

Simulación Termodinámica de un proceso Piro metalúrgico de Oxidación de los minerales sulfurados de Cobre

Pablo Nuñez Jara (*), Daniel F. Lovera Dávila (**)

Resumen

Modelos de Simulación Termodinámica se han venido desarrollando para observar la conducta de los elementos menores Zn, Pb, As, Sb y Bi; así como también los elementos mayores Cu, Fe, Si, O y S en los procesos de Conversión: y Fusión: NORANDA e ISASMELT para la producción de matas ricas en Cobre.

En el proceso Noranda se muestra un modelo de Estado Estacionario para la obtención de una mata de alto grado en cobre metálico. El proceso Isasmelt se basa en el concepto de los dos lugares de reacciones independientes en el baño (interfase mata - escoria): una oxidación rápida y una reducción lenta.

El balance de calor del proceso y la termodinámica de distribución de los elementos menores están unidas y expresadas en términos de las variables de proceso tales como la Temperatura, O_2 enriquecido, Composición de la Carga, Grado de la Mata y Contenido de la Magnetita en la escoria y otras variables son incorporados en el modelamiento, el cual puede predecir los efectos de operación de los parámetros químicos y puede también contribuir a proveer el control metalúrgico.

(*)Profesor Principal de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica U.N.M.S.M

(**) Profesor Asociado de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica U.N.M.S.M.

I.- GENERALIDADES

1.1. Proceso Isasmelt

El modelo computarizado se ha desarrollado para simular termodinámicamente la conducta de los elementos menores: Zn, Pb, As, Sb, y Bi; así como también los elementos mayores Cu, Fe, Si, O y S, en la producción de mata de cobre.

El modelo está basado en el concepto de la existencia de dos ambientes de reacciones independientes en un baño de escoria: uno para una oxidación rápida y otro para una reducción lenta. La reacción de oxidación en primer lugar produce mata, escoria rica en magnetita y gas a partir del concentrado de calcopirita y de los fundentes silícicos.

La escoria luego es parcialmente reducida con carbón pulverizado. Las reacciones de oxidación y reducción son asumidas que proceden bajo una serie de condiciones de equilibrio de separación.

El modelo termodinámico explica bien la distribución de elementos menores observados en los 15 Ton/h del horno piloto, y es empleado para proyectar las condiciones óptimas de fusión para un escalamiento a 100 Ton/h de un reactor Isasmelt.

1.1.1 Modelo de los Dos Lugares para la Fusión Isasmelt.

La desventaja de una operación con alta magnetita descansa en un inevitable incremento de pérdida de cobre en la escoria y un alto riesgo que repercute la presencia de magnetita en el baño. Este dilema fue solucionado en el proceso Isasmelt por la introducción de una reacción lenta de carbón granulado o carbón sólido, con lo cual se crea en el reactor sitios con dos reacciones independientes: un sitio de reacción de rápida oxidación para el concentrado de calcopirita y un sitio de reacción de baja reducción para la magnetita y el óxido de cobre.

Conforme al resultado, el reactor Isasmelt puede oxidar y fundir un alto tonelaje de concentrado horariamente y aún producir una mata de medio a alto grado, junto a una escoria con contenidos bajos de magnetita y cobre.

La ventaja de tal doble posición fue favorablemente procesada en la operación del reactor Flash Smelting de Tamaño por medio de la adición de carbón pulverizado al baño de escoria.

El concepto de los dos sitios de reacciones independientes se muestra en la figura correspondiente. De acuerdo al modelo de los dos sitios, los óxidos gaseosos, tales como AsO (g) y ZnO(g), son volatilizados en el sitio de la reacción rápida y se asume que no están alrededor del sitio de reducción del carbón; sin embargo permite al reactor oxidar antes de reducir.

