

TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE PRECIPITACIÓN DE SULFUROS DE NÍQUEL Y COBALTO SEPARADOS DEL LICOR DE DESECHO WL

Mercedes Sosa Martínez*, Pedro Rafael Bassas.**

*Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), **Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ)

msosa@ismm.edu.cu

En el trabajo se realiza un estudio acerca del comportamiento termodinámico de los sulfuros de níquel y cobalto precipitados con sulfuro de sodio, que tiene lugar en la primera etapa de una variante de tratamiento aplicada al licor de desecho WL de la Empresa PSA - Moa Níquel. S.A.

El estudio se inicia con el cálculo termodinámico del pH de precipitación de los sulfuros de níquel, cobalto, cobre y cinc, se obtienen valores entre 0 y 1 para el cobre y cinc, por encima de 1,5 unidades para el níquel y cobalto. A partir de los resultados se definen los valores experimentales para dicho parámetro.

Posteriormente se calculan los valores de variación de energía libre para las reacciones de precipitación de los sulfuros a 25 y 55 °C, los que demuestran la posibilidad termodinámica de ocurrencia de las mismas presentando mayores valores a la temperatura de 55 °C.

Para analizar la influencia de la temperatura y la velocidad de agitación en el proceso de precipitación de los sulfuros de níquel, cobalto, cobre y cinc, se aplicó un diseño de experimento factorial completo a dos niveles, se realizaron cuatro pruebas experimentales con tres réplicas cada una. Según los resultados experimentales las extracciones para el níquel oscilan entre 70 – 80 % y para el cobalto alcanzan valores entre 80 – 90 %.

A partir de los resultados del diseño de experimentos se determinan los modelos estadístico-matemáticos que describen el comportamiento de los sulfuros de níquel y cobalto, y se comprueba la influencia positiva que ejercen los factores temperatura y velocidad de agitación sobre el proceso de precipitación, bajo las condiciones preestablecidas.

Los métodos de análisis químicos empleados fueron Espectrofotometría de Absorción Atómica y Difracción de Rayos X, los que permitieron definir el comportamiento del proceso de precipitación.

El tratamiento aplicado al licor de desecho WL, permite la recuperación de parte del níquel y el cobalto contenidos en el mismo, lo que contribuye a disminuir el poder contaminante que presenta éste.

Palabras clave: licor de desecho, WL, medio ambiente, metales, sulfuros.

In this work it is carried out a study about the thermodynamic behavior of the nickel and cobalt sulphurs, precipitated with PSA. Moa Nickel corp.

The study begins with the thermodynamic calculation of the pH of precipitation of the nickel, cobalt, copper and zinc sulphurs, sulphur of sodium, process that takes place during the first stage of the variant of treatment used with the waste liquor WL of Company of the values obtained vary between 0 and 1 for the copper and zinc, and above 1,5 units for the nickel and cobalt. Based on the results the experimental values for this parameter have been defined.

Afterwards the values of variation of free energy are calculated for the precipitation reactions of sulphurs at 25 and 55°C. They demonstrate the thermodynamic possibility of the occurrence of these reactions. They present bigger values at temperature of 55 °C.

To analyse the influence of the temperature and the speed of agitation in the process of precipitation of the nickel, cobalt, copper and zinc sulphurs, a design of complete factorial experiment was applied at two levels, four experimental tests, with three reply for each one, were carried out. Of according to the experimental results the extractions of nickel oscillate between 70 –80 % and for the cobalt they reach values between 80 –90 %.

The statistical – mathematical models are determined based on the results of the design of experiments. Models describe the behavior of nickel and cobalt sulphur. It is proved the positive influence of such factors like temperature and speed of agitation make on the precipitation process, under the present conditions.

The spectrophotometer of atomic absorption and diffraction of X Rays, were employed as methods of chemical analysis. They allowed to define the behaviour of the precipitation process.

The treatment applied to the waste liquor WL, allows the recovery of part the nickel and cobalt contained in it. This permits to diminish the polluting power of WL.

Keys Words: Waste liquor, WL, environment, metals, sulfurs

Introducción

En la industria niquelífera PSA – Moa Nickel S.A, situada al nordeste de la provincia de Holguín, tiene lugar el tratamiento de los minerales lateríticos, por vía ácida, con la obtención de sulfuros de níquel más cobalto como producto final. En la tecnología de lixiviación ácida se generan una serie de

desechos gaseosos, sólidos y líquidos, entre los que se encuentra el licor WL.

