

FIG. 3. Efecto del tiempo sobre la extracción de Ni y Co.

### CONCLUSIONES

Es posible realizar la tostación sulfatante del sulfuro de Ni + Co de la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba" con extracciones superiores al 60 % en el caso del Co, el cual puede separarse selectivamente del Ni utilizando esta vía.

En el residuo lixiviado se produce una concentración de Ni con respecto a los demás valores metálicos. El Zn presenta una tendencia a elevar la solubilidad en la medida que lo hace el Co. El Ni presenta un comportamiento errático en este sentido.

### REFERENCIAS

1. ALFONSO E.; V. KLEMENTIEV: "Obtención de sales de cobalto a partir del sulfuro de Ni + Co de Moa", CIPIMM, La Habana, 1971.
2. ALVAREZ V. y otros: "Factibilidad de la recuperación de los metales de las menas piríticas por medio de la tostación sulfatante en hornos de lechos fluidizados", CIPIMM, La Habana, 1986.

## ESTUDIO TERMODINAMICO DEL PROCESO DE TOSTACION SULFATANTE DEL SULFURO DE Ni + Co

Ing. Erasmo Griñan Bicet\*  
Ing. Pilar Martín González\*  
Dr. Juan Rodríguez Gamboa\*\*

\*Centro de Investigación de las Lateritas  
\*\*Instituto Superior Minero Metalúrgico

**RESUMEN:** En el presente trabajo se realiza un estudio termodinámico de las principales reacciones posibles durante el proceso de tostación sulfatante del concentrado de sulfuro de Ni + Co, los valores de energía libre ( $\Delta G$ ), constante de equilibrio ( $k_{eq}$ ) y calor de reacción ( $H_r$ ) en un rango de temperatura de 470 °K - 1 073 °K.

**ABSTRACT:** In the present work, realized is the study of thermodynamic of the possible principal reactions during the sulphur toasting process of the concentrate of nickel + cobalt, the values of the free energy ( $\Delta G$ ), equilibrium constant ( $k_{eq}$ ) and heat of reaction ( $H_r$ ) in the temperature range of 470 °K - 1073 °K.

### INTRODUCCION

#### Caracterización del material

El concentrado de sulfuro de Ni + Co que se obtiene en la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba" de Moa, es un mineral producto de granos finos (0,067 mm) con distribución uniforme del contenido de los metales, en este caso, fundamentalmente Ni y Co en las distintas fracciones que lo constituyen. En la naturaleza el sulfuro de Ni se encuentra con frecuencia en forma de Millerita. La Millerita conocida también como la pirita capilar se presenta en tres formas:  $\alpha$  - que es amorfa-,  $\beta$  -hexagonal, que cristaliza como la niquelina (As Ni) y la  $\gamma$  -romboédrica.

En el estudio realizado por V. Karelin y otros se pudo apreciar que el producto final de la Empresa "Pedro Sotto Alba" contiene en su mayor proporción el sulfuro de Ni en dos modificaciones, la  $\alpha$  y la  $\gamma$ , esta

última de menor temperatura y la predominante en este caso.

Este concentrado de Ni + Co tiene la siguiente composición química.

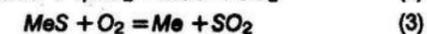
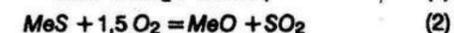
Elementos	Ni	Co	Zn	Fe	Cu	H <sub>2</sub> O
%	55,08	4,98	1,27	0,38	0,27	18,84

La refinación de este producto reviste una gran importancia económica para el país y debido a esto el estudio de tecnologías que garanticen dicho objetivo, es una tarea actual.

La posibilidad de recuperar los valores metálicos de este concentrado por la vía pirometalúrgica mediante la tostación sulfatante de los mismos, se encuentra en estudio, tomando como referencia la experiencia mundial sobre el tema.

### ASPECTOS TEORICOS DEL PROCESO

La oxidación de los sulfuros con el oxígeno se puede representar de forma general por las siguientes reacciones:



Con ello son posibles las reacciones:



Según las condiciones los productos finales de la oxidación del sulfuro pueden ser sulfatos, óxidos o metales. La fase gaseosa consta de  $SO_2$ ,  $SO_3$ , y  $O_2$ . En calidad de estos parámetros independientes tomamos la temperatura y la presión parcial de uno de los componentes de la fase

**MOA** La  
Región Minera  
de Cuba

La región de estabilidad de distintas fases en función de la temperatura y de  $PSO_2$  han sido estudiados por varios investigadores.

Los diagramas de estado de los sistemas Me-S-O permiten revelar todas las reacciones posibles en estos sistemas.

