



Aprovechamiento integral de recursos minerales en conformación de mezclas metalúrgicas para la producción de FeNi por el método computacional*

Tú Le Manh

Carrera: Ingeniería Metalúrgica.

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: La producción de ferróníquel demanda de una excelente preparación y conocimiento de los minerales que utilizará la planta pirometalúrgica. Para la futura planta a instalarse en Moa, es necesaria la conformación de diferentes tipos de mezclas de minerales limoníticos y de serpentina, que permitan un aprovechamiento integral de los recursos minerales existentes en las concesiones mineras, incrementar la vida útil de la minería y la planta, así como reducir el negativo efecto ecológico sobre la región de Moa. El sistema será utilizado en la empresa Ferróníquel S. A. La investigación se propone crear un programa informático para garantizar la calidad de minerales de alimentación a la planta de ferróníquel en Moa durante la conformación de mezclas metalúrgicas.

Palabras clave: Ferróníquel; recursos minerales; programa informático; mezclas metalúrgicas.

Maximum use of mineral resources in accordance to metallurgical blends for the production of Ferronickel using a computer-based method

Abstract: The production of ferronickel requires excellent preparation and information on the minerals that will be fed to the Pyro-metallurgical Plant. For the new plant to be installed at Moa site in the future, it is necessary to prepare various types of mixed limonite and serpentine; thus allowing the exploitation of existing mineral resources in the mining concessions to the maximum, extending the useful life of mining concessions and the plant in addition to minimizing the environmental impact in Moa. The system will be implemented at the Ferronickel S.A plant. The objective of the investigation is to make a computer-assisted program available to ensure high quality ore feed to the ferronickel plant in Moa during metallurgical blending operations.

Key Words: Ferroníquel; mineral resources; computer-assisted program; metallurgical blend.

Introducción

La obtención de ferroníquel exige que los profesionales de esta rama tengan un conocimiento pleno de los minerales que utilizará la planta pirometalúrgica. Para la instalación de una industria ferroniquelífera en Moa, es imprescindible la conformación de variados tipos de mezclas de minerales limoníticos y de serpentina, que permitan un aprovechamiento de los recursos minerales existentes en las concesiones mineras, aumentar la vida útil de la minería y la planta, a la vez que se reduzca el efecto negativo sobre la región en la cual se encuentra.

Características fisicoquímicas y mineralógicas de los minerales que conforman las mezclas metalúrgicas

La composición química promedio de los principales tipos tecnológicos de menas, que representan el corte vertical característico del perfil del yacimiento Yamanigüey, se exponen en la tabla 1, los cuales fueron codificados para su identificación de la siguiente forma:

FL: Mineral Ferroníquel Limonítico.

FS: Mineral Ferroníquel Saprolítico (serpentina blanda).

FD1: Mineral Ferroníquel Duro (serpentina dura tipo 1).

FD2: Mineral Ferroníquel más duro (serpentina muy dura).

Tabla 1. Composición química promedio por tipo tecnológico de menas en %

Litología	Ni	Co	Fe	MgO	SiO ₂	Fe/Ni	SiO ₂ /MgO	Ni/Co
FL	1,59	0,135	38,63	4,64	12,69	24,29	2,7	11,7
FS	2,00	0,055	21,43	18,38	27,23	10,715	1,48	36,4
FD1	2,20	0,047	21,87	19,75	25,90	9,9	1,31	46,8
FD2	1,31	0,030	14,53	27,58	33,90	11,02	1,2	43,67

Método de cálculo de mezclas metalúrgicas

La mezcla conformada a partir de diferentes tipos de menas, obtendría una composición variada en dependencia de la composición de los elementos, y de las proporciones de los tipos minerales utilizados. Para garantizar las condiciones tecnológicas y la calidad de los productos de la planta, se debe controlar la composición del mineral alimentado, prefijándose como una norma de operación, ya que la composición del mineral de alimentación a la planta debe mantenerse inalterable durante su paso por el proceso productivo. En la tabla 2 se representa la composición promedio del mineral a procesar.

