



Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento: Metalurgia-Química

Trabajo de Diploma

DIAGNÓSTICO DE LA EFICIENCIA TECNOLÓGICA DEL
TRABAJO DE LAS MINISERIES DE LA PRIMERA ETAPA DE
LIXIVIACIÓN DE LA EMPRESA NIQUELÍFERA “Comandante.
Ernesto Che Guevara”

Autor: Andi Wilfredo Palacio Galguera

**Moa, 2015
“Año 57 de la Revolución”**



Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad de Metalurgia Y Electromecánica
Departamento: Metalurgia-Química

Trabajo de Diploma

DIAGNÓSTICO DE LA EFICIENCIA TECNOLÓGICA DEL
TRABAJO DE LAS MINISERIES DE LA PRIMERA ETAPA DE
LIXIVIACIÓN DE LA EMPRESA NIQUELÍFERA "Comandante.
Ernesto Che Guevara"

Autor: Andi Wilfredo Palacio Galguera

Tutor: Dr. C, Profesor Titular: Antonio Ramón Chang Carbona

Moa, 2015
"Año 57 de la Revolución"

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Andi Wilfredo Palacio Galguera**, autor de este trabajo de diploma, que tiene como tema **Diagnóstico de la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniseries de la primera etapa de lixiviación de la empresa niquelífera "Comandante. Ernesto Che Guevara"** y tutor, **Profesor Titular, Dr. C, Antonio Ramón Chang Carbona**, declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando se estime conveniente.

Andi W. Palacio Galguera

Dr.C Antonio R. Chang Cardona

DEDICATORIA

- ❖ **Este trabajo va dedicado a mi mamá Silvia Isabel Galguera Galguera que es mi ser más querido y es lo que me inspira a alcanzar esta meta.**
- ❖ **A mi papá, Wilfredo Palacio Álvarez, a mi hermano Yordanky Palacio Galguera, a mi tía Cira Palacio Álvarez y demás familiares que me dieron su apoyo para que yo pudiera alcanzar mi meta y formarme como un profesional.**
- ❖ **A mis otros padres, Ermis Urrutia y Petronila Pérez por siempre darme ánimo y apoyarme en todo lo que necesité en todos estos años.**
- ❖ **A mi novia, Yaíma Cardoza Núñez por su apoyo y comprensión**
- ❖ **A todos los que de una forma u otra me apoyaron cuando me hizo falta y a los que creyeron en mí.**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de forma sincera la colaboración de todos aquellos que han contribuido a la realización de este trabajo, en especial:

- ❖ A Dios por darme sabiduría y permitir que salga adelante cada día.**
- ❖ A mi familia por haberme dado la fuerza y la confianza suficiente para formarme como un buen profesional, principalmente a mis padres biológicos y adoptivos, a mi hermano y abuelos, a mis tía y tío, y a todos mis primos.**
- ❖ A mi tutor, Antonio R. Chang Cardona por su ayuda incondicional, dedicación y por todo lo que dio de sí mismo para que yo lograra alcanzar mi objetivo.**
- ❖ A mis amigos, Yudilainis Urrutia Pérez y Alberto R. Verdecia González. por brindarme su amistad durante estos cinco años de estudio.**
- ❖ A todos los profesores del departamento, en especial a: Amaurys Palacios, Evangelia García, Yaritza Ramírez, Roger Samuel Almenares y Yosbel Guerra.**
- ❖ A mis compañeros de aula.**
- ❖ A todas mis amistades.**

"Educar es depositar en cada hombre toda la obra humana que le ha antecedido: es hacer a cada hombre resumen del mundo viviente, hasta el día en que vive: es ponerlo al nivel de su tiempo, para que flote sobre él, y no dejarlo fuera de su tiempo, con lo que no podría salir a flote: es preparar al hombre para la vida"

José Martí

Resumen

En el presente trabajo se diagnosticó la eficiencia tecnológica de las miniserias de la primera etapa de lixiviación de la empresa productora de Ni y Co "Comandante Ernesto Che Guevara" a través del empleo de un nuevo procedimiento experimental a escala de Unidades de Producción, el cual permitió detectar a tiempo las obstrucciones en el sistema, así como la distribución desigual de pulpa con el propósito de operar los parámetros de aireación de forma óptima y gestionarla con prontitud para evitar los desbalances prolongados de Lixiviado de Ni y Co en la Serie. Mediante este procedimiento se obtuvo un sistema de valores críticos de densidades que permiten predecir dichas obstrucciones en la tubería de alimentación a la Serie y de cada miniserie en relación con las densidades promedio de la sección de Tanques de Contacto, además se demostró que el desbalance sustancial de los lixiviados de Ni y Co constituye (6 - 8) % Ni y (2 - 4) % Co a favor de la miniserie M-1B. También se elaboró una nueva herramienta que permite incorporar la velocidad específica del aire - Q_a , en $m^3/(t_{MR} \cdot min)$ - como un nuevo parámetro de operación para disminuir la velocidad de cristalización de los óxidos e hidróxidos de hierro, sobre la base del volumen específico de aire- V_a , en m^3/t_{MR} ; los cuales definirán los flujos volumétricos de aire en cada turbo-aireador con la finalidad económica de incrementar los lixiviados de Ni y Co en la IraEL en 355,1 t/año y un aporte anual para una serie de 1 124 516 USD.

Palabras claves: lixiviación carbonato-amoniaca, eficiencia tecnológica de reactores en miniserias, distribución de pulpa, distribución de aire por miniserie y turbo-aireador, tiempo de residencia.

Abstract

In the presently work was diagnosed the technological efficiency of the miniseries of the first stage of leaching of the producer of nickel and cobalt company "Comandante Ernesto Che Guevara" through the use of a new experimental procedure to scale of Units of Production, which allowed to detect the obstructions of time in the system, as well as the unequal distribution of pulp with the purpose of to operate the parameters of aerate in a optimum and administer with readiness to avoid the prolonged desbalances of leached of Ni and Co in the Series. By means of this procedure a system of critical values of densities was obtained that allow to predict this obstructions in the feeding pipe to the Series and of each miniserie in connection with the densities average of the section of Tanks of Contact, it also demonstrated that the substantial desbalance of those leached of Ni and Co constitutes (6 - 8) % Ni and (2 - 4) % Co in favor of the miniserie M-B1. . A new tool was also elaborated that allows to incorporate the specific speed of the air - Q_a , in $m^3/(t_{MR}min)$ - as a new operation parameter to diminish the speed of crystallization of the oxides and iron hidróxidos, on the base of the specific volume of air - V_a , in m^3/t_{MR} -; which will define the volumetric flows of air in each turboaereator with the economic purpose of increasing those leached of Ni and Co in the 1raEL in 355,1 t/year and an annual contribution for a series of 1 124 516 USD.

Key words: leaching carbonate-amoniacal, technological efficiency of reactors in miniseries, pulp distribution, distribution of air for miniserie and turboaereator, time of residence.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	8
1.1 Fundamentos teóricos.....	8
1.1.1 Influencia de la concentración de NH ₃ y CO ₂ , así como su relación.	10
1.1.2 Efecto de la temperatura.....	12
1.1.3 Influencia del flujo específico de aire - m ³ /t _{MR} - y la velocidad específica - [m ³ /(t _{MR} ·min)]......	14
1.1.4 Influencia de la calidad del MR.....	16
1.1.5 Cinética de la lixiviación.....	18
1.2 Aspectos tecnológicos.....	21
1.2.1 Distribución desigual de los flujos volumétricos de pulpa.	22
Conclusiones parciales.....	23
MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.1 Hipótesis experimental para determinar la diferencia de densidades de la pulpa.....	24
2.1.1 Procedimiento para determinar la densidad de la pulpa.....	25
2.1.2 Procedimiento para determinar la densidad del licor.....	30
2.2 Hipótesis experimental para determinar los lixiviados de Ni y Co en las miniserías.....	32
2.2.1 Pruebas de comparación de lixiviados de Ni y Co y sus incrementos en las miniserías.....	32
2.3 Hipótesis experimental para determinar el tiempo de residencia.....	39
Conclusiones parciales.....	39
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
3.1 Análisis de los resultados de las densidades.....	41
3.2 Herramienta para determinar los Lixiviados de Ni – Co y sus incrementos.....	47
3.2.1 Cálculo para determinar los lixiviado de Ni y Co (30 de abril).	47
3.2.2 Cálculo de los incrementos de los lixiviados de Ni y Co.	48
3.2.3 Análisis de los resultados de los lixiviados de Ni-Co y sus incrementos.....	48

3.3 Elaboración de una herramienta operacional para determinar el flujo volumétrico de aire para cada TA.	50
3.3.1 Determinación de la distribución de los flujos de MR, licor y pulpa.	50
3.3.2 Determinación del TR de las miniserie.	61
3.3.3 Determinación de la velocidad específica de aire (Q_a), $m^3/(t \cdot min)$	62
3.3.4 Determinación del volumen de aire específico ($V_{a \text{ esp.}}$), m^3/t_{MR} para cada TA.	63
3.4 Cálculos económicos.	65
3.4.1 Cálculo de las TM de Ni + Co.	65
3.4.2 Cálculo del aporte potencial en USD/año.	67
Conclusiones parciales.	67
CONCLUSIONES GENERALES	69
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS.....	74

INTRODUCCIÓN

La Empresa Cmdte “Ernesto Che Guevara” (ECG), más conocida como Punta Gorda, se encuentra ubicada en el municipio Moa, al noreste de la provincia de Holguín - Cuba. Esta fue puesta en funcionamiento en el año 1987, la cual constituyó la última Planta químico-metalúrgica con tecnología carbonato – amoniacal instalada en el mundo (ver tabla 1).

El esquema tecnológico de la Empresa (ECG) se muestra en el Anexo 1. Los productos finales son: polvo de NiO, sulfuro de níquel más cobalto, y la mayor producción es la de Sínter de níquel.

Tabla 1. Plantas industriales con tecnología “CARON” (Pelegrín, 2013-2014)

Plantas Industriales	País	Año de fundación
Queensland Nickel (QNi)	Australia	1974
Tocantins-Niquelandia	Brasil	1980
Punta Gorda (ECG)	Cuba	1987

De las tres industrias antes mencionadas se puede observar en la tabla 2 que la más eficiente es la de Queensland Nickel en Yabulu (Australia) por ser la que mayor % de extracciones de Ni y Co posee, también se puede agregar que en esta industria y en la brasileña de Sao Miguel Paolista (Tocantins) se utiliza la extracción por solventes para separar el Ni del Co (Pelegrín, 2013-2014).

Tabla 2. Grado de extracción y recuperación de Ni y Co en las Plantas comerciales con TCA, (Chang, 2009).

PLANTAS	Punta. Gorda	YABULU		Niquelandia Tocantins 1999
		1982 (GRV)	1998 (QNI)	
Extractables, Ni (%) Co	80-82	82	82-84	75
	56-60	65	55-60	45
Extracciones, Ni (%) Co	78-79	81-82	80-82	73
	35-38	59-60	40-44	33
Recuperación, Ni (%) Co	73 - 75	70-72	81	< 73
	30 - 35	40-45	40	< 33

El esquema tecnológico de la Planta de lixiviación de la ECG se muestra en el Anexo 2.

El proceso de lixiviación comienza cuando el mineral reducido en los enfriadores de los Hornos Herreshoff es descargado a la canal de los tanques de contacto a una temperatura menor de 250 °C, dónde se añade el licor procedente de los enfriadores de placa con una temperatura de (25 a 33) °C, formándose una pulpa con una relación líquido-sólido de alrededor de 6/1 en los tanques de contacto (TC) con agitación mecánica. Los valores de las densidades de la pulpa en esta área se regula entre (1130 a 1140) g/l a través de la metodología de determinación de densidad expuesta por (Alepuz et al, 2013). Del área de contacto, la pulpa es transporta por bombas centrífugas

hacia el distribuidor elevado de pulpa (DI-100) que es el encargado de distribuir dicha pulpa hacia el área de lixiviación.

El área de Lixiviación, la cual cuenta con 4 series de turboaeradores (TA) en I etapa, una serie en II etapa y otra en III etapa, cuyos TA funcionan como parte de la II etapa. Cada serie tiene una caja distribuidora que ramifica el flujo de pulpa, suministrado por el DI-100, hacia dos miniserias que se encuentran situadas en cascada de 4 TA y en algunos casos por 3TA. En las tuberías de alimentación de dichas miniserie se manifiestan tendencias de distribución desigual del flujo de pulpa, el cual es causado por las obstrucciones excesivas de costras de mineral reducido (MR) o por precipitación de las sales dobles de magnesio que tradicionalmente se depositan y adhieren a las paredes, provocando resistencia hidráulica y la desigualdad de flujos volumétricos de pulpa (Q_{pulpa}) entre las miniserie de TA.

La lixiviación industrial que se desarrolla en las Plantas de QNi y Tocantins se efectúa en varias series de cuatro TA en línea en una sola etapa de lixiviación. Por tanto estas plantas no presentan tal deficiencia en su flujo tecnológico.

Esta modificación del flujo tecnológico en el área de lixiviación de la empresa (ECG) surge en los años 90 por un incremento de la productividad, debido a esto, los electroimanes instalados al final de cada serie de (TA), mostraron que no cumplían totalmente con la función de aumentar el tamaño de los flóculos de mineral, con vista a obtener una velocidad de sedimentación de (1 a 1,5) m/h, puesto que el flujo de pulpa (Q_{pulpa}) alimentado sobrepasaba la capacidad de trabajo o de rendimiento del electro-imán. Por esta razón, los tecnólogos decidieron dividir las series de (TA) en dos miniserias que descargan la pulpa hacia dos electroimanes independientes, y posteriormente ambos Q_{pulpa} se unen en la tubería de alimentación de los sedimentadores (Cintra, 2010).

Para que ocurra la lixiviación en los TA se hace necesaria la presencia de oxígeno. El oxígeno oxida al metal y, ese una vez oxidado, forma el complejo carbonato-amoniacal. De esta manera el oxígeno se reduce y forma el agua (reacción 6). (Chang et al, 2009)

Es de gran importancia suministrar el oxígeno rápidamente ya que la capacidad del licor para absorber oxígeno controla grandemente la velocidad con que el Ni y el Co reducido (metálico) se disuelve bajo fuerte agitación. Tal requerimiento es importante sobre todo en la primera etapa de lixiviación.

En la industrial la norma de aire en $\text{m}^3/\text{t}_{\text{MR}}$ en la 1ra Etapa de Lixiviación y en la 2da es la siguiente:

Tabla 3. Flujos de aire específicos en los turbo-aireadores. Fuente (Chang et al, 2009a)

Nº de TA	$V_a(\text{m}^3/\text{t}_{\text{MR}})$	$Q_a(\text{m}^3/\text{t} \cdot \text{min})$
Primera etapa de lixiviación		
1	34,3	1,77
2	33,9	1,75
3	33,6	1,73
4	33,2	1,71
Total	135	1,74
Segunda etapa de lixiviación		
	50	-
Total	158	-

Las elevadas velocidades específicas de aireación (por encima de $1,8 \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$) en los primeros turboaereadores como se muestra en la tabla 3 es la principal causa de una buena parte de las pérdidas de Ni y en mayor medida de Co con los coprecipitados de hierro. (Chang et al, 2009 a)

Para alcanzar una elevada productividad por Ni y Co en la 1ra etapa, bajo el supuesto que todas las miniserias cuenten con la misma cantidad de TA, se necesita de que todas las miniserias garanticen el procesamiento de flujos de pulpa muy cercanas entre sí y obtener elevados Lixiviados de Ni y Co (Lix. Ni-Co) como resultado de una correcta distribución de pulpa y un correcto cálculo de los flujos de aire, los cuales permiten aprovechar la capacidad del equipamiento instalado. En la práctica, el mayor riesgo productivo lo constituye la no detección a tiempo del desbalance de los Lixiviados de Ni (Lix. Ni) y Co (Lix. Co) 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 1raEL 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 miniseries en el menor tiempo posible, y así evitar un desbalance prolongado de los Lix. Ni y Lix. Co que afectaría sus producciones. (Chang et al. 2015 a)

CATEGORÍAS CIENTÍFICO-METODOLÓGICAS DE LA INVESTIGACIÓN

Objeto de estudio

El Proceso de Lixiviación de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, en las áreas de: tanques de contacto, distribuidor DI-100 y primera etapa de lixiviación.

Campo de acción

La distribución de pulpa en las áreas de: tanques de contacto, distribuidor DI-100 y primera etapa de lixiviación.

Situación problemática

Las pérdidas económicas de Ni y Co provocadas por el desbalance prolongado de los Lix. Ni y Lix. Co debido a las obstrucciones excesivas en las tuberías de alimentación de pulpa a las miniseries y en el sistema: tanques de contacto, distribuidor cien y primera etapa de lixiviación, que traen como consecuencia una distribución desigual del flujo de pulpa (Q_{pulpa}) alimentado a las series de 1raEL, que a su vez inducen un erróneo cálculo del flujo de aire que se suministra a los TA.

Problema de la investigación

La ausencia de un procedimiento, mediante el cual se pueda detectar a tiempo las obstrucciones excesivas en el sistema: tanques de contacto, distribuidor DI-100 y primera etapa de lixiviación, y que permita realizar un diagnóstico eficaz del trabajo de las miniseries para operar con certeza el flujo de aire en éstas.

Objetivo general

Demostrar experimentalmente un procedimiento seguro, mediante el cual se pueda realizar un diagnóstico eficaz del trabajo de las miniseries de 1raEL que permita detectar a tiempo las obstrucciones en el sistema que conllevan a una distribución desigual de pulpa, y operar los parámetros de aireación de forma adecuada para evitar un desbalance prolongado de los Lix. Ni-Co que afectaría la producción de Ni y Co.

Objetivos específicos

- Crear un nuevo método para determinar la densidad promedio en la sección tanques de contacto, como referencia a las densidades de las miniseries de TA en la primera etapa de lixiviación, con el propósito de pronosticar posibles obstrucciones en la Unidad Demostrativa de Producción (UDP).
- Efectuar las pruebas de los lixiviados de níquel y cobalto en las dos miniserie de la serie B de primera etapa de lixiviación para compararlos, cuando los valores de densidades de la pulpa alimentada lo aconsejen para conocer la magnitud de sus diferencias.
- Realizarlas pruebas de tiempo de retención (TR) mediante el empleo del carbonato de sodio como sustancia trazadora en el licor, con el propósito de cuantificar el flujo de pulpa alimentado a cada miniserie, y por éste ajustar los flujos de aire a los TA.
- Fundamentar el método de diagnóstico para evaluar la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniseries de primera etapa de lixiviación para optimizar los parámetros de aeración con el objetivo de incrementar las extracciones de níquel y cobalto.

Hipótesis del trabajo

Si se emplea un procedimiento para el diagnóstico tecnológico del trabajo de las miniseries, expresado en los objetivos, se podrá detectar a tiempo las posibles obstrucciones en 1raEL con el propósito de ajustar los flujos de aire en los TA de cada miniserie para evitar los desbalances prolongados de los Lixiviados de Ni y Co.

Los aportes esperados en esta investigación son:

Científico - Técnico. Aplicación de un nuevo procedimiento para diagnosticar el trabajo de las miniserie en la 1raEL con vista a optimizar los parámetros de aeración a los TA.

Económico. Incremento de los Lixiviados de níquel y cobalto que permitirá el aumento de la producción de estos metales en la empresa ECG que contribuirá a los ingresos económicos del país.

CAPÍTULO 1

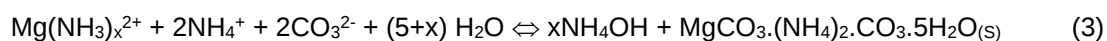
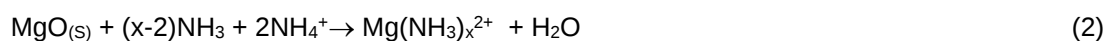
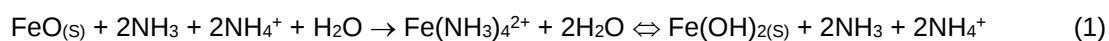
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

El objetivo principal de este capítulo es realizar una fundamentación sobre los aspectos teóricos-tecnológicos del proceso de lixiviación carbonato amoniacal a partir de resultados obtenidos en otras investigaciones con el propósito de demostrar los problemas científicos experimentales que serán resueltos en el presente trabajo.

