



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO METALURGIA**

**METODOLOGÍA DE CÁLCULO DINÁMICO DE LOS
BALANCES METALÚRGICOS DEL PROCESO DE
FUNDICIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE FERRONÍQUEL**

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Roymer Rubio González

Moa, 2011



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO METALURGIA**

**METODOLOGÍA DE CÁLCULO DINÁMICO DE LOS
BALANCES METALÚRGICOS DEL PROCESO DE
FUNDICIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE FERRONÍQUEL**

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Autor: Roymer Rubio González

Tutores: Ing. Tú Le Manh, Msc.

Prof. Inst Ing. Yunaydi Paumier Castañeda

Moa, 2011

Tesis en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

Dedicatoria

A mi madre Mayre González Basurto por su paciencia y ejemplo durante estos cinco años de estudios y por recordarme siempre que las más grandes caminatas comienzan con el primer paso.

A mi abuela Encarnación Martínez por ser la mejor persona del mundo con mígo.

A mi hermano y mejor amigo Roynier Rubío por ser quien me ha apoyado y estimado durante este tiempo.

Agradecimientos

Agradecer de manera especial al Ing. Roberto Majendíe Cemítiere y su esposa Cecília por apoyarme en este trabajo.

Al Msc. Tu Le Manh por su exigencia y su conocimiento compartido con mígo

A los muchachos del grupo de Metalurgia 5^{to} por su apoyo durante estos cinco años.

A la Ing. Yunaydí Paumier Castañeda por ser tan atenta y buen amiga con mígo.

A todos los que hicieron posible este trabajo.

Gracias.

RESUMEN

En el trabajo se desarrolló una metodología de cálculo dinámico de los balances de masa y energía del proceso de fundición para la obtención de ferróníquel. A partir de dicha metodología se elaboraron los algoritmos de balances y se implementó en EXCEL para la confección de una base de cálculo la cual permite evaluar a los principales parámetros de control del proceso de fundición en el Horno de Arco Eléctrico. Se demostró además, que la metodología propuesta, se puede utilizar como una herramienta imprescindible para el desarrollo de los proyectos de curso, trabajos de diploma en la carrera de metalurgia. Para la validación de la metodología propuesta, se realizó un análisis comparativo con otras bases de datos de las plantas de ferróníquel en el mundo.

Palabras Clave

Metodología, Algoritmo, Horno de Arco Eléctrico.

ABSTRACT

In this work is developed a base of dynamic calculation for the balances of mass and energy of the process of foundry in the obtaining of ferronickel. In spite of this methodology is created an algorithm of metallurgical balances y implanted in Excel for the confection of a based calculation, capable of determining the main parameters of control in the Electric Arch Furnace. It's demonstrated that, the proposal methodology can be used like an important tool for the related works in the career of metallurgy. For the validation of the nominative methodology it was carried out a comparative analysis with other data bases of the principal industries for the nickel production of the world.

Keywords

Methodology, algorithm, Electric Arch Furnace.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1.ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA	11
1.1. Esquema Tecnológico de obtención de FeNi	12
1.1.1. Características del horno de arco eléctrico.	14
1.1.2. Principio de funcionamiento de la conversión de la energía eléctrica en térmica.	15
1.1.3. Parámetros de control que influyen en la operación del horno de Arco Eléctrico.	16
1.1.4. Ciclo típico de reducción	17
CAPÍTULO 2.METODOLOGIA DE CÁLCULO	20
2.1. Metodología de cálculo de balance metalúrgico para el proceso de fundición	20
2.1.1. Metodología de balance de masa	20
2.1.2. Cálculos termodinámicos de las reacciones	21
2.1.3. Cálculo de la masa de FeNi	22
2.1.3.1. Datos utilizados para el desarrollo del balance de masa.	23
2.1.3.2. Determinación de las masas de los compuestos en el ferróníquel y escoria.	24
2.1.4. Cálculo de la masa de carbón necesario para la reducción.	25
2.1.5. Cálculo de la masa de gases producto de la reducción	26
2.2. Cálculo de la composición racional de la materia prima.	27
2.2.1. Cálculo de composición racional del polvo	28
2.3. Metodología de cálculo al balance de energía	28
CAPÍTULO 3.ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	32
3.1. Base de cálculo dinámico de los balances	32
3.1.1. Algoritmo del balance de masa	32