El cual presenta a la salida de la fábrica, un pH entre 1.2 y 1.4, una temperatura de salida cerca de 90 °C y una concentración apreciable de níquel, aluminio, cromo y otros metales. Como puede observarse en la tabla 1.

Tabla 1: Composición química del licor de desecho WL, g / L.

Ni	Co	Cu	Zn	Fe	Cr	Al	Mn	Mg	H ₂ SO ₄
0.03	0.002	0,0009	0,009	0,2102	0,36	4,18	0,947	2,069	3,58

Las características enumeradas determinan la contaminación que provoca el licor de desecho, lo que ha motivado que a lo largo de los años se hayan desarrollado una serie de investigaciones encaminadas a solucionar la problemática planteada, tanto desde el punto de vista medio ambiental como tecnológico.

Diferentes trabajos que han abordado dicha temática se resumen en los siguientes:

1.- Neutralización del licor mediante el empleo de diferentes agentes neutralizantes, como: pulpas de arenas coralinas, mineral de serpentina níquelífera, amoníaco (Landazury y col 1995, Morrell 1990, Gafarov 1978). (Lasser 1973, Sifontes 1974, Casado y García 1986), (Granda 1987, Quemanc y Show 1976, Martín y Leal 1988, Alfonso 1995).

2.- Recirculación del licor al proceso productivo (Sovol 1981, Gafarov 1978).

3.- Recuperación de los valores metálicos presentes en el licor, utilizando: Zeolitas naturales (Pérez 1991), métodos químicos (García 1982, Fonseca 1988, Morrell 1990, Calzadilla 1994, Barrabia 1997, Legan 1990).

Una variante de tratamiento para el licor de desecho WL por vía química, es el presente estudio, donde se analiza el comportamiento termodinámico de los sulfuros de níquel y cobalto en el proceso de precipitación con sulfuro de sodio a presión atmosférica y temperaturas de 25 y 55 °C, que tiene lugar en la primera etapa del tratamiento del licor.

El trabajo tiene como objetivo: Realizar un estudio acerca del comportamiento termodinámico de los sulfuros de níquel y cobalto en el proceso de precipitación con sulfuro de sodio a presión atmosférica.

Condiciones de trabajo

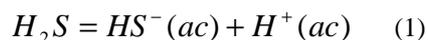
Según la literatura (Zelikman 1982), los procesos de precipitación de los sulfuros metálicos están relacionados con la concentración de iones hidronios presentes en la disolución y en dependencia de la misma, ocurre la precipitación de los sulfuros de los diferentes metales, es decir mediante la regulación del pH del medio, es posible lograr la precipitación selectiva de los mismos. Por tanto es necesario conocer las regularidades para el cálculo de los valores teóricos, con vistas a establecer los valores experimentales de pH de precipitación, para cada sulfuro, con posibilidades prácticas de precipitar a partir del licor industrial WL.

En el proceso de precipitación de los sulfuros metálicos, se consideran los aspectos relacionados con la interacción entre las sales de los metales no ferrosos y el sulfuro de hidrógeno, la existencia de una relación directa entre la acidez de las

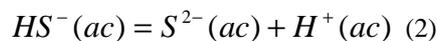
disoluciones y el producto de solubilidad de los distintos sulfuros, así como el proceso de hidrólisis del sulfuro de sodio.

A continuación se establecen las relaciones correspondientes, a partir de las ecuaciones de equilibrio entre los parámetros mencionados, para llegar a una expresión general (Zelikman 1982).

Primeramente consideramos el equilibrio de disociación del ácido sulfhídrico, caracterizado por las constantes de disociación K_1 y K_2 :



$$K_1 = \frac{c(HS^-) \cdot c(H^+)}{c(H_2S)} = 9 \cdot 10^{-8} \quad (I)$$



$$K_2 = \frac{c(S^{2-}) \cdot c(H^+)}{c(HS^-)} = 1.2 \cdot 10^{-13} \quad (II)$$

De donde:

$$K_{H_2S} = K_1 \cdot K_2 \quad (III)$$

Sustituyendo K_1 y K_2 en la ecuación (III), se obtiene:

$$c(S^{2-}) = K_{H_2S} \frac{c(H_2S)}{c(H^+)^2} \quad (IV)$$

O sea, la concentración de iones azufre, es inversamente proporcional al cuadrado de la concentración de iones hidronios, de ahí la estrecha relación entre ellos, lo que da la posibilidad de variar selectivamente la concentración de los aniones hidrógeno en la disolución al variar el pH, que a la vez, posibilita realizar precipitaciones selectivas de diferentes sulfuros metálicos, calculando previamente el pH de precipitación de cada uno de los mismos, considerando la dependencia de este último, con la concentración del metal en la solución y de los valores de las constantes que caracterizan el equilibrio de las reacciones que transcurren. Después de algunas transformaciones matemáticas se obtiene la expresión para cálculo del pH de precipitación de los sulfuros en las disoluciones ácidas, a la temperatura de 298 K (Zelikman et al., 1975 p.355). Para realizar los cálculos de los valores de pH de inicio de precipitación, en el presente trabajo se emplea la siguiente metodología.

1.- Se toman como datos iniciales las concentraciones de los metales en el licor de desecho (WL), que aparece en la tabla 1.

2.- Se toman de la literatura (Zelikman 1982), los valores para las constantes del producto de solubilidad (K_{ps}) de los sulfuros de níquel, cobalto, cobre, cinc y el valor para la constante del producto iónico del agua.

3.-Se calculan los valores de:

$$\log K_{ps_{MeS}}, \log K_{H_2S}, \log c(Me^{2+}), \log c(S).$$

4.-Se aplica la expresión (V) para el cálculo del pH de precipitación de los sulfuros metálicos a la temperatura de 298 K.

$$pH_{MeS} = \frac{1}{n} (\log K_{ps_{MeS}} - \log K_{H_2S} - \log (Me^{2+}) - \log (S)) \quad (V)$$

En la tabla 2 aparecen los valores de pH de precipitación para los sulfuros metálicos calculados por la expresión V.

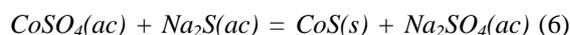
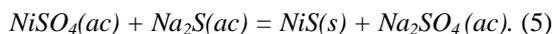
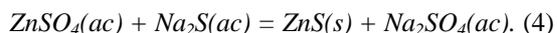
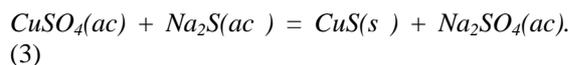
Tabla 2: Valores de pH de precipitación de los sulfuros metálicos.

Compuestos	NiS	CoS	CuS	ZnS
pH	1.83	1.91	0.65	0.16

Como puede observarse, existen diferencias entre los valores calculados de pH de precipitación para los diferentes sulfuros, lo que permite realizar la precipitación de los sulfuros de cobre y cinc, níquel y cobalto selectivamente.

Para el trabajo experimental se toman valores cercanos a los utilizados en la industria y por encima de los calculados, como se recomienda en la literatura.

Las reacciones de precipitación de los sulfuros de níquel, cobalto, cobre y cinc, sometidas al estudio termodinámico bajo las condiciones: T = 298 y 328 K y p = 101.3 kPa, son las siguientes:



La metodología empleada para los cálculos es la siguiente:

1.- Se toman los datos reportados en la literatura (Perry y Chilton 1985; Zelikman 1982; Ellor 1975; Glastone 1987, 1969; Sundahl 1992), de los valores

de la variación de la entalpía de formación ΔH_{298}^0 ,

entropía S_{298}^0 y la capacidad calorífica Cp para todas las sustancias presentes en las reacciones a la temperatura de 298 K.

2.- Se calculan los valores de la variación de entalpía (ΔH_{R298}^0 y DH_{R328}), la variación de entropía (ΔS_{R298}^0 y DS_{328}) y la variación de energía libre (ΔG_{R298}^0 y DG_{R328}), para cada reacción química analizada.

Los valores de (ΔG_{R298}^0 y ΔG_{R328}) calculados para las reacciones representadas por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6 se reflejan en la tabla 3.

Tabla 3: Valores de energía calculados para las reacciones de precipitación de los sulfuros a las temperaturas 298 K y 328 K.