1.1 Fundamentos teóricos.

Las reacciones químicas del proceso de lixiviación fueron demostradas durante los años 1970 – 1989 en San Petersburgo por el equipo de trabajo dirigido por Dobrojtov, G.N, y posteriormente, por su cercano colaborador Chang-Cardona, A. R.; las cuales se sintetizan en el artículo (Chang & Vargas, 2009) como se expone a continuación:

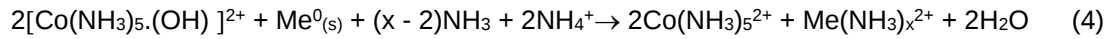
Estas comienzan a efectuarse en las tuberías del tramo tanques de contacto - distribuidor de pulpa - tuberías hasta la entrada a cada serie de turbos producto de la energía mecánica que es suministrada a la pulpa durante su transportación, y a la acción química de los componentes del licor lixiviante: NH_3 , CO_2 , iones del Ni^{2+} , Co^{3+} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ que determinan la solubilidad y oxidación de los metales y sus óxidos por las interacciones físico-químicas siguientes:



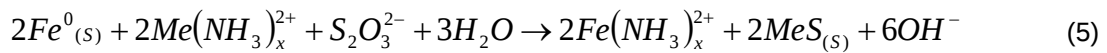
Cuando la solubilidad del Mg es favorecida, dicha sal doble de Mg se precipita en las tuberías del sistema, en las paredes o placas de los enfriadores de licor

y en las paletas de los agitadores, disminuyendo el tiempo de campaña de los mismos, y por tanto- la productividad de la planta.

El Co (III) presente en el licor de recirculación puede oxidar a los metales y ferroaleaciones:

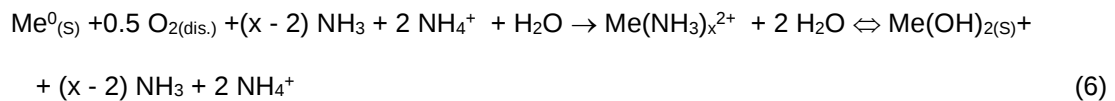


La cual compite con la reacción de oxidación – reducción (redox):



Para tener una idea del grado de lixiviación del Ni y el Co en este tramo, la práctica ha demostrado que se puede extraer hasta un 40 % de Ni y un 12 % de Co, o sea, casi la mitad de todo el Ni que se lixivia respecto a la mena alimentada a hornos de reducción.

Las reacciones (1-5) continúan con mayor intensidad en los TA, junto a la oxidación masiva de los metales y sus iones por las reacciones principales:

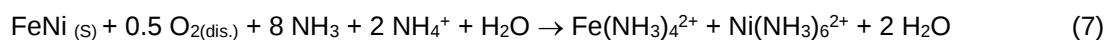


donde:

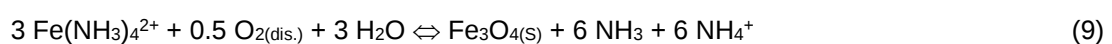
x para Fe y Cu es 2, 3 y 4 y para Ni y Co es 2, 3, 4, 5 y 6.

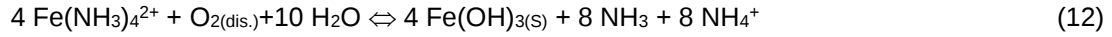
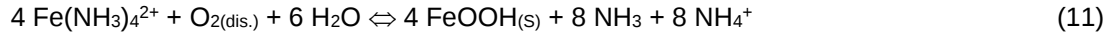
$\text{O}_{2(\text{dis.})}$ – Oxígeno disuelto.

Análogamente, para las aleaciones de FeNi, FeCo o FeNiCo:



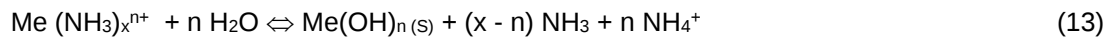
De todo lo anterior se deduce, que la lixiviación del Ni, el Co y sus ferroaleaciones transcurre en competencia con varias reacciones que la frenan, cuya resultante determinará las extracciones de Ni y Co. A esto, hay que sumarle el alto contenido de Fe soluble en la MR y la elevada inestabilidad de sus iones complejos en el licor lixiviante, que constituyen un alto riesgo para sus extracciones finales, ya que paralelamente ocurren otros procesos como la oxidación e hidrólisis de los iones de hierro por las reacciones secundarias siguientes:





1.1.1 Influencia de la concentración de NH_3 y CO_2 , así como su relación.

Las reacciones (1, 3, 6) están escritas en forma de *pérdidas de metales por hidrólisis*, las cuales compiten con su permanencia en el licor, basado en su solubilidad o estabilidad de los complejos amoniacaes de cada ión-metal. Por esta forma de escritura, se puede comprender mejor las variables que influyen sobre la solubilidad (extracción) de los metales y sus compuestos, a partir del análisis del equilibrio de la segunda parte de la reacción (6), expresada para iones de cualquier valencia por la ecuación (Grigorieva, 1987 y Chang, 1988):



$$\left[\text{Me}(\text{NH}_3)_x^{n+} \right] = \frac{L * K_x}{K_b^n} * [\text{NH}_4\text{OH}]^{x-n} * [\text{NH}_4^+]^n \quad (14)$$

donde:

$$K_b = \frac{[\text{NH}_4^+] * [\text{OH}^-]}{[\text{NH}_4\text{OH}]} - \text{constante de equilibrio de la disociación básica del}$$

hidróxido de amonio $\text{NH}_4\text{OH} \Leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$;

$$L = [\text{Me}^{n+}] * [\text{OH}^-]^n - \text{producto de solubilidad de los iones del hidróxido,}$$

$$K_x = \frac{[\text{Me}(\text{NH}_3)_x^{n+}]}{[\text{Me}^{n+}] * [\text{NH}_3]^x} - \text{constante de estabilidad general de los complejos}$$

amoniacaes.

Por consiguiente, al aumentar la concentración total de amoníaco para una temperatura y relación de concentraciones (NH_3/CO_2) constantes deben crecer las extracciones (solubilidades) de Ni y Co.

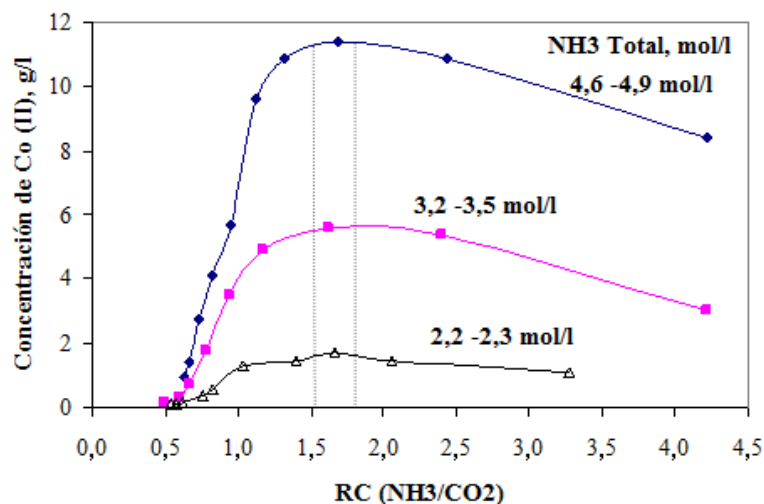


Figura 1. Solubilidad del Co (II) en mezclas de carbonato-amoniacaes a temperatura ambiente. Fuente (Chang et al, 2009).

En las mencionadas publicaciones se demuestra que al disminuir la concentración de NH_3 total de 5 a 4 mol/L, la solubilidad del Cobalto decrece en 2 veces como se muestra en la figura 1, mientras que el Níquel lo hace en 1,4 veces (Grigorieva, 1987; Chang, 1988).

Esta regularidad fue confirmada con minerales reducidos a escalas de banco y planta piloto por numerosos autores (Cónsul, et al. 1967, 1968; Castellano, 1978, 1997; Colvin, 1979; Reid, 1982; Chang, 1988 y 1989).

Todas las mencionadas investigaciones confirmaron que la composición óptima del licor para la lixiviación corresponde a una concentración de amoníaco total (85 y 90 g/l) y una relación respecto al CO_2 entre 1,5 y 1,7.

Por tales razones, en los primeros 30 años de funcionamiento de la Planta de Nicaro con concentraciones de NH_3 alrededor de 4 mol/L (68 g/l) y posteriormente en Punta Gorda se obtuvieron menores valores de sus extracciones (ver tabla 4).

La utilidad de este conocimiento y confirmación industrial indica la necesidad de comparar los resultados de los lixiviados de Ni y Co para concentraciones de NH_3 y CO_2 en rangos muy estrechos, lo cual se reflejará en el diseño de los experimentos del presente trabajo.

1.1.2 Efecto de la temperatura.

El incremento de la temperatura de lixiviación hasta 50°C desplaza la relación óptima de NH_3 y CO_2 hacia la región más ácida: 1.2 – 1.4 (Chang, 1984), disminuyendo la solubilidad de los amoniacatos de níquel y cobalto (II) produciendo un apreciable decrecimiento de los contenidos de Ni y en gran medida el Co en los lixiviados (Ver figura 2). Al mismo tiempo estos licores favorecen la solubilidad del hierro (Chang, 1988), aumentando el riesgo de pérdidas de Cobalto con los óxidos e hidróxidos de hierro (**OHH**) durante la aireación.

Este problema es una realidad industrial reconocida por todos los productores, por lo cual el enfriamiento constituye una de las principales vías más económicas para elevar la extracción de Co. Según la práctica industrial de YABULU-QNI, por cada °C de decrecimiento de la temperatura en lixiviación, se recupera 1 % de Co. (Chang et al, 2009)

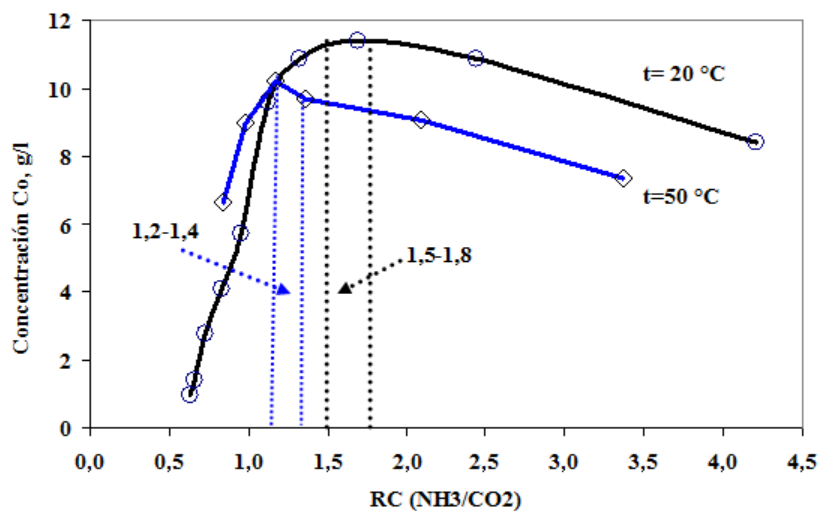


Figura 2. Influencia de la temperatura sobre la solubilidad del Co (II) en licores carbonato-amoniacaes puros con 4,6-4,9 mol/l de NH_3 total. Fuente (Chang et al, 2009a)

La utilidad de este conocimiento y su confirmación industrial indica la necesidad de comparar los resultados de los lixiviados de Ni y Co para temperaturas de la pulpa en TC que se encuentren en un estrecho rango (36

-38) °C, lo cual se tendrá en cuenta en el diseño de los experimentos del presente trabajo.

Para confirmar el análisis realizado en los acápites 1.1.1 y 1.1.2, a continuación se muestra una comparación entre las Plantas industriales con la tecnología de lixiviación carbonato-amoniaco en el mundo:

Tabla 4. Parámetros operacionales de la primera etapa de lixiviación en las plantas industriales y las extracciones de Ni y Co, respecto a sus extractables en hornos.

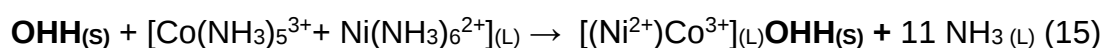
PLANTAS	Punta. Gorda	YABULU		Niquelandia, Tocantins 1999
		1982 (GRV)	1998 (QNI)	
NH ₃ , g/dm ³	60-68	85	90	82-85
CO ₂ , g/dm ³	30-35	55	70	60-65
RC (NH ₃ / CO ₂)	1,9-2,0	1,5	1,3	1,3-1,4
Temperatura, °C	42-48	41-48	50-52	45-52
Extractables, Ni (%) Co	80-82	82	82-84	75
	56-60	65	55-60	45
Extracciones, Ni (%) Co	78-79	81-82	80-82	73
	35-38	59-60	40-44	33
Observaciones		1985, inicia agotamiento mina GRV en 1993	1986, mezcla menas- New Caledonia e Indonesia	

Como se observa en la tabla, con excepción de las dos plantas cubanas, todas incrementaron las concentraciones de NH_3 total y optimizaron la relación de concentraciones totales (en g/dm^3) de NH_3 y CO_2 – RC (NH_3/CO_2), aunque esta última varió ampliamente entre 1,3 y 1,9 debido a los rangos de temperatura.

1.1.3 Influencia del flujo específico de aire - $\text{m}^3/\text{t}_{\text{MR}}$ - y la velocidad específica - $[\text{m}^3/(\text{t}_{\text{MR}} \cdot \text{min})]$.

En el proceso de lixiviación un mal manejo de los Q_a que son suministrados hacia cada miniserie de TA puede traer como consecuencia una disminución apreciable de los lixiviados de Co, y en menor medida, de Ni por las *pérdidas por coprecipitación segregante con los (OHH)* por las reacciones (9 -12). Estas transcurren paralelamente a las de hidrólisis. Por cuanto, el mineral reducido contiene la mayor masa de Fe soluble que por la elevada inestabilidad de sus amoniacatos se hidrolizan y oxidan fácilmente, esto hace posible que el Ni y el Co se puedan perder en grandes cantidades debido a las formaciones de OHH durante la lixiviación, en la que es mayoría la goethita (Chang y Boskovski, 1995)- reacción (11).

Las pérdidas por coprecipitación segregante se fundamentan en la teoría de cristalización de un sólido a partir de un licor que contiene sus iones (Zelikman, 1983). Por tanto, al aumentar la velocidad de cristalización, provocada por la velocidad específica del flujo de aire Q_a , en $\text{m}^3/(\text{t}_{\text{MR}} \cdot \text{min})$, se obtendrán cristales más finos y amorfos que adsorberán en su superficie a los iones de metales, y los que posean menor radio iónico más profundo penetrarán en las cavidades del OHH formado, de dónde será difícil de extraer, lo cual puede apreciarse en la figura 3, aunque parte de estas, pueden ser recuperadas (Chang, 1989, 2000) durante la lixiviación y el lavado, sobre todo, las de Ni, por eso, el Ni^{2+} está entre paréntesis en el esquema siguiente:



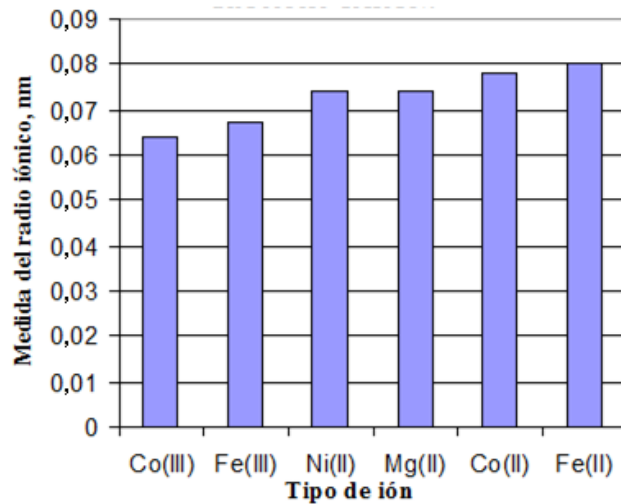


Figura 3. Radio iónico de los iones de interés para la lixiviación del proceso CARON. Fuente (Chang, 1989)

Varios autores. (Queneau, et al. 1986; Chang, et al. 1989, 1998, 2000) han demostrado que es posible disminuir dichas pérdidas al optimizar Q_a y V_a (m^3/t_{MR}), lo cual se manifiesta en la constante de velocidad de oxidación del hierro (K) como se muestra en la figura 4. En esta se observa que las extracciones de Co (E_{Co}) disminuyen con el aumento de la velocidad específica de aireación Q_a , $m^3/(t \cdot min)$.

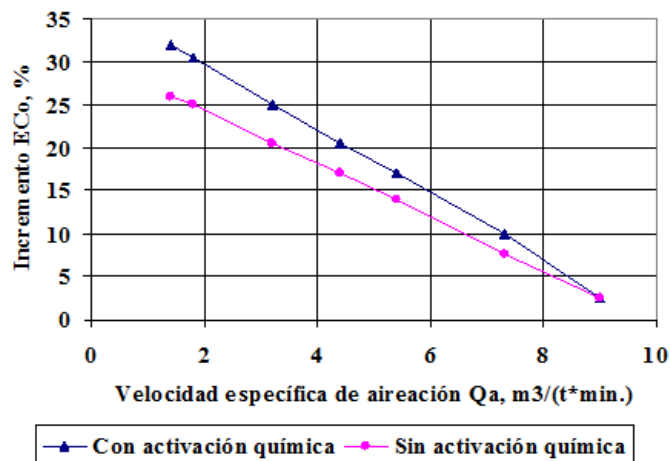


Figura 4. Influencia de la velocidad de aireación sobre la extracción relativa de Co. Fuente (Chang et al, 1989)

Por otra parte, mientras mayor sean las velocidades de aireación mayor será la probabilidad de que ocurran crisis de sedimentación en los sedimentadores de primera etapa de lixiviación, lo que obliga a usar más floculante para

clarificar el reboso de licor producto, y evitar el riesgo de hacer inoperable la tecnología.

Para poder introducir en la práctica industrial el parámetro de aireación Q_a se necesita contar con un modelo matemático obtenido a escala de UDP para predecir el TR en función del Q_{pulpa} , el cual se publicó recientemente en el artículo (Chang et al, 2015 b). El vacío de este conocimiento ha provocado que no exista una herramienta para operar el aire con vista a regular la velocidad de cristalización de los OHH en los dos primeros TA.

La utilidad de este conocimiento y su confirmación industrial permitirá explicar las posibles causas de las diferencias de los Lix. Ni y Co entre las miniserías estudiadas, así como, indica la necesidad de controlar los flujos de aire en los TA, el tonelaje de MR a los TC y su distribución por Serie, además del TR en cada miniserie con el propósito de determinar los parámetros de aireación (V_a , Q_a y Q_v) de dichas miniserías, lo cual se tendrá en cuenta en el diseño de los experimentos del presente trabajo.

1.1.4 Influencia de la calidad del MR.

La calidad de mena reducida (MR) se valora por su contenido de Fe (II), el cual indica la medida del grado de reducción. La práctica industrial de Nicaro y las investigaciones realizadas con MR a escala de banco y Planta Piloto han demostrado que mientras mayor sean los contenidos totales de Fe_T y Ni_T en el mineral alimentado (MA), mayores serán los extractables y lixiviados de Ni, lo que hizo incluir el Número de mineral (NoMin) como parámetro de control de la calidad del MA a la Planta de Hornos de reducción (PHR). No obstante, pocos trabajos han establecido esta correlación respecto a los contenidos de Fe (II) y Ni^0 en MR (Chang y Rojas, 2009 a). La importancia de esta última consiste en la necesidad de explicar el tope de los extractables mediante las pérdidas con los OHH para poder establecer los valores óptimos de Q_a para cada calidad de MR. Bajo este concepto se supone que mientras mayor sea el contenido de Fe^{2+} en MR mayor será su masa disuelta en el licor y por consiguiente, mayor será el riesgo de pérdidas de Co y Ni por coprecipitación segregante con los OHH.

$$NoMin = \frac{Fe \cdot Ni}{SiO_2 \cdot MgO} \quad (1.1)$$

donde:

NoMin, es el Número de mineral, el cual se calcula por los contenidos en % de los metales y compuestos de la tabla 7.

Una investigación detallada sobre este tema fue desarrollada en la Tesis de maestría de (Rojas, 2007) demostró que para cada calidad de MR existe un flujo de aire óptimo que permitirá maximizar las extracciones de Ni y Co, como se muestra en las figuras siguientes.