3.1.1.1. Cálculo del balance de material	34
3.1.1.2. Cálculo de la masa de ferroníquel y escoria	34
3.1.1.3. Determinación de los grados de transformación	37
3.1.1.4. Cálculo de la composición racional de materia prima	39
3.1.1.5. Cálculo de la masa de Fe	39
3.1.1.6. Cálculo de la masa de Fe_2O_3	39
3.1.1.7. Cálculo de la masa de FeO_1	39
3.1.1.8. Cálculo de la masa de níquel	40
3.1.1.9. Cálculo de la masa de óxido de níquel	40
3.1.1.10. Cálculo de la masa de dióxido de silicio	40
3.1.1.11. La masa de silicio se halla por estequiometria	40
3.1.1.12. Cálculo de la masa de cobalto	41
3.1.1.13. Cálculo de la masa de óxido de cobalto.	41
3.1.1.14. Cálculo da la masa de MgO , Cr_2O_3 , Al_2O_3	41
3.1.2. Cálculo de la masa de carbón necesario	42
3.1.3. Cálculo de la masa de azufre y la masa de fósforo en la calcina	42
3.1.4. Cálculo de la masa de polvo	42
3.1.5. Algoritmo del balance de energía	43
3.1.6. Cálculo del balance energético	45
3.1.7. Acápites de entrada	45
3.1.7.1. Cálculo del calor aportado por la corriente eléctrica	45
3.1.7.2. Cálculo del calor aportado por la materia prima	45
3.1.7.3. Cálculo del calor aportado por la reacción exotérmica	46
3.1.7.4. Cálculo del calor físico del aire	46
3.1.7.5. Cálculo del calor aportado por la combustión del electrodo	47
3.1.8. Acápites de salida	47
3.1.8.1. Cálculo del calor necesario para la obtención del ferroníquel	47
3.1.8.2. Cálculo del calor necesario para obtener la escoria	47
3.1.8.3. Cálculo del calor necesario consumidos por las reacciones endotérmicas	48
3.1.9. Pérdidas de calor	48
3.1.9.1. Calor perdido por los gases	48
3.1.9.2. Cálculo del calor perdido por el polvo	48
3.1.9.3. Cálculo del calor perdido por el revestimiento	49
3.2. Análisis del balance de materiales.	50
3.3. Análisis del balance energético	54

3.4. Comparación con los Procesos Industriales	55
3.5. Utilidad de la metodología de cálculo dinámico de balances metalúrgicos	56
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	63

INTRODUCCIÓN

La producción de ferroníquel por la tecnología convencional consta de tres procesos fundamentales, tostación reductora en hornos rotatorios, fundición y refinación en hornos eléctricos, los cuales necesitan realizar las operaciones rigurosamente controladas para la obtención de un ferroníquel con la calidad deseada.

La fundición del producto tostado proveniente de los hornos rotatorios tiene como objetivo derretir la carga y llevar a cabo la reducción parcial de níquel e hierro de la misma hasta la obtención de un ferroníquel crudo con características especificadas por la tecnología.

Es necesario contabilizar estrictamente los insumos del proceso para crear las condiciones favorables a la etapa de refinación, ya que es imposible realizar las correcciones durante la marcha del proceso. Por lo que surge la necesidad de la elaboración de los balances de masa y energía que permitan tomar las decisiones tecnológicas correctamente.

Los balances de masa y energía son actividades frecuentes de profesionales de las ingenierías de procesos, principales bases criterios para el diseño y valoración económica de equipos y aparatos en plantas industriales y son tareas cotidianas en la industria metalúrgica. La realización de los balances metalúrgicos permite de antemano chequear los valores experimentales reportados para luego realizar los diagnósticos y la toma de decisiones tecnológicas.

Por lo general, el balance de masa con reacciones químicas se realiza con la suposición de los grados de transformaciones de las reacciones, lo que conduce a la obtención de resultados erróneos en los cálculos. Por ejemplo, la composición química estimada por el cálculo teórico no coincide con los análisis químicos, o existe diferencias inexplicables en los cálculos.