1.1.2 Modelamiento Matemático

i.-Balance de Masa en el Equilibrio para las Reacciones de Oxidación

A) Contenido de Oxígeno y Sulfuro en la Mata.

$$n_{O_2}^* = 10^{-4} W_{sc} (69.59[FeO]_{sc} + 93.93[FeO_{1.5}]_{sc}) \quad (1)$$

$$W_{sc} = [(1 + 12865r)W_{Si} + W_{Cu} + W_{Zn}] / (1 - 0.000691m) \quad (2)$$

B) Contenido de Hierro Ferroso y Férrico en la Escoria

C) Presión parcial del SO₂

D) Distribución del Zinc por la Ley de Nernst

E) Distribución del Arsénico por la Ley de Nernst

B) Contenido de Hierro Ferroso y Férrico en la Escoria

$$W_{ferr} = 0.006897mW_{m} \quad (3)$$

$$W_{ferr} = 1.2865rW_{sil} - 0.00620mW_{m} \quad (4)$$

C) Presión Parcial del SO₂

$$n_{so_2} = n_s^0 - n_{H_2S} - n_{CO_2} \quad (5)$$

$$n_T = n_{CO} + n_{CO_2} + n_{H_2S} + n_{CO_2} + n_{H_2} + n_{H_2O} + n_{so_2} + n_{N_2} \quad (6)$$

$$p_{so_2} = Pn_{so_2} / n_T \quad (7)$$

D) Distribución del Zinc por la Ley de Nernst

$$W_{Zn}^{m} = 0.01[Zn]_{m} W_{m} \quad (8)$$

$$W_{Zn}^{s} = 0.01[Zn]_{s} W_{s} \quad (9)$$

$$W_{Zn}^2 = 2.918P_{Zn} V_{s'} / (1 - P_{Zn}') \quad (10)$$

E) Distribución del Arsénico por la Ley de Nernst

$$W_{As}^s = Az^2 + Bz \quad (11)$$

$$A = 6.689V_{s'}K_{As}^{s2}W^2(1 + K_{33}P_{O_2}^{1/2}) / K_{26} \quad (12)$$

$$B = 3.345V_{s'}K_{As}^{s2}W(K_{23}^{s2} + K_{31}P_{O_2}^{1/2} + K_{34}P_{Zn}^{1/2}) / K_{26}^{s2} \quad (13)$$

$$Z = [-\delta + (\delta^2 + 4AW_{As}^s)^{1/2}] / 2A \quad (14)$$

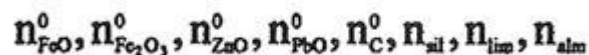
$$W_{As}^m = 0.01Z(W_{m} + W_{s} / L_{As}^{s'}) + W_{As}^s \quad (15)$$

Así de ese modo la concentración del As en la mata Z, puede ser calculada para una cantidad dada de arsénico inicial. La distribución de antimonio y bismuto pueden ser calculados por un procedimiento similar al caso del arsénico.

F.- Balance de Masa para el Equilibrio de las Reacciones de Reducción.

Considerando una reacción de equilibrio donde una escoria con alto contenido de magnetita (p. ej m=18) es reducida con carbón granulado a un nivel bajo de magnetita, tal como m = 3. El número de moles de las especies antes y después de la reducción puede ser expresada como se muestra:

Antes:



Después:

$$n_{\text{FeO}}, n_{\text{Fe}_2\text{O}_3}, n_{\text{CO}}, n_{\text{CO}_2}, n_{\text{Zn(g)}}, n_{\text{Pb(g)}}, n_{\text{sil}}, n_{\text{lim}}, n_{\text{alm}}, n_{\text{ZnO}} (\equiv X), n_{\text{PbO}} (\equiv y)$$

En el sistema reactante, todos los constituyentes además del carbón granulado están en la escoria; mientras que en el sistema de productos CO, CO₂, Zn (g) y Pb (g) están en la fase gas y todos los otros en la fase escoria.