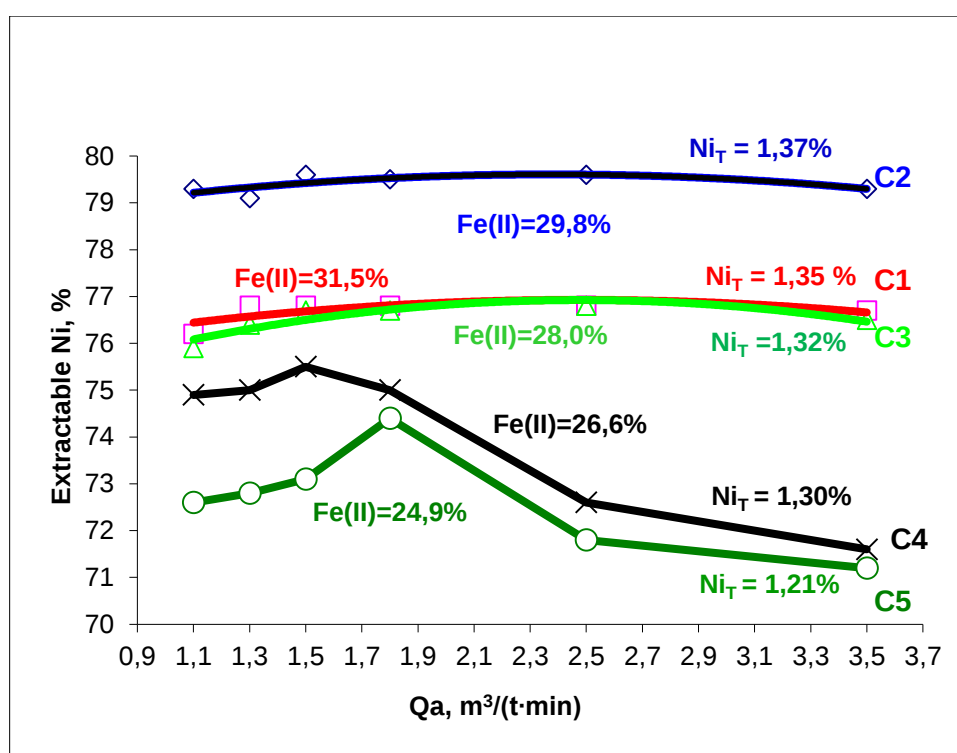


Figura 5. Efecto de la variación de Q_a y el % de Fe (II) en MR sobre el Extractable de Ni. Fuente (Chang et al, 2009a)

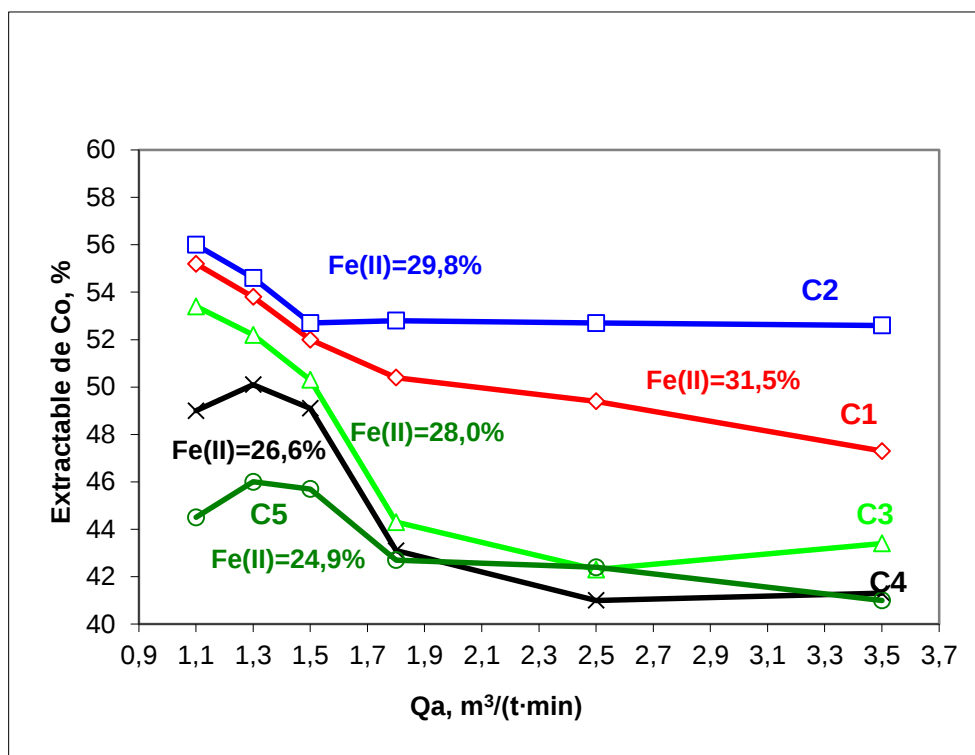


Figura 6. Efecto de la variación de Q_a y el % de Fe (II) en MR sobre el Extractable de Co. Fuente (Chang et al, 2009a)

La utilidad de este conocimiento y su confirmación industrial nos permitirá adicionar el control del NoMin, además de los flujos de aire y del TR mencionados en el acápite anterior, lo cual se tendrá en cuenta en el diseño de los experimentos del presente trabajo para evitar realizar pruebas en la UDP con valores muy distantes entre sí del NoMin, ya que darían resultados de lixiviados a favor del mayor valor de éste.

1.1.5 Cinética de la lixiviación.

La cinética de las reacciones de lixiviación del Ni y el Co ha sido estudiada por numerosos autores, pero los resultados más significativos que se corresponden en mayor medida con la práctica industrial son los publicados en los trabajos (Chang, 1989, 1990, 2009 b y Fiffe, 1985). Si la MR es constante y no se considera el efecto oxidante de los iones Co^{3+} y tiosulfato, se puede ilustrar la influencia de cada variable sobre la velocidad de disolución del Ni por el orden de la reacción (exponentes sobre las variables) en la ecuación cinética del régimen mixto o de transición, según Fiffe, 1985, en el

intervalo de temperatura 308-323 K (35-50 °C), pero escrita de la forma siguiente:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = 1,25 \cdot 10^4 * e^{-\left(\frac{8,49}{T}\right)} * [NH_3]^{1,06} * [CO_2]^{-0,38} * K_{O_2}^{1,21} * P_{O_2}^{1,21} * S_0^{1,03} * (1-\alpha)^{1,03} \quad (1.2)$$

dónde:

α –grado de disolución del Ni; K_{O_2} y P_{O_2} son el coeficiente de solubilidad y la presión parcial del oxígeno;

S_0 –área específica de las partículas de Ni;

T –temperatura de lixiviación;

τ - tiempo de lixiviación.

Como significativo en la expresión (1.2), se puede ver que la relación de concentraciones $RC (NH_3 / CO_2) = \frac{[NH_3]^{1,06}}{[CO_2]^{0,38}}$ tiene un gran peso sobre la

velocidad de disolución del Ni, considerando, que el exponente del CO_2 es mucho menor que uno, lo que revela un mecanismo de influencia complejo entre el sólido y los compuestos disueltos, además, cuantitativamente, hace crecer el valor absoluto de dicha división, cuando se calcule α por su ecuación integrada. El resto de las variables, caracterizan el régimen difusivo, al alcanzar un primer orden de reacción al igual que el NH_3 . Aunque la difusión transcurre con una elevada resistencia, lo cual ha sido confirmado al procesar los datos cinéticos de la lixiviación de MR de Nicaro a escala de banco (26 dm 3 de pulpa) por la ecuación de Jander (Chang et al, 1988, 1989; Chang, 1989), que modela la difusión tridimensional (esférica) de las partículas de Ni, caracterizando el régimen mixto:

$$1 - [1 - \alpha(\tau)]^{1/3} = K * \tau^2 \quad (1.3)$$

donde:

K es la constante de velocidad de disolución del Ni, Co, en l/h

$\alpha(\tau)$ es el grado de lixiviación del Ni durante el tiempo de aireación, en fracciones de unidades.

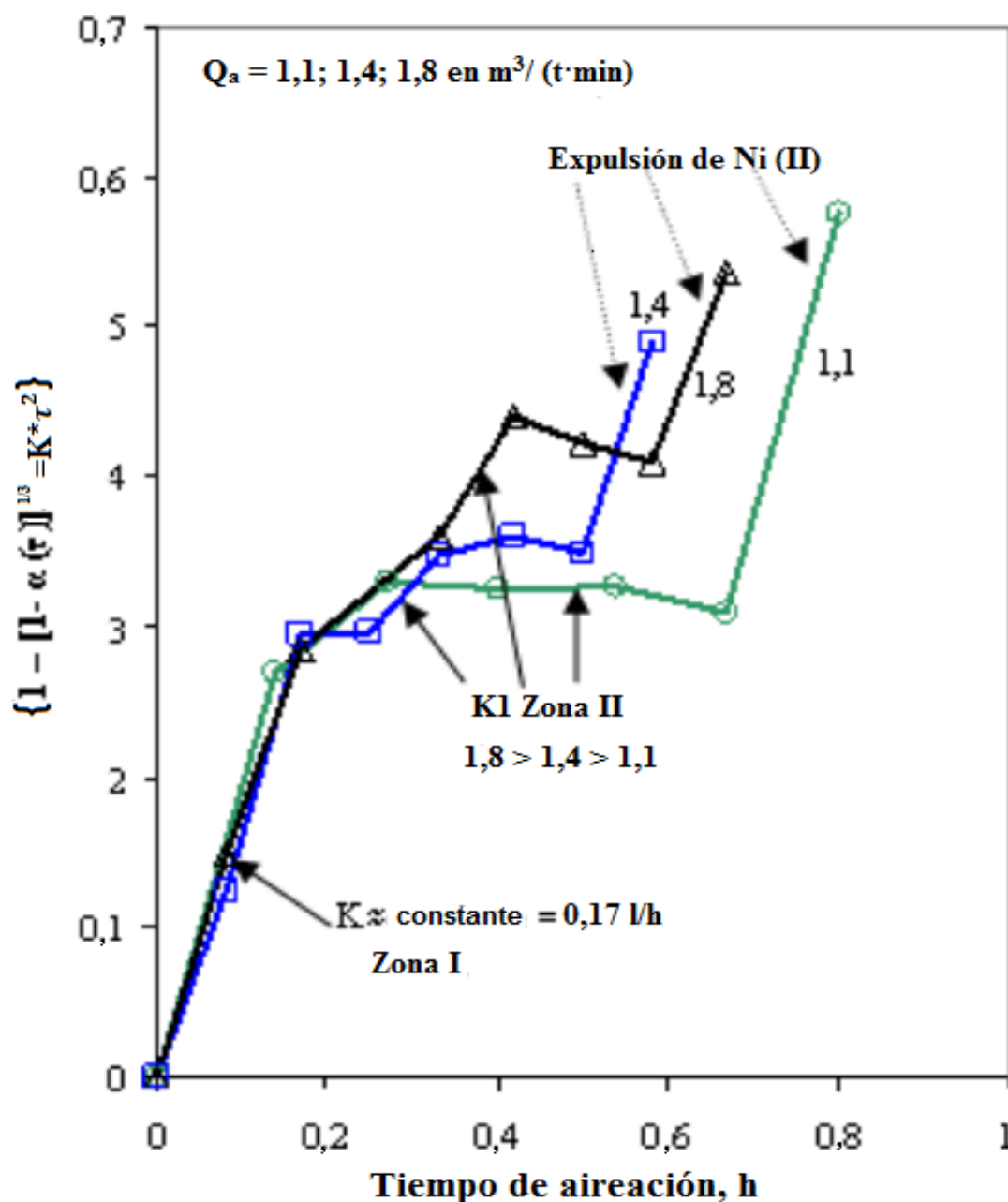


Figura 7. Cinética de la 1ra etapa de lixiviación del Ni por la ecuación de Jander para un mismo tipo de MR de Nicaro. Fuente (Chang et al, 1989)

Al graficar la ecuación (1.3) en los ejes de coordenadas, entonces se puede determinar K, a partir de las regularidades de la primera etapa de lixiviación del Ni que se muestran en la figura 7, la cual fue obtenida para un mismo tipo de MR y un licor lixiviante, que contiene NH_3 , 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 (Chang et al, 2009 a), 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} (Chang et al, 1989 y Chang 1990) mientras que al aumentar Q_a , en $m^3/(t \cdot min)$ 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, confirmándose 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_1 diferentes entre sí, las cuales crecen linealmente con el aumento de Q_a (Chang et al, 1989 y Chang et al, 1994). 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 analizadas en (Chang et al, 2009 a)

La utilidad de este conocimiento y su confirmación industrial nos permitirá diseñar una herramienta operacional para dirigir los parámetros de aireación según el deseo tecnológico en correspondencia con las regularidades cinéticas analizadas.

1.2 Aspectos tecnológicos.

Las lixiviación industrial del Proceso CARON que se desarrolla en las empresas niquelíferas Queensland Nickel y Tocantins-Niquelandia, tienen como peculiaridad que se efectúa en varias series de turbo-aireadores (TA), compuesta por cuatro (TA) en la primera etapa de lixiviación (1raEL), a diferencia de la lixiviación que se desarrolla actualmente en la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” (ECG), la cual tiene la particularidad de desarrollarse en tres series de turbo-aireadores (TA), cada uno de los cuales

está compuesto por dos miniserias de cuatro TA como se representa en la figura 8. Sin embargo, una de las dificultades de este planteamiento ingenieril para la lixiviación es el desbalance de los Lixiviados de Ni y Co entre miniserias provocado por la desigualdad de los flujos de pulpa (Q_{pulpa}) después de suministrarla a la caja distribuidora de cada serie por la tubería (son dos, una de reserva y la otra en operación), también esta desigualdad puede ser causada por obstrucciones en la tubería de alimentación de cada miniserie.

1.2.1 Distribución desigual de los flujos volumétricos de pulpa.

En la práctica, la distribución desigual de los Q_{pulpa} puede ser causada por la existencia de tendencias desiguales entre los flujos de pulpa que son alimentados desde la caja distribuidora hasta cada una de las miniserias o por las **obstrucciones excesivas** en alguna de las dos tuberías de alimentación de dichas miniserias, cuya resistencia hidráulica provoca mayor desigualdad entre los flujos volumétricos de pulpa - Q_{pulpa} -, lo cual origina un desbalance sustancial entre los Lixiviados Lix. Ni y Lix. Co de dichas miniserias.

En el artículo (Chang et al, 2015 a) se demostró la existencia de diferencias en la distribución de los Q_{pulpa} que se alimenta las miniserias. Esto sucede por el insuficiente conocimiento de los operadores para controlar la distribución de los flujos de pulpa para cada serie y miniserias de la 1ra EL y determinar cuándo la distribución entre estas es desigual.

1.2.1.1 Proceso de obstrucción excesiva.

En el artículo Chang et al, 2015 se conceptualiza el proceso de **obstrucción excesiva** 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 cerrar 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, pero que son difíciles de arrastrar por el flujo y, por tanto, constituyen una resistencia adicional al paso del flujo de pulpa.(Chang et al, 2015 a)

El MR contiene una apreciable cantidad de su masa de partículas gruesas multiformes, formadas sobre las soleras de los hornos por aglomeración del

petróleo aditivo y otros factores tecnológicos en la Planta de Hornos de Reducción (PHR), que incluye, además, las arcillas que contiene la mena alimentada desde la Mina, todas las cuales se depositan por gravedad en: los enfriadores de mineral, los tanques de contactos, las tuberías de distribución a las series de la primera etapa de lixiviación (1ra EL) y en los TA. Esto disminuye la eficiencia operativa de los equipos porque hay que pararlos cada dos o tres veces al año para limpiarlos, independientemente a la precipitación de las sales dobles de magnesio que tradicionalmente se depositan y adhieren a las paredes de las tuberías, cerrando su diámetro interior con el tiempo de operación. (Chang et al, 2015b)

Dado los problemas planteados en los acápites 1.2.1 y 1.2.1.1 surge la necesidad de crear una herramienta operacional que permita operar y ajustar los flujos de aire en los TA de las miniserias en el menor tiempo posible para cualquiera de los dos primeros aspectos, y así evitar un desbalance prolongado de los Lix. Ni y Lix. Co que afectaría sus producciones.

Conclusiones parciales.

De acuerdo con el análisis realizado en los acápites del presente capítulo, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se establecieron los parámetros a controlar para comparar los lixiviados de Ni y Co en diferentes días durante varios meses de pruebas experimentales a escala industrial.
- Se demostró que existe un insuficiente conocimiento para poder detectar el fenómeno de obstrucción excesiva que provoca una distribución desigual sustancial de la pulpa alimentada hacia cada miniserie que se manifiesta en una apreciable diferencia entre sus lixiviados de Ni y Co por no contar con una herramienta operacional para detectar dicha obstrucción, lo cual constituye un problema científico-técnico a resolver.
- Se fundamentó la insuficiencia de conocimientos existentes para diagnosticar la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniserias en la Planta de Lixiviación de la empresa –ECG-, para lo cual se requiere establecer un procedimiento experimental a escala de UDP.

- Se demostró la necesidad de elaborar una nueva herramienta para operar los parámetros de aireación a partir de la cuantificación de los Q_{pulpa} que se alimentan a las miniseries, relacionados con el modelo del TR para poder disminuir los desbalances de los lixiviados de Ni Co entre estas.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se fundamentará las hipótesis experimentales empleadas para dar solución al problema científico-técnico existente en la UDP- lixiviación que se muestra en la figura 8, la cual constituyó la instalación experimental, donde se desarrolló el estudio del comportamiento de la distribución de pulpa con la particularidad de que la evaluación de los Lix. Ni-Co en la 1ra EL se realizó en la Serie B de la Planta de Lixiviación de la Empresa ECG, la cual consta de dos miniserias (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 informe sobre el TR, su $V_{\text{útil}}=224 \text{ m}^3$ (de cada miniserie) y el de cada TA es de 56 m^3 (Chang et al, 2014 a).

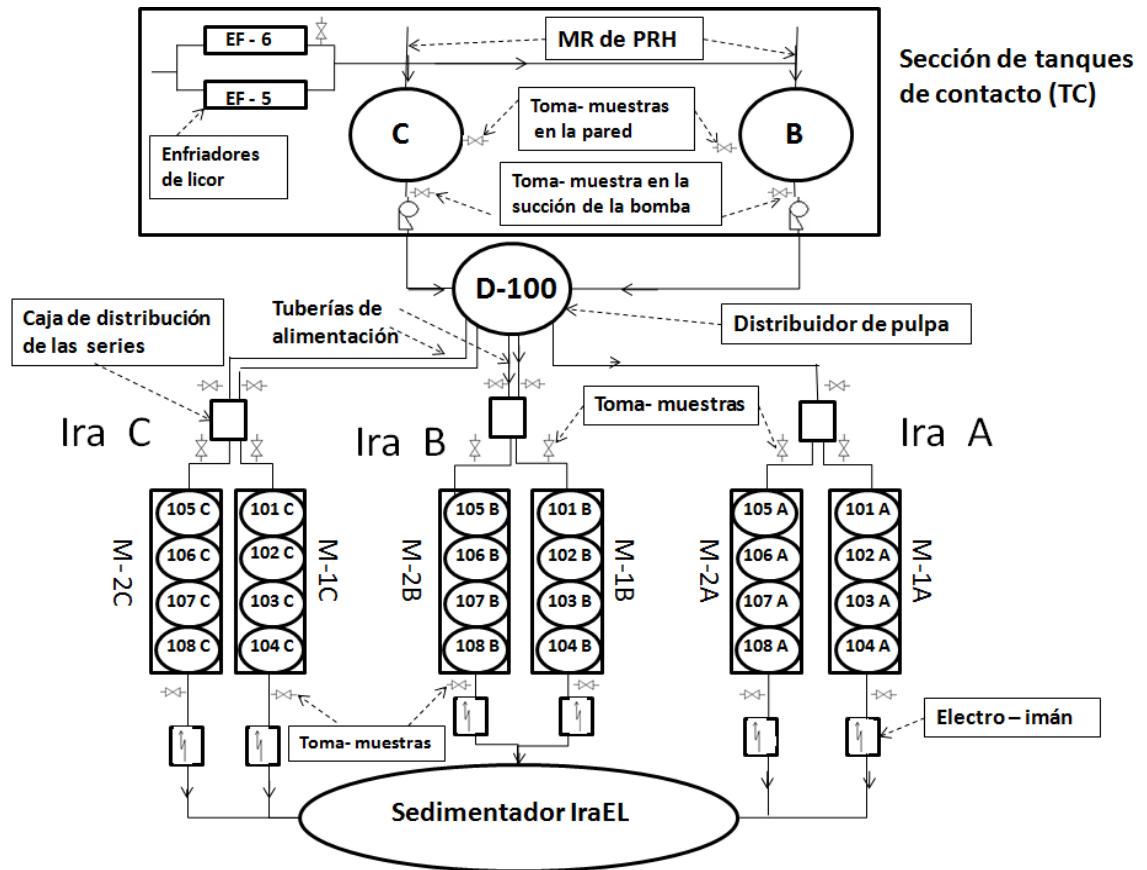


Figura 8. Caracterización de la Unidad Demostrativa de Producción (UDP).