### MÉTODOS UTILIZADOS EN LOS CÁLCULOS

TABLA 1. Reacciones químicas estudiadas

No.	Reacciones químicas	No.	Reacciones químicas
1	$NiS + 2O_2 = NiSO_4$	19	$CoO + SO_3 = CoSO_4$
2	$CoS + 2O_2 = CoSO_4$	20	$FeO + SO_3 = FeSO_4$
3	$FeS + 2O_2 = FeSO_4$	21	$CuO + SO_3 = CuSO_4$
4	$CuS + 2O_2 = CuSO_4$	22	$ZnO + SO_3 = ZnSO_4$
5	$ZnS + 2O_2 = ZnSO_4$	23	$NiO + FeS = NiS + FeO$
6	$NiS + 3/2O_2 = NiO + SO_2$	24	$CoO + FeS = CoS + FeO$
7	$CoS + 3/2O_2 = CoO + SO_2$	25	$CuO + FeS = CuS + FeO$
8	$FeS + 3/2O_2 = FeO + SO_2$	26	$ZnO + FeS = ZnS + FeO$
9	$CuS + 3/2O_2 = CuO + SO_2$	27	$NiO + FeSO_4 = NiSO_4 + FeO$
10	$ZnS + 3/2O_2 = ZnO + SO_2$	28	$CoO + FeSO_4 = CoSO_4 + FeO$
11	$FeS + 5/3O_2 = 1/3Fe_3O_4 + SO_2$	29	$CuO + FeSO_4 = CuSO_4 + FeO$
12	$FeS + 7/4O_2 = 1/2Fe_2O_4 + SO_2$	30	$ZnO + FeSO_4 = ZnSO_4 + FeO$
13	$1/4NiS + SO_3 = 1/4NiSO_4 + SO_2$	31	$NiS + H_2SO_4 = NiSO_4 + H_2S$
14	$1/4CoS + SO_3 = 1/4CoSO_4 + SO_2$	32	$S + O_2 = SO_2$
15	$1/4FeS + SO_3 = 1/4FeSO_4 + SO_2$	33	$SO_2 + 1/2O_2 = SO_3$
16	$1/4CuS + SO_3 = 1/4CuSO_4 + SO_2$	34	$NiS + O_2 = Ni + SO_2$
17	$1/4ZnS + SO_3 = 1/4ZnSO_4 + SO_2$	35	$CuS + O_2 = Cu + SO_2$
18	$NiO + SO_3 = NiSO_4$	36	$FeS + O_2 = Fe + SO_2$

Para este estudio termodinámico se emplearon dos métodos:

1. Método tradicional, cuyas ecuaciones son las siguientes:

$$a) \Delta G^0_t = \Delta H^0_t - T \Delta S^0_t$$

donde:

$$\Delta H_T = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T C_p dT;$$

$$C_p = a + bt + ct^2;$$

$$\Delta S_T^0 = S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{C_p}{T} dT$$

$$b) \text{Log Keq} = \frac{-\Delta G_t}{2,303 RT}$$

2. Método de Tiomkin-Chuarsman, cuyas ecuaciones son las siguientes:

$$c) \frac{\Delta G_t}{T} = \frac{\Delta H^0}{T} - 298 \Delta S_{298}^0 -$$

$$- (\Delta C_0 M_0 + \Delta C_1 M_1 + \Delta C_2 M_2 + \dots + \Delta C_z M_z)$$

donde:

$M_0, M_1, M_2, \dots, M_z$  - coeficientes que dependen de la temperatura para las cuales se tiene una tabla auxiliar (desde  $T = -73,16^\circ C$  hasta  $2226,84^\circ C$ ).

$\Delta C_0, \Delta C_1, \Delta C_2, \dots, \Delta C_z$  - variación de cada uno de los coeficientes de la ecuación para la variación de la capacidad calorífica ( $a + bt + ct^2$ ).

Ambos métodos proporcionan la fiabilidad requerida para los resultados del presente trabajo.

El intervalo de temperatura que se seleccionó para el trabajo fue de  $200^\circ C$  como valor mínimo y de  $800^\circ C$  como valor máximo con un intervalo de cálculo de  $50^\circ C$ .

Se elaboró un programa de computación para realizar los cálculos termodinámicos en el rango de temperatura seleccionado. Fueron estudiadas un total de 36 reacciones posibles (Tabla 1) de acuerdo con la literatura consultada.

En la Fig. 1 y en la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el estudio termodinámico.

- En el gráfico de  $\Delta G$  vs  $T$  se aprecia que desde el punto de vista termodinámico todas las reacciones formadoras de sulfatos tienen posibilidad de ocurrir teniendo en cuenta que los valores de  $\Delta G$  son inferiores a cero.
- De acuerdo con la magnitud de  $\Delta G_T$  se puede determinar que la reacción de formación del  $CoSO_4$  ( $CoS + 2O_2 = CoSO_4$ ) es la que más posibilidad tiene de ocurrir debido a que su  $\Delta G_T$  alcanza el valor más negativo de todos y su constante de equilibrio (Keq) es la mayor en el intervalo de temperatura estudiado.
- Para la reacción  $SO_2 + 1/2 O_2 = SO_3$  se observa que con el aumento de la temperatura hay una variación considerable de la magnitud de la constante de equilibrio con tendencia a la disminución.