Ecuaciones	ΔG_{298}^0 (kJ/mol)	ΔG_{328} (kJ/mol)
$CuSO_4(ac) + Na_2S(ac) = CuS(s) + Na_2SO_4(ac).$ (3)	- 305.321	- 25665.383
$ZnSO_4(ac) + Na_2S(ac) = ZnS(s) + Na_2SO_4(ac).$ (4)	- 244.063	- 56710.858
$NiSO_4(ac) + Na_2S(ac) = NiS(s) + Na_2SO_4(ac).$ (5)	- 226.124	- 47733.83
$CoSO_4(ac) + Na_2S(ac) = CoS(s) + Na_2SO_4(ac)$ (6)	- 233.880	- 40413.394

Según estos resultados se demuestra la posibilidad de ocurrencia de las reacciones de precipitación de los sulfuros de cobre, cinc, níquel y cobalto a las temperaturas de 298 K y 328K.

Materiales y Métodos

Reactivos

- * Licor de desecho WL.
- * Sulfuro de sodio. P.A.EINECS 2152115.
- * Ácido sulfúrico (d = 1.83 g/cm³, MERCK).
- * Carbonato de calcio. P.A. EINECS 2319841.
- * Hidróxido de amonio. (25% en NH₃) P.A.
- * Sulfato de amonio (1mol/L).P.A. EINECS 2319841.

*Hidrogeno sulfuro de amonio industrial (138.9g/L).

Equipos

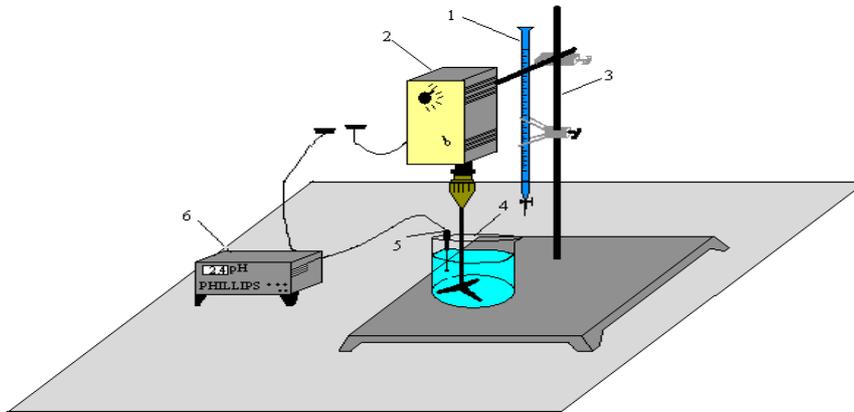
- * pH-metro. PHILLIPS.
- * Agitador mecánico de vidrio.
- * Plancha eléctrica. WLN. 1 Kw.
- * Bomba de vacío. Marca BH- 461 - M 220v 0.55 Kw . 1390 rpm.
- * Estufa eléctrica. Labor Type: LP - 403. 60 Hz 220v. 114 Kw.
- * Difractómetro de Rayos X, PHILLIPS PW 1840.
- *Espectrofotómetro de Absorción Atómica UNICAM SOLAA R 927.
- * Horno eléctrico. Marca TIPCHOL 16251/ 11 220v. 60Hz.

Métodos

Para el desarrollo del trabajo experimental se utilizó licor de desecho (WL), proveniente de la planta de lavadero de la Empresa P. S. A - Moa Nickel .S.A.,

cuya composición aparece en la tabla 1.

Para el tratamiento de este desecho se contó con la instalación que se muestra en la figura 1.



Leyenda.

- 1 - Bureta graduada. 4 - Beacker
 2 - Agitador mecánico. 5 - Electrodo.
 3 - Soporte universal. 6 - pH-metro.

Fig. # 1: Instalación experimental.

Con el objetivo de analizar la influencia de la temperatura y la velocidad de agitación en el proceso de precipitación de los diferentes elementos metálicos, se aplica un diseño de experimento factorial a dos niveles, (Alpizar 1990; Cochran 1965).

Para su realización se fijaron dos valores (máximo y mínimo), los que se reflejan en la tabla 4.

Primeramente se determina el número de pruebas a realizar, según la expresión:

$$2^n = N; (V)$$

Donde:

N - Número de pruebas

2 - Número de niveles

N = 4 Pruebas

n - Número de variables

T - Temperatura;

k - Velocidad de agitación;

ξ_{Me} - Porcentaje de extracción del metal.

Cada prueba se realiza con tres réplicas.

Tabla 4: Niveles de estudio

Niveles	k	T
Máximo (+)	160	55
Mínimo (-)	90	25

La matriz experimental del diseño aparece en la tabla 5

Tabla 5: Matriz experimental del diseño factorial

Nº de pruebas	k	T	k· T
1	-	-	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	+

-Tratamiento propuesto al licor de desecho

A seguidas se expone el tratamiento que se realiza al licor de desecho.