Para demostrar el primer objetivo específico se elabora la primera hipótesis experimental.

2.1 Hipótesis experimental para determinar la diferencia de densidades de la pulpa.

Si se determina la diferencia entre la densidad de la pulpa a la entrada de cada miniserie respecto a la densidad promedio hallada en el área de tanques de contacto, donde cuyo valor positivo indique el comienzo de un proceso de obstrucción en las tuberías de alimentación de dichas miniserie, entonces se podrá prevenir con tiempo dicha anomalía en alguna de éstas y se evitarán los desbalances de los Lix. Ni y Co.

Para demostrar dicha hipótesis experimental se realizó el siguiente procedimiento:

2.1.1 Procedimiento para determinar la densidad de la pulpa.

Las muestras para determinar la densidad se toman una vez al día en pomos de 1000 mL, en caso de que se derrame fuera de la probeta o se pierda por cualquier otro motivo una de las muestras entonces se deberá tomar de nuevo.

Principio del método.

El principio de este procedimiento se fundamenta en la resta del peso de una probeta de mil mililitros llena a una vacía pesada previamente, y posteriormente dividida por dicho volumen.

2.1.1.1 Muestreo.

La toma de muestra se realizó en diferentes puntos del área de lixiviación como se mencionan a continuación:

- 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, mientras la segunda, incluye partículas más gruesas. Las 4 densidades resultantes se promedian ($\rho_{prom.}$) para que sirva de referencia operacional a las que se obtendrán en las miniseries de 1ra EL. Antes de tomar la muestra el personal debe dirigirse al panel de control para conocer de las zonas B y C, cuál de los tanques (1 ó 2) se encuentran en funcionamiento. También debe cerciorarse de que las bombas centrífugas que se encuentren operando en ese momento tengan el toma-muestra instalada.

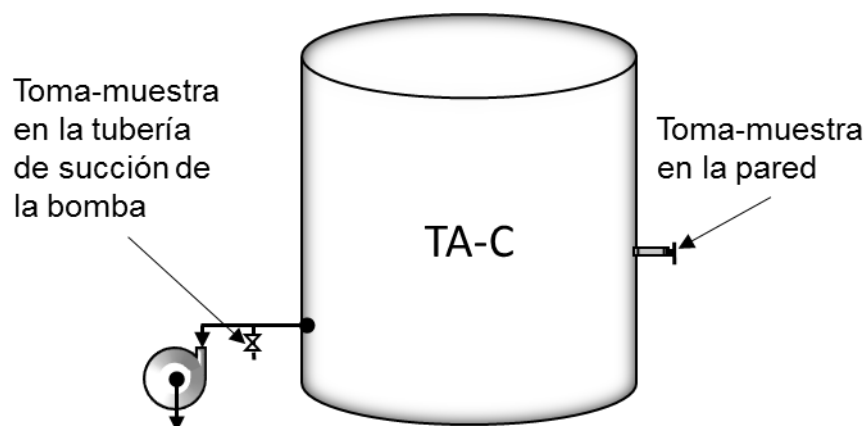


Figura 9. Toma-muestras en TC.

- En las miniseries de la 1ra EL- 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 ésta son las que se utilizan para detectar las posibles obstrucciones en las tuberías mediante su comparación con la densidad promedio y son las principales para operar el aire en la Planta.

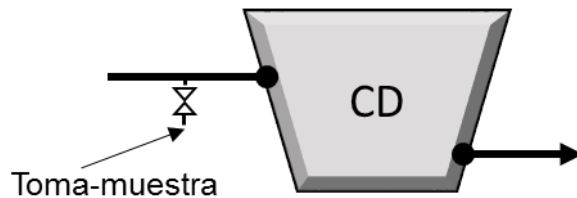


Figura 10. Toma-muestra a la entrada de la caja distribuidora.

- En las tuberías que alimentan a las cajas distribuidoras de pulpa de las series B de la 1ra EL con el propósito de comprobar la tendencia de distribución desigual que proviene del distribuidor D-100. Antes de tomar la muestra en esta área hay que cerciorar de las dos tuberías que alimentan la caja distribuidora, cuál de ellas se encuentra en funcionamiento.

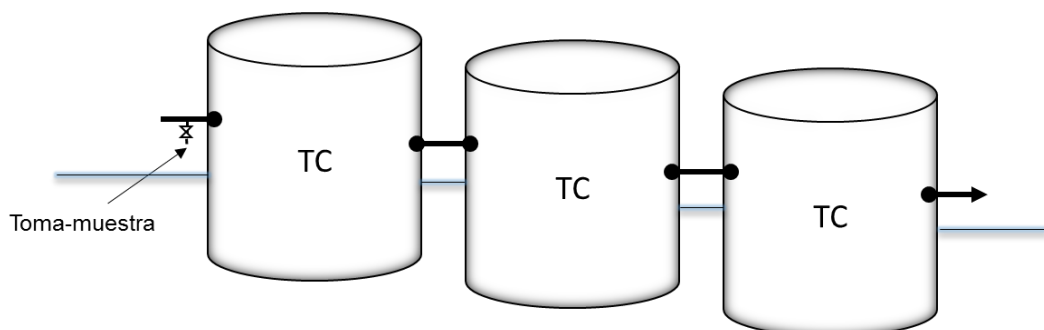


Figura 11. Toma-muestra en la entrada de la miniserie.

2.1.1.2 Procedimiento para tomar la muestra y efectuar el pesaje de la pulpa.

Toma de la muestra:

- El primer paso que debe ser cumplido es el de destupir el toma-muestra para liberar cualquier partícula de solido que se encuentra obstruyendo la salida de la pulpa.
- Después se drena por treinta segundo con el objetivo de eliminar cualquier resto de partículas sólidas retenidas en el seno del fluido, la

cual puede llegar a provocar alteraciones en los resultados finales de la densidad.

- c) Se endulza el pomo para eliminar cualquier partícula, sustancia o restos de muestras tomadas anteriormente que puedan contaminar la muestra.
- d) Se toma la muestra de forma frontal al flujo de pulpa que sale por el toma-muestra con el objetivo de que ésta sea representativa, por lo que se debe tomar en la periferia del chorro.
- e) Cuando se tome en la muestra, el nivel de pulpa en el pomo plástico debe estar entre la base del cuello y la marca que indica 1000 mL. Este nivel no se alcanza de forma inmediata, por tanto, en el caso de que no se logre dicho nivel, se debe pasar el pomo rápidamente por el centro del chorro, verificando cada vez, hasta que éste se alcance. La razón de esta recomendación es que al no cumplir con el mencionado nivel se distorsionan los resultados, ya sea, por defecto de volumen de pulpa o por exceso de sólido que queda en el fondo del pomo con muy poco líquido.

Pesaje de la pulpa:

- a) Lavar y secar con aire a presión la probeta y su base plástica para no dejar ninguna gota de agua en su interior. Se debe precisar que la probeta debe ser la misma para todas las muestras debido a que las probetas presentan un margen de error entre ellas de alrededor de ± 10 ml y puede provocar una apreciable diferencia entre las densidades.
- b) Pesar la probeta seca.
- c) Agitar fuertemente el pomo aproximadamente 20 segundos para homogenizar la pulpa.
- d) Verter rápidamente la pulpa hacia una probeta de 1000 mL, verificando siempre que no quede mucho contenido de sólido en el fondo del pomo y que se encuentre el menisco inferior en la raya que mide 1000 mL.
- e) En caso de quedar sólido en el pomo se vierte pulpa de la probeta con el objetivo de que no quede sólido en el mismo. Si no se logra sacar de esta forma, entonces, se utiliza la espátula.

- f) Pesar la probeta llena de pulpa en la balanza analítica.
- g) Realizar las anotaciones pertinentes sobre el peso de la probeta vacía y llena, en caso de que sobre o falte mucha pulpa se anota en la columna de observaciones de la hoja de registro de datos para repetir dicha muestra.
- h) En el caso de las cuatro densidades tomadas en el área de contacto, estas son promediadas para determinar la densidad promedio.

2.1.1.3 Materiales y equipos empleados.

Tabla 5. Materiales.

No.	Materiales	u	Total	Especificaciones
1	Pomo (plástico) graduado	u	10	Volumen 1000 mL
2	Lápiz cristalográfico (marcador)	u	1	-
3	Probeta de vidrio graduada	u	1	Volumen 1000 mL
4	Aire a presión para el secado			

Tabla 6. Equipos.

No.	Materiales	u	Total	Especificaciones
1	Pesa o Balanza analítica digital	u	1	Marca: RADWAG-2010 WLC 10/A ₂ . (Ver figura 11) Peso máximo: 10 kg Precisión: $\pm 0,1$ g



Figura 12. Pesa o balanza analítica.

2.1.1.4 Metodología de cálculo para determinar la densidad de la pulpa.

$$\rho_{pulpa} = \frac{(P_{prob. llena} - P_{prob. vacía})}{V_{probeta}} \quad (2.1)$$

donde:

ρ_{pulpa} – Densidad de la pulpa, g / dm^3 ;

$P_{probeta}$ – Peso de la probeta vacía o llena, g;

$V_{probeta}$ – Volumen de la probeta, $1 dm^3$.

2.1.1.5 Metodología de cálculo para determinar la densidad promedio de la pulpa en tanques de contacto.

$$\rho_{promedio, TC} = \frac{(\rho_{C-B} + \rho_{C-B1}) + (\rho_{C-C} + \rho_{C-C1})}{4} \quad (2.2)$$

donde:

$\rho_{promedio, TC}$ – Densidad promedio en TC, g / dm^3 ;

ρ_{C-B} y ρ_{C-C} – Densidad de las muestras tomadas en el toma – muestra de la pared de la serie de TC (B o C), g / dm^3 ;

ρ_{C-B1} y ρ_{C-C1} – Densidad de las muestras tomadas en el toma – muestra de la tubería de succión de la bomba de la serie de TC (B o C), g / dm^3 ;

2.1.2 Procedimiento para determinar la densidad del licor.

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, por lo que para conocer dicha 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 3 muestras de los licores que salen del enfriador de placa 106 en pomos plásticos de 1 L cada vez.

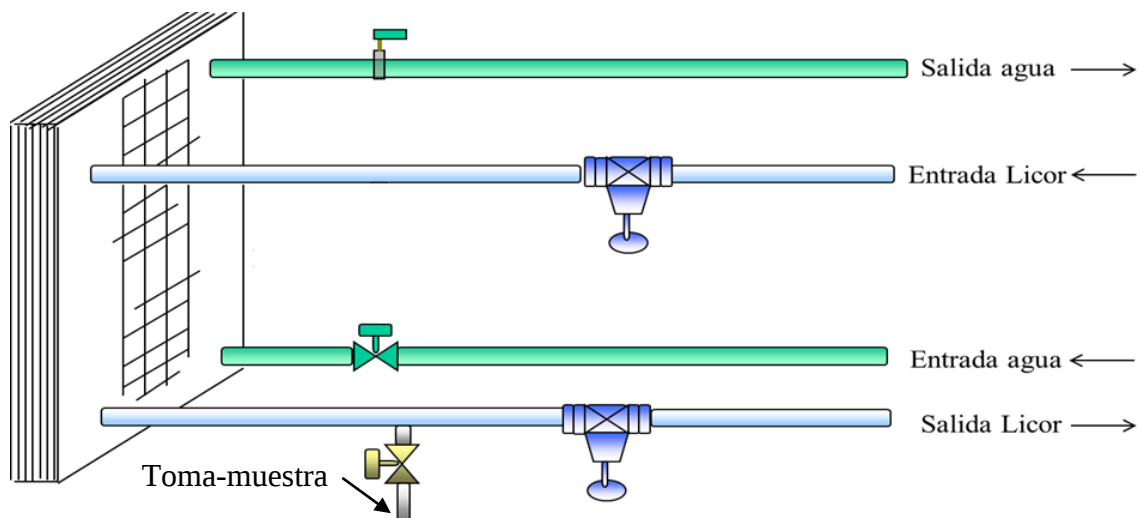


Figura 13. Toma-muestra en el enfriador de placa 106.

A continuación explicaremos con más detalles los procedimientos a realizar para tomar la muestra, el pesaje y cálculo de la densidad del licor:

2.1.2.1 Procedimiento para tomar la muestra y pesaje del licor.

Toma de la muestra:

- Drenar el licor por el toma-muestra durante 30 segundos con el objetivo de eliminar cualquier partícula sólida que se encuentre en suspensión o depositada en el fondo de la tubería.
- Se endulza el pomo para no contaminar la muestra de licor.
- Se toma la muestra hasta la boca del pomo con el objetivo de asegurar que no falte licor a la hora que este se vaya a pesar.

Pesaje del licor:

- a) Para realizar el pesaje del licor se deben realizar los pasos a y b expuestos anteriormente en el procedimiento para el pesaje de la pulpa.
- b) Después de realizar los pasos anteriores se pesa la probeta llena.
- c) Se realizan las anotaciones sobre el peso de la probeta vacía y llena.
- d) Se toman los tres valores de densidades y se promedian con el objetivo de obtener el valor oficial de la densidad del licor.

La muestra de licor se tomaron en pomos de igual volumen que los de la pulpa y el pesaje se realizó en la misma balanza por esta razón no expongo la tabla de los materiales empleados.

2.1.2.2 Metodología de cálculo para determinar la densidad del licor.

$$\rho_{\text{licor}} = (P_{\text{promediado}} - P_{\text{prob. vacía}}) / V_{\text{probeta}} \quad (2.3)$$

donde:

ρ_{licor} – Densidad del licor, g / dm³;

P_{promedio} – Peso promedio obtenida g;

$P_{\text{prob. vacía}}$ – Peso de la probeta vacía, g;

V_{probeta} – Volumen de la probeta, 1dm³.

Las densidades se midieron durante varios días en los meses de: marzo, abril y mayo para demostrar su evolución en el tiempo y determinar sus valores de riesgo de obstrucciones y distribución desigual de pulpa como se muestra en la tabla 12.

Si se demuestra en la primera hipótesis experimental que existe un valor de diferencia de densidades mencionada en la misma que indique un riesgo de formación de obstrucción excesiva en una de las tuberías de alimentación de pulpa a las miniseries, por consiguiente, se debe demostrar mediante la comparación de sus correspondientes lixiviados de Ni y Co.

Para demostrar el segundo objetivo específico se elabora la siguiente hipótesis experimental.

2.2 Hipótesis experimental para determinar los lixiviados de Ni y Co en las miniserie.

Si se realiza la comparación de los lixiviados de Ni y Co en cada miniserie, y como resultado se obtiene que sus diferencias toman valores iguales o superiores que 1,5 %, entonces se puede sospechar la existencia de un proceso de obstrucción excesiva en una de las tuberías que alimentan a las miniserie de TA.

Para demostrar dicha hipótesis experimental a continuación se explica el procedimiento para obtener los lixiviados de Ni y Co a la entrada y salida de cada miniserie.

2.2.1 Pruebas de comparación de lixiviados de Ni y Co y sus incrementos en las miniserie.

Para realizar los experimentos de lixiviado primeramente se debe respetar 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 8) 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 taponamiento 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 8 y 9). Los datos que reflejan las condiciones de realización de las pruebas se tomaron del CITEC y se muestran en las tablas 7, 8 y 9.

Tabla 7. 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 8. 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 9. Indicadores de aireación por miniserie.

FECHA	MINISERIE-1 B		MINISERIE-2 B	
	Va	Qa	Va	Qa
	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:

NH_3 y NH_3/CO_2 concentración de amoníaco y su relación con la del dióxido de carbono en el licor de 1ra EL.

V_a , (m^3/t) volumen específico de aire

Q_a , [$\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$] velocidad específica del aire

2.2.1.1 Muestreo.

La comparación de los incrementos (Δ) de los lixiviados (Lix. Ni y Lix. Co) se realizó en el transcurso de un día de trabajo (8:00 Am a 4:00 Pm) en los toma-muestras instalados en la tubería de entrada y salida de las miniserias M-1B y M-2B como se muestra en la figura 8.

2.2.1.2 Procedimiento para la toma de muestra y preparación del compósito.

Toma de la muestra:

- a) Para comenzar a tomar las muestras se debe destupir y verificar que los toma-muestras estén en buen estado técnico.
- b) Posteriormente se procede a tomar 4 muestras al mismo tiempo en las tuberías de: entrada de los TA 101B y 105 B y salida (TA: 104 B y 108 B) de cada miniserie (ver fig. 8) 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 horas en los horarios (8 am, 10 am, 12 m y 2 pm).
- c) Luego se transportan las muestras al laboratorio donde será filtrada para conformar el compósito.

Procedimiento para preparar el compósito:

- a) Antes de comenzar a filtrar se debe lavar el embudo Büchner y el kitasato para eliminar cualquier partícula que pueda contaminar la muestra.

- b) Posteriormente las muestras se dejan reposar por un tiempo de alrededor de 30 min para que el sólido se sedimente, después se decanta la mayor parte del líquido con el objetivo de evitar la hidrólisis de los amoniacatos de Ni y Co que pueden falsear los resultados del análisis químico de estos.
- c) Luego se prepara el embudo con doble papel de filtro para retener la mayor cantidad de partículas sólidas y se coloca el kitasato en la instalación al vacío para verter la muestra.
- d) El sólido se lava con 100 mL de soluciones amoniacales al 7 y al 3 % y agua para eliminar los restos de licor que puedan quedar en el intersticio de la torta. En este proceso de filtrado se debe tener mucho cuidado con las muestras y su identificación, debido a que si se confunden se pueden llegar a obtener resultados no reales.
- e) Para preparar el compósito se habilitan cuatro pomos de 500 mL codificados y con agua hasta un volumen ± 200 mL con el objetivo de disipar restos de líquidos que aun puedan quedar en la torta.
- f) La torta filtrada se debe añadir en los pomos antes mencionados manteniendo un estricto control con dicha identificación.
- g) De igual forma se procede con el resto de las muestras del día.
- h) Al finalizar el día de pruebas se filtran los 4 compósito correspondiente a cada toma-muestra y se procede a secarse.
- i) El secado se realiza en platillos metálicos en una estufa a 120 °C durante 2 horas. Cuando se enfrió, se homogenizó y trituro 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 de los contenidos totales de Fe, Ni y Co en cada compósito de sólido por el método de espectrometría de absorción atómica (AAS), ver figura 15.

2.2.2.3 Materiales y equipos empleados.

Tabla 10. Materiales.

No.	Materiales	u	Total	Especificaciones
1	Pomo (plástico) boca ancha	u	20 4	Volumen 250 mL Volumen 500 mL (La cantidad de pomos depende de la cantidad de muestras tomadas)
3	Lápiz cristalográfico (marcador)	u	1	-
4	Kitasato	u	4	Volumen 3000 mL (Ver figura 15)
5	Embudo Büchner de porcelana	u	4	Ver figura 13
6	Papel de filtro	u	-	

Tabla 11. Equipos

No.	Materiales	u	Total	Especificaciones
1	Estufa	u	1	-
2	Bomba al vacío	u	1	-



Figura 14. Embudo Büchner.



Figura 15. Un embudo Büchner conectado a un kitasato y a una bomba de vacío.



Figura 16. Espectrómetro de absorción atómica (AAS).