En virtud a la ley de la conservación de masas antes y después de la reacción, existen los siguientes cinco balances de masa:

Balance Fe:

$$n_{\text{FeO}}^0 \equiv n_{\text{FeO}}^0 + 2n_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^0 = n_{\text{FeO}} + 2n_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (16)$$

Balance O:

$$n_{\text{O}_2}^0 \equiv n_{\text{FeO}}^0 + 3n_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^0 + n_{\text{ZnO}}^0 + n_{\text{PbO}}^0 \quad (17)$$

$$n_{\text{O}_2}^0 = n_{\text{FeO}} + 3n_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + n_{\text{CO}} + 2n_{\text{CO}_2} + x + y \quad (18)$$

Balance C:

$$n_{\text{C}}^0 = n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2} \quad (19)$$

Balance Zn:

$$n_{\text{ZnO}}^0 = x + n_{\text{Zn}} \quad (20)$$

Balance Pb:

$$n_{\text{PbO}}^0 = y + n_{\text{Pb}} \quad (21)$$

Además hay tres balances más tal como para el SiO₂, CaO y Al₂O₃ los cuales son invariables antes y después de la reacción. El sistema involucra 11 especies y ocho balances de masa, existiendo tres equilibrios independientes.

Suponiendo que el contenido de escoria m% Fe₃O₄ antes de la reducción con carbón granulado de una escoria teniendo r razón de Fe/SiO₂ Sustituyendo los valores de m y r, las actividades del FeO y Fe₃O₄ pueden ser calculados.

$$k \equiv n_{\text{CO}_2} / n_{\text{CO}} = K_{55} a_{\text{FeO}}^3 \quad (22)$$

$$P_{\text{Zn}} = K_{56} a_{\text{ZnO}} / k \quad (23)$$

$$P_{\text{Pb}} = K_{57} a_{\text{PbO}} / k \quad (24)$$

Desde las ecuaciones anteriores, podemos hallar:

$$n_{CO} = (n_{Fe}^0 - n_{Fe}^0 - n_{Fe_3O_4} - x - y) / (1 + 2k) \quad (25)$$

Donde el número de moles del Fe₃O₄ es conocido a partir de la masa oxidada de escoria y el valor r y el nivel propuesto de m a partir de la reducción del C. Para una presión total dada de fase gas, P (atm), la presión parcial de zinc y plomo podrían ser expresados en términos del número de moles, como se muestra:

$$P_{Zn} = P n_{Zn} / n_g \quad (26)$$

$$P_{Pb} = P n_{Pb} / n_g \quad (27)$$

Donde:

$$n_g = n_{CO} + n_{CO_2} + n_{Zn} + n_{Pb} \quad (28)$$

$$n_g = n_g - x - y \quad (29)$$

Pudiendo describir las siguientes expresiones:

$$kP n_{Zn} / n_g = K_{56} g_{ZnO} X / n_b \quad (30)$$

$$kP n_{Pb} / n_g = K_{57} g_{PbO} Y / n_b \quad (31)$$

Donde:

$$n_b \equiv n_{FeO}^0 + n_{Si} + x + y$$

$$n_{Si} = n_{Si}^0 + n_{Si} + n_{lim} + 2n_{Si} \quad (33)$$

Después de algunos arreglos podemos arribar a las siguientes expresiones:

$$F_1 = kP(n_{Zn}^0 - x)(n_{Fe}^0 + n_{Si} + x + y) - K_{56} \gamma_{ZnO} (n_{Fe}^0 - x - y)x = 0 \quad (34)$$

$$F_2 = kP(n_{Pb}^0 - y)(n_{Fe}^0 + n_{Si} + x + y) - K_{57} \gamma_{PbO} (n_{Fe}^0 - x - y)y = 0 \quad (35)$$

Las ecuaciones simultáneas F1 y F2 contiene dos variables no conocidas x e y, los cuales pueden ser encontrados por el método iterativo de Newton Rhapsom. Lo cual nos permitirá establecer la composición completa de la fase gas y escoria.

1.2 Proceso Noranda

El modelo en estado continuo para el proceso Noranda produciendo tanto cobre metálico o mata de alta ley. Las variables para el proceso tales como: temperatura, enriquecimiento del oxígeno, composición de la carga (o concentrado), la ley de la mata y el contenido de la magnetita de la escoria se integraron en un modelo computarizado, el cual provee la composición química del cobre metálico, la mata y las fases de la escoria para alguna composición especificada, además suministra predicciones o pronósticos en lo que concierne a los efectos de operación y así mismo contribuye a mejorar el control metalúrgico.

