



Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Metalúrgico

Evaluación de la Efectividad del Esquema de Precipitación de Cobalto Fase II en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

Firmo Bientz Herrera

Moa, 2010



Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Metalúrgico

Evaluación de la Efectividad del Esquema de Precipitación de Cobalto Fase II en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

Autor. Firmo Bientz Herrera

Tutores: Ing. Alexander Garcés Rignack

Ing. Roger Samuel Almenares Reyes

Moa, 2010

RESUMEN

El presente trabajo aborda la evaluación de la efectividad del nuevo circuito de precipitación de cobalto instalado en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” aplicando métodos comparativos y la interrelación de variables y respuestas del proceso tecnológico a partir de los datos obtenidos de los reportes de contabilidad metalúrgicos, teniendo en cuenta métodos estadístico para la obtención de la base de datos limpia de trabajo. Cuya información procesada permitió comprobar que el nuevo circuito de precipitación de cobalto instalado mejora la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco, arrojando valores promedios por debajo de dos. En el período analizado las operaciones con porcentajes de precipitación del cobalto en el licor de segunda etapa entre un 20 y 30 % y en primera etapa por encima del 90 % constituye la mejor variante de operación, logrando una concentración promedio de 0,025 g/L de cobalto en el licor descobaltizado sin afectar la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco ofreciendo una eficiencia metalúrgica de cobalto por encima de 34 %.

ABSTRACT

The present work approaches the evaluation of the effectiveness of the new circuit of cobalt precipitation installed in the Company "Commander Ernesto Che Guevara" applying to comparative methods and the interrelation of variables and answers of the technological process from the collected data of the metallurgical reports of accounting, considering methods statistical for the obtaining of the clean data base of work. Whose processed information allowed verifying that the new circuit of cobalt precipitation installed, improves the relation nickel cobalt in dry sulfide, throwing values averages below two. In the analyzed period the operations with percentage of precipitation of cobalt in the liquor of second stage between 20 and 30 % and in first stage over 90 % constitute the best variant of operation, obtaining a average concentration of 0,025 g/L of cobalt in the liquor descobaltized without affecting the relation nickel cobalt in dry sulfide offering a metallurgical cobalt efficiency over 34 %.

DEDICATORIA

A: Fidel Castro Ruz por dedicar toda su vida a la educación de este pueblo y del mundo.

A: Mis padres que durante su vida me dieron la mejor educación

A: El claustro de profesores que durante la carrera dieron lo mejor de si para mi aprendizaje

A: Mi esposa e hijos que me dieron tanto apoyo incondicional

A: Los compañeros de aula y de trabajo que también me dieron su ayuda

AGRADECIMIENTOS

A “Fidel Castro” por ser líder de una revolución socialista con oportunidades para todos, a mis tutores, Ing. Roger Samuel Almenares Reyes y al Ing. Alexander Garcés Rigñack por haberme guiado en la ejecución de esta investigación. Al Colectivo de Profesores del ISMM por su dedicación para que se materializara este sueño. A todos aquellos compañeros que fueron capaces de transmitir sus experiencias para alcanzar este propósito, a todos los que defendieron y lucharon por una causa justa.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. TECNOLOGÍA CARBONATO AMONIAICAL	4
1.1.1. Desarrollo de la tecnología carbonato amoniacal.....	4
1.2. ESQUEMAS TECNOLÓGICOS QUE EMPLEAN LA SEPARACIÓN DE COBALTO.....	5
1.2.1. Flujo tecnológico de la planta de separación de cobalto de la ECG.....	8
1.3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	9
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
2.1. MATERIALES Y EQUIPOS.....	14
2.2. OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS DE TRABAJO Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	16
2.3. PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA DE LA BASE DE DATOS.....	16
2.3.1. Procesamiento estadístico de la base de dato	17
2.4. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA INTERRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES	17
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	19
3.1. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE FACTORES EN LA RELACIÓN NÍQUEL - COBALTO EN EL SULFURO SECO.....	19
3.1.1. Influencia de la relación níquel - cobalto en el licor producto alimentado en la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco.....	19
3.1.2. Comportamiento de la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco obtenido y su relación con el porcentaje de precipitación de cobalto	20
3.1.3. Comportamiento de la R Ni/Co en función del porcentaje de precipitación de cobalto durante la operación del esquema de cobalto fase II	22
3.1.4. Comportamiento de la R Ni/Co en función del porcentaje de precipitación de cobalto durante la operación del esquema de cobalto simple.....	22
3.1.5. Comportamiento de la concentración de cobalto en el licor descobaltizado	23
3.1.6. Eficiencia metalúrgica del cobalto en la empresa durante las operaciones con el esquema cobalto fase II y esquema simple.....	26
3.1.7. Evaluación del régimen de precipitación de cobalto para el esquema de cobalto fase II.....	26
3.2. VALORACIÓN ECONÓMICA	28
CONCLUSIONES.....	30
RECOMENDACIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA.....	32
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

La industria minero metalúrgico de los minerales lateríticos, como principales procesos de extracción de níquel y cobalto desarrolló los procesos:

1. Lixiviación ácida a presión.
2. Lixiviación carbonato amoniacal.

La tecnología carbonato amoniacal, diseñada en sus inicios para la extracción de níquel, la presencia de cobalto en el producto final es considerada como una impureza y constituye una pérdida económica importante para el proceso.

Muchas fueron las modificaciones realizadas en el proceso con el objetivo de disminuir el contenido de cobalto. Una de las modificaciones introducida fue la precipitación selectiva del cobalto en forma de sulfuro, con los objetivos siguientes:

- Controlar la concentración del cobalto en el licor de la lixiviación carbonato amoniacal, evitando el alto contenido de cobalto en el producto final.
- Diversificar la producción de la industria obteniendo un concentrado de sulfuros de níquel y cobalto.
- Incrementar la eficiencia metalúrgica de cobalto en la empresa.

En la práctica la modificación introducida al proceso tecnológico no satisface los objetivos planteados al caracterizarse por:

- Recuperación de cobalto inferior al 90 %.
- Alta relación níquel - cobalto en el sulfuro.

Existen varias tecnologías que emplean la separación de cobalto de soluciones amoniacales, tal es el caso del proceso de Queensland, Tocantins, Comandante René Ramos Latourt, Sered y Nonoc (Sherrit). Pero sólo el proceso de Nonoc y la Comandante René Ramos Latourt han empleado la separación de cobalto en los licores de la segunda etapa de lixiviación.

En la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” (ECG) a partir de Julio de 2009 se instaló un nuevo esquema de precipitación de cobalto (cobalto fase II o segunda etapa) similar al propuesto por Sherrit, donde se trata el cobalto contenido en parte del licor de segunda etapa de lixiviación, el mismo tiene como principales objetivos:

- Obtener sulfuro seco con relación níquel - cobalto menor de 2.
- Alcanzar valores de precipitación de cobalto en primera etapa por encima del 90 %.
- Incrementar la eficiencia metalúrgica del cobalto en ECG.

Si bien es cierto que se han revisado los resultados obtenidos en el período aun no existe una evaluación de rigor con respecto al logro de los objetivos propuestos para el nuevo esquema, por tanto podemos definir como **problema:**

- No se cuenta con un estudio de rigor que permita evaluar la efectividad del esquema de precipitación de cobalto en segunda etapa instalado en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objeto de estudio:

Las principales variables y respuestas del proceso de precipitación de cobalto en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Estos elementos permiten establecer como **hipótesis de la investigación** la siguiente:

- Si se realiza una comparación de las principales variables manejadas en el proceso y los resultados obtenidos antes y después de la puesta en marcha de la precipitación de cobalto en segunda etapa es posible evaluar la efectividad del esquema instalado.

El presente trabajo tiene como **objetivo general:**

Evaluar la efectividad del nuevo circuito de precipitación de cobalto instalado en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Y como objetivos específicos:

- Determinar el comportamiento de las variables y sus respuestas en el proceso de precipitación de sulfuro.
- Determinar los principales parámetros de operación con el nuevo esquema.

Y para dar cumplimiento a los objetivos, se plantea como tareas de la investigación

- Búsqueda bibliográfica relacionada con la temática tratada en la investigación.
- Recopilación de datos del proceso antes y después de puesta en marcha. el esquema de precipitación de cobalto fase II.
- Tratamiento estadístico de los datos.
- Análisis de los resultados de la investigación.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo se describe un resumen de las principales plantas con tecnología carbonato amoniacal (Caron) que han operado u operan en la actualidad en el mundo y tratan la separación del cobalto a partir del licor amoniacal y además un resumen de los principales estudios relacionados con el tema de la separación de cobalto en solución amoniacal por medio de la precipitación selectiva.

1.1. Tecnología Carbonato Amoniacal

En este epígrafe se analizará la historia del desarrollo de la tecnología carbonato amoniacal; los esquemas tecnológicos utilizados para la aplicación de la tecnología; el flujo tecnológico del proceso de Lixiviación Carbonato Amoniacal en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” y específicamente en la planta de Separación de Cobalto.

1.1.1. Desarrollo de la tecnología carbonato amoniacal

El estudio del procesamiento del mineral limonita se remonta a los años 20, cuando el profesor Caron de Delf University, Holanda, emprendió el estudio del mineral de Dutch East Indies (Indonesia). De este trabajo dedujo que la vía de procesamiento más económica consistía en un horno de reducción seguido de una lixiviación a presión atmosférica en una solución de amoníaco – carbonato de amonio. No fue hasta 1943 en que se aplicó este proceso comercialmente, cuando la Freeport Sulphur Company de Louisiana inició el diseño y la construcción de una planta en Nicaro, Cuba. La planta fue presupuestada y administrada por el gobierno de Estados Unidos de América, como parte del esfuerzo de la guerra.