2.2.2.4 Metodología de cálculo para determinar los lixiviados de Ni y Co.

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:

$$Lix (Me) = \left[1 - \left(\frac{Fe_{MA}}{Fe_{MLix}} \cdot \frac{Me_{MLix}}{Me_{MA}} \right) \right] \cdot 100, (\%) \quad (2.5)$$

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:

$$\Delta Lix (Me) = \left[1 - \left(\frac{Fe_{MEntra}}{Fe_{MSale}} \cdot \frac{Me_{MSale}}{Me_{MEntra}} \right) \right] \cdot 100, (\%) \quad (2.6)$$

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 1ra EL;

Fe_{MA} y Fe_{MEntra} contenidos de Fe en el MA a la PHR (muestra HR-1) 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 (muestra HR-4) - 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 (muestra HR-1) 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 (muestra HR-4) que sale de cada miniserie de 1ra EL de la Planta de Lixiviación, (%);

En total se realizaron 3 pruebas a temperaturas de la pulpa en los TC entre 36-39 °C en algunas de las fechas comprendidas en los ensayos de densidades (ver tabla 12) para comparar sus resultados normales de Lix. Ni-Co con los que indican una obstrucción excesiva.

Si se demuestra mediante las dos primeras hipótesis experimental que existe un proceso de obstrucción excesiva en una de las tuberías de alimentación de pulpa a las miniseries, entonces, se debe realizar las pruebas de tiempo de retención (TR) para cuantificar el flujo de pulpa alimentado a cada miniserie, y por éste ajustar los flujos de aire a los TA..

Para demostrar el tercer objetivo específico se elabora la siguiente hipótesis experimental.

2.3 Hipótesis experimental para determinar el tiempo de residencia.

Si se determina el tiempo de residencia real para cada miniserie, entonces se podrá cuantificar la proporción de los flujos de pulpa alimentado con el propósito de rectificar los indicadores de aire suministrado a dichas miniserie y así contribuir a la disminución de las fluctuaciones de los lixiviados Ni y Co en la serie.

Para demostrar dicha hipótesis se determina el TR para calcular las proporciones de Q_{pulpa} en cada miniserie de la serie B de la 1ra EL por la metodología de la sustancia trazadora Na_2CO_3 , este procedimiento fue fundamentado por el estudiante Luis Miguel Bargayó Chacón en su trabajo diploma y publicado por Chang et al, 2015 b.

Conclusiones parciales.

- 1) Se creó una metodología experimental sencilla y confiable para determinar las diferencias de densidades entre las miniseries de la 1ra EL y la promedio de TC con el propósito de demostrar la hipótesis experimental 1.
- 2) Se estableció un procedimiento experimental para la UDP que permite comparar los Lixiviados de Ni y Co de ambas miniseries de 1ra EL con la representatividad y confiabilidad deseada, así como una metodología de procesamiento de los resultados de los análisis químicos en dos parámetros diferentes –Lix. Ni y Co, y sus incrementos Δ Lix. Ni y Co-, los cuales garantizan la confirmación de la existencia de una regularidad en el comportamiento de dichos lixiviados, con el propósito de demostrar la hipótesis experimental 2.
- 3) Se demostró un tercer procedimiento que permite a través de la determinación de TR calcular las proporciones de los Q_{pulpa} alimentado hacia cada miniserie y por el cual se podrán determinar los parámetros de aireación (Q_a , V_a y Q_v).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos con el propósito de evaluar el grado de cumplimiento de las hipótesis científico-experimentales planteadas en el capítulo 2

3.1 Análisis de los resultados de las densidades.

Los resultados de **las densidades promedio de la pulpa** en TC, así como la densidad de la pulpa en cada serie y miniserie se muestran en la tabla 12.

Es necesario destacar que dichas densidades de la pulpa, tanto la promedio como la de cada serie y miniserie se determinan a partir de las ecuaciones (2.1) y (2.2) mostradas en el capítulo 2.

Tabla 12. 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. kg/m ³
	Succión en Bombas TC	Pared TC	De todos en TC (ρ_{prom})	Ira B	M-1B	M-2B	M- 1B	M- 2B	
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	1 177	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 12 es la siguiente:

Las densidades de la succión ($\rho_{suc.}$) 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 del 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 la $\rho_{suc.}$ y cercanas o menores que la densidad promedio de todos los toma-muestras ($\rho_{prom.}$) en TC que incluye la precisión del método ($\pm 3-4 \text{ kg/m}^3$), lo cual sucede en las dos miniserias del 26 al 29 de abril y en la miniserie 2 en casi todas las fechas con excepción del 30-abril. Cuando las densidades de las miniserias (ρ_{m-1B} y ρ_{m-2B}) son mayores que las $\rho_{prom.}$ 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 a partir del día 30-abril.

La tubería de alimentación a la Serie Ira-B se manifestó con densidades muy superiores que las de $\rho_{suc.}$, lo cual es lógico porque toda la pulpa pasa por la misma, aumentando la acumulación de arena y piedras que se hace notar en su toma-muestra a partir del 29-abril. Lo interesante del comportamiento de estas densidades es que comienza a aumentar gradualmente hasta el 8-mayo ($1\ 343 \text{ kg/m}^3$), descendiendo poco a poco, respecto a la $\rho_{suc.}$ de su día correspondiente. Mientras tanto, las densidades en la miniserie M-1B va creciendo respecto a la $\rho_{prom.}$ de su día, siendo estas, mayores que las de la M-2B. Estos síntomas se pueden interpretar de la forma siguiente: la tubería de alimentación de pulpa a la Serie Ira-B va aumentando el espesor de costra hasta que el flujo de pulpa traslada parte del “arenamiento” para la caja de distribución y pasa en mayor medida para la M-1B, hasta tal punto, que va cerrando 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 TR como se muestra en la tabla 3 del artículo (Chang et al, 2015b) y en las de lixiviados de Ni y Co (ver tabla 15), las cuales se analizarán más adelante.

Para las operaciones en la Planta es importante definir los valores críticos de la densidad de pulpa en diferentes lugares de la UDP para predecir posibles obstrucciones con el propósito de solicitar a tiempo el servicio científico

técnico necesario a la Unidad Básica de Servicios Técnicos de la ECG (UBST-ECG) o al CEDINIQ para realizar la comparación de los lixiviados de Ni y Co en las miniseries y determinar 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, y así evitar pérdidas prolongadas de Ni y Co.

Para la tubería de entrada a la caja de distribución de la Serie Ira B, los valores críticos están por encima de $1\ 190\ \text{kg/m}^3$, 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 cerrar y hay 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 miniseries en relación con las densidades promedio de TC.

Por otra parte, la correlación de valores de densidades de las miniseries 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 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 en la tabla 12, 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 miniseries. La distribución real cuantificada de Q_{pulpa} 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 Ira A por las densidades de la miniserie M-2B, las cuales entre los días del 9 al 11 de julio tomaron valores de 1 175 -1 200 kg/m³, mientras que la M-1A mantuvo valores algo más bajo (1 166-1 175) kg/m³. Posteriormente, estos descendieron hasta 1 600 -1 167 kg/m³, indicando que se dejó de arrastrar "arena" y piedras hacia la caja debido al pobre flujo de pulpa que circuló al ir cerrándose el 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/m³ 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, se mandó a comprobar su tupición en el distribuidor D-100 el día 11 de julio, 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 Ira A el día 16 de julio.

Implementación del método de control de las diferencias de densidades.

Por cuanto, en la Planta se determina la densidad de la pulpa en las balanzas técnicas de brazo colgante situadas en las Series B y C de TC, entonces, para poder establecer un método de vigilancia diaria en la Planta de lixiviación sobre las diferencias de densidades mencionadas, se requiere corregir los valores de las densidades medidas en dichas pesas técnicas, respecto a los determinados en las investigaciones por la probeta de 1 L, para lo cual se realizó el siguiente procedimiento:

Se tomaron 3 muestras duplicadas en los pomos plásticos de cada punto de muestreo en las miniseries y se determinaron sus densidades por el método de la probeta de 1 L, pero la balanza analítica se colocó en un lugar cercano a los TC, paralelamente se pesaron en la balanza técnica de brazo colgante las pulpas correspondientes en un recipiente metálico de 1 L. De esta forma, se establecieron las diferencias promedios entre ambos métodos para ajustar el pesaje de la balanza técnica de brazo colgante a los valores determinados por el método de la probeta. En el caso de las muestras de TC se diferenciaron

del procedimiento anterior en que las muestras que se pesan en la balanza de brazo colgante se tomaron en la cántara metálica de 5 L. Esto significa que al tomar la muestra, por ejemplo, de la pared del TC, una se tomó en el pomo plástico de 1 L y seguidamente, la otra se tomó en la cántara metálica de 5 L. La del pomo plástico cerrado se vertió en la probeta de un litro y se pesó en la balanza analítica, mientras que la muestra de la cántara de 5 L se vertió en el recipiente metálico de 1 L para su pesaje en la balanza de brazo colgante. Estas operaciones se realizaron durante varios días para garantizar una data confiable como se muestra en la tabla 13.

A continuación se ilustra el procedimiento para determinar los valores promedios y la desviación estándar de las diferencias de los dos métodos de pesaje que aparecen el modelo del Anexo 3, en este caso, para las balanzas de brazo colgante situadas en las Series B y C de TC:

Tabla 13. Datos de densidades obtenidos a partir de los dos procedimientos de pesaje.

Fecha	Turno	Toma-muestra en la pared de TC					
		Cántara- Balanza de brazo colgante		Probeta- Balanza analítica		Diferencia	
		Serie B	Serie C	Serie B	Serie C	Serie B	Serie C
19 nov.	A	1100	1140	1147,9	1179,6	47,9	39,6
20 nov.	A	1130	1120	1176,6	1169,5	46,6	49,5
21 nov.	B	1140	1140	1158,2	1169,2	18,2	29,2
22 nov.	B	1160	1130	1164,3	1152,6	4,25	22,6
23 nov.	C	1140	1140	1165,9	1156,5	25,9	16,5
24 nov.	C	1135	1150	1155,3	1162,2	20,3	12,2
25 nov.	D	1120	1130	1144,3	1153,9	24,3	23,9
Promedio		1132,1	1135,7	1158,9	1163,4	26,8	27,6
Desviación estándar		18,7	9,8	11,1	9,9	15,6	13,1

Como se observa en las dos últimas columnas de la tabla se toman los valores promedios y las desviaciones estándar de las diferencias por ambos métodos para determinar las densidades de la pulpa, cuyos valores se colocan en la parte superior del modelo-segunda fila- con el significado siguiente:

- Para la pesa de TC –Serie B: 27 ± 16 , lo que se muestra en la tabla como: .Serie B-el valor promedio y Restar y Sumar- la desviación estándar. De tal forma, que a partir de la 4ta fila, los valores que aparecen en la columna de la Serie B, serían los valores medidos en la balanza de brazo colgante registrados (1130) en el modelo del Anexo 3, al que se le suma el valor 27 (1157) y en las columnas de Restar y Sumar, a dicho valor se le resta (1141) y suma (1173) el valor de la desviación estándar, como se observa en la tabla 25 de dicho Anexo.
- Para la pesa de TC -Serie C: 28 ± 13 , el resto, se realiza análogamente a la Serie B, donde, los valores que aparecen en la columna de la Serie C, serían los valores medidos en la balanza de brazo colgante (1140), al que se le suma el valor 28 (1168) y en las columnas de Restar (1155) y Sumar (1181).

Este mismo procedimiento se repite para los casos de: Toma-muestras de la succión de las bombas de TC- Anexo 3, tabla 25 y en todas las miniserie de 1ra EL- ver tabla 26-28 del mismo anexo.

Con este propósito se elaboró el modelo de control de densidad en el sistema: TC - entrada de cada miniserie de 1ra EL que se encuentra en el Anexo 3, donde los operadores determinan las densidades en los mismos puntos de muestreo que se representa en la fig. 8 y registran los datos obtenidos en dicho modelo, luego se comunica por teléfono al panel de control y se reportan los datos obtenidos. Posteriormente el operador del panel de control introduce dichos datos en una hoja de Excel, desde donde los tecnólogos acceden por intranet para tomar los datos e introducirlo en la hoja de Excel dinámica, la cual determina la diferencia de las densidades de cada una de las miniserie y la densidad promedio de TC. Esta diferencia es estudiada hasta que esta tome valores iguales o mayores +15, donde se indica el comienzo del proceso de obstrucción en alguna de las miniserie. Cuando se cumpla la condición en las miniserie de TA de que al menos dos de los tres valores de diferencias respecto a la densidad promedio de TC – Miniserie, Restar y Sumar- sean mayores que +15, entonces, los tecnólogos podrán tomar la decisión de

contratar al CEDINIQ para que realizan las comparaciones de los Lix Ni y Co en dicha Serie.

3.2 Herramienta para determinar los Lixiviados de Ni – Co y sus incrementos.

Antes de comenzar los cálculos se necesita conocer los contenidos de Ni, Co y Fe presente en la muestra HR-1, la cual es tomada en la PHR y el de las pruebas realizadas a la entrada y salida de cada una de las miniseries (HR-4) durante los días de sospecha de obstrucción excesiva en la Serie-1B (Ver Tabla 14).

Tabla 14. Datos para determinar los lixiviados de Ni y Co, M-1B.

Fecha	Min. Alimentado, %			ENTRADA, %			SALIDA, %		
	Ni	Co	Fe	Ni	Co	Fe	Ni	Co	Fe
	HR-1			MINISERIE-1B					
30-abril	1,191	0,106	40,077	0,900	0,115	33,900	0,350	0,077	40,180
06-mayo	1,173	0,117	41,140	0,880	0,130	43,070	0,333	0,090	43,860
12-mayo	1,189	0,109	40,440	1,050	0,157	46,880	0,334	0,083	45,100

Es necesario destacar que como el procedimiento de cálculo es el mismo para cada caso de las dos miniserie, a continuación solo se expone un ejemplo de cómo se realizan los cálculo para determinar el incremento y los lixiviados de Ni y Co en la M-1B.

Para determinar los lixiviados de Ni – Co y sus incrementos en la M-1B se realizan los siguientes cálculos:

3.2.1 Cálculo para determinar los lixiviado de Ni y Co (30 de abril).

Los cálculos de los lixiviados de Ni y Co se realizaron por la ecuación (2.5):

$$\text{Lix}(\text{Ni}) = \left[1 - \left(\frac{40,077}{40,180} \cdot \frac{0,350}{1,191} \right) \right] \cdot 100$$

$$\text{Lix}(\text{Ni}) = 70,688 \%$$

$$\text{Lix}(\text{Co}) = \left[1 - \left(\frac{40,077}{40,180} \cdot \frac{0,077}{0,106} \right) \right] \cdot 100$$

$$\text{Lix}(\text{Co}) = 27,545 \%$$

3.2.2 Cálculo de los incrementos de los lixiviados de Ni y Co.

Los cálculos de los incrementos se realizaron por la ecuación (2.6):

$$\Delta\text{Lix}(\text{Ni}) = \left[1 - \left(\frac{33,900}{40,180} \cdot \frac{0,350}{0,900} \right) \right] \cdot 100$$

$$\Delta\text{Lix}(\text{Ni}) = 67,189 \%$$

$$\Delta\text{Lix}(\text{Co}) = \left[1 - \left(\frac{33,900}{40,180} \cdot \frac{0,077}{0,115} \right) \right] \cdot 100$$

$$\Delta\text{Lix}(\text{Co}) = 43,509 \%$$

Los resultados obtenidos en los cálculos de Lix. Ni-Co y sus incrementos se muestran en la tabla 15.

3.2.3 Análisis de los resultados de los lixiviados de Ni-Co y sus incrementos.

La tabla 14 muestra con claridad que la miniserie M-1B se favorece apreciablemente en los Lixiviados de Ni en sus dos indicadores (ΔLix y Lix-S), mientras que el Lix. Co 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 9), 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 Lix. Ni y un mayor Lix. Co por concepto de disminución de las pérdidas por co-precipitación del Co^{3+} con los óxidos e hidróxidos de hierro (OOH), al descender apreciablemente la velocidad de oxidación de los iones de Fe^{2+} en el licor lixiviante, lo que permitió precipitar cristales de OOH mejor formados que poseen menor capacidad de adsorción.

A partir de los resultados obtenidos se demuestra la validez de la hipótesis científico-experimental número 2.

Tabla 15. 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	27,5	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

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 en las columnas Lix-S y Δ Lix de la tabla 15. Estos resultados son compatibles con la interpretación dada sobre el comportamiento de los valores de densidades de la tabla 12 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 de la limpieza de la tubería de la Serie 1ra B. Estos resultados se toman del citado informe (Chang et al, 2015b), en la cual se observa que la miniserie M-B2 trabajó con el (64 y 69) % del Q_{pulpa} que se suministró a la Serie 1ra B, lo que indicó una obstrucción excesiva 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 Lix. Ni-Co del 12 de mayo (ver tabla 15). 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 Lix. Ni-Co en la serie antes de la limpieza y gestionarla con prontitud.

A continuación se expone el procedimiento de cálculo empleado para determinar el Q_a en la M-B2 el 29 junio.

3.3 Elaboración de una herramienta operacional para determinar el flujo volumétrico de aire para cada TA.

Para poder determinar el Q_a para cada TA, primeramente se debe conocer la distribución de los flujos volumétricos de pulpa suministrado a cada miniserie, para determinar dichos flujos se debe elaborar un procedimiento, el cual está constituido por los siguientes pasos:

3.3.1 Determinación de la distribución de los flujos de MR, licor y pulpa.

Para calcular el flujo de pulpa es necesario tomar los datos del tonelaje de MA y el flujo volumétrico de licor (G_{Licor}) directamente del CITEC, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 16. Datos tomados de la producción.

Tonelaje de MA (t/h)	Flujo de Licor a TC (m^3/h)
230	1 066

Posteriormente se procede a determinar las densidades de la pulpa en TC, Serie de 1ra EL y Miniseries a partir de la ecuación (2.1) expuesta en el capítulo 2. (Ver tabla 17, 18 y 19)

Tabla 17. Densidades en TC.

Codificación	Densidad (g/L)
C-B	1 158
C-C	1 167
C-B1	1 166
C-C1	1 179

Tabla 18. Densidades de cada serie de 1raEL.

Codificación	Densidad (g/L)
PS-1 ^a	1 171
PS-1B	1 167
PS-1C	1 186

Tabla 19. Densidades en la M-B2

Codificación	Densidad (g/L)
M-B1	1 168
M-B2	1 167

Determinación de la $\rho_{prom.}$ en TC por la ecuación (2.2).

$$\rho_{promedio} = \frac{((1\ 158 + 1\ 166) + (1\ 167 + 1\ 179))}{4}$$

$$\rho_{promedio} = 1\ 167\ g \cdot L^{-1}$$

Determinación de la densidad promedio del licor $\rho_{prom. Licor}$.

Para determinar dicha densidad promedio se utilizó la ecuación (2.3)

$$\rho_{prom. Licor} = 1\ 038,2\ g \cdot L^{-1}$$

Determinación de la masa de sólido por cada litro (dm^3), en correspondencia con las densidades tomadas en las tuberías de alimentación de las Series A, B y C (PS-1A, 1B y 1C).

Esta se determina por la diferencia entre la densidad de la pulpa tomada a la entrada de cada serie de 1ra EL y la densidad del licor tomado en el enfriador 106.

$$m(PS - Serie) = \rho_{PS-1raEL} - \rho_{prom. Licor} \quad (3.1)$$

donde:

m (PS-Serie), no es más que la masa de sólido alimentada a la Serie (A, B y C), g;

$\rho_{PS-1raEL}$, densidad del sólido de la muestra tomada en la tubería de entra de cada Serie de la 1ra EL; g

$\rho_{prom. Licor}$, es la densidad promedio del licor proveniente del área de enfriamiento, g

Cálculo de la masa de sólido a partir de la ecuación (3.1).

$$m(PS - 1A) = \rho_{PS-1A} - \rho_{prom. Licor Enf.}$$

$$m(PS - 1A) = 1\,171 - 1\,038,2$$

$$m(PS - 1A) = 133\,g$$

$$m(PS - 1B) = \rho_{PS-1B} - \rho_{prom. Licor Enf.}$$

$$m(PS - 1B) = 1\,167 - 1\,038,2$$

$$m(PS - 1B) = 129\,g$$

$$m(PS - 1C) = \rho_{PS-1C} - \rho_{prom. Licor Enf.}$$

$$m(PS - 1C) = 1\,186 - 1\,038,2$$

$$m(PS - 1C) = 148$$

Posteriormente se determina la masa de sólido total en al 1ra EL mediante la suma de todas las masa de sólido en las series de 1ra EL.

$$mSeries_{Total} = \rho_{PS-1A} + \rho_{PS-1B} + \rho_{PS-1C}$$

$$mSeries_T = 133 + 129 + 148$$

$$mSeries_T = 410\,g$$

Determinación de la masa de sólido por cada litro (dm^3), en correspondencia con las densidades tomadas en las tuberías de alimentación de las Miniserie-B1y B2.