1.2.1 Elección de Variables

El sistema fundamental del Proceso Noranda puede considerarse consistente de cinco componentes : Cu Fe, S, O y SiO₂. En el Proceso Noranda (PN), las fase de mata y cobre metálico contienen en gran manera bajas concentraciones de elementos menores, los cuales no son tomados en cuenta, mientras que en las escorias correspondientes pueden contener cantidades apreciables de óxido de Zinc (7%), alúmina (5%), óxido de plomo (3%), y óxidos de metales alcalinotérreos (3%).

En el caso del proceso de obtención del cobre, existen cuatro fases: Cobre metálico, mata, escoria y gas. Asumiendo que una mezcla turbulenta entre esas fases, debido al funcionamiento de toberas ocasiona condiciones de equilibrio en el sistema. Los parámetros termodinámicos del proceso de obtención del cobre pueden ser definidos por tres variables:

- Temperatura.
- Presión parcial del SO₂
- Actividad de la Magnetita

La actividad de la magnetita puede correlacionarse con su concentración presente en la escoria de fayalita, con la siguiente ecuación:

$$[\text{Fe}_3\text{O}_4]_{\text{Si}} = 2.6 + 29.7a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - (10.8 - 34a_{\text{Fe}_3\text{O}_4}) - (10.8 - 34a_{\text{Fe}_3\text{O}_4})t - (2.3 - 6.7a_{\text{Fe}_3\text{O}_4})t^2 \quad (36)$$

Donde:

$$t = 0.01 (T - 1523) \quad 1473 \leq T \leq 1573$$

Para el proceso de obtención de la mata donde hay tres fases presentes que son: mata, escoria y gas; hay cuatro grados de libertad que son:

- Temperatura
- Presión parcial del SO₂
- Actividad de la Magnetita
- Ley de la Mata ([Cu]_{Mt})

i.- Proceso de Obtención del Cobre

Para las cuatro fases coexistentes bajo condiciones termodinámicas estables, el sistema está sujeto a varias limitaciones, por ejemplo, se puede expresar las condiciones para la fase de la mata debe ser prácticamente metal blanco o bajo en hierro dentro de las cuatro fases en equilibrio.

A.- Presión Parcial del SO₂

El reactor del proceso Noranda opera para una eficiencia del oxígeno prácticamente al 100%. Consecuentemente, el valor de la presión parcial del SO₂ se puede calcular del contenido de oxígeno del aire de la tobera y del balance de masa del oxígeno para los componentes oxidados del alimento.

El volumen del aire V_a requerido para convertir el alimento en cobre metálico y escoria está dado por:

$$V_a = (2240/32y)(0.998(S)_F + 0.338(Fe)_F + 0.245(Zn)_F + 0.077(Pb)_F) \quad (37)$$

Donde:

y: Porcentaje del Oxígeno en la Tobera
(M)_F: Concentración de un elemento en el alimento

El volumen de Nitrógeno suministrado es:

$$V_{N_2} = 0.01*(100 - y)V_g \quad (38)$$

El volumen del SO₂, producido está dado por:

$$V_{SO_2} = (22.4/32.066) * [S]_F \quad (39)$$

El volumen del gas efluente está dado por

$$V_g + V_{N_2} + V_{SO_2} \quad (40)$$

Consecuentemente, la presión parcial del SO₂ en la reacción gaseosa está dado por:

$$P_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_g} \quad (41)$$

B.- Las Fusiones Cu-Fe-S

Las condiciones bajo las cuales las fases de las matas de alta ley y el cobre metálico coexisten han sido convenientemente establecidas por Krivsky y

Schuhmann. Los datos de Krivsky et al, permiten el cálculo de los contenidos de hierro y azufre de la fase del cobre metálico en equilibrio con la mata de alta ley y así mismo la presión parcial del azufre.