Tabla 2. Composición química promedio del mineral de explotación de la planta

Elementos	Ni°	Fe	Co	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Si/Mg
(%)	1.85	18.5	0.04	33.14	24.55	3.35	1	1.35

El problema consiste en la determinación de los porcentajes máxicos de los tipos de menas, teniendo en cuenta la composición prefijada de la mezcla deseada, para la conformación de la receta final. Estos contenidos son incógnitas que han sido asignados por X, Y, Z y T. La determinación de estas puede realizarse por un método analítico matemático, conformando un sistema de ecuaciones a través de los cálculos del contenido de los elementos de la mezcla final. Para simplificar el cálculo se buscan

los valores de dos o tres elementos de la mezcla, que afectarían la calidad del producto final, como es el caso del níquel y el hierro. En el caso de la existencia de desviación en la comprobación de los otros elementos se admite como un error sistemático del método. Algunos elementos de la composición promedio de los componentes de las mezclas se representan en la tabla 3.

Tabla 3. Composición promedio de los componentes de las mezclas

Litologías	%	Ni	Fe	MgO
FL	X	1.59	38.2	5.5
FS	Y	1.68	12.79	27.6
FD1	Z	1.92	9.2	29.9
FD2	T	1.31	14.53	27.58
Total	100	1.85	18.5	24.55

La última fila de la tabla 3 representa la composición prefijada de la mezcla final que se desea obtener, a partir de los tipos de menas tecnológicas.

La primera condición que se debe satisfacer es la ecuación:

$$X+Y+Z+T = 100 \quad (1)$$

Si el cálculo se realiza para 100 Kg. de carga, el contenido de los elementos de la mezcla según la tabla 3, se determina por las expresiones siguientes:

$$(1,59X+1,68Y+1,92Z+1,31T)/100 = 1,85 \quad (2)$$

$$(38,2 X+12,79Y+9,2Z+14,53T)/100 = 18,5 \quad (3)$$

$$(5,5X+27,6Y+29,9Z+27,58T)/100 = 24,55 \quad (4)$$

Paralelamente las ecuaciones (2), (3), (4) pueden escribirse por las expresiones (5), (6), (7), multiplicándose los dos miembros de las ecuaciones correspondientes por 100.

$$1,59X+1,68Y+1,92Z+1,31T = 185 \quad (5)$$

$$38,2 X+12,79Y+9,2Z+14,53T = 1850 \quad (6)$$

$$5,5X+27,6Y+29,9Z+27,58T = 2455 \quad (7)$$

Al integrarse las últimas expresiones con la primera ecuación se forma un sistema de cuatro ecuaciones. El método de solución del sistema se describe a continuación por el diagrama de bloques.

Los diagramas de bloques consisten en la descripción esquemática de un algoritmo, mediante una representación gráfica en base a la combinación de figuras geométricas y flechas. Es la representación simbólica de una sucesión lógica de pasos, capaz de describir un proceso de cómputo de forma completa y precisa. Por supuesto esa sucesión tiene que reflejar el orden y tipo de operación a realizar, siendo cada paso susceptible de conversión a instrucciones de un lenguaje de programación dado (Garmendía, 1989).

En la figura 1 se representan en forma de un diagrama de bloques las ideas principales de algoritmo de cálculo de mezclas de minerales.

Para la aplicación de este método se debe acudir a la programación para facilitar la determinación de las incógnitas, ya que en algún momento la solución que se puede obtener por el método algebraico es ilógica a la realidad del problema. Por ejemplo, cuando una de ellas es negativa.