Esta se determina por la diferencia entre la densidad de la pulpa tomada a la entrada de cada miniserie y la densidad del licor tomado en el enfriador 106.

$$m(M - B) = \rho_{M-B} - \rho_{prom. Licor} \quad (3.2)$$

donde:

$m(M - B)$, no es más que la masa de sólido alimentada a la Miniserie (B1 y B2), g;

ρ_{M-B} , densidad de la muestra tomada a la entrada de la Miniserie (B1 y B2), g;

$\rho_{prom. Licor}$, es la densidad promedio del licor proveniente del área de enfriamiento, g.

Cálculo de la masa de sólido a partir de la ecuación (3.2).

$$m(M - B1) = \rho_{M-B1} - \rho_{prom. Licor Enf.}$$

$$m(M - B1) = 1\,168 - 1\,038,2$$

$$m(M - B1) = 130\,g$$

$$m(M - B2) = \rho_{M-B2} - \rho_{prom. Licor Enf.}$$

$$m(M - B2) = 1\,167 - 1\,038,2$$

$$m(M - B2) = 129\,g$$

Posteriormente se determina la masa de sólido total en la Serie-B1 mediante la suma de todas las masas de sólido en las miniserie.

$$mSerie_T = \rho_{M-B1} + \rho_{M-B2}.$$

$$mSerie_T = 130 + 129$$

$$mSerie_T = 258\,g$$

Determinación de coeficiente de distribución de los flujos de pulpa (x_{1B}) para la Serie-1B.

El coeficiente de distribución de los flujos de pulpa hacia la Serie-1B se determina a partir de la relación de la masa de sólido en la serie, en este caso la 1B y la masa de sólido total en la 1ra EL.

$$x_{1B} = \frac{m(PS-Serie)}{mSeries_T} \quad (3.3)$$

donde:

x_{1B} , coeficiente de distribución de la pulpa, adimensional;

$m(PS - Serie)$, masa de sólido alimentada a la Serie (A, B y C), g;

$mSeries_T$, masa de solido total que se suministra a la 1ra EL, g.

Cálculo del coeficiente de distribución de los flujos de pulpa hacia la Serie-1B.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.3).

$$x_{1B} = \frac{m(PS - 1B)}{mSeries_T}$$

$$x_{1B} = \frac{129}{410}$$

$$x_{1B} = 0,315$$

Determinación del coeficiente de distribución de los flujos de pulpa (x_{M-B}) para la M-B1 y B2.

El coeficiente de distribución de los flujos de pulpa hacia las miniseries se determina mediante la relación de la masa de sólido de la miniserie y la masa de sólido total en la serie.

$$x_{MB} = \frac{m(M-B)}{mSerie_T}$$

(3.4)

donde:

x_{MB} , coeficiente de distribución de pulpa, adimensional;

$m(M - B)$, masa de sólido alimentada a la Miniserie (B1 y B2), g;

$mSerie_T$, masa de solido total que se suministra a la Serie B1, g.

Cálculo del coeficiente de distribución de los flujos de pulpa hacia la M-B2 y B1 Este se realiza a partir de la ecuación (3.4).

$$x_{MB1} = \frac{m(M - B1)}{mSerie_T}$$

$$x_{MB1} = \frac{130}{258}$$

$$x_{MB1} = 0,502$$

$$x_{MB2} = \frac{m(M - B2)}{mSerie_T}$$

$$x_{MB2} = \frac{129}{258}$$

$$x_{MB2} = 0,498$$

Determinación del flujo másico de MR (Q_{MR}) alimentado a TC.

El flujo másico de MR alimentado a TC se determina a partir del producto del flujo másico alimentado a la romana (PHR) y el factor de contracción del mineral.

$$Q_{MR} = Q_{MA} \cdot \varphi \quad (3.5)$$

donde:

Q_{MR} , flujo másico del mineral alimentado en la canal de TC, t/h;

Q_{MA} , flujo másico del mineral alimentado a la romana (Ver tabla 15), t/h;

φ , factor de contracción del mineral (Este dato lo da el departamento de contabilidad metalúrgica de la empresa). El mismo no es confiable porque en él no se incluye el estado técnico de la romana y la variabilidad de la calidad de mineral reducido, aunque es factor obligatorio para la contabilidad en la planta.

Cálculo del flujo másico de MR alimentado a TC.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.5).

$$Q_{MR} = 230 \cdot 0,756$$

$$Q_{MR} = 173,88 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Determinación del flujo másico de Licor ($Q_{Licor,TC}$) alimentado a TC.

El flujo másico de licor alimentado a TC se determina a partir del producto del flujo volumétrico y la densidad del licor de enfriamiento, partido 1000 kg/t.

$$Q_{Licor,TC} = \frac{G_{Licor,TC} \cdot \rho_{prom. Licor.}}{1000} \quad (3.6)$$

donde:

$Q_{\cdot Licor, TC}$, flujo másico de licor alimentado a TC, t/h;

$G_{\cdot Licor, TC}$, flujo volumétrico de licor alimentado a TC, m³/h;

$\rho_{prom. Licor,}$, densidad promedio del licor alimentado a TC, kg/m³;

1 000, no es más que el factor de conversión de kilogramo a tonelada.

Cálculo del flujo másico de licor alimentado a TC.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.6).

$$Q_{\cdot Licor, TC} = \frac{1\,066 \cdot 1\,038,2}{1\,000}$$

$$Q_{\cdot Licor, TC} = 1\,106\,t \cdot h^{-1}$$

Determinación de la relación líquido-sólido ($R(L/S)$) en tanques de contacto.

La relación líquido-sólido en tanque de contacto se determina a partir de la relación del flujo másico de licor dividido por el flujo másico de MR.

$$R\left(\frac{L}{S}\right) = \frac{G_{\cdot Licor, TC}}{Q_{\cdot MR}} \quad (3.7)$$

donde:

$R\left(\frac{L}{S}\right)$, no es más que la relación líquido sólido de la pulpa en la canal de contacto;

$G_{\cdot Licor, TC}$, flujo másico del licor alimentado a TC, t/h;

$Q_{\cdot MR}$, flujo másico de MR alimentado a TC, t/h.

Cálculo de la $R(L/S)$ en TC a partir de la ecuación (3.7).

$$R\left(\frac{L}{S}\right) = \frac{1\,106,7}{173,88}$$

$$R\left(\frac{L}{S}\right) = 6,4$$

Determinación del flujo de pulpa (Q_{pulpa}) suministrado al DI-100.

Este se determina a partir de la suma del flujo de mineral reducido y el flujo másico de licor.

$$Q_{pulpa} = Q_{MR} + Q_{Licor, TC} \quad (3.8)$$

donde:

$Q_{pulpa, TC}$, flujo de pulpa alimentado al DI-100;

Los demás aspectos se explican en las ecuaciones anteriores

Cálculo del flujo de pulpa suministrado al DI-100.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.8).

$$Q_{pulpa} = 173,88 + 1106,7$$

$$Q_{pulpa} = 1\,280,6 \, t \cdot h^{-1}$$

Determinación del flujo de MR ($Q_{MR \text{ Serie}}$) que se distribuye a las Series de 1ra EL.

El flujo de MR que se distribuye a las Series de 1ra EL se determina a partir del producto del flujo de mineral reducido y el coeficiente de distribución de los flujos de pulpa de las Series.

$$Q_{MR \text{ Serie}} = Q_{MR} \cdot x_{1B} \quad (3.9)$$

Este cálculo solo se realizará para la Serie-1B por que el procedimiento de es el mismo para todas las demás Series.

Calculo del flujo de MR que se distribuye a la Serie-1B.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.9).

$$Q_{MR \text{ 1B}} = 173,88 \cdot 0,315$$

$$Q_{MR \text{ 1B}} = 54,8 \, t \cdot h^{-1}$$

Determinación del flujo de MR ($Q_{MR M}$) que se distribuye a cada Miniserie.

El flujo de MR que se distribuye a cada Miniserie se determina a partir del producto del flujo de MR distribuido a la Serie 1B y el coeficiente de distribución de los flujos pulpa para las miniseries.

$$Q_{MR MB} = Q_{MR 1B} \cdot x_{MB} \quad (3.10)$$

Cálculo del flujo de MR que se distribuye a la M-B1 y B2.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.10).

$$Q_{MR MB1} = 54,8 \cdot 0,502$$

$$Q_{MR MB1} = 27,5 \, t \cdot h^{-1}$$

$$Q_{MR MB2} = 54,8 \cdot 0,498$$

$$Q_{MR MB2} = 27,3 \, t \cdot h^{-1}$$

Determinación del flujo de licor ($Q_{Licor Serie}$) alimentado a la Serie.

El flujo de licor alimentado a la serie se determina a partir del producto del flujo de licor másico y el coeficiente de distribución de los flujos de pulpa para la Serie -1B.

$$Q_{Licor Serie} = G_{Licor, TC} \cdot x_{1B} \quad (3.11)$$

Este cálculo solo se realizara para la Serie-1B por que el procedimiento de es el mismo para todas las Serie.

Cálculo del flujo de licor alimentado a la Serie-1B.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.11).

$$Q_{Licor 1B} = 1106,7 \cdot 0,315$$

$$Q_{Licor 1B} = 348,7 \, t \cdot h^{-1}$$

Determinación del flujo de licor ($Q_{Licor M}$) alimentado a cada Miniserie.

El flujo de licor alimentado a cada miniserie se determina a partir del producto del flujo de licor másico y el coeficiente de distribución de los flujos pulpa para cada miniseries.

$$Q_{Licor M} = G_{Licor, TC} \cdot x_M \quad (3.12)$$

Cálculo del flujo de licor que se suministra a la M-B1y B2.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.12).

$$Q_{Licor MB1} = 348,7 \cdot 0,502$$

$$Q_{Licor MB1} = 175,0 \, t \cdot h^{-1}$$

$$Q_{\text{Licor MB2}} = 348,7 \cdot 0,498$$

$$Q_{\text{Licor MB2}} = 173,7 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Determinación del flujo de pulpa ($Q_{\text{pulpa Serie}}$) que se distribuye a cada Serie de 1ra EL.

El flujo de pulpa que se distribuye a cada serie se determina a partir de la suma del flujo de MR y el flujo de licor que son alimentados a la Serie.

$$Q_{\text{pulpa Serie}} = Q_{\text{MR Serie}} + Q_{\text{Licor Serie}} \quad (3.13)$$

Este cálculo solo se realizara para la Serie-1B por que el procedimiento de es el mismo para las demás Series.

Cálculo del flujo de pulpa que se distribuye para la Serie-1B.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.13).

$$Q_{\text{pulpa 1B}} = 54,8 + 348,7$$

$$Q_{\text{pulpa 1B}} = 403,5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Determinación del flujo de pulpa ($Q_{\text{pulpa M}}$) que se distribuye a cada Miniserie de la Serie-1B.

El flujo de pulpa que se distribuye para cada miniserie se determina a partir de la suma del flujo de MR y el flujo de licor que son alimentados a la Miniserie.

$$Q_{\text{pulpa M}} = Q_{\text{MR M}} + Q_{\text{Licor M}} \quad (3.14)$$

Cálculo del flujo de pulpa que se distribuye para la M-B1 y B2.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.14).

$$Q_{\text{pulpa MB1}} = 27,5 + 175,0$$

$$Q_{\text{pulpa MB1}} = 202,5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$Q_{\text{pulpa MB2}} = 27,3 + 173,7$$

$$Q_{\text{pulpa MB2}} = 201,0 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Determinación del flujo volumétrico de la pulpa (Q_{vpS}) que se suministra a la Serie.

El flujo volumétrico de la pulpa que se suministra a la Serie se determina a partir de la relación del flujo de pulpa suministrado a la serie dividido entre su densidad.

$$Q_{V,pSerie} = \frac{Q_{pulpaSerie}}{\rho_{PS-1raEL}} \cdot 1000 \quad (3.15)$$

Cálculo del flujo volumétrico de pulpa que se suministra a la Serie-1B a partir de la ecuación (3.15).

$$Q_{V,p1B} = \frac{403,5}{1\,167} \cdot 1000$$

$$Q_{V,p1B} = 345,7 \, m^3 \cdot h^{-1}$$

Determinación del flujo volumétrico de la pulpa (Q_{vpM}) que se suministra a las miniserie.

El flujo volumétrico de la pulpa que se suministra a cada miniserie se determina a partir del producto del flujo volumétrico de pulpa suministrado a la serie y el coeficiente de distribución de los flujos de pulpa para la Miniserie.

$$Q_{V,pM} = Q_{V,pSerie} \cdot x_M \quad (3.16)$$

Cálculo del flujo del flujo volumétrico que se suministra a la M-B1 y B2.

Este se realiza a partir de la ecuación (3.16).

$$Q_{V,pMB1} = 345,7 \cdot 0,502$$

$$Q_{V,pMB1} = 173,5 \, m^3 \cdot h^{-1}$$

$$Q_{V,pMB2} = 345,7 \cdot 0,498$$

$$Q_{V,pMB2} = 172,2 \, m^3 \cdot h^{-1}$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos por el procedimiento anteriormente explicado (ver tabla 20).

Tabla 20. Distribución de los flujos másico y volumétrico de pulpa y licor para la Serie-1B y M-B1-B2.

	Flujo del M.R; t/h	Flujo de Licor; t/h	Flujo másico de pulpa t/h	Flujo volumétrico de pulpa; m³/h
Serie-1B	54,8	348,7	403,5	345,7
M-B1	27,5	175,0	202,5	173,5
M-B2	27,3	173,7	201,0	172,2

3.3.2 Determinación del TR de las miniserie.

Después que se conoce el Q_{pulpa} que es suministrado a cada miniserie se procede a realizar el cálculo del tiempo de retención a partir del modelo matemático estadístico determinado por (Chang et al, 2015b).

$$TR = 13\,297 \cdot (Q_{pulpa})^{-0,999}$$

Cálculo del TR de la M-B1 y B2.

$$TR_{MB1} = 13\,297 \cdot (173,5)^{-0,999}$$

$$TR_{MB1} = 77,0 ; min$$

$$TR_{MB2} = 13\,297 \cdot (172,2)^{-0,999}$$

$$TR_{MB2} = 77,6 ; min$$

Cálculo el TR para cada TA de la M-B1 y B2.

Teniendo en cuenta que dichas miniseries están compuestas por cuatro TA el TR de la pulpa para cada uno de ellos será el TR de la miniserie partido entre el total de TA que la conforman, como se muestra a continuación.

$$TR_{MB1} = \frac{TR}{4} ; min$$

$$TR_{MB1} = \frac{77,0}{4} = 19,3 min$$

$$TR_{MB2} = \frac{TR}{4} ; min$$

$$TR_{MB2} = \frac{77,6}{4} = 19,4 min$$

Tabla 21. Resumen de los resultados obtenidos.

TA	Q _{MRMB1}	TR _{MB1} , min	Q _{MRMB2}	TR _{MB2}
1 - 4	27,5	19,3	27,3	19,4

3.3.3 Determinación de la velocidad específica de aire (Q_a), m³/ (t·min).

Como se analizó en el capítulo 1, este parámetro de aireación no existe en la Planta, por lo que al conocer los valores del TR de cada miniserie y por el valor conocido de V_a deseado por los tecnólogos de la Planta se determina Q_a, como se ilustra a continuación:

$$Q_a = \frac{V_a \text{ deseado}}{TR_{M-B}}$$

De acuerdo a el TR calculado anteriormente (77,0 min) para la miniserie M-B1 y el V_a deseado igual a 130 m³·t⁻¹ como se muestra a continuación:

$$Q_a = \frac{130}{77,0}$$

$$Q_a = 1,69 \text{ m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{min})^{-1}$$

De acuerdo a el TR calculado anteriormente (77,6 min) para la miniserie M-B2 y el V_a deseado igual a 130 m³·t⁻¹ como se muestra a continuación:

$$Q_a = \frac{130}{77,6}$$

$$Q_a = 1,68 \text{ m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{min})^{-1}$$

De esta forma, es posible diseñar la investigación a escala industrial para optimizar Q_a en función de la calidad de la MR como en el trabajo (Rojas, 2008), cuyos valores serán los de Q_a deseados en los dos primeros TA, por ejemplo 1,6 m³/ (t·min) con el propósito de cumplir con el régimen mixto en correspondencia con lo expresado en la figura 8.

Como el tercer y cuarto TA trabajan en régimen difusivo, entonces se puede incrementar la velocidad de aireación gradualmente en dependencia de las condiciones operacionales. A continuación se muestra un ejemplo:

Cálculo para el tercer TA de la M-B1.

$$Q_{a3}MB1 = Q_{a1 y2} + 0,1$$

$$Q_{a3}MB1 = 1,6 + 0,1 = 1,7 \text{ m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{min})^{-1}$$

Cálculo para el cuarto TA.

Para la hallar el Qa4 de la M-B1 se le suma 0,15 con el objetivo de completar los 130 m³/t.

$$Q_{a4}MB1 = Q_{a3} + 0,15$$

$$Q_{a4}MB1 = 1,7 + 0,15 = 1,85 \text{ m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{min})^{-1}$$

Cálculo para el tercer TA de la M-B2

$$Q_{a3}MB2 = Q_{a1 y2} + 0,1$$

$$Q_{a3}MB2 = 1,6 + 0,1 = 1,7 \text{ m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{min})^{-1}$$

Cálculo para el cuarto TA.

$$Q_{a4}MB2 = Q_{a3} + 0,1$$

$$Q_{a4}MB2 = 1,7 + 0,1 = 1,8 \text{ m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{min})^{-1}$$

3.3.4 Determinación del volumen de aire específico ($V_{a \text{ esp.}}$), m³/t_{MR} para cada TA.

El volumen de aire específico está relacionado con los m³ de aire por cada tonelada de MR suministrado en este caso a cada TA, para ello es necesario multiplicar la velocidad específica de aireación por el TR del mineral en cada TA, obteniéndose bajo este procedimiento la siguiente expresión:

$$V_{a \text{ esp.}} = Q_a \cdot TR_{TA} \quad (3.17)$$

A continuación se calcula el $V_{a \text{ esp.}}$ para cada TA a partir de la ecuación (3.17).

$$V_{a \text{ esp.}1MB1} = 1,6 \cdot 19,3 = 30,8 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$$

$$V_{a \text{ esp.}2MB1} = 1,6 \cdot 19,3 = 30,8 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$$

$$V_{a \text{ esp.}3MB1} = 1,7 \cdot 19,3 = 32,7 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$$

$$V_{a \text{ esp.}4MB1} = 1,85 \cdot 19,3 = 35,6 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$$

Análogamente se realiza para la otra miniserie.

$$V_{a\text{ esp.}1MB2} = 1,6 \cdot 19,4 = 31,1 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$$

$$V_{a\text{ esp.}2MB2} = 1,6 \cdot 19,4 = 31,1 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$$

$$V_{a\text{ esp.}3MB2} = 1,7 \cdot 19,4 = 33,0 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$$

$$V_{a\text{ esp.}4MB2} = 1,8 \cdot 19,4 = 34,9 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$$

Cálculo de flujo volumétrico de aire para cada TA.

Este cálculo se realiza a partir del producto del flujo de MR alimentado a cada miniserie (Ver tabla 20) y el volumen de aire específico para cada TA antes hallado.

$$G_aTA = Q_{MR} \cdot V_{a\text{ esp.}} \quad (3.18)$$

A partir de la ecuación (3.18) se calcula el $Q_{a\text{ esp.}}$ para cada TA de la M-B1.

$$G_aTA1 = 27,5 \cdot 30,8 = 847 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$G_aTA2 = 27,5 \cdot 30,8 = 847 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$G_aTA3 = 27,5 \cdot 32,7 = 900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$G_aTA4 = 27,5 \cdot 35,6 = 980 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Cálculo del G_a total suministrado a la miniserie.

$$G_aTotal = \sum G_aTA$$

$$G_aTotal = 3\,575 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Análogamente se realiza para la M-B2.

$$G_aTA1 = 27,3 \cdot 31,1 = 847 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$G_aTA2 = 27,3 \cdot 31,1 = 847 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$G_aTA3 = 27,3 \cdot 33,0 = 900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$G_aTA4 = 27,3 \cdot 34,9 = 953 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Cálculo del G_a total suministrado a la miniserie.

$$G_aTotal = \sum G_aTA$$

$$G_a Total = 3\,548\,m^3 \cdot h^{-1}$$

A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos a partir de los cálculos que fueron desarrollados en los acápites 3.3.2, 3.3.3 y 3.3.4 (ver tabla 22).