En 1947, la planta fue preservada y la Freeport fue sustituida por la Nacional Lead, quien reinició la planta en 1952 para proporcionar níquel para la guerra de Corea. Inmediatamente comenzó la construcción de diez nuevos hornos de reducción para complementar la producción de los doce construidos en 1944 (un incremento de la capacidad en un 80% a 22000 t/año de níquel). La expansión de la planta se completó en 1957. Los depósitos de Nicaro fueron parcialmente explotados por el gobierno de Estados Unidos de América y por la Freeport Sulphur Company y otros. La planta de

tratamiento, la que procesa todo el mineral de Nicaro, fue explotada por el gobierno de los EUA entre los años 1944 – 1947. En 1951 esta fue rehabilitada y operada por la Níkel Prossing Corporation con la Nacional Lead Company y Fomento de Minerales Cubanas, S.A. La producción aumentó hasta 22679,6185 t/año de níquel en 1957. En 1960 la planta fue nacionalizada pasando a ser una de las principales fuentes de divisa para el país.

1.2. Esquemas tecnológicos que emplean la separación de cobalto

La extracción de cobalto no fue contemplada en el proceso Caron original (Caron, 1950) pero, con el fin de incrementar su eficiencia, fue incorporado en las plantas de procesamiento de minerales lateríticos a partir de la década del 70 (Nonoc, Filipina; Sered, Checoslovaquia; Queensland, Australia. (Sherritt, 1992). Para lograr la descobaltización de los licores, se han puesto en explotación diferentes esquemas tecnológicos que responden a particularidades del proceso, a continuación se resumen los más importantes.

- **Esquema Sherritt de descobaltización**

Su objetivo principal es la separación máxima de cobalto de los licores productos de la lixiviación con dos fines: evitar la contaminación por cobalto del producto final y lograr aprovechar las ventajas económicas que ofrece la comercialización de este metal (Sherritt, 1992).

La tecnología se basa en dos etapas en serie de separación de cobalto en reactores tubulares utilizando sulfuro de hidrógeno como agente precipitante. En la primera etapa es descobaltizado parte del licor producto de la planta de lixiviación. En la segunda, es enriquecido el sulfuro obtenido en la etapa anterior y a la vez, es mezclado y descobaltizado el licor restante de primera etapa junto al de segunda etapa de lixiviación.

Aproximadamente 2/3 partes del licor de primera etapa de lixiviación es enviada a la segunda etapa de separación de cobalto, mientras que su licor producto es reciclado a tanques de contacto. En ambas etapas el licor a descobaltizar es mezclado, previo a su

entrada en el reactor tubular, con una recirculación del sulfuro mixto obtenido en la propia etapa.

El esquema Sheritt es utilizado en varios complejos que utilizan la tecnología carbonato amoniacal a nivel mundial: Nonoc, Filipina y PTPNI en Indonesia. Se caracteriza por su sencillez, permite obtener sulfuros mixtos con una relación másica níquel aproximadamente 1,5 - 2 y logra una eficiencia de recuperación del cobalto superior al 97 por ciento con muy bajas precipitaciones de níquel.

- **Esquema Queensland de separación de los metales**

Yabolú, Australia ha desarrollado, dentro del esquema Caron, un proceso nuevo para la separación de cobalto y níquel del licor amoniacal (Sheritt, 1992), en el que combinan la extracción por solventes y la precipitación de sulfuro.

El licor producto de la planta de lixiviación, inicialmente es tratado para la separación del manganeso y la sílice, luego se somete a calentamiento con el objetivo de eliminar el amoniaco, a causa de los perjuicios que este ocasiona en la separación del níquel con el solvente orgánico. Posteriormente la solución es clarificada, enfriada, aireada, filtrada y tratada con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para lograr el paso de los iones cobaltosos remanentes a cobálticos. Este paso minimiza las pérdidas del solvente orgánico que tiende a formar complejos muy estables de cobalto (II).

El níquel es separado a través de la extracción por solvente y el cobalto es precipitado con hidrógenosulfuro de amonio a partir del refinado, obteniéndose un sulfuro de cobalto con relación másica de níquel - cobalto igual a 1: 40. Posteriormente el níquel es eliminado de la fase orgánica usando un licor fuerte carbonato amoniacal, lográndose concentraciones aproximadas de 75 g/L de níquel que son alimentadas a posteriores etapas de concentración del metal.

Estas características, unidas a varias modificaciones tecnológicas en otras partes del proceso, hacen del complejo metalúrgico Queensland Níquel Inc., el más eficiente entre las tecnologías Caron. (Reid, 1979).

- **Esquema Outokumpu Oy de separación**

El proceso de Tocantins, Brasil, ha puesto en marcha otra variante de separación de los metales dentro del proceso Caron, la secuencia tecnológica aplicada a esta planta, hasta obtener el carbonato básico de níquel (BNC), es similar a las llevadas a cabo en los procesos Caron tradicionales, luego el carbonato básico de níquel es redissuelto en el electrolito gastado proveniente de la planta de electrólisis de níquel y pasa al proceso de separación de cobalto, donde este metal es separado a través de la extracción por solventes y continúa a posteriores etapas de electrólisis, mientras que la solución descobaltizada pasa a la planta de electrólisis de níquel (Sherritt, 1992; Catasus, 1996).

- **Esquema Sered de separación de los metales**

Sered, antigua República Checoslovaca, empleó durante muchos años un proceso de descobaltización basado en la precipitación selectiva de níquel y cobalto utilizando el sulfuro de sodio (Na_2S) como agente precipitante, de relativa abundancia en Europa. El precipitado obtenido constituía un sulfuro con una relación níquel - cobalto aproximadamente de 8 - 10, que era purificado de hierro y azufre antes de pasar a la sección de electrólisis (Hernández y col., 1974).

Como resultado de esta operación el níquel y el cobalto pasaban a formar complejos solubles en el licor y eran sometidos nuevamente a un proceso de precipitación con Na_2S , el recobrado de este proceso estaba en el orden del 70 - 80% del cobalto y el metal restante era reciclado al proceso. El sulfuro obtenido proseguía una serie de etapas hasta la electrólisis, para obtener como producto final cátodos de cobalto de alta pureza.

- **Proceso Nonoc**

El proceso de tecnología Caron, localizado en Filipinas llamado Nonoc, fue diseñado en 1920, con una capacidad de diseño de 34000 t/año de níquel y 15000 t/año como metal sólido de cobalto, teniendo una capacidad real aproximadamente de 25000 t/año de níquel y 1350 t/año de cobalto, con un porcentaje de recuperación de 72 – 75 % de níquel y de un 45 - 47% de cobalto. El mineral alimentado al proceso contiene 1,22 %

de níquel; 0,10 % de cobalto; 3 % de magnesio; 38 - 39% de hierro, con una humedad de un 3 %.

La tecnología previó la separación del cobalto, en reactores tubulares utilizando el sulfuro de hidrógeno como agente precipitante. Se utilizó como método de separación de cobalto, la precipitación de níquel y cobalto (a presión normal) como sulfuros mixtos, con una proporción de níquel cobre de (1,5 – 2), empleando como agente sulfurante, sulfuro de amonio ($\text{NH}_4)_2\text{S}$, con una eficiencia de recuperación de cobalto superior al 97 % y con una baja precipitación de níquel. Obteniendo como productos finales, níquel en forma de briqueta y polo, y sulfuro mixto de níquel y cobalto (Sherrit, 1992).

- **Esquema actual de las plantas Cubanas en operación**

El esquema actual para la separación de cobalto fue introducido, en forma de “Esquema Corto”, en la Empresa “Comandante René Ramos Latour” en 1983 y luego en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, su objetivo principal es mantener el producto final dentro de los niveles tolerados de cobalto. Tecnológicamente su estructura es similar a la primera etapa del esquema *Sherritt*.

1.2.1. Flujo tecnológico de la planta de separación de cobalto de la ECG

Para elevar la calidad de los productos finales de óxido y sinter de níquel, se realizó una modificación al proceso tecnológico carbonato amoniacal, que consiste en disminuir la concentración de cobalto en el licor, para ello es tratada la solución con hidrogeno sulfuro de amonio (NH_4HS) a determinadas condiciones para lograr una precipitación selectiva del cobalto (II) en forma de sulfuros.

El flujo tecnológico de precipitación de cobalto, inicialmente el licor producto de la primera etapa de lixiviación y lavado se bombea hacia la parte de recuperación de amoniaco para su filtración, eliminando las partículas en suspensión, luego se bombea a los tanque agitadores a los que se le adiciona pulpa recirculada del fondo de los sedimentadores en condición de semilla. En esos tanques agitados se logra el intercambio iónico del níquel del sulfuro mixto con el cobalto contenido en el licor producto, lográndose la reducción del cobalto (III) a cobalto (II) el que reaccionará con el hidrogeno sulfuro de amonio (NH_4HS) o el sulfhidrato de sodio (NaHS) en el reactor

tubular donde se produce la reacción de precipitación del cobalto (II) y parte del níquel (II) contenido en el licor, lográndose un sulfuro mixto con una relación de 1,5 – 2,5; luego se bombea a los tanques sedimentadores. El sulfuro mixto se bombea a los filtros y el reboso al proceso de destilación. La torta de sulfuro descargada de los filtros, con una humedad del 50 % se envía al proceso de secado ambiental y el licor efluente de los filtros va a la caja distribuidora que alimenta los sedimentadores.

El licor de segunda etapa de lixiviación es bombeado hasta el sedimentador para la separación de los sólidos en suspensión, este proceso de clarificación se realizara inyectando floculante diluido hasta una concentración de 0,5 g/L, el reboso clarificado es bombeado hasta los tanques colectores, una parte de este licor clarificado alrededor de 380 - 400 m³ se desvía hacia los turbos. Al primer turbo se le inyecta alrededor de 20 m³/h de la pulpa de la primera etapa de cobalto en forma de semilla, y alrededor de 30 m³/h de la pulpa de segunda etapa. De aquí el licor pasa al tanque de descarga de los turbos y de este es bombeado hacia el reactor tubular de fase II, donde se le inyecta el agente precipitante con el objetivo de lograr la precipitación del níquel y cobalto presente en los licores.

Después que la pulpa sale del reactor se alimenta a un sedimentador, donde se le inyecta floculante para lograr un mejor aglutinamiento de las partículas. El reboso del sedimentador hacia el tanque colector, para ser incorporado a las canales de contacto. La pulpa se bombea hacia los filtros para la obtención del sulfuro de níquel y cobalto como producción final de forma periódica y el licor efluente de los filtros se recircula al sedimentador de II etapa.