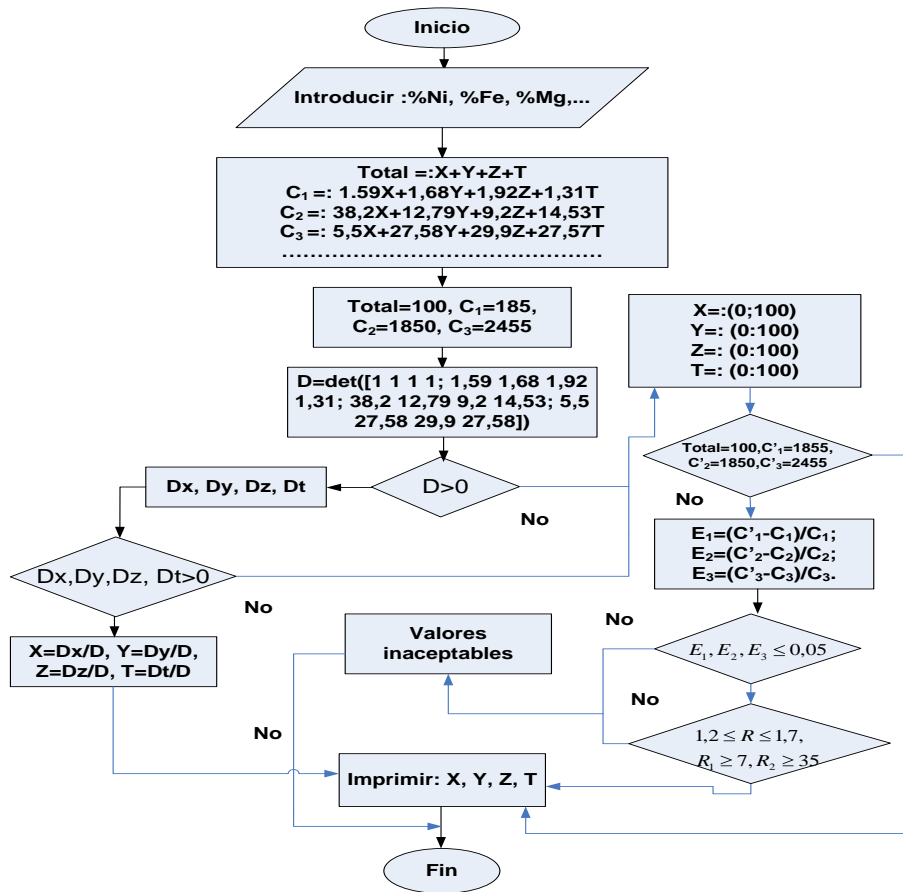


Figura 1. Diagrama de bloque del método de cálculo de mezclas metalúrgicas.

El algoritmo de programación se inicia con la introducción de datos de los elementos, %Ni y %Fe, como se muestra en la tabla 1. Se obtienen las expresiones iguales como el miembro izquierdo de las ecuaciones (1), (4), (5), (6), el miembro derecho de las expresiones correspondientes es asignado por Total, C₁, C₂ y C₃, por lo que estos valores se cambiarán cuando se utilice el método numérico de aproximación sucesiva, que se analiza posteriormente. El paso siguiente es dar valores al Total=100, C₁=185, C₂=1850 y C₃=2455, se obtiene entonces, un sistema formado por las ecuaciones, (1), (4), (5), (6). Aplicando el método de Cramer (Virginia y otros, 1986) para la solución algebraica, se calcula el determinante de sistema por la expresión:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1,59 & 1,68 & 1,92 & 1,31 \\ 38,2 & 12,79 & 9,2 & 14,53 \\ 5,5 & 27,6 & 29,9 & 27,58 \end{vmatrix} \quad (8)$$

De modo general, se comprueba la condición, $D > 0$, si cumple, se realizará el cálculo de D_x , D_y , D_z , D_t de forma similar a la expresión (8). Se comprueba. Si D_x , D_y , D_z , D_t es positivo, se obtiene la solución única siguiente:

$$X = D_x/D, Y = D_y/D, Z = D_z/D, T = D_t/D,$$

Si no cumple, es decir, D es menor o igual que cero e igualmente con los D_x , D_y , D_z , D_t , se utilizaría el método numérico para la solución del problema.

Este último consiste en darles valores numéricos a las variables en rango de (0; 100) para buscar que valores pueden satisfacer las restricciones asignadas anteriormente, como Total, C_1 , C_2 y C_3 . Si los valores encontrados no son exactamente iguales a los de miembro derecho de las ecuaciones (1), (4), (5) y (6) se calcula el criterio de error para C_1 , C_2 y C_3 solamente ya que el Total debe ser 100% obligatoriamente. Los criterios de error se efectúan por las expresiones:

$$E_1 = (C'_1 - C_1)/C_1; E_2 = (C'_2 - C_2)/C_2; E_3 = (C'_3 - C_3)/C_3 \quad (9)$$

Se calculan las relaciones SiO_2/MgO , Fe/Ni , Ni/Co por las expresiones siguientes:

$$R = \% \text{SiO}_2 / \% \text{MgO}, R_1 = \% \text{Fe} / \% \text{Ni}, R_2 = \% \text{Ni} / \% \text{Co} \quad (10)$$

En este método se acepta un error máximo admisible de 5%, o sea, una desviación de $\pm 5\%$ y los valores de la ecuación (10) se prefijan en el rango de $R = (1,2 - 1,7)$, $R_1 \geq 7$; $R_2 \geq 35$, para garantizar la estabilidad del comportamiento de la mezcla, en los procesos metalúrgicos posteriores.