Tabla 22. Distribución de los flujos volumétrico de aire.

	TR; min	Va esp; m ³ ·(t _{MR}) ⁻¹	Qa; m ³ ·(t·min) ⁻¹	Q _{MR} t·h ⁻¹	Ga, m ³ ·h ⁻¹
TA	M-B2				
1	19,4	31,1	1,6	27,3	847
2	19,4	31,1	1,6	27,3	847
3	19,4	33,0	1,7	27,3	900
4	19,4	34,9	1,8	27,3	953
M-B2	77,6	130,0	1,68	27,3	3 548
TA	M-B1				
1	19,3	30,8	1,6	27,5	847
2	19,3	30,8	1,6	27,5	847
3	19,3	32,7	1,7	27,5	900
4	19,3	35,6	1,85	27,5	980
M-B1	19,3	130,0	1,69	27,5	3 575

Este mismo procedimiento se repite para todas las demás series y miniserias de 1ra EL- ver anexo 4.

3.4 Cálculos económicos.

A continuación se muestra el cálculo del aporte estimado de toneladas métricas de Ni + Co en la primera etapa de lixiviación y su equivalente en USD relativo al año 2014.

3.4.1 Cálculo de las TM de Ni + Co.

$$Ap_{TM} (Me) = \frac{Ley_{Me}}{100} \cdot \left[\frac{ton_{MALix}}{h} \right] \cdot \left[\frac{Incr_{MeLix y Lav}}{100} \right] \cdot \left[\frac{Me_{env.}}{Me_{Lix y Lav}} \right] \cdot 24 \frac{h}{d} \cdot 365 \frac{d}{año} \quad (3.19)$$

donde:

$\frac{Ley_{Me}}{100}$, no es más que la ley del metal en el mineral alimentado a hornos de reducción por cada 100 toneladas de mineral alimentado a lixiviación, $\frac{t_{Me}}{t_{MA Lix}}$,

$\frac{ton_{MALix}}{h}$, es la cantidad de mineral alimentado al área de lixiviación por hora, $t_{MA}Lix \cdot h^{-1}$;

$\frac{Incr_{MeLix y Lav}}{100}$, incremento del metal lixiviado y lavado por cada 100 toneladas de metal alimentado a lixiviación, $\frac{t_{MeLix y Lav}}{t_{Me}}$;

$\frac{Me_{env.}}{Me_{Lix y Lav}}$, es la cantidad de metal envasado por cada tonelada de metal lixiviado y lavado, $\frac{t_{Me env.}}{t_{Me Lix y Lav}}$.

Análisis de unidad.

$$\left[\frac{t_{Me env.}}{año} \right] = \frac{t_{Me}}{t_{MA} Lix} \cdot \left[\frac{t_{MA} Lix}{h} \right] \cdot \left[\frac{t_{Me Lix y Lav}}{t_{Me}} \right] \cdot \left[\frac{t_{Me env.}}{t_{Me Lix y Lav}} \right] \cdot \frac{h}{d} \cdot \frac{d}{año}$$

Los datos que más abajo se muestran fueron tomados del departamento de contabilidad metalúrgica adjunta a la dirección de producción, así como del tecnólogo del grupo técnico que atiende la Planta de Lixiviación y del departamento de Planificación adjunto a la Dirección de economía de la Empresa Cmdte ECG.

✓ Ley_{Me}: Ni = 1,186 %; Co = 0,106 % ton MA a Lix. = 192 t/h ó $\left[\frac{t_{MA} Lix}{h} = 192 \frac{t}{h} \right]$.

✓ Incremento Lix y Lav Me: Ni = 3 %; Co = 3 %, [el % equivale a $\frac{t_{Me Lix y Lav}}{100 t_{Me}}$].

Estos valores son menores que los incrementos y LixNi y Co promedios que se reflejaron en la Tabla 15 , ya que estos se corresponden con los valores de la operación de lavado y la potencialidad de eficiencia del Ni y Co respecto a sus extractables que el grupo técnico consideró posible.

✓ $\frac{Me \text{ envasado}}{Me \text{ Lix y Lav}}$: Ni = 0,954; Co = 0,863 $\left[\frac{t_{Me \text{ envasado}}}{t_{Me Lix y Lav}} \right]$

✓ Considerando que el fenómeno de obstrucción depende del ciclo de mantenimiento (6 ÷ 8) meses y que en un término de 2 ó 3 meses progresivamente se va obstruyendo, se asume que los incrementos

medios de Lix. y Lav. de Me tomados se manifiestan en un término de 7 meses, equivalente a 210 d/año.

Sustituyendo los datos en la ecuación (3.19) resulta:

$$Aporte\ TM\ (Ni) = \frac{1,186}{100} \cdot 192 \cdot \left[\frac{3}{100} \right] \cdot 0,954 \cdot 24 \cdot 210 = 328,5\ t/año$$

$$Aporte\ TM\ (Co) = \frac{0,106}{100} \cdot 192 \cdot \left[\frac{3}{100} \right] \cdot 0,863 \cdot 24 \cdot 210 = 26,6\ t/año$$

La suma de la t (Ni + Co) envasado = 328,5 + 26,6 = 355,1 t/año.

3.4.2 Cálculo del aporte potencial en USD/año.

$$\left[Ap. en \frac{USD}{año} \right] = t_{(Ni+Co)} \cdot [Factor\ de\ costo\ Prod\ Lix\ y\ Lav_{Me}] \cdot [Precio\ Me\ en \frac{USD}{TM}\ de\ (Ni + Co)] \quad (3.20)$$

donde:

$$t\ de\ (Ni + Co) = 355,1 \frac{t}{año}$$

$$[Factor\ de\ costo\ Prod\ Lix\ y\ Lav\ del\ Me] = 0,60$$

$$Precio\ Me = 15\ 837,4\ USD/t ; (7,184\ USD/lb); 1\ t = 2\ 204,6233\ Lb$$

Sustituyendo en la ecuación (3.20).

$$\left[Aporte\ en \frac{USD}{año} \right] = 355,1 \cdot 0,6 \cdot 15\ 837,4 = 3\ 373\ 548\ USD/año$$

Para la Serie-1B, dónde se realizaron las pruebas y se confirmó a obstrucción excesiva durante el año 2014, se estimó un aporte equivalente a la tercera parte del calculado, ya que la mayor parte del año se operó con tres Series en Primera Etapa:

$$\left[Aporte\ en \frac{USD}{año} \right] (SERIE\ I\ B) = \frac{3\ 373\ 548}{3} = 1\ 124\ 516 \frac{USD}{año}$$

Conclusiones parciales.

De acuerdo con el análisis realizado en el presente capítulo, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se fundamentó experimentalmente un nuevo método de operación por las diferencias de densidades entre las miniserias y la densidad promedio de los tanques de contacto, que cuando alcanzan valores iguales o mayores que 15 kg/m^3 , entonces, indica que es posible el comienzo del proceso de obstrucción excesiva en una de las tuberías de alimentación de dichas miniserie, y por tanto, se le da solución al objetivo específico 1.
- Se demostró mediante la comparación de los incrementos y de los lixiviados de Ni y Co en cada miniserie la existencia de un desbalance sustancial de los lixiviados de Ni y Co a favor de la miniserie M-1B - (6 - 8) % Ni y (2 - 4) % Co-, el cual se produjo gradualmente a medida que evolucionó el proceso de obstrucción en la tubería de alimentación de pulpa, y por tanto, se le da solución al objetivo específico 2.
- Se elaboró una herramienta para operar el aire a partir del modelo de TR en función del Q_{pulpa} , el cual permite calcular Q_a como nuevo parámetro de aireación, basado en el V_a ya existente para determinar los flujos volumétricos de aire en cada TA, según el deseo tecnológico de dirección del proceso.
- Se demostró experimentalmente que para diagnosticar la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniserias es más económico realizarlo en el orden siguiente: 1ro- el estudio diario de las densidades de la pulpa en el sistema TC-Series de 1ra EL para detectar los valores críticos de las densidades; 2do- realizar las pruebas de comparación de Lix. Ni-Co en las dos miniserias cuando dichos valores de densidades lo aconsejen; 3er- determinar la distribución del flujo de pulpa en cada miniserie para confirmar los resultados de los dos pasos anteriores y recalcular los flujos volumétricos de aire por miniserie y TA.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se creó un nuevo método para determinar la densidad promedio en la sección tanques de contacto, como referencia a las densidades de las miniserias de TA en la primera etapa de lixiviación, mediante el cual se puede pronosticar las posibles obstrucciones en la 1ra EL.
- Se demostró experimentalmente que cuando los valores de las diferencias de densidades de la pulpa alimentada a las miniserias respecto a las densidades promedios en la sección tanques de contacto alcanzan valores iguales o mayores que 15 kg/m^3 , las diferencias de los lixiviados de níquel y cobalto entre las dos miniserie son significativas, alcanzando valores promedio entre (6 – 8) % Ni y (2 - 4) %Co.
- ❖ Se elaboró una herramienta que conjugado con la metodología de distribución de pulpa por Serie de 1ra EL permite calcular Q_a como nuevo parámetro de aireación a través del modelo de TR en función del Q_{pulpa} alimentando a la miniserie, y basado en el V_a ya existente, para determinar los flujos volumétricos de aire en cada TA, según el deseo tecnológico de dirección del proceso.
- ❖ Se validó el orden de las partes del mencionado diagnóstico, el cual consta de tres pasos: 1ro- el estudio diario de las densidades de la pulpa en el sistema TC-Series de 1ra EL para detectar los valores críticos de las densidades; 2do- realizar pruebas de comparación de Lix. Ni-Co en las dos miniserias cuando dichos valores de densidades lo aconsejen; 3er- determinar la distribución del flujo de pulpa en cada miniserie para confirmar los resultados de los dos pasos anteriores y recalcular los flujos volumétricos de aire por miniserie y TA.
- Se demostró experimentalmente a escala de UDP la efectividad del procedimiento estudiado para el diagnóstico de la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniserias de 1ra EL, 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 Lix. Ni-Co en la Serie.

- Se fundamentó el aporte económico potencial del trabajo, el cual puede significar 355,1 t/año y un aporte anual para una serie de 1 124 516 USD.

BIBLIOGRAFÍA

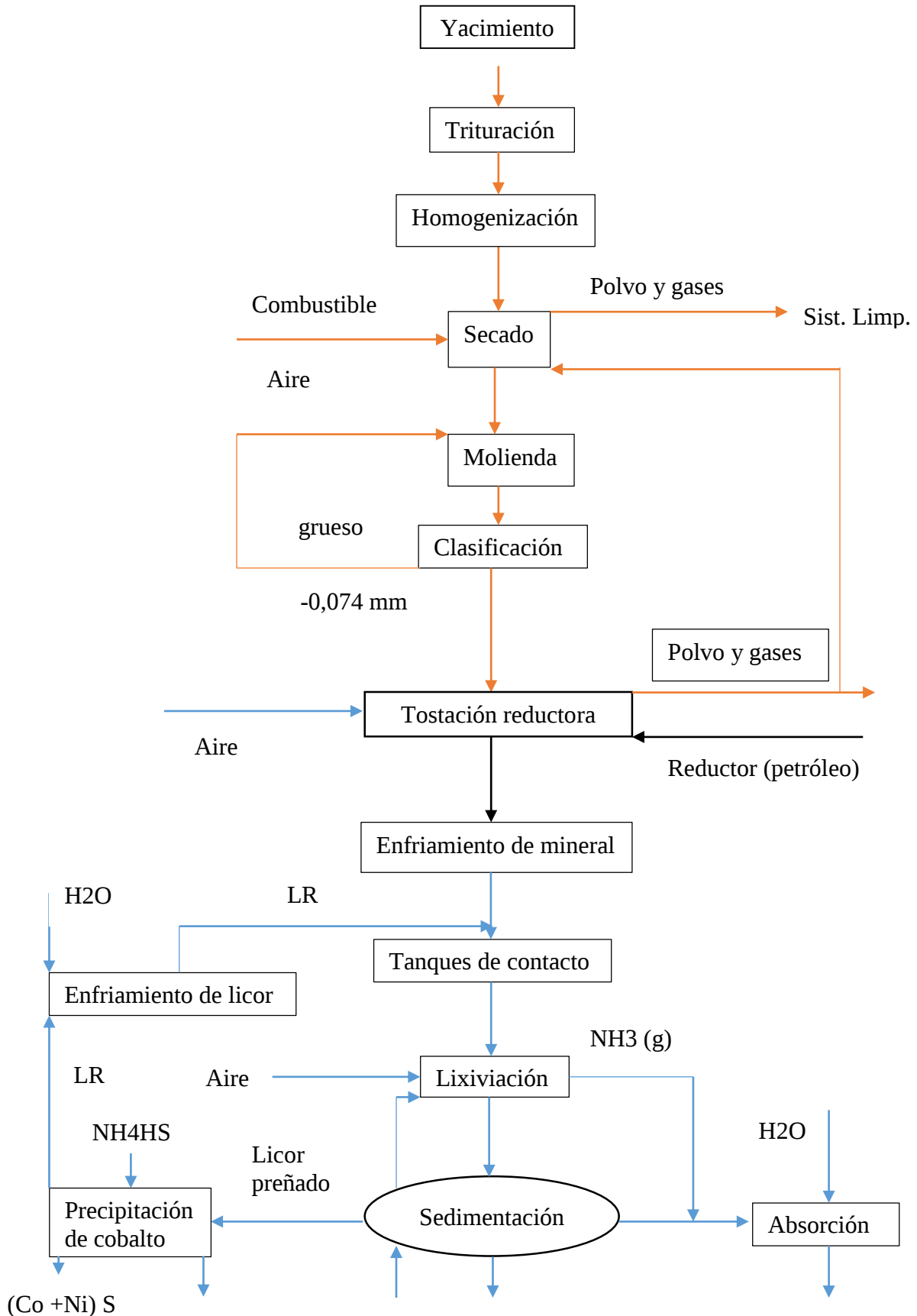
1. CASTELLANOS S. J.; GARCÍA, I. 1978. Aumento de la extracción de níquel y cobalto en el proceso carbonato amoniacal. *Minería en Cuba*, 4: 58
2. QUENEAU P.B. y WEIR D. R. 1986. Control of iron during hydrometallurgical processing of nickeliferous laterite ores, in Iron control in Hydrometallurgy, Dutrizac, J. E. & A. J. Mohemius, Eds., Ellis Horwood Ltd, Chichester,.
3. COLVIN N.; GULYAS J. W. 1979. The Marinduque Surigao Nickel Refinery. In *International Laterite Symposium*, New Orleans, AIME, N.Y, 346 – 356.
4. REID J. G. 1982. Some observations of roasting, leaching, and washing characteristics of Greenvale lateritic ore, in Hydrometallurgy, Research, Development and Plant Practice. AIME, New York, 109 - 120.
5. ZELIKMAN A. N.; VOLDMAN G. M. y BELIAEVSKAYA L. V. 1983. Teoría de los Procesos Hidrometalúrgicos. Moscú, Ed. Metalurgia.
6. CHANG CARDONA A. R. 1989. Perfeccionamiento de la tecnología de la empresa René Ramos Latour. Nicaro. Cuba. [Instituto de Minas de Leningrado], Rusia. (Tesis Doctoral), 150.
7. ROJAS VARGAS. A. 2007. 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), 108.
8. CHANG CARDONA. A. R.; RODRIGUEZ J. I.; BELOGLAZOV I. N. 1998. Cinética de la lixiviación carbonato - amoniacal del mineral laterítico reducido industrialmente bajo aireación diferenciada. *Revista Minería y Geología*, 15(3): 23 - 29.
9. CHANG CARDONA. A; MERENCIO GUEVARA, P.L.; GUERRA GONZÁLEZ, y., ROJAS VARGAS, A. 2015a. Diagnóstico de la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniseries en la lixiviación industrial del proceso “CARON” en la planta de PUNTA GORDA. Cuba. *Revista Tecnología Química*, 35(2): 125-138.

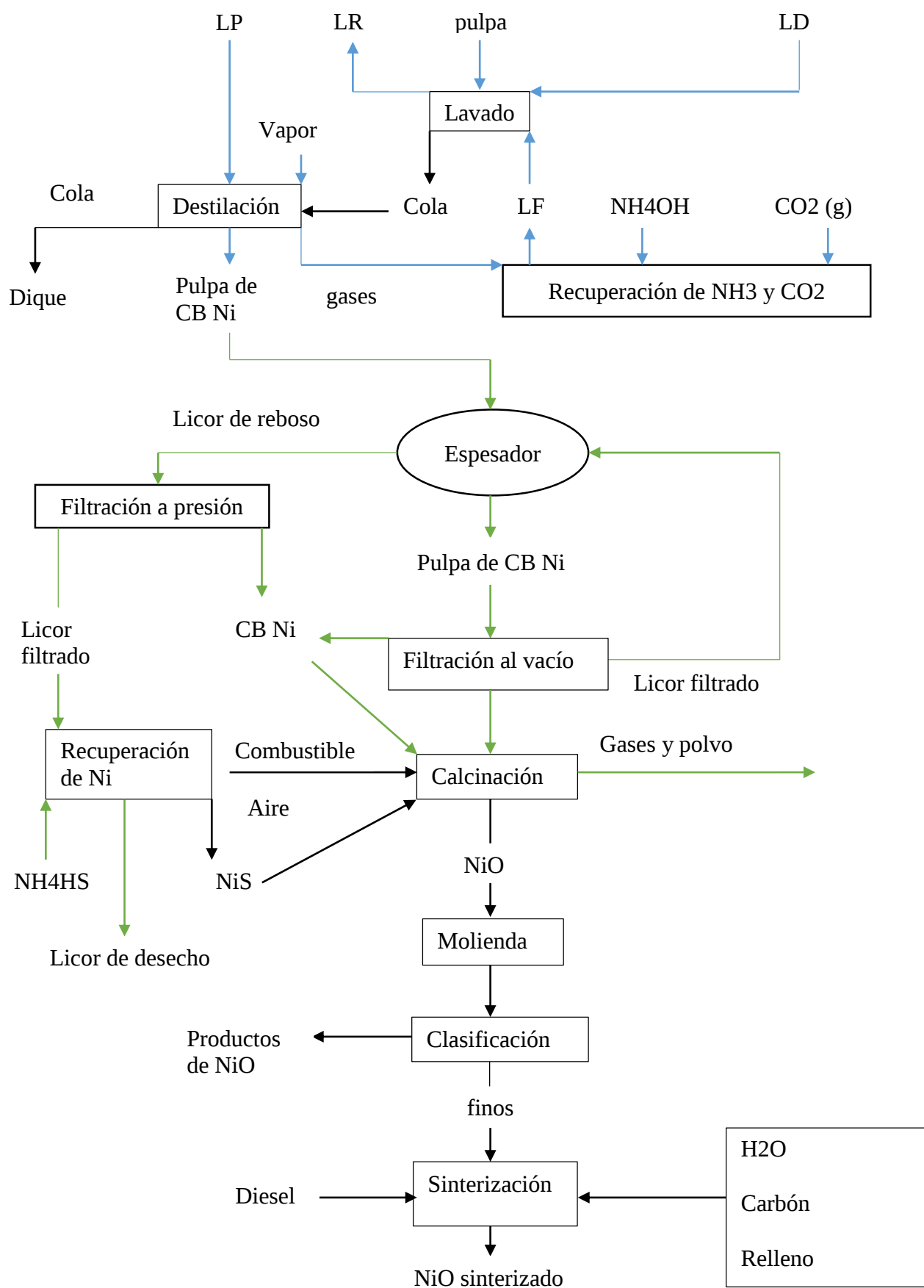
10. CHANG CARDONA, A.; MERENCIO GUEVARA, P.; GUERRA GONZÁLEZ, Y.; ROJAS VARGAS, A. 2015 b. Consideraciones sobre la determinación del tiempo de residencia de la pulpa en la lixiviación industrial del proceso "CARON en la planta de Punta Gorda, Moa, Cuba. *Revista Tecnología Química*, 35(1): 5-20,
11. CHANG CARDONA A.R.; BOBKOVSKI A.G.; RODRIGUEZ D.J.I.; BELOGLAZOV I.N. 1995. 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. En *Tsvetnie Metally*, (9): 30-34.
12. CHANG CARDONA A.R.; DOBROJOTOV G.N.; BATISTA H.R.; MARÍN P.J.; y MATAMOROS L.R.A. 1988. Optimización de la composición de los licores carbonato-amoniacaes por NH_3 y CO_2 para la Lixiviación de minerales reducidos de Ni. *Revista Minería y Geología*, 6(2): 57-61.
13. CHANG CARDONA .A.R.; RODRÍGUEZ J.I.; DOBROJOTOV G.N. 1989. Influencia del régimen de aireación sobre las extracciones de Cobalto en la primera etapa de la Lixiviación carbonato-amoniacaal de los minerales reducidos de Ni, en *Revista Minería y Geología*, 1(1): 51-62.
14. CHANG CARDONA A. R.; BOBKOVSKI A. G.; RODRÍGUEZ J. I.; BELOGLAZOV I. N. 1995. 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, *Tsvetnie Metally*, 9, 30-34.
15. CHANG CARDONA, A. y ROJAS VARGAS, A. 2009a. La lixiviación del Proceso CARON: Síntesis del conocimiento para su perfeccionamiento industrial. Parte 1. *Tecnología Química*, 29(1): 98-107.
16. CHANG CARDONA, A. y ROJAS VARGAS, A. 2009b. La lixiviación del Proceso CARON: Síntesis del conocimiento para su perfeccionamiento industrial. Parte 2. *Tecnología Química*, 29(2): 96-105.
17. CHANG, A. R. 1984. Análisis de la Solubilidad de los complejos amoniacaes de Co (II), en *Minería y Geología*. (1):173-184.
18. GRIGORIEVA K. I.; VAILLANT H. H.; CHANG CARDONA A. R.; DOBROJOTOV G. N. 1987. Solubilidad del níquel y cobalto (II) en licores carbonato-amoniacaes, *Izv. Vuzov Zvetnaya Metallurgia*, 1: 37-41.