1.3. Antecedentes de la investigación

La separación del cobalto a partir de soluciones carbonato amoniacaes ha sido objeto de un gran número de investigaciones científicas con el objetivo de determinar la influencia de los parámetros en la precipitación de los sulfuros de níquel y cobalto a partir de las soluciones carbonato amoniacaes.

En investigaciones realizadas (Herrera y Kasavin, 1971; Suárez, 1998) se ha analizado la influencia del grado de oxidación del cobalto en la solución amoniacaes en el proceso de precipitación, pues el incremento de la relación cobalto (II) / cobalto (III) favorece la

cinética del proceso y la disminución del consumo de agente precipitante usado en la reducción del cobalto (III) a cobalto (II). Este resultado indica la importancia del control en el proceso tecnológico de la relación cobalto (II) / cobalto (III) en el licor producto de lixiviación pues el cobalto (III) constituye aproximadamente el 90% del cobalto total y ese solo se precipita una vez reducido a cobalto (II), lo cual se logra al reaccionar con el hidrógeno sulfuro de amonio.

El estudio de los procesos de precipitación utilizando el sulfuro de amonio como agente precipitante (Samalea, 1968) demostró la influencia de la concentración inicial de cobalto, el consumo de agente precipitante y la recirculación de semilla en la eficiencia del proceso de precipitación. En esta investigación se analiza la cinética del proceso para diferentes concentraciones iniciales del cobalto (0,6; 0,306 y 0,22 g/L) y para relaciones sulfuro de hidrógeno / $c(\text{Co})$ de 3,6; 2,2; 1,7 veces el estequiométrico, obteniendo como tiempo óptimo de precipitación 15 segundos, alcanzando extracciones del 99 % y relación níquel - cobalto de 5:6 en el sólido, pero no determina las ecuaciones cinéticas. También se analiza el uso del ensemillamiento, el cual permita incrementar la recuperación de cobalto y disminuir el consumo de sulfuro de hidrogeno.

La evaluación experimental del proceso de separación de níquel y cobalto (Muñoz y Col, 1995), permite analizar la influencia de los factores: gasto de reactivo y semilla en la cinética del proceso de precipitación de los sulfuros de níquel y cobalto, concluyendo que el incremento de reactivo precipitante provoca una disminución de la concentración de cobalto en el licor residual, siendo mínima con el incremento del gasto de semilla, lo cual se explica mediante la reacción de intercambio iónico entre el sulfuro de níquel y el cobalto en solución.

Investigaciones en la Empresa "Comandante René Ramos Latourt", realizadas por Hernández (1996), comprobó que el ensemillamiento favorece el intercambio de níquel precipitado y la liberación de los iones sulfuros para reducir el cobalto (III) al cobalto (II), precipitar cobre y algo de cobalto, mejorando la calidad del sulfuro al variar la relación níquel - cobalto de 2,22 a 1,09 y además disminuir el consumo de agente precipitante hasta un 30 %. Los datos experimentales muestran la disminución del contenido de níquel desde 16,89 hasta 8,79 %, sin embargo no existe un incremento del cobalto al variar de 7,6 a 8,09 %.

En trabajos realizados (Menés, 1998) en el ISMM, se analizan la influencia del uso del hidrógeno sulfuro de amonio y sulfuros de sodio en la precipitación de sulfuros, evaluándose la eficiencia del proceso en función de la relación (níquel - cobalto) en el licor de entrada y salida del proceso (licor carbonato amoniacal), relación (agente precipitante-metal), consumo específico de agente precipitante, porcentaje de ensemillamiento, porcentaje de precipitación de níquel y cobalto.

En la investigación realizada en la Universidad de Oriente sobre la precipitación de sulfuros por Suárez (1998) se analiza la influencia de los factores siguientes:

1. Modelo cinético de mezclado.
2. Concentración inicial de níquel en el licor.
3. Concentración inicial de cobalto en el licor.
4. Grado de oxidación del cobalto.
5. Consumo de agente precipitante.
6. Temperatura del licor.

En las conclusiones del trabajo se indica que la precipitación del níquel y cobalto se favorecen para las condiciones siguientes:

A. Precipitación del níquel.

- Alta concentración inicial de níquel.
- Baja concentración de cobalto.
- Alta concentración de cobalto (III).
- Alta dosificación del agente precipitante.
- Alta temperatura.

B. Precipitación de cobalto.

- Alta concentración inicial de cobalto total en el licor.
- Alta dosificación del agente precipitante.
- Alta concentración de cobalto (III).
- La temperatura no afecta la eficiencia de la precipitación.

En esta investigación no se analiza la etapa de ensemillamiento en el proceso tecnológico, en la cual tiene lugar el proceso de reducción del cobalto (III) a cobalto (II), así como la reacción de intercambio entre el sulfuro de níquel precipitado y el cobalto (II) en solución.

Chaviano (2000), analiza la influencia del ensemillamiento en la eficiencia de la precipitación de cobalto en la tecnología carbonato amoniacal, a partir de resultados experimentales obtenidos en Marinduque y en el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica. En el mismo se comparan las eficiencias de la precipitación de cobalto al utilizar una etapa previa de ensemillamiento y sin ella, indicándose que el uso de la semilla favorece el proceso al lograr la reducción del cobalto (III) a cobalto (II). El mejor resultado se obtuvo con 148,7% de recirculación de semilla al reducirse el 49,9 % del cobalto (III) y un ahorro del agente precipitante de un 31,68%. En este informe no se especifican las características del sulfuro utilizado como semilla tales como densidad, porcentaje de sólido, relación níquel - cobalto y temperatura.

Al comparar estos resultados con los ofrecidos en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, no es posible definir las causas que influyen en la efectividad del proceso, pues no se conocen las condiciones experimentales (agitación, temperatura, concentraciones de cobalto (III) y cobalto (II) en licor producto, relación níquel/cobalto en la semilla).

Otras de las investigaciones realizadas en el Instituto Superior Minero Metalúrgico (Slix. y M. Garrido, 2000) analizaron la influencia de otros factores tecnológicos: Por ciento de semilla, temperatura, agitación y tiempo de residencia en la eficiencia del proceso de precipitación obteniendo los modelos matemáticos que caracterizan el proceso. Además se corroboró que en la etapa de ensemillamiento no tiene lugar la reacción de intercambio entre el níquel precipitado y el cobalto en solución. En este estudio no se analizó el proceso de reducción de cobalto (III) a cobalto (II), ni se realizó una caracterización de los sulfuros de níquel y cobalto obtenidos en la experimentación.

Santana, Y. y López, Y (2002) realizaron un estudio del circuito de ensemillamiento en la planta de precipitación de sulfuros mixto de níquel y cobalto en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, evaluando la influencia de los factores que inciden en el proceso de ensemillamiento y su interrelación con la recuperación selectiva del cobalto. La investigación se realizó a escala industrial y de laboratorio. En la industria se hizo un muestreo en los reactores del circuito, para caracterizar las transformaciones químicas, controlándose la concentración de níquel, cobalto y otros

elementos en la fase líquida; bajo diferentes condiciones de recirculación de semilla. Se comprobó que el porcentaje de recirculación de semilla influye positivamente en el proceso de disminución del contenido de cobalto (III) en el licor.

Garrido, M. (2003), obtiene ecuaciones que muestran la influencia de variables independientes en el proceso de recirculación de sulfuros de cobalto y níquel a escala de laboratorio, siendo la más significativa la densidad de la pulpa. En el propio trabajo se recomienda continuar las investigaciones a una mayor escala para favorecer la precipitación selectiva del cobalto en la solución amoniacal.

León, M. (2008), realiza estudios a escala de laboratorio para la evaluación del efecto de la dosis de semilla y la concentración de hidrosulfuro de amonio sobre la calidad del precipitado de sulfuro de níquel y cobalto a partir de licores carbonatos amoniacales de la Empresa “Comandante René Ramos Latourt” simulando concentración del licor de segunda etapa de lixiviación, mostrando que la calidad del sulfuro está dada principalmente por la relación níquel - cobalto menor de 3,0. Los resultados mostraron que se obtiene experimentalmente sulfuro de mejor calidad que el obtenido en la primera etapa de precipitación.

Conclusiones parciales

- Nonoc y la Empresa “Comandante René Ramos Latourt” ha sido las únicas plantas de tecnología carbonato amoniacal que han operado con el esquema propuesto por Sheritt para la precipitación selectiva del cobalto a partir de solución carbonato amoniacal con el esquema de precipitación de los licores de segunda etapa de lixiviación.
- Los estudios realizados sobre el proceso de separación de cobalto a partir de soluciones amoniacales sirven de apoyo para la aplicación del nuevo esquema instalado.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales y equipos

En la tabla 1 se indican las características fundamentales de las materias primas y productos del proceso de precipitación de sulfuros.

Tabla 1. Características de las materias primas y productos del proceso de precipitación

Materiales		Características							
Licor filtrado a descobaltizar									
Sólido	Concentración (g/L)						Densidad (g/cm³)		
ppm	c(Ni)	c(Co)	c(Fe)	c(NH₃)	c(CO₂)	1,02			
20	9-11	0,25-0,5	0,03	>75	>37,5				
Licor producto del fondo del sedimentador									
Sólido	Contenido (%)					Precipitación de Ni	Precipitación de Co		
ppm	c(Ni)	c(Co)	c(Fe)	c(NH₃)	c(CO₂)	%	%		
20	8-9	0,03	0,03	>72	>35	12	88		
Sulfuros mixtos									
Sólido	Contenido (%)							Tamaño	Densidad
%	c(Ni)	c(Co)	c(Fe)	c(Mg)	c(Mn)	c(Zn)	c(Cu)	mm	g / cm³
15	15-24	6-10	0,5	0,05	0,01	0,01	2,5	0,008	3,5
Licor de segunda Etapa de Lixiviación a descobaltizar									
Sólido	Concentración (g/L)						Densidad		
ppm	C(Ni)	C(Co)	C(Fe)	C(NH₃)	C(CO₂)	g / cm³			
40	4,5-5,5	0,10-0,34	0,03	>78	>35	1,02			

En la tabla 2 se indican las características principales de las operaciones metalúrgicas en la separación del cobalto mediante las etapas siguientes:

1. Recirculación de sulfuros.
2. Precipitación de sulfuros.
3. Separación líquido – sólido.
4. Filtración y Secado de sulfuros precipitados.