1.- Precipitación de los sulfuros de cobre y cinc, utilizando sulfuro de sodio como agente precipitante.

2.- Precipitación de los sulfuros de níquel y cobalto, utilizando sulfuro de sodio como agente

precipitante.

Etapa # 1. Precipitación de los sulfuros de cobre y cinc.

Se mide un volumen de 1000 mL de licor WL, se transfiere a un vaso de precipitado y se ajusta el pH con ácido sulfúrico hasta 1,2 unidades, se añade disolución de sulfuro de sodio, se forma un

precipitado de color gris de sulfuro de cobre y zinc, este se filtra hasta separar completamente el sólido, el cual se seca en la estufa a temperatura de 60 °C.

Etapa # 2. Precipitación de los sulfuros de níquel y cobalto.

A la disolución resultante de la primera etapa, se le mide el pH y se añade carbonato de calcio hasta ajustar el pH a 2.7, se mantiene la muestra en constante agitación, se filtra obteniéndose un sólido blanco correspondiente al sulfato de calcio, el cual se seca en la estufa a una temperatura de 60 °C se pesa y se somete al análisis por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

A la disolución que se obtiene después de la filtración, se le añaden 40 mL de disolución de sulfuro de sodio (1 mol/L), se observa la formación de un precipitado negro de sulfuro de níquel y cobalto, se filtra al vacío hasta separar completamente el sólido, se seca en la estufa a una temperatura de 60 °C, se pesa y se somete a análisis por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

La composición química para cada prueba efectuada se refleja en la tabla 6.

De igual forma se determinan los modelos estadístico-matemáticos para cada elemento analizado.

Determinación del modelo matemático estadístico para las etapas de precipitación.

1. Modelo para la recuperación de níquel en la precipitación de la mezcla de sulfuros de níquel y cobalto.

Según los resultados experimentales de recuperación del níquel para las diferentes pruebas, mostrados en la tabla 6, además a través de los cálculos estadísticos cuyos resultados más significativos se representan en la tabla 9, se determina el modelo estadístico-matemático que representa la relación entre el porcentaje de

recuperación y los dos factores analizados en el proceso de precipitación, según la expresión (VI).

$$\xi_{Ni} = 82.65 + 1.17 \cdot k + 5.29 \cdot T + 0.20 \cdot k \cdot T \quad (VI)$$

$$F_{cal} = 0.067 \quad F_{tab} = 3.11$$

Como $F_{tab} > F_{cal}$, se puede afirmar que el modelo es adecuado.

En la tabla 7 se refleja el diseño de experimento practicado para analizar el comportamiento de la recuperación del níquel en la mezcla de sulfuros para las cuatro pruebas experimentales, con tres replicas.

La figura 2 muestra una comparación entre los valores medios de recuperación de níquel reflejados en la tabla 7.

2. Modelo para la recuperación de cobalto en la precipitación de la mezcla de sulfuros de níquel y cobalto.

Según los resultados experimentales de recuperación del cobalto para las diferentes pruebas, mostrados en la tabla 8, se obtiene el siguiente modelo estadístico matemático para la recuperación de cobalto, que representa la relación entre el porcentaje de extracción y los dos factores analizados en el proceso de precipitación, según la expresión (VII).

$$\xi_{Co} = 82.46 + 1.13 \cdot k + 5.20 \cdot T + 0.30 \cdot k \cdot T \quad (VII)$$

Se determinan además:

$$F_{cal} = 0.0195 \quad F_{tab} = 3.11$$

Como $F_{tab} > F_{cal}$, se puede afirmar que el modelo es adecuado.

La figura 3 muestra una comparación entre los valores medios de recuperación de cobalto reflejados en la tabla 8, obtenidos en el proceso de precipitación de los sulfuros de níquel y cobalto. En la tabla 9 se muestran los principales resultados.