Si no cumple esta condición, se debe revisar la mineralogía de los tipos de menas.

La dificultad principal de este método consiste en que si no existe la solución algebraica del sistema de ecuaciones anteriormente señalado, no se puede calcular manualmente porque los números para ser comprobados son infinitos, y esto solo puede lograrse en la programación del algoritmo propuesto en el diagrama de bloques de la figura 1. De acuerdo con el algoritmo presentado anteriormente, se confeccionó un software llamado *Cálculo de mezclas metalúrgicas* por medio del lenguaje Microsoft Visual Studio 2005 C#. Un ejemplo de la interfase se representa en la figura 2.

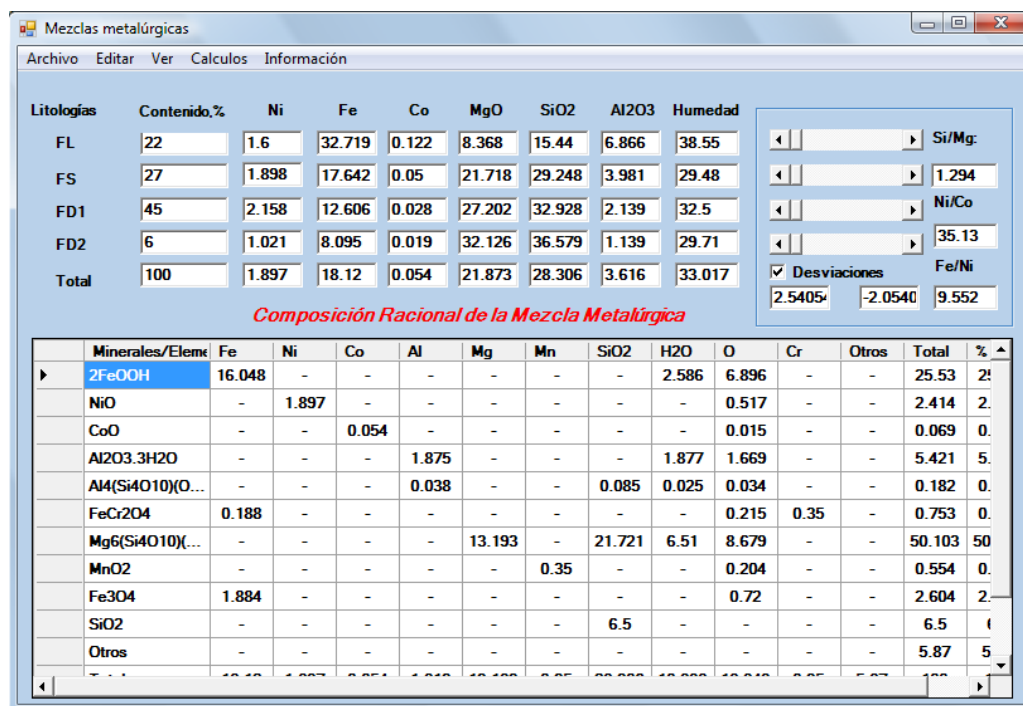


Figura 2. Software de cálculo de mezclas metalúrgicas.

Para este ejemplo, en los datos de entrada se ingresa la composición de cada tipo de minerales que se representa en la tabla 1 y también se puede utilizar el botón *Demos* para acceder a ellos, de acuerdo con el resultado del software, los porcentajes correspondientes a cada tipo de minerales serían: X=22; Y=27; Z=45; T=6.

La composición de la mezcla conformada se representa en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química de la mezcla de minerales

Elementos	Ni	Fe	Co	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂ /MgO
(%)	1.89	18.07	0.054	28,398	21,866	3.650	1.3

Este resultado se debe comparar con el resultado de análisis químico de los mismos minerales.

En la práctica de la empresa Ferroníquel Minera S.A. (FMSA) se elaboraron las mezclas metalúrgicas conformadas por diferentes contenidos de limonita, FL, (10, 15 y 20%), (Pons, 2003), sin embargo el resto de los constituyentes FS, FD1, FD2, no son controlados.