19. ALEPUZ, H. LL.; LEGRÁ, A. L.; y LAMORÚ, A. U. 2013. Introducción de la metodología para la determinación de la variabilidad del extractable en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Informe Científico – Técnico, en *archivo técnico del CEINNIQ*, Moa,
20. CHANG CARDONA A.R. 2000. Conferencia Internacional de aprovechamiento de recursos minerales: CINAREM. *Archivo de CEINNIQ*, Nicaro.
21. CHANG CARDONA. A. R. 2004. Tecnología carbonato-amoniaco de menas lateríticas, procesos tecnológico y elementos teóricos específicos. Programa de acreditación de operadores de plantas.
22. CASTELLANOS S. J. y Otros. 1997. Intensificación del Proceso Carón. Process Ni Leach. In *17th World Mining Congress*. Tomo 2, 91-97, Acapulco.
23. CÓNUL A. M.; VAREKA JO.; ALEPUZ, H. 1967. Efecto de la concentración del NH_3 y CO_2 en la extracción del Níquel y del Cobalto”. Informe técnico. Prueba de planta Piloto, CEINNIQ, Nicaro.
24. CÓNUL A.M.; VAREKA J.O.; ALEPUZ, H. 1968. Aumento de la extracción de cobalto. Oxidación del mineral reducido en la primera etapa con oxígeno. En Informe técnico. Prueba de planta Piloto, CEDINIQ, Nicaro.
25. CINTRA, V. 2010. Manual de operaciones de la Unidad Básica de Producción Lixiviación y Lavado. Informe Técnico de la Empresa Cmdte Ernesto Che Guevara, Moa.
26. FIFFE, L. J. y GRANDA, O. 1985. Mecanismo de disolución del níquel metálico en soluciones que contienen diferentes relaciones NH_3 / CO_2 . *Revista Cubana de Química* 1(1): 31- 36.
27. PELEGRÍN, P. M., 2014. Tecnología del procesamiento de las lateritas por el método de la Lixiviación Carbonato - Amoniaco (Tecnología CARON). Tema III.

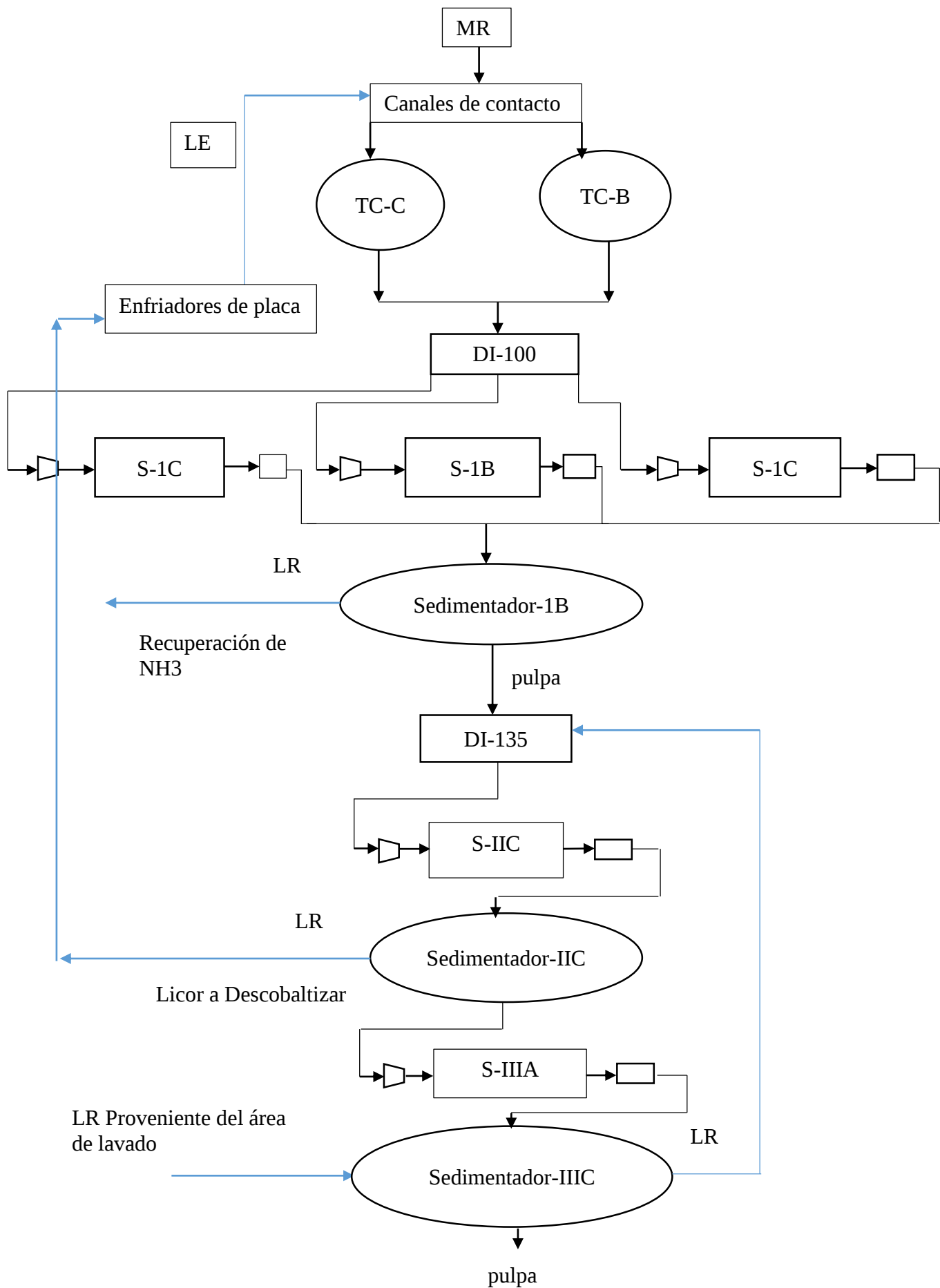
ANEXOS

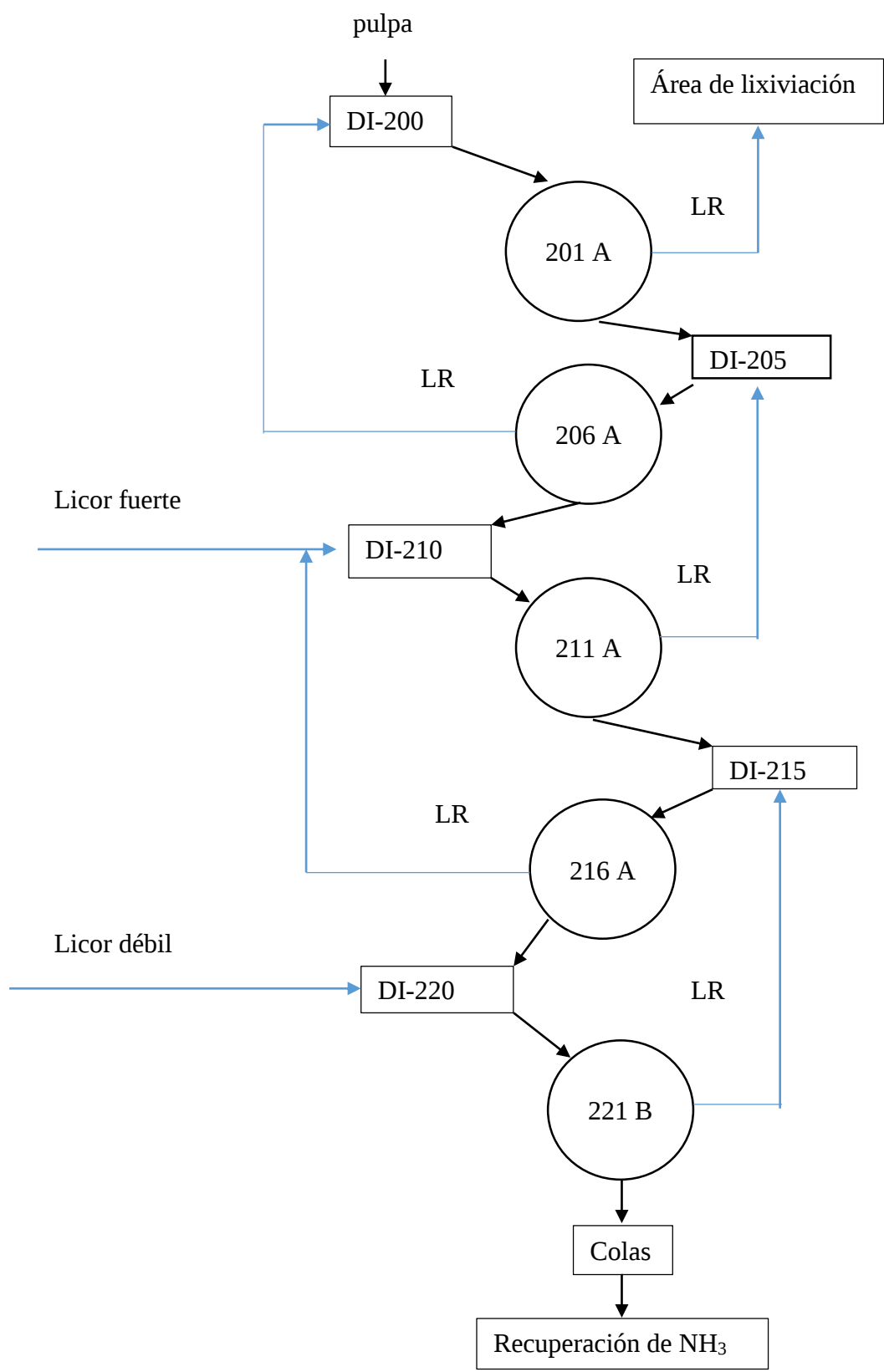
Anexo 1: Flujo tecnológico de la Empresa niquelífera “Cmdte Ernesto Che Guevara”.





Anexo 2: Esquema tecnológico de la UBP Lixiviación y lavado.





Anexo 3: Estructura del modelo de determinación de las obstrucciones mediante el control de las densidades en el sistema: TC - entrada de cada miniserie de 1raEL

Tabla 23. Densidades en TC

TURNO DE DÍA	Fecha d-mes	Horario toma de muestra	Toma-muestra en la		Toma-muestra en la		Densidad del Licor a TC
			pared TC por Pesa:		Succión Bomba por Pesa:		Promedio
			(+)27 (±16)	(+)28 (±13)	(+)30 (±6)	(+)30(±11)	
			Serie B	Serie C	Serie B	Serie C	
A	04-jun	9:20 h	1130	1140	1150	1160	1038
A	05-jun	9:20 h	1120	1130	1140	1150	1038

Tabla 24.Densidades de la entrada de cada serie y miniserie de 1raEL

TURNO DE DÍA	Fecha d-mes	Horario toma de muestra	DENSIDADES PULPAS (g/L) = (kg/m ³) EN LOS TOMA-MUESTRAS DE Ira Etapa de Lixiviación POR PESA EN TC:								
			Pesa Serie B			Pesa Serie B			Pesa Serie B		
			SERIE	Mini-Serie		SERIE	Mini-Serie		SERIE	Mini-Serie	
			IA-T	1A	2A	IB-T	1B	2B	IC-T	1C	2C
			(+)27 (±16)								
A	04-jun	9:20 h	1170	1150	1152	1180	1160	1164	1165	1156	1160
A	05-jun	9:20 h	1160	1140	1142	1160	1150	1154	1175	1146	1150

Tabla 25. Modelo para determinar la densidad promedio en tanques de contacto a través del toma muestra de la pared y de la succión

TURNO DE DÍA	Fecha d-mes	Horario toma de muestra	Toma-muestra en la Pared por pesa. Conversión a Probeta de 1 L									Toma-muestra en la Succión-Bomba por pesa. Conversión a Probeta de 1 L									DENSIDAD PROMEDIO EN TC		
			27	16	16	28	13	13	DENS PROM-Pared			30	6	6	30	11	11	DENS PROM-SuccBomba			PARA LOS 4 TOMA-MUESTRAS		
			Serie B	RESTAR	SUMAR	Serie C	RESTAR	SUMAR	SERIES	MÍN	MÁX	Serie B	RESTAR	SUMAR	Serie C	RESTAR	SUMAR	SERIES	MÍN	MÁX	SERIES	MÍN	MÁX
A	04-jun	9:20 h	1157	1141	1173	1168	1155	1181	1163	1148	1177	1180	1174	1186	1190	1179	1201	1185	1176,5	1194	1174	1162	1185
A	05-jun	9:30 h	1147	1131	1163	1158	1145	1171	1153	1138	1167	1170	1164	1176	1180	1169	1191	1175	1166,5	1184	1164	1152	1175

Tabla 26. Modelo para identificar las obstrucciones en la serie -1A a través de la diferencia de la densidad de dicha serie y miniserie respecto a la densidad promedio en TC.

		Horario	Por la Pesa de TC en la SERIE B. Conversión a Probeta de 1 L									DensProm por Miniseries			Diferencias respecto la DensProm de TC					
TURN O	Fecha	toma de	27	16	16	27	16	16	27	16	16	Para condic- no obstrucción			Para identificar la obstrucción parcial (+15)					
DE DÍA	d-mes	muestra	Serie IA-T	RESTAR	SUMAR	M-1 A	RESTAR	SUMAR	M-2 A	RESTAR	SUMAR	Serie IA	RESTAR	SUMAR	M-1 A	RESTAR	SUMAR	M-2 A	RESTAR	SUMAR
A	04-jun	9:20 h	1197	1181	1213	1177	1161	1193	1179	1163	1195	1178	1162	1194	3	-1	8	5	1	10
A	05-jun	9:30 h	1187	1171	1203	1167	1151	1183	1169	1153	1185	1168	1152	1184	3	-1	8	5	1	10

Tabla 27. Modelo para identificar las obstrucciones en la serie -1B a través de la diferencia de la densidad de dicha serie y miniserie respecto a la densidad promedio en TC.

		Horario	Por la Pesa de TC en la SERIE B. Conversión a Probeta de 1 L									DensProm por Miniseries			Diferencias respecto la DensProm de TC					
TURN O	Fech a	toma de	27	16	16	27	16	16	27	16	16	Para condic- no obstrucción			Para identificar la obstrucción parcial (+15)					
DE DÍA	d- mes	muestr a	Serie IB- T	RESTA R	SUMA R	M-1 B	RESTA R	SUMA R	M-2 B	RESTA R	SUMA R	Serie IB	RESTA R	SUMA R	M-1 B	RESTA R	SUMA R	M-2 B	RESTA R	SUMA R
A	04- jun	9:20 h	1207	1191	1223	1187	1171	1203	1191	1175	1207	1189	1173	1205	13	9	18	17	13	22
A	05- jun	9:30 h	1187	1171	1203	1177	1161	1193	1181	1165	1197	1179	1163	1195	13	9	18	17	13	22

Tabla 28. Modelo para identificar las obstrucciones en la serie -1C a través de la diferencia de la densidad de dicha serie y miniserie respecto a la densidad promedio en TC.

		Horario	Por la Pesa de TC en la SERIE B. Conversión a Probeta de 1 L									DensProm por Miniseries			Diferencias respecto la DensProm de TC					
TURN O	Fech a	toma de	27	16	16	27	16	16	27	16	16	Para condic- no obstrucción			Para identificar la obstrucción parcial (+15)					
DE DÍA	d- mes	muestr a	Serie IC- T	RESTA R	SUMA R	M-1 C	RESTA R	SUMA R	M-2 C	RESTA R	SUMA R	Serie IC	RESTA R	SUMA R	M-1 C	RESTA R	SUMA R	M-2 C	RESTA R	SUMA R
A	04- jun	9:20 h	1192	1176	1208	1183	1167	1199	1187	1171	1203	1185	1169	1201	9	5	14	13	9	18
A	05- jun	9:30 h	1202	1186	1218	1173	1157	1189	1177	1161	1193	1175	1159	1191	9	5	14	13	9	18

Anexo 4: Estructura de la herramienta operacional para determinar el flujo volumétrico de aire para cada TA.

Tabla 29. Determinación de la distribución de los flujos másico y volumétrico por serie y miniserie

DISTRIBUCIÓN DEL MR POR SERIE, (t/h)				DISTRIBUCIÓN DE LICOR POR SERIE		
I A	56,4	M-1 B	M-2B	358,7	M-1 B	M-2B
I B	54,8	27,5	27,3	348,7	175,0	173,7
I C	62,7			399,3	t/h	
TONELAJE DE PULPA DISTRIBUIDA A PRIMERA ETAPA				FLUJO VOLUMÉTRICO PULPA POR EL TONELAJE DE MR		
I A	415,1	M-1 B	M-2B	354,5	M-1 B	M-2B
I B	403,5	202,5	201,0	345,7	173,52	172,18
I C	462,0	t/h		389,5	m ³ /h	

Tabla 30. Cálculo del tiempo de residencia por Miniserie de I B

PROGRAMACIÓN DE LA ECUACIÓN DE REGRESIÓN PARA EL CÁLCULO DINÁMICO					
SERIE B Ira Lix	Coeficiente	X=Qpulpa	Exponente	Valor de	Fracc. Vol
Miniseries	libre	(m ³ /h)	Qpulpa	TR, min	Qpulpa
M-1 B	13297	173,5	-0,999	77,0	0,502
M-2 B	13297	172,2	-0,999	77,6	0,498

Tabla 31. Flujo de aire deseado

Deseado	Deseado
m ³ /(t.min)	m ³ /t
1,60	130,0
Diferencia	Diferencia
-0,01	0,0

Tabla 32. Calculo del Flujo de Aire por TA y Va a partir del Qa deseado en los dos primeros TA de las Miniseries

Fecha:	Flujo de Aire	Tonelaje MR	F. Aire esp.(Qa)	Velocidad (Va)	Tiempo Retenc
No. Turbo	m ³ /h	t/h	m ³ /t	m ³ /(t.min)	min
SERIE	7123	54,8	130,0		
M-1 B	3575	27,5	130,0	1,69	77,0
101	847	27,5	30,8	1,60	19,3
102	847	27,5	30,8	1,60	19,3
103	900	27,5	32,7	1,70	19,3
104	980	27,5	35,6	1,85	19,3
M-2 B	3548	27,3	130,0	1,68	77,6
105	847	27,3	31,1	1,60	19,4
106	847	27,3	31,1	1,60	19,4
107	900	27,3	33,0	1,70	19,4
108	953	27,3	34,9	1,80	19,4