**Tabla 6: Valores alcanzados para la mezcla de sulfuros (NiS, CoS), %.
Para las pruebas I, II, III y IV.**

Prueba # I.									
Exp.	Ni	Co	Cu	Zn	Fe	Mg	Mn	Al	Cr
1	1.6086	0.3322	0.0052	0.0509	0.0630	0.0839	0.2350	1.8530	1.1070
2	1.6130	0.3327	0.0052	0.0517	0.0650	0.0893	0.2380	1.8490	1.1150
3	1.6177	0.3326	0.0052	0.0525	0.0670	0.0844	0.2380	1.8510	1.1170
Media	1.6131	0.3325	0.0052	0.0517	0.0650	0.0842	0.2370	1.8510	1.1130
Prueba # II.									
1	1.8299	0.3630	0.0059	0.0579	0.0590	0.0838	0.2500	1.8490	1.1230
2	1.8318	0.3625	0.0060	0.0590	0.0630	0.0831	0.2490	1.8540	1.1250
3	1.8346	0.3629	0.0059	0.0586	0.0610	0.0830	0.2300	1.8560	1.1240
Media	1.8321	0.3628	0.0059	0.0585	0.0610	0.0833	0.2430	1.8530	1.1240
Prueba # III.									
1	2.0321	0.4060	0.0057	0.0619	0.0760	0.0958	0.3830	1.8840	1.2540
2	2.0336	0.4040	0.0057	0.0624	0.0749	0.0952	0.3790	1.8790	1.2490
3	2.0345	0.4050	0.0057	0.0626	0.0744	0.0961	0.3840	1.8810	1.2560
Media	2.0334	0.4050	0.0057	0.0623	0.0750	0.0957	0.3820	1.8840	1.2530

Prueba # IV.									
1	2.0690	0.4090	0.0057	0.0637	0.0750	0.0959	0.4120	1.8900	1.2750
2	2.0720	0.4070	0.0058	0.0631	0.0790	0.0969	0.4200	1.8870	1.2790
3	2.0726	0.4080	0.0058	0.0637	0.0770	0.0955	0.4010	1.8810	1.2830
Media	2.0712	0.4080	0.0058	0.0635	0.0770	0.0961	0.4110	1.8860	1.2780

Tabla 7: Diseño de experimento para la recuperación del níquel en la mezcla de sulfuros (NiS, CoS), para las pruebas I, II, III y IV

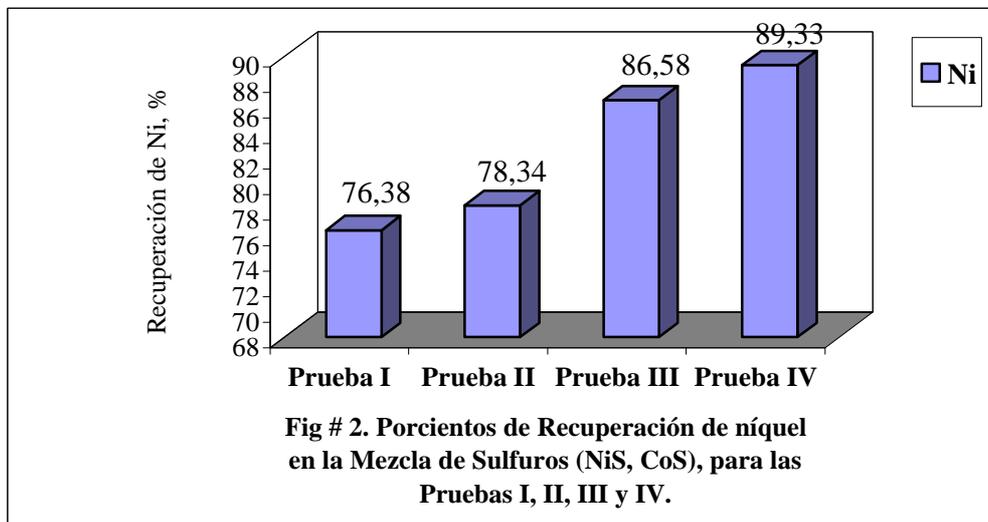
Pruebas	k	T	k·T	y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}
I	-	-	+	76.19	76.23	76.60	76.38
II	+	-	-	78.25	78.33	78.45	78.34
III	-	+	-	86.53	86.59	86.63	86.58
IV	+	+	+	89.24	89.37	89.39	89.33