Tabla 2. Características de las operaciones metalúrgicas en la separación del cobalto

Operaciones tecnológicas			
Ensemillamiento	Tanque deensemillamiento		
	Tiempo de retención (min)	% de Ensemillamiento	Agitación rpm
	28	150	80
Precipitación	Reactor tubular		
	Tiempo de residencia (s)	Temperatura en (°C)	Relación NH ₄ HS/Cobalto
	6	38	0,98
Separación líquido – sólido	Sedimentador		
	Densidad de fondo (g / cm ³)	Sólidos en reboso (ppm)	Floculantes (g / t) de sulfuros
	1,08	20	150
Filtrado de sulfuros	Filtro prensa		
	Tiempo de filtrado (h)	Tiempo de lavado (min)	Presión (MPa)
	30	15	5,6

2.2. Obtención de las muestras de trabajo y diseño experimental

Para la realización de esta investigación fueron seleccionados los datos registrados diariamente en la planta de Recuperación de Cobalto de la ECG, en el período comprendido entre los meses de enero de 2009 hasta marzo del 2010, es decir, seis meses antes y seis meses después de la puesta en marcha del esquema de cobalto fase II.

Los datos fueron tomados de la base de datos en Excel de los reportes metalúrgicos de la empresa, así como del programa Citect, un software que almacena datos del proceso continuamente y en el cual se pueden realizar búsquedas precisas de información en los periodos deseados.

La base de datos de partida obtenida muestra los resultados de relación níquel - cobalto en el licor producto y en el sulfuro seco, los porcentajes de precipitación de níquel y cobalto, eficiencia metalúrgica de cobalto y concentración de licor descobaltizado, se organizaron por meses según los datos promedios del reporte diario, a los cuales se le realizó una limpieza estadística.

2.3. Procedimiento de limpieza de la base de datos

En el trabajo fue necesario efectuar la limpieza de la base de datos a través de tres pasos de filtrado. En el primer paso se evitó incluir los meses de julio agosto y septiembre que no era representativa del régimen típico de operaciones de la planta de Recuperación de Cobalto debido al período de estabilización de la operación con la introducción del esquema de cobalto fase II.

El segundo paso de limpieza se realiza a través del software EXCEL, el cual permitió eliminar los períodos que no cumplían con los valores habituales del proceso, relacionados con afectaciones por trabajos de mantenimiento.

El tercer paso del procedimiento de limpieza de la base de datos es el más importante, consistió en eliminar los turnos que no entraban en el intervalo confiable de relación níquel - cobalto en el licor producto y en el sulfuro seco, los porcentajes de precipitación de níquel y cobalto, la eficiencia metalúrgica de cobalto y la concentración de licor descobaltizado debido a problemas de operación o errores de instrumentación.

Es necesario destacar que cuando se detectan los valores incongruentes, se eliminan los restantes valores correspondientes a la fila.

La comprobación de la calidad de la limpieza efectuada se realiza a través del análisis estadístico, cuyo procedimiento se expone en el acápite siguiente.

2.3.1. Procesamiento estadístico de la base de dato

Por cada una de las filas de la base de datos se toman los valores dudosos de acuerdo a las incongruencias que motivaron a realizar la limpieza de la base de datos según se explicó en el acápite anterior. Se calculó el valor promedio de los datos sin tener en cuenta los valores dudosos para cada caso, o sea, para relación níquel - cobalto en el licor producto y en el sulfuro seco, los porcentajes de precipitación de níquel y cobalto, la eficiencia metalúrgica de cobalto y la concentración de licor descobaltizado. Se determinó la desviación cuadrática media sin incluir los valores dudosos en las filas donde existían los errores apreciables. Se calculó la t -students y se compararon los resultados con la t-students tabulada y los valores de esta que eran mayores que la t -students calculada se incluyeron en los cálculos y por lo tanto se mantuvieron en la base de datos. Los demás que no cumplían con esta regla se eliminaron de la base de datos. Con estos valores se calcularon los promedios y se comenzó a realizar las interrelaciones de las variables y respuestas del proceso.

2.4. Metodología utilizada para interrelación entre las variables

Para la evaluación de los resultados se aplica el método comparativo, se toman datos de operación de la base de datos limpia, correspondientes al periodo de enero a junio de 2009, anterior al inicio de la evaluación, ver tabla 3; los que se comparan con los valores correspondientes al periodo de octubre a marzo de 2010, valores medios por meses donde se opera el esquema de segunda etapa. Ver tabla 4.

Para validar la metodología se empleó los procedimientos básicos de la estadística descriptiva con la obtención final de la matriz de correlación. (Ver anexos 2; 3; 4 y 5)

Tabla 3. Resumen de los principales indicadores del esquema de precipitación de cobalto simple

Meses Evaluados	Relación Ni/Co (%)		% de precipitación		Producción (t)		
	R Ni/Co Sulfuro seco	R Ni/Co SC-1	Ni	Co	Ni	Co	Ni+Co
Enero 09	2,092	25,129	7,84	94,19	164,655	78,725	243,38
Febrero 09	2,264	25,31	8,29	92,69	169,755	74,969	244,724
Marzo 09	2,495	23,16	9,9	91,95	210,782	84,484	295,266
Abril 09	3,253	31,82	8,89	86,91	225,211	69,236	294,447
Mayo 09	3,265	31,46	9,29	89,52	213,474	65,392	278,866
Junio 09	3,482	33,98	9,1	88,9	170,549	48,978	219,527

Tabla 4. Resumen de los principales indicadores del esquema de precipitación de cobalto fase II

Meses Evaluados	Relación Ni/Co (%)		% de precipitación		Producción (t)		
	R Ni/Co en sulfuro	R Ni/Co en licor producto	Ni	Co	Ni	Co	Ni+Co
Octubre 09	2,107	32,75	5,92	86,37	153,028	72,628	225,656
Noviembre 09	2,430	35,53	6,6	87,35	185,068	76,171	261,239
Diciembre 09	2,226	36,82	5,74	63,15	176,858	79,445	256,303
Enero 10	1,937	32,65	3,41	58,28	156,479	80,768	237,247
Febrero 10	1,753	31,17	1,92	56,04	123,897	70,671	194,568
Marzo 10	1,989	33,89	3,83	57,35	176,055	88,514	264,569

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El análisis se realiza teniendo en cuenta los procedimientos que se describen en el capítulo anterior.

3.1. Análisis de la influencia de factores en la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco

En el esquema de precipitación de sulfuros existen varios factores que inciden directamente en la relación níquel - cobalto, sin restarle importancia a otros, los que se tuvieron en cuenta en esta investigación son los siguientes:

- Porcentaje de precipitación del cobalto contenido en el licor producto.
- Relación níquel - cobalto en el licor producto alimentado al esquema de precipitación.

3.1.1. Influencia de la relación níquel - cobalto en el licor producto alimentado en la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco

En la figura 1, se muestra el comportamiento de la relación níquel - cobalto ($R_{Ni/Co}$) tanto en el sulfuro seco obtenido como en el licor producto alimentado al proceso, para seis meses de operación en un caso con esquema de cobalto fase II y en otro con esquema simple. Para facilitar el análisis de los resultados se divide el mismo en dos partes la primera con los tres primeros meses para cada esquema y luego con los tres meses restantes esto debido a la complejidad de factores que inciden en el proceso.

En los primeros tres meses para ambos esquemas de operación se puede apreciar valores de $R_{Ni/Co}$ en el sulfuro seco obtenido bastante similares en un rango de 2,1 a 2,5 en cambio el comportamiento de la $R_{Ni/Co}$ en el licor producto alimentado no fue el mismo, para el caso de los meses con el esquema sencillo se puede apreciar que se alcanzaron valores por debajo de 25 muy inferiores a la media normal de operación que se encuentra entre 30 y 35, mientras que para los tres meses con el esquema de cobalto fase II el valor de la $R_{Ni/Co}$ en el licor producto fue superior a 33. Esto indica que el esquema de precipitación de cobalto en los licores de II etapa logró mantener

valores de $R_{Ni/Co}$ en el sulfuro seco próximos a dos aun bajo condiciones desfavorables debido a altas relaciones en el licor producto alimentado evidenciando la efectividad del mismo.

En los tres últimos meses analizados para cada caso ocurre otro fenómeno interesante en este caso las $R_{Ni/Co}$ en el licor producto alimentado son similares (entre 31 y 34) sin embargo se puede apreciar diferencia significativa en cuanto a la $R_{Ni/Co}$ en el sulfuro seco para el esquema sencillo esta se mantuvo entre 3,3 y 3,5 mientras que durante el funcionamiento del esquema de cobalto fase II se alcanzaron valores inferiores a dos, esto se puede considerar como un importante logro del esquema instalado.

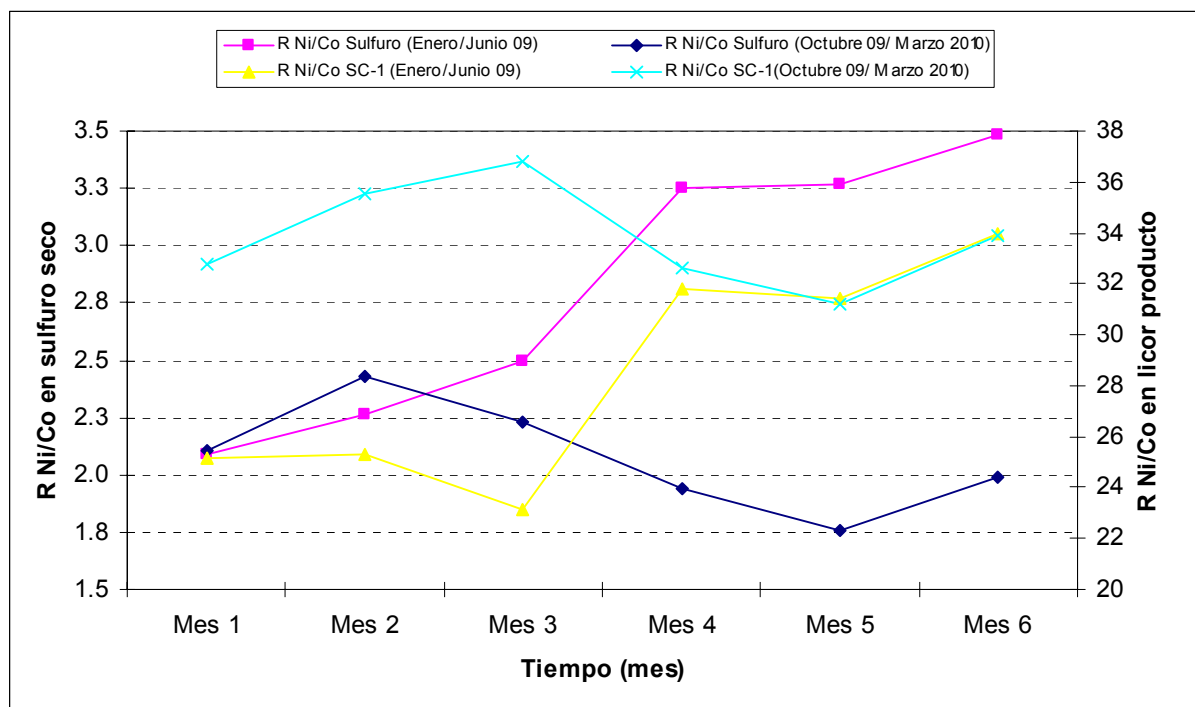


Figura1. Comportamiento de la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco y en el licor producto alimentado al proceso con y sin esquema de precipitación de cobalto en II etapa.