Para el desarrollo de un modelo computarizado, es necesario expresar las relaciones en forma de ecuaciones. Las concentraciones de azufre y hierro en la fase de cobre saturada de Cu_2S , pueden expresarse en función de la temperatura y la concentración del hierro en la mata:

$$[\text{Fe}]_{\text{Cu}} = (18.3 + 1.1t)x + (875 + 19M)x^2 \quad (x < 0.12) \quad (42)$$

$$[\text{S}]_{\text{Cu}} = (1.33 + 0.28t + 0.08t^2) - (0.3 - 2.7t)x + (43 + 33t)x^2 \quad (43)$$

Donde:

$$x = 0.01[\text{Fe}]_{\text{M}}^{\%}$$

La presión parcial del azufre puede ser calculado mediante:

$$P_{\text{S}_2}^{1/2} \cdot 10^3 = (1.49 + 1.2t + 0.37t^2) - (1.75 + 2.05t + 0.45t^2)x + (-5.50 + 2.75t^2)x^2$$

Así también se demostró que la composición de la mata saturada en cobre varía muy poco con la temperatura, y consecuentemente la ley de la mata puede ser calculada del contenido de Hierro en la mata por la siguiente relación independiente de la temperatura:

$$[\text{Cu}]_{\text{Mst}} = 80.4 - 117x$$

Las actividades del FeS y del Cu_2S pueden expresarse como:

$$a_{\text{FeS}} = 2.0x - 3.0x^2$$

$$a_{\text{Cu}_2\text{S}} = 0.969 - 2.77x + 4.0x^2$$

Válidos en el rango de temperatura [1150 - 1350 °C]

C.- Disolución Oxidada del Cobre en la Escoria.

La solubilidad del cobre en las escorias fayalíticas se debe a la contribución oxidada y sulfurada. Las disoluciones sulfuradas pueden ser obviadas en el análisis de la obtención del cobre en el Proceso Noranda.

En cuanto a la disolución oxidada se han reportado varios experimentos. Ruddle, Taylor y Bates por su parte, así como Altman y Kellogg investigaron la solubilidad del cobre en las escorias fayalíticas saturadas de SiO_2 en un rango de

temperatura de 1200 – 1400 °C resumiéndose en la siguiente relación independiente de la temperatura:

$$[\text{Cu}]_{\text{Escoria}}^{\text{Ox}} = 35.9a_{\text{CuO}_{6.8}}$$

Toguri y Santander investigaron las escorias de Fayalita que contiene Al_2O_3 en condiciones de saturación de SiO_2 y encontraron solubilidades de cobre un poco más bajas.

$$[\text{Cu}]_{\text{Escoria}}^{\text{Ox}} = 29.7a_{\text{CuO}_{6.8}}$$

Nagamori, Mackey y Tarassoff midieron la solubilidad del cobre en las escorias fayalíticas no saturadas en SiO_2 conteniendo aproximadamente 8 % de Al_2O_3 :

$$[\text{Cu}]_{\text{Escoria}}^{\text{Ox}} = 31.0a_{\text{CuO}_{6.8}}$$

A diferencia de algunas de esas escorias estudiadas, las escorias del Proceso Noranda están insaturadas de sílice y bajo en alúmina. Por acuerdo, la disolución oxidada de cobre estará dada por la ecuación última a lo largo de todo el trabajo.

ii.- Proceso de Fabricación de la Mata.

A) Diferencia con el Proceso de Obtención del Cobre.

Cuando el sulfuro de cobre líquido coexiste con el cobre metálico, como en el proceso de obtención del cobre, la presión parcial del azufre sobre el sistema es el mínimo. Este límite no se mantiene para el proceso de fabricación de la mata y la presión parcial puede variar incrementándose.

De esta manera, la presión parcial del azufre será más alta, con la presión parcial del oxígeno para el mismo conjunto de la presión parcial del SO_2 y la actividad del Fe_3O_4 , dependiendo de la ley de la mata.

La ley de la mata es una nueva variable importante en el caso de la fabricación u obtención del cobre.

B.- Presión Parcial del SO_2

Cuando una mata con una ley $[\text{Cu}]_{\text{mat}}$ es producida a partir de 100 g de calcopirita, consistente de sulfuros de Cu, Fe Zn, y Pb, además de la ganga.