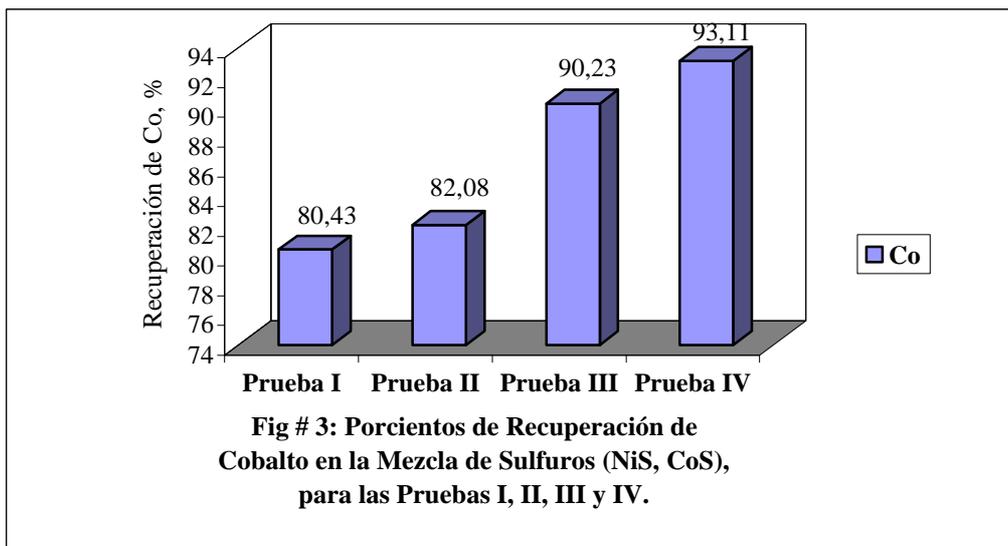
Tabla 8: Diseño de experimento para la recuperación del cobalto en la mezcla de sulfuro (NiS, CoS).

k	T	k·T	y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}
-	-	+	80.54	80.27	80.47	80.43
+	-	-	82.30	82.01	82.10	82.08
-	+	-	90.12	90.37	90.21	90.23
+	+	+	93.34	92.88	93.11	93.11

Tabla 9: Valores estadísticos para cada etapa de precipitación.

Elementos	ΣS^2_i	S^2_y	S_y	$S_{(bj)}$	$S^2_{adec.}$	R
Ni	0.0628	0.0157	0.1250	0.0360	0.00105	0.99
Co	0.0920	0.0230	0.1515	0.0437	0.00045	0.99





Análisis de resultados

En la primera parte del trabajo se presenta el análisis teórico realizado y la metodología de cálculo empleada para determinar la posibilidad termodinámica de ocurrencia de las reacciones de precipitación de los sulfuros de níquel y cobalto, cuyos resultados aparecen en las tablas 2 y 3, los cuales demuestran que las reacciones representadas por las ecuaciones (3, 4, 5 y 6), presentan mayor espontaneidad a la temperatura de 55 °C (328 K) respecto a 25 °C (298 K) y a presión de 101,3 kPa. Los cálculos realizados por las expresiones correspondientes, demuestran que existen diferencias entre los valores de pH de precipitación de los sulfuros de cobre y cinc respecto al níquel y cobalto, lo que puede observarse en la tabla 2, esto permite emplear el método de precipitación selectiva.

Una vez concluido el análisis termodinámico, se define el esquema de tratamiento a aplicar al licor de desecho WL.

En la primera etapa se realiza la precipitación de los sulfuros de cobre y cinc con sulfuro de sodio, a un valor de pH de 1,2 unidades, obteniéndose un sólido gris que se separa por filtración, este se somete a análisis químico y se comprueba que corresponde a una mezcla de sulfuros de cobre y cinc con contenidos apreciables de otros metales presentes en el licor.

En la segunda etapa se eleva el pH hasta 2,7 unidades y al añadir de nuevo sulfuro de sodio, precipita un sólido de color negro que corresponde a la mezcla de los sulfuros de níquel y cobalto según los análisis químicos realizados. Los resultados se muestran en las tablas 6, 7, 8, y 9, además en las propias tablas se observan contenidos determinados de algunos elementos que constituyen impurezas para la mezcla de sulfuros.

Al analizar los resultados del diseño de experimentos, mostrados en las tablas 7 y 8 se

observa que los valores para las recuperaciones de níquel varían entre 75 y 90 %, mientras que para el cobalto oscilan entre 80 y 90 %. Reportándose los valores más altos de recuperación para el níquel y el cobalto en la prueba IV. A partir de dicho resultado se analiza la influencia de la temperatura y la velocidad de agitación sobre los procesos de precipitación de los sulfuros de níquel y cobalto, de los que se infiere que el proceso de precipitación se favorece con el aumento de la temperatura y la velocidad de agitación, ya que los mejores resultados se obtienen a la temperatura de 55°C y velocidad de 160 rpm.