3.1.2. Comportamiento de la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco obtenido y su relación con el porcentaje de precipitación de cobalto

En la figura 2, se muestra el comportamiento de la $R_{Ni/Co}$ en el sulfuro seco obtenido y su relación o dependencia con el % de precipitación de cobalto a partir del licor producto de primera etapa para seis meses de operación en un caso con esquema de

cobalto fase II y en otro con esquema simple, para facilitar el análisis de los resultados analizaremos el comportamiento de cada uno de los esquemas instalados en el período correspondiente.

Durante los seis meses de operación con el esquema simple se aprecia un incremento de la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco a pesar de la disminución gradual aunque no muy significativa del % de precipitación de cobalto a partir del licor producto esto obedece a los cambios ocurridos en las concentraciones del níquel y cobalto en el licor producto (R Ni/Co en la SC-1) analizadas anteriormente.

Durante los seis meses de operación con el esquema de cobalto fase II se aprecia que hubo un incremento gradual de la precipitación de cobalto en primera etapa y aún así la R Ni/Co en el sulfuro seco tuvo una clara tendencia a la disminución incluso con valores por debajo de dos, no siendo el caso analizado en el esquema simple donde la R Ni/Co en el licor favoreció los resultados, en este caso la relación en los licores se mantuvo alta durante los seis meses analizados lo cual indica la efectividad del esquema.

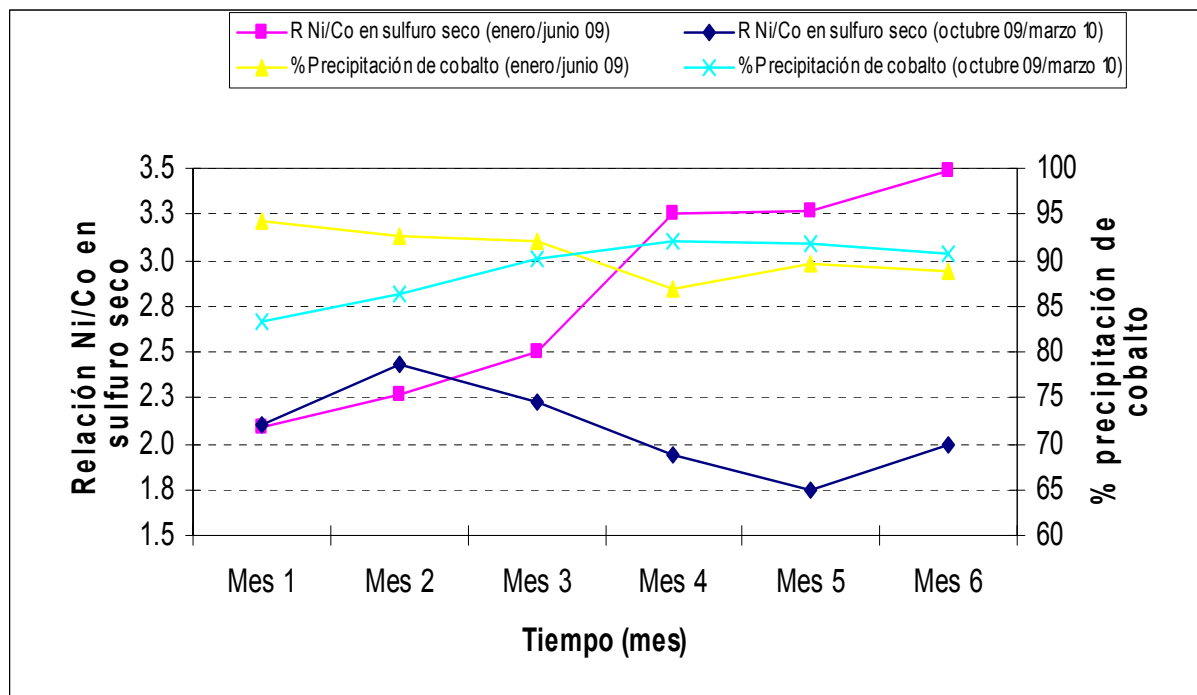


Figura 2. Comportamiento de la relación Ni/Co en el sulfuro seco y % de precipitación de Cobalto en el licor producto alimentado con y sin esquema de precipitación de cobalto en segunda etapa.

3.1.3. Comportamiento de la R Ni/Co en función del porcentaje de precipitación de cobalto durante la operación del esquema de cobalto fase II

En la figura 3 se muestra el comportamiento de la R Ni/Co en función del porcentaje de precipitación de cobalto durante la operación del esquema de cobalto fase II. Se puede apreciar como a pesar del aumento de la precipitación de cobalto en el licor de primera etapa la R Ni/Co en el sulfuro seco muestra una tendencia a la disminución, esto se debe a la efectividad del esquema de ensemillamiento con los licores de segunda etapa ya que la R Ni/Co en el licor producto en el período analizado se mantuvo en valores con ligeras variaciones pero siempre elevados (mayor de 34).

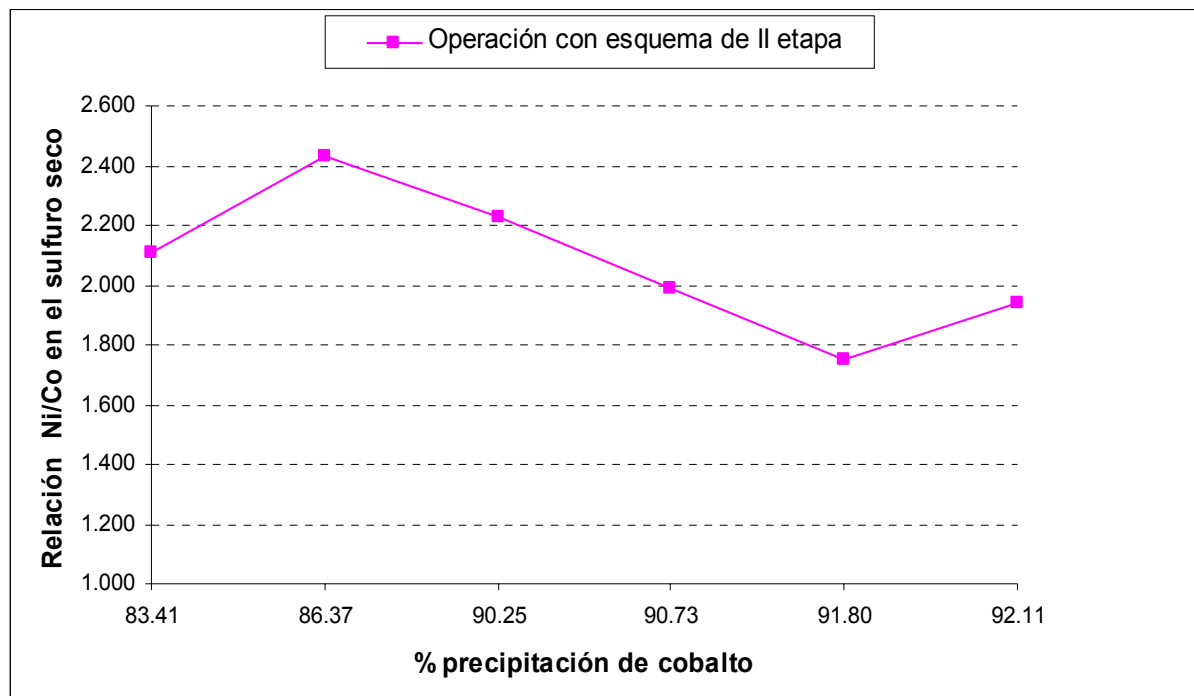


Figura 3. Relación Ni/Co en el sulfuro seco vs. % de precipitación de cobalto durante la operación con cobalto fase II.

3.1.4. Comportamiento de la R Ni/Co en función del porcentaje de precipitación de cobalto durante la operación del esquema de cobalto simple

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la R Ni/Co en función del porcentaje de precipitación de cobalto durante la operación del esquema de cobalto simple. Se puede apreciar como a pesar del aumento de la precipitación de cobalto en el licor de primera etapa la R Ni/Co en el sulfuro seco muestra una tendencia a la disminución, esto se

debe a la R Ni/Co en el licor producto en el período analizado tuvo variaciones significativas.

Aunque las figuras 3 y 4 reflejan curvas similares se debe señalar que no obedecen a las mismas causas ya que fueron períodos de tiempo diferentes con condiciones de operación igualmente diferentes. Nótese además que a pesar de la similitud en los valores de los por cientos de precipitación manejados existe una notable diferencia en la R Ni/Co en el sulfuro seco que llega casi a ser de una unidad.