El requerimiento de aire se da por:

$$V_a' = \left(\frac{2240}{32y}\right) * (0.285[\text{Cu}]_F + 0.338[\text{Fe}]_F + 0.998[\text{S}]_F + 0.245[\text{Zn}]_F + 0.077[\text{Pb}]_F - 42.9([\text{Cu}]_F / [\text{Cu}]_{\text{Mst}})$$

El volumen del nitrógeno utilizado está dado por:

$$V_{so_2} = \left(\frac{22.4}{32.066} \right) \cdot \{ [S]_F + 0.0086 [Cu]_F - 27.1 \left(\frac{[Cu]_F}{[Cu]_{mst}} \right) \}$$

El volumen del gas efluente se da por

$$V_g = V_{N_2} + V_{so_2}$$

En consecuencia la presión parcial del SO₂ gas que sale de la fusión esta dado por:

$$P_{so_2} = V_{so_2} / V_g$$

C.- La Mata en la del Oxígeno

Usando los datos obtenidos por SPIRA para matas aproximadas dirigidas al proceso de fabricación de la mata, las concentraciones de todos los componentes mayores en la mata pueden expresarse como una función de la ley de la mata [Cu]_{Mat} y son:

$$[Cu_2S]_{mst} = 1.25 [Cu]_{mst}$$

$$[FeS]_{mst} = 7.42 - 0.9275 [Cu]_{mst}$$

$$[FeO]_{mst} = 4.8 - 0.06 [Cu]_{mst}$$

$$[FeO_{1.33}]_{mst} = 20.0 - 0.25 [Cu]_{mst}$$

$$[SiO_2]_{mst} = 1.0 - 0.0125 [Cu]_{mst}$$

La concentración del Fe en la mata bajo la forma de sulfuro de hierro en la mata se da por:

$$[Fe]_{mst} = 47.12 - 0.389 [Cu]_{mst}$$

Como una aproximación, la actividad del Cu₂S en las matas que contienen más del 60% de Cu se pueden calcular por:

$$a_{Cu_2S} = N_{Cu_2S}$$

La actividad del FeS en las matas de Cu₂S-FeS es prácticamente independiente de la temperatura

$$a_{FeS} = 2.36x - 6.44x^2 + 28.12x^3$$

La ecuación anterior puede usarse reemplazando $[Fe]S_{Mat}$ por x para aproximar la actividad del FeS en las matas que contienen oxígeno.

D.- Disolución oxidada y Sulfurosa en la Escoria

Además de la disolución oxidada de escoria definida anteriormente, las escorias fayalíticas pueden disolver cobre adicional cuando la escoria coexiste con una mata que contiene sulfuro de Fe. Para el sistema mata escoria en los hornos de rebervero, la disolución sulfurosa de cobre ha sido establecida como

$$[Cu]_{esc}^s = 0.39[S]_{esc} \cdot a_{CuS_{0.5}}$$

El coeficiente 0,39 en la ecuación 42 es válido sólo a 1200°C, pero en este estudio se asume el mismo valor para mantenerlo por encima del rango de la temperatura de fusión de la mata. Estas relaciones se extendieron para las condiciones de fusión continua con el fin de aproximar las pérdidas sulfuradas de cobre. La totalidad del cobre disuelto en la escoria se da por:

$$[Cu]_{esc}^d = [Cu]_{esc}^{ox} + [Cu]_{esc}^s$$

II.-SIMULACIÓN TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS PIRO METALÚRGICOS

2.1 Proceso Noranda

Parámetros Seleccionados

$$\text{Temperatura} = 1473 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$[Cu]_{mst} = 70$$

$$a_{Fe_3O_4} = 1.0$$

$$[Fe_3O_4] = 21.8$$

$$P_{SO_2} = 0.225 \text{ atm}$$

$$\% V_{O_2} = 30 \% \text{ (aire)}$$

2.2 Proceso Isasmelt

Datos de Planta Piloto y del Modelo Computarizado

El modelo computarizado, tiene las siguientes características y plantea las siguientes simulaciones

- Se procesan 820 ecuaciones
- Tiene 4 loops iterativos
- El modelo predice y compara con los datos de planta
- El volumen observado del aire en la lanza fue mucho menor que el valor del modelo, sugiriéndonos la existencia de una filtración de aire.
- Todos los datos observados en planta pueden ser bien tomados en cuenta por el modelo.
- La distribución fraccional predicha de Zn, Pb, As, y Bi está de acuerdo con los datos de planta.
- También se contempla el diseño de modelos termodinámicos más rigurosos para poder simular procesos pirometalúrgicos.