A partir de los resultados obtenidos se determinan los modelos estadísticos – matemáticos representados por las expresiones (VI y VII), que describen el comportamiento de los factores analizados. En ambos modelos se refleja la influencia positiva de la temperatura y la velocidad de agitación sobre el proceso de precipitación, mientras que la interacción entre los factores no resulta significativa.

Conclusiones

1. Según el estudio realizado existe posibilidad termodinámica de precipitación de los sulfuros de níquel y cobalto bajo las condiciones de temperatura, velocidad de agitación, agente precipitante y presión fijadas y las diferencias entre los valores de pH de precipitación permiten el empleo del método de precipitación selectiva.
2. Se comprobó la influencia de la temperatura y la velocidad de agitación en los procesos de precipitación, lográndose recuperaciones de níquel entre 75 y 90 % y de cobalto entre 80 y 90 %.
3. Las mayores recuperaciones de níquel y cobalto se alcanzan a la temperatura de 328 K (55 °C) y velocidad de agitación 160 rpm.
4. Se determinaron los modelos estadísticos – matemáticos que describen el comportamiento de

los factores analizados. En ambos modelos se refleja la influencia positiva de la temperatura y la velocidad de agitación sobre el proceso de precipitación, mientras que la interacción entre los factores no resulta significativa.

Recomendaciones

1. Realizar el estudio del proceso de precipitación de los sulfuros de níquel y cobalto en el rango de temperatura entre 55 y 100 °C.
2. Estudiar la posibilidad de emplear otros agentes precipitantes.

Bibliografía

1. Alfonso, E. y otros. Tecnología de descontaminación del licor residual WL mediante utilización del mineral serpentínico previamente calcinado. Informe Técnico. Centro de Investigaciones y Proyectos de la Industria Minero Metalúrgica. La Habana, 1995.
2. Sosa M, ; Barrabía, E. y. Estudio preliminar de una variante de recuperación de elementos metálicos a partir del licor ácido de la E.P.S.A. Informe técnico (ISMM) Facultad de Metalurgia, Moa, 1997.
3. Casado, J ; García, R. Tratamiento de residuales con coral. Informe Técnico. CIS. Moa, 1986.
4. Fonseca, M. Separación de níquel y cobalto en licores ácidos. Informe Técnico CIS, Moa, 1988.
5. Gafarov , R. ; López J. Aplicación Industrial de la tecnología de lavado del mineral lixiviado con el licor de desecho WL. Informe Técnico. Centro de Investigación y Proyecto de la Industria Minero Metalúrgica. La Habana, 1978.

6. Gutiérrez, M. Procedimiento para la obtención de compuestos de cromo a partir del licor de desecho de la Empresa Pedro Soto Alba. Trabajo de Diploma. Facultad de Ciencias Naturales. (U.O.) Santiago de Cuba, 1991.
7. Hernández, E. S. y col... Metalurgia Extractiva de los Minerales Oxidados de Níquel. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1972.
8. Landazury, S. y col. Proceso de tratamiento del licor WL con amoníaco. Folleto. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1995.
9. Legan, P. J. Estudio de la separación del hierro y manganeso del licor WL. Trabajo de Diploma. Facultad de Ciencias Naturales (U.O). Santiago de Cuba, 1990.
10. Morrell, A. Desarrollo de una metodología para la descontaminación del WL y recuperación de algunos valores metálicos. Trabajo de Diploma. Facultad de Ciencias Naturales (U.O) Santiago de Cuba, 1990.
11. Pérez, F. Estudio cinético de la reacción de neutralización del licor WL con un pH = 4.5, Informe Técnico Centro de Investigaciones y Proyectos de la Industria Minero Metalúrgica. La Habana, 1991.
12. Sosa, M. M. Recopilación bibliográfica sobre los distintos trabajos realizados para el tratamiento de los licores ácidos. Informe Técnico. Facultad de Metalurgia y Electromecánica (ISMM) Moa ,1997.
13. Sosa, M. M.; Bassas, P. Estudio termodinámico del proceso de precipitación de sulfuros de níquel y cobalto a partir de licores ácidos. CD CINAREM 2002 ISBN 1450.
14. Sosa, M. M.; Bassas, P. Recuperación de metales del licor de desecho WL en forma de compuestos químicos. Revista Minería y Geología, vol, No.3-4, 2001.