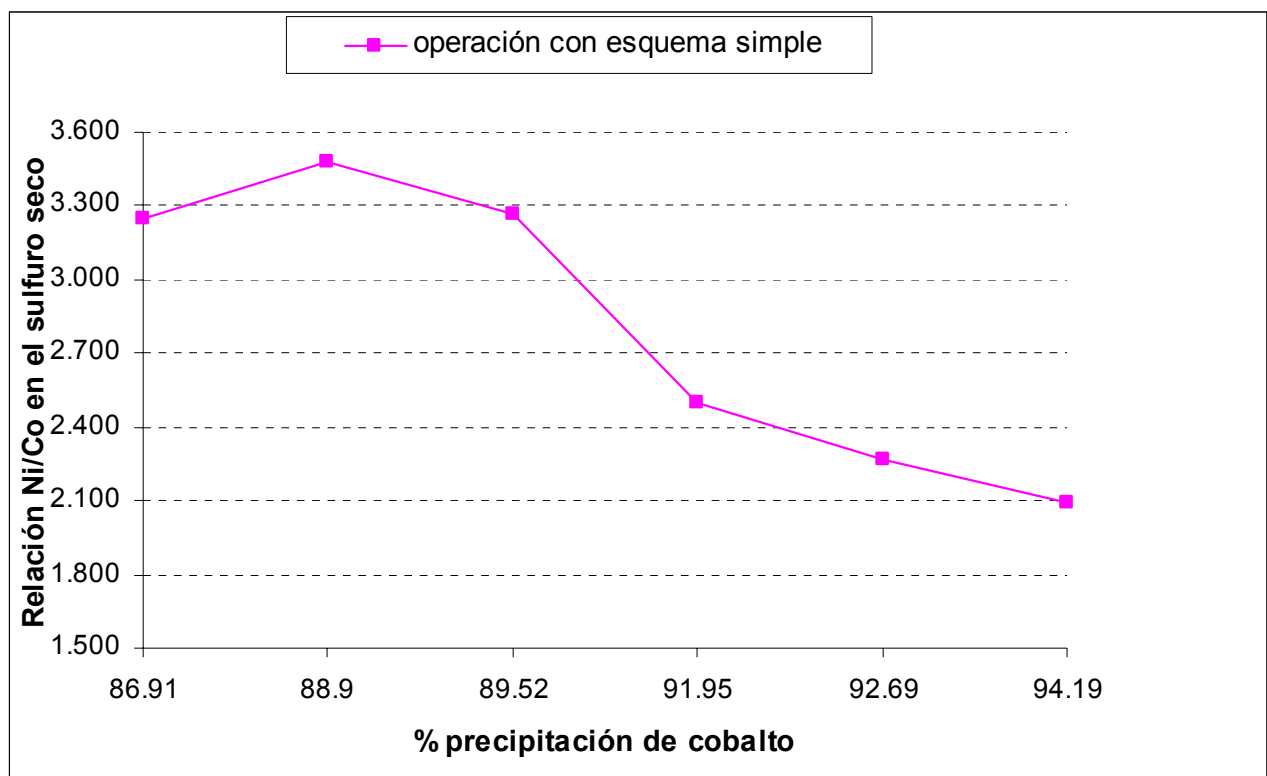


Figura 4. Relación Ni/Co en el sulfuro seco vs. % de precipitación de cobalto durante la operación con el esquema simple de cobalto.

3.1.5. Comportamiento de la concentración de cobalto en el licor descobaltizado

En la tabla 2 se refleja el comportamiento de la concentración de cobalto en el licor descobaltizado. Este es uno de los objetivos fundamentales del nuevo esquema instalado. Históricamente con el esquema instalado la precipitación del cobalto en el licor de primera etapa no sobrepasa el 90 % porque esto trae aparejado un incremento significativo de la R Ni/Co en el sulfuro seco y además una disminución considerable en

la concentración de níquel en el licor producto descobaltizado por encima de 1 g/L de diferencia.

Tabla 5. Comportamiento de la concentración de cobalto en el licor descobaltizado

Meses con operación de esquemas sencillos	Relación Ni/Co en sulfuro	Relación Ni/Co en licor producto	% de precipitación cobalto	Licor producto a destilación	
				Concentración de cobalto g/L	Masa de cobalto t
Enero 09	2,092	25,129	94,19	0,019	4,912
Febrero 09	2,264	25,31	92,69	0,023	5,725
Marzo 09	2,495	23,16	91,95	0,028	7,251
Abril 09	3,253	31,82	86,91	0,038	9,556
Mayo 09	3,265	31,46	89,52	0,031	7,39
Junio 09	3,482	33,98	88,9	0,03	6,267
Octubre 09	2,11	32,75	83,41	0,042	9,082
Noviembre 09	2,43	35,53	86,37	0,033	7,218
Diciembre 09	2,23	36,82	90,25	0,025	5,84
Enero 10	1,94	32,65	92,11	0,023	5,82
Febrero 10	1,75	31,17	91,80	0,024	4,98
Marzo 10	1,99	33,89	90,73	0,027	6,78

Sólo en casos como el ocurrido en los meses de enero, febrero y marzo del 2009 donde la R Ni/Co en el licor producto alimentado es baja se logran altos valores de precipitación de cobalto con el esquema simple sin alterar significativamente la R Ni/Co en el sulfuro seco. En estos casos se pueden alcanzar concentraciones de cobalto en el licor descobaltizado de hasta 0,23 g/L lo que se traduce en pérdidas alrededor de 5,9 t/mes de cobalto por este concepto teniendo en cuenta que el cobalto en el Sínter es considerado una impureza y como tal su precio es nulo y en el caso del sulfuro de níquel aunque se recupera es a un precio inferior.

Los meses de abril a mayo constituyen un reflejo de las condiciones normales de operación, es decir, relación níquel - cobalto en el licor producto por encima de 30, y se pueden observar los resultados obtenidos en cuanto a relación en el sulfuro seco incluso con menores porcentajes de precipitación de cobalto. Bajo estas condiciones lo más que se pudo lograr fue un promedio de 0,033 g/L de cobalto en el licor de salida y enviando a destilación hasta 9 t/mes de cobalto.

Comparando los resultados analizados anteriormente con los de obtenidos durante los meses de enero a febrero del 2010 podemos apreciar que se obtienen mejores resultados incluso bajo condiciones más difíciles de operación como se ha analizado con anterioridad, con el funcionamiento del nuevo esquema se logró una concentración promedio de 0,025 g/L de cobalto en el licor descobaltizado sin afectar la relación en el sulfuro seco y una cantidad de cobalto en el licor descobaltizado próxima a las 5 t/mes.

De aquí se desprende que las ventajas obtenidas con la operación del nuevo esquema se traducen en mantener altos niveles de precipitación de cobalto a pesar de mantenerse la R Ni/Co en el licor producto por encima de 30 esto garantiza una baja concentración de cobalto en el licor descobaltizado y a su vez una disminución del cobalto bombeado a Recuperación de NH_3 o dejado de precipitar con el consecuente incremento de la producción de cobalto en el sulfuro mixto y aumento de la eficiencia metalúrgica de cobalto en la empresa al recuperar solo por este concepto entre 2 y 4 t/mes de cobalto.

Otro aspecto importante a resaltar es cuando se compara la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco obtenido como promedio con uno y otro esquema bajo condiciones similares. En este caso podemos analizar los resultados de los meses de abril a junio del 2009 y enero a marzo del 2010 según tabla 2, en el primer caso se obtiene como promedio una relación de 3,3 y en cambio con el esquema de cobalto fase II la relación promedio es de 1,88 para una diferencia equivalente a 1,42 este número obtenido no es más que la cantidad de níquel dejada de precipitar por unidad de cobalto envasada y que será enviada a la planta de Calcinación y Sínter en forma de carbonato hasta obtener el níquel en forma de Sínter con un mayor valor agregado que si se vendiera en el sulfuro mixto.

3.1.6. Eficiencia metalúrgica del cobalto en la empresa durante las operaciones con el esquema cobalto fase II y esquema simple

En la figura 5 se comparan los resultados de la eficiencia metalúrgica del cobalto en la empresa durante las operaciones con ambos esquemas. Aunque se debe señalar que este indicador no solo corresponde a la operación de cobalto de hecho no es el más significativo ya que obedece a los resultados obtenidos en la Planta de Hornos de Reducción y Lixiviación los cuales tienen el mayor peso en la eficiencia metalúrgica de la empresa. No obstante la tabla refleja valores en la eficiencia de cobalto para el tiempo de operación del nuevo esquema con un incremento sostenido incluso a valores superiores a 33 %.

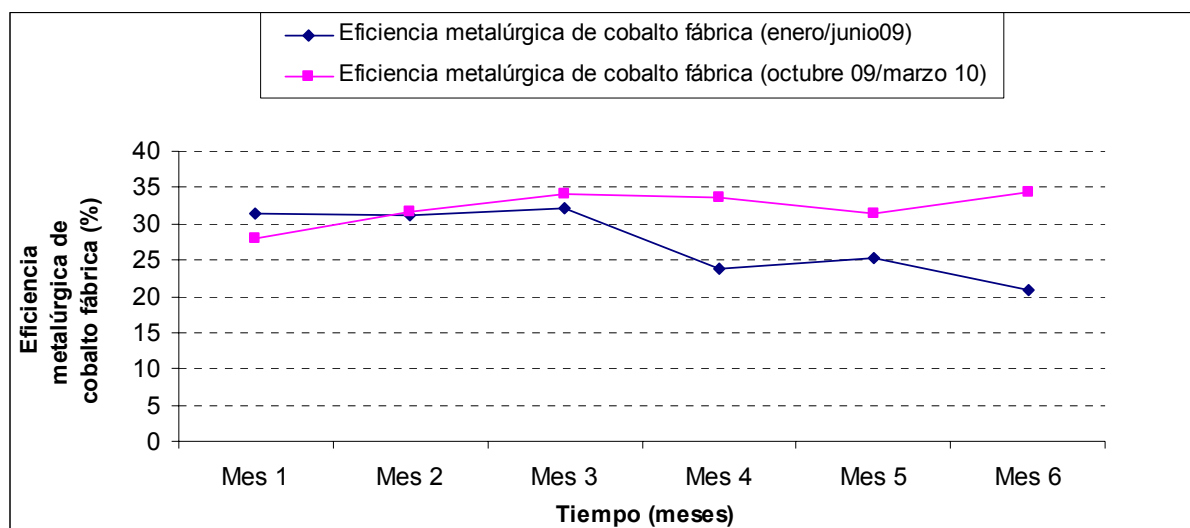


Figura 5. Comparación de la eficiencia metalúrgica de cobalto en la empresa en ambos esquemas.