TABLA 2. Valores de la energía libre (AG) en función de la temperatura (KJ/mol)

N DE LA REAC.	SULFUROS	473 K		573 K		673 K		773 K		873 K		973 K		1073 K	
		AG	Ig Keq												
1	$NiS + 2O_2 = NiSO_4$	-610,9	67,4	-576,7	52,5	-543,1	42,1	-509,9	34,4	-477,2	28,5	-444,9	23,8	-412,9	20,1
2	$CoS + 2O_2 = CoSO_4$	-636,2	70,2	-602,7	4,9	-569,4	44,18	-537,4	36,3	-505,5	30,2	-474,2	25,4	-443,2	21,5
3	$FeS + 2O_2 = FeSO_4$	-607,9	67,1	-572,8	52,1	-538,1	41,3	-503,7	34,0	-469,7	28,1	-436,1	23,4	-403,1	19,6
4	$CuS + 2O_2 = CuSO_4$	-544,9	60,1	-508,0	46,3	-471,2	36,5	-434,5	29,3	-398,1	23,8	-361,8	19,4	-325,9	15,8
5	$ZnS + 2O_2 = ZnSO_4$	-604,3	66,7	-556,4	50,7	-504,6	39,1	-449,4	30,3	-391,3	23,4	-330,3	17,7	-266,8	12,9
33	$SO_2 + 1/2 O_2 = SO_3$	-54,5	6,0	-45,1	4,1	-35,8	2,8	-26,6	1,8	-17,5	1,0	-8,6	0,5	0,23	$1,1 \times 10^{-2}$