III.- CONCLUSIONES

- 1.- Se presenta dos modelamientos termodinámicos con filosofías distintas, los cuales producen cobre metálico o mata de alta ley.
- 2.- El Modelo Noranda se basa en la suposición que las fases están en equilibrio con otra, debido al agitación del baño turbulento causado por los jets que producen las toberas.
- 3.- Dicho modelo de aproximación termodinámica integra parámetros del proceso tales como: Temperatura, oxígeno enriquecido, composición del concentrado, ley de la mata y contenido de la magnetita en la escoria.
- 4.- El Modelo Noranda describe la fisicoquímica del proceso como una función de las variables controlables, por lo cual puede emplearse como una herramienta para el control del proceso.
- 5.- En cambio el Modelo Isasmelt basado en la suposición de la existencia de dos posiciones; una de oxidación rápida y otra de reducción lenta.
- 6.- El modelo Isasmelt simula termodinámicamente la conducta de los elementos menores Zinc, Plomo, Arsénico, Antimonio, y Bismuto; como también de los elementos mayores Cobre Fierro, Sílicio, Oxígeno y el Azufre.

7.- El modelo Isasmelt tiene como ventajas: el bajo costo del reactor, requerimientos mínimos para la alimentación, bajo % de Cobre en la escoria, alto rango de operación y buenas condiciones ambientales en planta.

IV.-BIBLIOGRAFIA

1. N.J Themelis, et al, J. Metals, 1972, vol 24, no 4,pp 25-32
2. A. Yaswa: Can. Met. Quart., 1974, vol 13. pp 443-53
3. A. Yazawa and M. Eguchi: Extractive Metallurgy of Copper, J. C. Yannopoulos and J. C. Agarwal, eds., pp 3-20, AIME, New York, 1976
4. M. Nagamori: Met. Trans. 1974, Vol. 5,pp. 539-48.
5. R. Altman and H. H. Kellogg: Trans. Inst. Mining Met., 1972, vol. 81,pp. C163-75.
6. E.J. Michaland R. Schuhmann: Trans. AIME, 1952, vol. 194, pp. 723-28.
7. R. Schuhmann and P.J. Ensio: Trans. AIME, 1951, vol. 191, pp. 401-11.
8. M. Nagamori: Met Trans., 1974, vol, 5, pp. 531-38.
9. W A. Krivsky and R. Schuhmann: Trans. AIME, 1957, vol. 209, pp. 981-88.
10. O. Kubaschewski, E. Li. Evans, and C. B. Alcock: Metallurgical Thermochemistry, 4th de., pp. 421-29, Pergamon Press, New York, 1967.
11. R. W Ruddle, B. Taylor and A.P Bates: Trans. Inst. Mining Met., 1966, vol. 75, pp. C1-12.
12. J.M. Toguri and N. H. Stander: Met Trans., 1972, vol 3,pp. 586-88.
13. M. Nagamori, P J. Mackey, and P Tarassoff.- Met. Trans. B, 1975, vol. 6B,pp. 295-301.
14. M. Nagamori and P J. Mackey: Met. Trans. B, 1977, vol. 88pp. 39-46.
15. P Spira andN.J. Themelis: J. Metals, 1969, vol 21, noApp.3542.
16. K. Nagamori and P J. Mackey: Metall. Trans. B, 1978 vol. 9B, pp 567-79
17. PC. Chaubal and M. Nagamori. Metall. Trans. B, 1988, vol 19B pp 547-56

18. S.N Sinha, H. Y Sohn, and M. Nagamori:Metall. Trans. B, 1984, vol. 15B,pp.441-49
19. M.Hino and J.M Toguri: Metall. Trans. B, 1987, vol. 18B.pp.189-94
20. PC Chaubal, M.Naganzori, and H.Y Sohn: Can Metall Q,. 1984, voL23, pp 405-11