3.1.7. Evaluación del régimen de precipitación de cobalto para el esquema de cobalto fase II

El esquema de precipitación de cobalto fase II instalado y puesto en marcha en ECG a partir del mes de Julio del 2009 ha sufrido variaciones en el régimen de operaciones basado fundamentalmente en los porcentajes de precipitación de cobalto tanto en el licor de primera como de segunda etapa. Inicialmente durante la arrancada del mismo y durante un período de 4 meses es decir de julio a octubre del 2009 se operó bajo la condición de elevado porcentaje de precipitación de cobalto en el licor de segunda

etapa por encima de 80 % y un discreto porcentaje de precipitación del mismo en primera etapa inferior al 85 %. Durante los meses de noviembre y diciembre de 2009 esta operación se modificó bajándose el porcentaje de precipitación en segunda etapa hasta un 40 % e incrementando el de primera hasta el 90 % y en un tercer momento comprendido entre los meses de enero a marzo de 2010 se volvió a modificar el porcentaje de precipitación de cobalto en segunda etapa, se mantuvo entre 20 y 30 % y en primera se alcanzaron valores por encima del 90 % de precipitación.

Analizando los resultados obtenidos en cada uno de estos períodos de tiempo (tabla 3) se puede ver que durante los meses de enero a marzo del 2010 se alcanzaron los mejores valores en cuanto a R Ni/Co en el sulfuro seco siempre por debajo de dos y con porcentaje de precipitación de cobalto en primera etapa por encima de 90 %. Esto cumple satisfactoriamente con una de las premisas del nuevo esquema instalado que es lograr el mayor porcentaje de precipitación de cobalto en primera etapa sin afectar la R Ni/Co en el sulfuro seco. Esto trae aparejado además la menor presencia del elemento en la solución descobaltizada, como se puede apreciar se alcanzan valores de concentración de 0,02 g/L de cobalto.

Tabla 3 Resultados de operación con esquema de cobalto fase II

Meses evaluados	R Ni/Co en el sulfuro seco	R Ni/Co en el licor producto (SC-1)	% de precipitación		% precipitación					Licor producto a destilación	
					I etapa		II etapa		R Ni/Co	Cobalto	
			Ni	Co	Ni	Co	Ni	Co	L II etapa	g/L	t
Julio 09	3,23	37,25	7,73	85,33	11,82	84,92	4,62	85,11	33,26	0,04	8,04
Agosto 09	2,97	41,45	7,01	84,21	11,39	83,58	6,06	81,97	32,44	0,03	6,64
Septiembre 09	2,72	37,90	6,89	86,91	10,56	83,37	7,50	89,64	30,23	0,04	9,05
Octubre 09	2,11	32,75	5,92	86,37	5,62	83,41	5,69	89,42	27,03	0,04	9,08
Noviembre 09	2,43	35,53	6,60	87,35	12,88	86,37	6,43	74,80	25,87	0,03	7,22
Diciembre 09	2,23	36,82	5,74	63,15	13,79	90,25	4,52	38,87	23,62	0,03	5,84
Enero 10	1,94	32,65	3,41	58,28	11,84	92,11	2,30	27,33	22,76	002	5,82
Febrero 10	1,75	31,17	1,92	56,04	11,33	91,80	1,69	21,94	22,49	0.02	4,98
Marzo 10	1,99	33,89	3,83	57,35	14,00	90,73	1,93	19,31	20,89	0,03	6,78

Según el análisis anterior con los resultados obtenidos hasta la fecha podemos concluir que en el esquema de cobalto fase II instalado en ECG es recomendable operar la precipitación del cobalto en el licor de II etapa entre un 20 y 30 % y en primera etapa por encima del 90 %.

3.2. Valoración económica

De los resultados obtenidos durante la comparación de los esquemas de precipitación instalados tenemos:

Se ha logrado incrementar la producción de cobalto por concepto del aumento del porcentaje de precipitación en primera etapa por encima de 90 en al menos 2 y 4 t mes, teniendo en cuenta el precio actual del metal esto representa entre 79200 y 158,400 dólares al mes sin considerar los gastos de la instalación y la penalización del producto.

Se ha logrado dejar de precipitar como promedio 1,42 t de Ni por tonelada de cobalto envasado como sulfuro mixto, si tenemos en cuenta que como promedio en lo que va de año existe una diferencia de precios del Níquel contenido en el sulfuro mixto con relación al contenido en el Sínter de \$ 3682.7 esto se traduce en \$ 5229.4 /t de cobalto envasado. Para un mes donde la producción puede alcanzar las 70 t de cobalto esto puede alcanzar el valor de \$ 366060.

Sumando ambos aportes se puede establecer, que como promedio con los resultados obtenidos por el nuevo esquema durante un mes de producción se aporta un total de \$.524460

Conclusiones parciales

- Se pudo comparar los resultados obtenidos durante las operaciones para los dos esquemas analizados.
- Con el esquema de cobalto fase II se pueden lograr una R Ni/Co en el sulfuro, inferior a dos, pese a manejar altos valores de R Ni/Co en el licor producto y de porcentajes de precipitación de cobalto en primera etapa.
- El nuevo esquema instalado influye positivamente mejorando la relación Ni/Co en el sulfuro seco.
- Existe una elevada dependencia en el esquema simple de precipitación de cobalto entre la R Ni/Co en el licor y en sulfuro seco.
- Se establece con los resultados analizados la mejor variante de operación para el nuevo esquema propuesto.
- La valoración económica del nuevo esquema instalado arrojó resultados satisfactorios.

CONCLUSIONES

Una vez finalizado el trabajo se considera que el esquema de precipitación de cobalto fase II evaluado, es efectivo, lo cual se demuestra a través de los resultados siguientes:

- El nuevo circuito de precipitación de cobalto instalado en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara mejora la relación níquel - cobalto en el sulfuro seco, se obtienen valores promedios por debajo de dos, a pesar de manejar altos valores de relación de níquel - cobalto en el licor producto y de porcentajes de precipitación de cobalto en primera etapa.
- Se establece en el período analizado que la mejor variante de operación para el nuevo esquema propuesto, es cuando se opera con porcentajes de precipitación del cobalto en el licor de segunda etapa entre un 20 y 30 % y en primera etapa por encima del 90 %.
- Con el funcionamiento del nuevo esquema se logró una concentración promedio de 0,025 g/L de cobalto en el licor descobaltizado sin afectar la relación en el sulfuro seco y una cantidad de cobalto en el licor descobaltizado próxima a las 5 t/mes.
- La eficiencia metalúrgica de cobalto del nuevo esquema de precipitación refleja un incremento sostenido para el tiempo de operación, incluso, con valores superiores a 33 %.

RECOMENDACIONES

- Realizar una evaluación en un período más amplio de tiempo de funcionamiento del esquema tecnológico de precipitación de cobalto fase II, utilizando mayor número de variables.
- Analizar la influencia de los factores: efectividad del circuito de ensemillamiento y grado de oxidación del cobalto contenido en el licor, sobre la relación níquel – cobalto en el sulfuro.

BIBLIOGRAFÍA

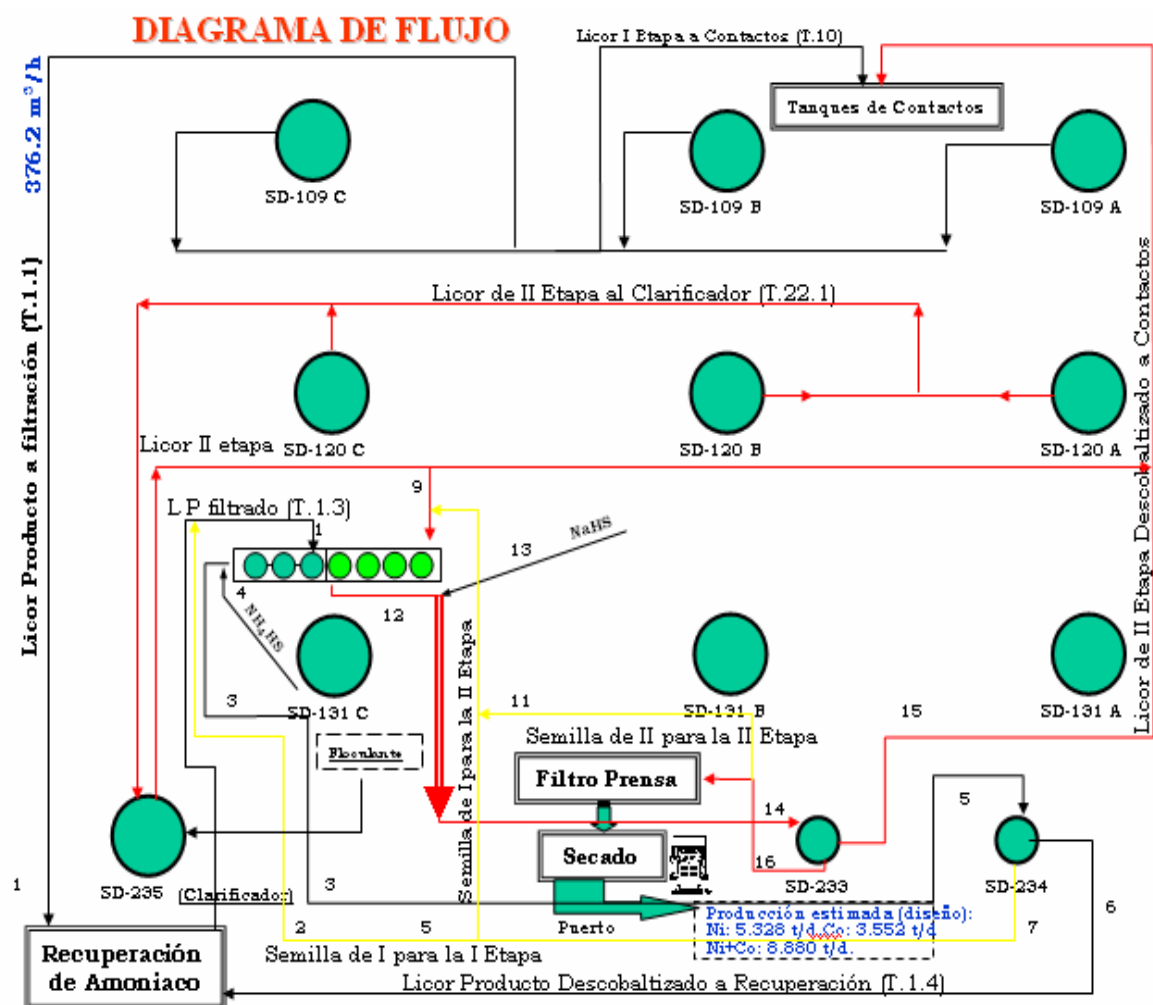
- AKHTAR, K Y I. ul Haq. 2003: Preparation and characterization of uniformly coated particles by homogeneous precipitation (cobalt compounds on nickel compounds). Advanced Powder Technology. Vol. 12. N° 3. P 291-456.
- ALPIZAR. J. 1990: Introducción a la elaboración matemática de los resultados experimentales. Universidad de la Habana.
- CASTELLANOS, J. 1974. Metalurgia extractiva de los minerales oxidados de níquel. La Habana.
- CHANG, A. R. y M. Sosa. 1987: Consideraciones sobre la termodinámica del proceso de lixiviación carbonato amoniacal, 2da parte. Revista Minería y Geología. Vol. 5 No 1.
- CHAVIANO, J. 2000: Informe técnico. Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
- Fiffe, J. Cinética de la disolución del níquel y el cobalto metálicos en soluciones carbonato-amoniacaes. Tesis de Doctorado, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. 1985.
- GARCIA, G. 1998: Diferencia en los contenidos de sulfuro enriquecido. Informe técnico. Empresa Comandante René Ramos Latourt.
- Garrido, M y M. Slix. 2000: Precipitación de sulfuros a partir de soluciones amoniacaes. Trabajo de Diploma. I.S. M.M. Moa.
- GARRIDO, M. 2000: Precipitación de sulfuros a partir de soluciones carbonato amoniacaes. Tesis en opción al título de Master en Metalurgia Extractiva. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 80 p.
- GARRIDO, M. O. 2000: Lovaina y E. Fernández. Precipitación de sulfuros a partir de soluciones carbonato amoniacaes. Revista Minería y Geología No 3-4. Volumen XVII
- GARRIDO, M. O. 2001: Lovaina y E. Fernández. Precipitación de sulfuros a partir de soluciones carbonato amoniacaes. Revista Minería y Geología No 3-4. Volumen XVIII.