Esta es una de las razones por las que los resultados obtenidos en muchos casos no coinciden con los esperados, al ser comparados con el software elaborado. Algunos ejemplos se muestran a continuación.

En la tabla 5, se muestran los resultados del análisis químico de una mezcla metalúrgica conformada con 10% de limonita.

Tabla 5. Composición química promedio de la mezcla conformada con 10 % de limonita

Elementos	Ni°	Fe	Co	SiO ₂	MgO	Al	SiO ₂ /MgO
(%)	1.99	16,53	0.05	30,01	25,69	1,63	1.17

Se observa que la mezcla obtenida de esta forma no cumple las condiciones para el caso de Ni, Fe y la relación SiO₂/MgO.

El análisis químico de la mezcla metalúrgica No.6 se muestra en la tabla 6, en este caso, para un contenido de limonita de 15%.

Tabla 6. Composición química promedio de la mezcla conformada con 15 % de limonita

Elementos	Ni	Fe	Co	SiO ₂	MgO	Al	SiO ₂ /MgO
(%)	1.885	17,37	0.05	29,44	23,96	2,02	1.28

En este caso el contenido de hierro está por debajo de la norma, con la desviación siguiente:

$$\frac{(17,37 - 18,5) \times 100}{18,5} = 6,1\%$$

En la tabla 7 se muestran los resultados del análisis químico de la mezcla metalúrgica conformada con 20% de limonita.

Tabla 7. Composición química promedio de la mezcla conformada con 20 % de limonita

Elementos	Ni	Fe	Co	SiO ₂	MgO	Al	SiO ₂ /MgO
(%)	1.88	15,50	0.05	30,06	22,98	2,97	1.33

Similarmente al caso anterior, el contenido de esta mezcla está por debajo de la norma con desviación de 16,22%.

De esta forma se comprueba que el método de cálculo de mezcla propuesto representa una vía importante para la conformación de mezclas metalúrgicas con mayor confiabilidad en los resultados, basados en las herramientas matemáticas e informáticas, como se ha demostrado en la aplicación del software elaborado.

Por otra parte, se puede obtener la mezcla deseada sin la necesidad de la toma de grandes volúmenes de muestras, ya que el software indicará al tecnólogo el comportamiento de las mismas simplemente con la entrada de la composición química de los componentes de cada litología empleada.

De esta forma se evitan las pérdidas de recursos minerales al optimizarse el desarrollo de pruebas experimentales y la consiguiente reducción de los costos de análisis químicos.

Conclusiones

El software *Mezclas metalúrgicas*, elaborado a partir de un algoritmo permite conformar mezclas con diferentes tipos de minerales, con un rango de error admisible para el níquel de 2,15%, y para el hierro de 2,32%, lo que garantiza la calidad de ferroníquel de acuerdo con las exigencias de los minerales de alimentación al proceso de pre-reducción.

La aplicación del software *Cálculo de mezclas metalúrgicas* garantiza la optimización y confiabilidad de las pruebas experimentales, durante la conformación de la mezcla de minerales.

Recomendaciones

Aplicar el software *Cálculo de mezclas metalúrgicas* para la conformación de mezclas metalúrgicas en la práctica del proyecto de ferroníquel, con objetivo de comprobar y comparar resultados obtenidos de él a través de pruebas experimentales.

Aplicar la metodología de cálculo obtenida en la realización de cálculos de carga para la producción de aceros y aleaciones.

Continuar perfeccionando este software y aplicarlo con fines docentes en la carrera de Metalurgia.

Referencias bibliográficas

GARMENDÍA, A. G. 1989: *Diagramas de bloques*. Pueblo y Educación. La Habana.

PONS, H. 2003. *Informe técnico*. Ferroníquel Minera S. A. Moa.

VIRGINIA, M. V., SUÁREZ, L. G., CASTRO, M. G, & Peña, G. B. 1896: *Álgebra lineal*. Pueblo y Educación. La Habana.

* Trabajo presentado en el XX Concurso Científico Nacional de Computación en la categoría: Carreras que usan la computación como apoyo en la solución de los problemas. Tutorado por el Dr. C. José Alberto Pons Herrera.