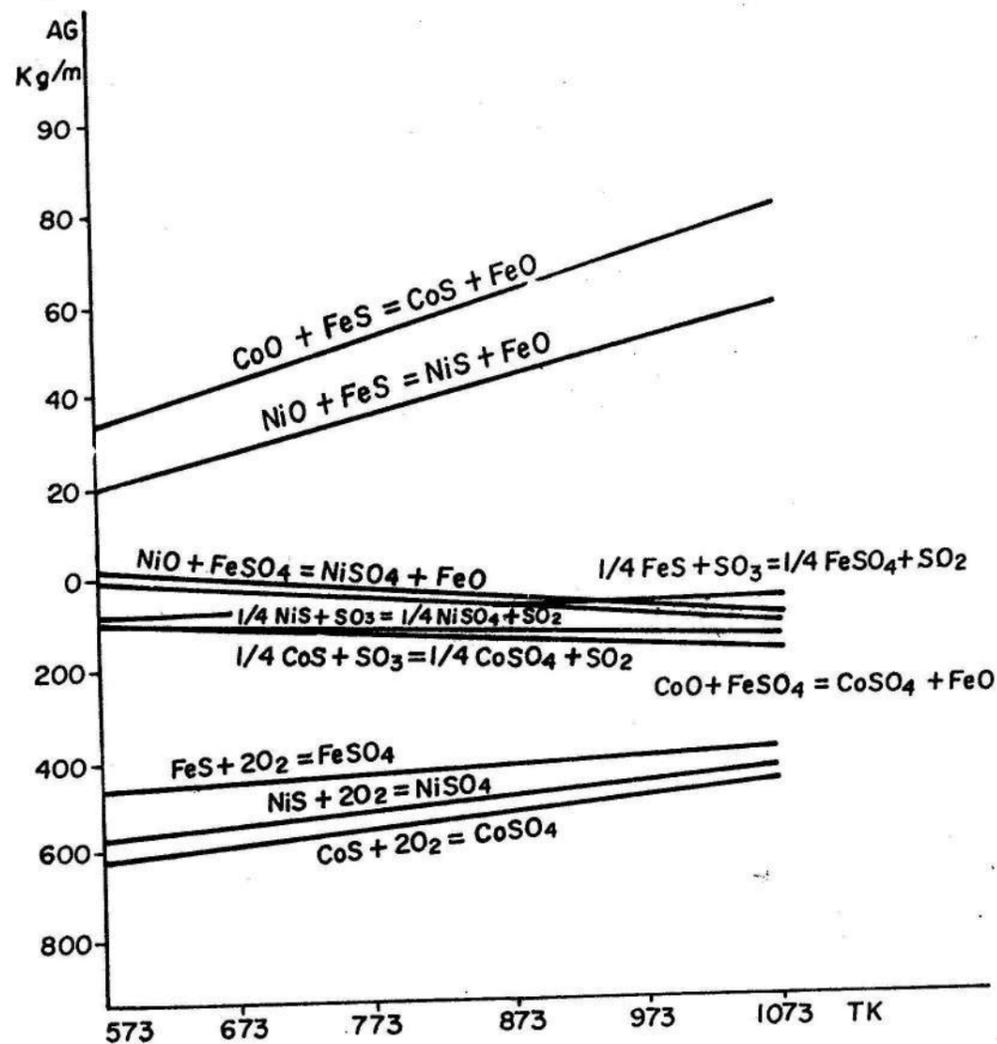


FIG.1 Variación de la energía libre en función de la temperatura

#### REFERENCIAS

1. GARCIA DIAZ, J.; V. KARELIN: Composición mineralógica del producto final y de las costras de la planta de sulfuros de la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba", Moa, 1979.
2. GRUPO DE AUTORES: Teoría de los procesos metalúrgicos, manual para las prácticas de los estudiantes de la especialidad, IML, Leningrado, 1985.
3. VANIUKOV A.V.; V.Y.ZAITSEV: Teoría de los procesos pirometalúrgicos, Ed. Metalurgia, Moscú, 1981.
4. VIADIMIROV L.P.: Cálculos termodinámicos del equilibrio de las reacciones metalúrgicas, Moscú, 1970.

## LAS ASOCIACIONES ESTRUCTURO FORMACIONALES Y LA PROSPECCION GEOLOGICA

Dr.Félix Quintas Caballero

Instituto Superior Minero Metalúrgico

**RESUMEN:** En este artículo se hace un análisis de las Asociaciones Estructuro Formacionales, profundizando en su concepción y estableciendo la comparación entre las mismas y las Zonas Estructuro Faciales, también se muestra un ejemplo de la aplicación de las AEF en Cuba y la importancia de las mismas en el trabajo de prospección al viabilizar el conocimiento de las leyes que rigen la distribución de los yacimientos minerales en las secuencias rocosas.

**ABSTRACT:** In this article an analysis of Structural Formation Associations (AEF) is made, concentrating in its conception and establishing a comparison between them and the Facial Structure Zone (ZEF), also an example of the application of AEF in Cuba is shown, and its importance in the prospection work to facilitate the knowledge of the laws which bind the distribution of the mineral deposits in the rock sequence.

El análisis geológico regional cobra cada vez más un papel importante en la prospección de yacimientos minerales sólidos y de petróleo y gas.

Hasta el presente se han hecho estudios por separado de las distintas condiciones geológicas que sirven de base para la prospección pero en los últimos tiempos se ha abierto paso el análisis integrado, lo que se expresa a través de diferentes concepciones como son las Asociaciones Estructuro Formacionales (AEF), las Zonas Estructuro Faciales (ZEF) y los Terrenos tectónicos.

La visión integrada de las condiciones geológicas permite tener una concepción más clara de la potencialidad geológica de una región como posible contenedora de yacimientos minerales y hace posible definir con un mayor

grado de detalle las regiones y localidades pronosticadas para la ocurrencia de yacimientos minerales.

Los progresos alcanzados en la Geodinámica expresados en la nueva tectónica global han permitido desarrollar y perfeccionar diversos sistemas de unidades geológicas (ZEF, AEF, Terrenos).

En Cuba fueron definidas por Bronniman y Pardo las ZEF en la década de 1950 basándose en la existencia de zonas geológicas bien diferenciadas y reconocibles a las que emmarcaron dentro del Eugeosinclinal, Miogeosinclinal, o la Plataforma de Bahamas. Esta concepción fue posteriormente desarrollada por Ducloz y Vuagnat, Hatten, Judoley, Knipper, Furrázola y otros. (Tabla 1).

TABLA 1. Esquema de AEF para Cuba

Hatten y otros:	Zaza	Las Villas	Zulueta	Remedios	Cayo Coco, 1958
Ducloz y Vuagnat:	Santa Clara	Placetas	Camajuaní	Remedios,	1964
Bronniman y Pardo:	Cabaiguán	Santo Domingo	Cifuentes	Placetas,	1959
Las Villas	Jatibonico	Sagua la Chica	Yaguajay	Cinturon costero	
Judoley:	Zaza	Las Villas	Remedios	Cayo Coco	Canal viejo de Bahamas, 1969

YU. M. Puscharovski, M. Iturralde y otros (1989), presentan uno de los esquemas de ZEF más recientes enlazando las mismas con unidades tectónicas, este cuadro se presenta en el mapa tectónico de Cuba.

Ejemplo de estas unidades

UNIDAD TECTONICA  
Depresiones intracontinentales y de la plataforma marina.  
Talud continental y pie continental.

ZEF  
Remedios y Cayo Coco  
Camajuaní, La Esperanza, y Norte de la Sierra del Rosario.