- GONZÁLEZ, L. 1991: Cinética de la precipitación de sulfuros de cobalto de los licores amoniacales que contienen níquel. Informe técnico. Centro de Investigación del níquel. Moa.
- HERNÁNDEZ, R. 1983: Comportamiento del sulfuro precipitado en la planta de lixiviación para el control del cobalto. Informe técnico. Empresa Comandante René Ramos Latourt.
- HERNÁNDEZ R. 1996: Optimización del circuito de precipitación de cobalto en el licor producto utilizando la tecnología de ensemillamiento en reactores con agitación. Informe Técnico. Planta Piloto, Nicaro.
- HERRERA, V Y KASAVIN, J. 1971: Separación de níquel y cobalto por el método de formación de sulfuros en las soluciones carbonatos amoniacales. Informe Técnico. C.I.P.I.M.M.
- HERRERA, V. 1964: Reporte técnico del proceso carbonato amoniacal. Informe Técnico. Planta Piloto, Nicaro.
- KASAVIN, J. 1970: Reporte de investigación. Nicaro, N0 518.
- LEÓN, M. 2008: Evaluación a escala de laboratorio del ensemillamiento para la precipitación de cobalto en los licores de 2da etapa de lixiviación de la empresa Comandante René Ramos Latourt. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.
- LOBAINA, O. y col. 1998: Pruebas a escala de banco para analizar el uso del sulfuro de sodio en la precipitación de sulfuros. Informe de investigación. C.I.L
- LOBAINA, O. y col. 1994: Reporte técnico. C.I.L
- LÓPEZ, Y E y, SANTANA. 2002: Estudio del circuito de ensemillamiento de Cobalto en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Informe técnico. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.
- MAGAÑA, M. 2001: Revisión del circuito de precipitación de cobalto de RRL. Informe Técnico. Planta Piloto, Nicaro.
- MITROFANOV, S. 1982: Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Mir. Moscú.

- REYES, E y ÁLVAREZ, M. 1989: Comportamiento estadístico de la oxidación de cobalto (II) en licores industriales empleando óxido de níquel. Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente.
- RODRÍGUEZ C, GARCÍA A. 1994: Determinación del consumo de varios agentes precipitantes para la separación del cobalto. Informe Técnico. Planta Piloto, Nicaro.
- RODRÍGUEZ C, GARCÍA A. 1996: Propuesta para esquema provisional de separación de cobalto. Informe Técnico. Planta Piloto, Nicaro.
- RODRÍGUEZ C. 1984: Separación de níquel y cobalto en los licores de la fábrica Cmdte, René Ramos Latour". Informe Técnico. Planta Piloto, Nicaro.
- ROMERO, U. 2008: Influencia del aire en la eficiencia de la precipitación selectiva del cobalto en la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.
- SAMALEA, G. 1978: Separación de cobalto en soluciones amoniacales con H_2S . La Minería en Cuba. Vol 4, N°. IV.
- SHERRIT G. 1992: Caron process study. Technical evaluation.
- SLIX, M. 2000: Precipitación de sulfuros a partir de soluciones carbonato amoniacales. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.
- SUÁREZ, A. 1998: Análisis del proceso de precipitación de sulfuros a partir de los licores carbonato amoniacales. Tesis en opción a Master en ingeniería de procesos. Universidad de Oriente.
- TORRES, A Y L. CORRALES. 2000: Aumento de la productividad de la planta de separación de cobalto. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.
- ZELIKMAN, A; G.; VOLDMAN Y L. VELIAEVSKAYA. 1975: Teoría de los procesos Hidrometalúrgicos. Editorial Metalurgia. 492p.

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de flujo tecnológico de separación de cobalto en la ECG.



Anexo 2. Resultado de la estadística descriptiva aplicada a los resultados obtenidos del esquema simple de precipitación de cobalto.

[illegible]

Anexo 3. Resultado de la estadística descriptiva aplicada a los resultados obtenidos del esquema de precipitación de cobalto fase II.

[illegible]

Anexo 4. Matriz de correlación para esquema de precipitación de cobalto simple.

			R Ni/Co		Precipitación I etapa		Producción	Consumo	L descobaltizado.		Ef. Metalg.	Extract.	Ley Ind.
			-	-	%		t	t	g/L	t	%	t	%
			<i>Sulfuro</i>	<i>L. producto</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Co</i>	<i>H2S</i>	<i>Co</i>	<i>Co</i>	<i>Co</i>	<i>Co</i>	<i>Co</i>
R Ni/Co	-	Sulfuro	1.000										
	-	L. producto	0.929	1.000									
Precipitación I etapa	%	Ni	0.499	0.146	1.000								
		Co	-0.920	-0.838	-0.448	1.000							
Producción	t	Co	-0.814	-0.913	-0.083	0.621	1.000						
Consumo	t	H2S	0.777	0.714	0.360	-0.822	-0.389	1.000					
L descobaltizado.	g/L	Co	0.830	0.672	0.580	-0.964	-0.406	0.824	1.000				
	t	Co	0.608	0.424	0.540	-0.836	-0.089	0.780	0.943	1.000			
Ef. Metalg.	%	Co	-0.949	-0.988	-0.227	0.860	0.920	-0.675	-0.704	-0.448	1.000		
Extract.	t	Co	-0.025	-0.163	0.201	-0.297	0.534	0.465	0.491	0.744	0.163	1.000	
Ley Ind.	%	Co	-0.124	-0.405	0.535	-0.145	0.598	0.073	0.384	0.604	0.326	0.780	1.000

Anexo 5. Matriz de correlación para esquema de precipitación de cobalto fase II.

			R Ni/Co		Producción	Precipitación I etapa		Precipitación II etapa		R Ni/Co	Consumo	L descobaltizado.		Ef. Metalg.	Extract.	Ley Ind.
			-	-	t	%		%		-	t	g/L	t	%	t	%
Operación Cobalto fase II			Sulfuro	L. producto	Co	Ni	Co	Ni	Co	L II etapa	H2S	Co	Co	Co	Co	Co
R Ni/Co	-	Sulfuro	1.000													
	-	SC-1	0.830	1.000												
Producción	t	Co	0.062	0.359	1.000											
Precipitación I etapa	%	Ni	0.120	0.490	0.611	1.000										
		Co	-0.585	-0.158	0.385	0.687	1.000									
Precipitación II etapa	%	Ni	0.882	0.556	-0.337	-0.333	-0.850	1.000								
		Co	0.659	0.212	-0.474	-0.653	-0.969	0.920	1.000							
R Ni/Co	-	L II etapa	0.603	0.170	-0.618	-0.677	-0.901	0.902	0.974	1.000						
Consumo	t	H2S	0.053	0.453	0.950	0.657	0.407	-0.340	-0.520	-0.654	1.000					
L descobaltizado.	g/L	Co	0.452	0.026	-0.358	-0.761	-0.984	0.746	0.921	0.841	-0.387	1.000				
	t	Co	0.469	0.091	-0.086	-0.673	-0.925	0.677	0.842	0.722	-0.155	0.955	1.000			
Ef. Metalg.	%	Co	-0.081	0.372	0.772	0.910	0.805	-0.525	-0.786	-0.806	0.786	-0.835	-0.668	1.000		
Extract.	t	Co	-0.346	-0.504	0.112	-0.327	-0.252	-0.230	0.032	-0.125	0.105	0.387	0.418	-0.332	1.000	
Ley Ind.	%	Co	0.570	0.160	-0.467	-0.644	-0.981	0.842	0.943	0.882	-0.445	0.957	0.855	-0.823	0.277	1.000