Además, los cálculos de los balances metalúrgicos son muy voluminosos, requieren mucho tiempo de elaboración. Por eso el tiempo que los estudiantes tienen que dedicar a la elaboración de dichos balances es considerable. Actualmente un proyecto de curso que incluye el desarrollo de dichos balances se realiza por dos estudiantes en un período comprendido entre 12 y 16 semanas. Por otra parte, varias disciplinas de la especialidad durante el semestre requieren de otros trabajos similares. Para facilitar y aumentar la productividad del trabajo debido a las interacciones entre las tablas dinámicas de los balances, incluso el ahorro del tiempo, es imprescindible crear la metodología general para resolver dicho problema, (Le, 2010).

Situación problémica: La necesidad de desarrollar una metodología de cálculo de los balances metalúrgicos del proceso de fusión en los hornos eléctricos.

Problema: No existencia de una metodología de cálculo que permita la determinación de los grados de transformación de las reacciones de reducción y desarrollar los balances metalúrgicos del proceso de fundición para la producción de ferroníquel de forma eficiente.

Hipótesis: Si se elabora una metodología de cálculo dinámico con la utilización de los datos reales, entonces, permitirá realizar los balances metalúrgicos del proceso de fundición de forma eficiente para la producción de ferroníquel.

Objeto de estudio: Metodología de cálculo de los balances metalúrgicos del proceso de fundición para la obtención de ferroníquel.

Objetivo general: Elaborar una metodología de cálculo dinámico que permita realizar con mayor eficiencia los balances metalúrgicos del proceso de fundición para la producción de ferroníquel.

Para dar cumplimiento al objetivo general se plantean las **tareas** siguientes:

- Gestionar datos prácticos del proceso de fundición para la realización de los cálculos.
- Elaborar una base de cálculos de balances metalúrgicos del proceso mediante las tablas dinámicas en Excel.
- Realizar cálculos de los balances de masa y energía del proceso de fundición para la producción de ferroníquel.

- Desarrollo algorítmico de los balances de masa y energía para el proceso de fundición.
- Determinar los grados de extracción de los elementos de ferróníquel.
- Determinar el comportamiento de los principales parámetros de control del proceso.

Aportes

- Desarrollo de una metodología de cálculo dinámico de los balances metalúrgicos del proceso de fundición para la producción de ferróníquel.
- Desarrollo de un modelo teórico para la solución de un problema inverso de la técnica del balance de materiales
- Material de estudio del proceso de fundición para la obtención de ferróníquel y la asignatura “Metalurgia del Acero y otras Aleaciones” del plan D de la carrera de Metalurgia.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA

La obtención de ferroníquel parte de un esquema tecnológico, el cual se encarga de describir los procesos ocurridos hasta llegar al producto final. Actualmente las principales fábricas del mundo se rigen por el esquema tradicional de tostación reductora en hornos rotatorios, fundición y refinación en hornos eléctricos.

Las etapas del proceso ubicadas en el esquema tecnológico garantizan la realización de los balances metalúrgicos y determinan los consumos principales así como los parámetros que influyen en la fusión eléctrica.

Hernández & Onichin (1973), realizaron un estudio de la obtención de ferroníquel por electrofundición a partir de minerales serpentiniticos de Moa. El mineral se mezcla con el agente reductor sólido después se enviaba a tolva de alimentación de horno. Como agente reductor, se utilizó el carbón de piedra, cuyo consumo varió desde 4,5 a 6 % del mineral seco. Se elaboró un balance de masa para la obtención de ferroníquel, sobre la base del pesaje de los materiales. La extracción de níquel determinada fue de 67 % para el ferroníquel pobre entre (7 a 8 %) y de más de 95 % al FeNi más rico (12 %). Las pérdidas de níquel con la escoria de desecho fueron de 2,16 % del total, la extracción hierro fue de un promedio de 72 %. De esta forma se puede decir que las pruebas investigativas de elaboración de serpentinas de Moa por la vía de electrofundición, mostraron que esta materia prima puede ser elaborada para la obtención de un ferroníquel de 7 a 12 % y a un mayor contenido de níquel, con una alta extracción de este y sin adición de fundente.

Suárez (1993), determinó un análisis de la tecnología de prerreducción de la serpentina para la producción de ferroníquel a partir de los minerales serpentiniticos de cuba según el esquema convencional. Se realizó una sustitución parcial de carbón por un agente clorurante con el objetivo de obtener un mayor grado de reducción y mejores índices tecnológicos, por la formación de silicatos de sodio o de calcio, los que disminuyen el punto de fusión de la escoria. Pero, no se desarrollaron los cálculos sobre la base de las reacciones químicas que tienen lugar en el proceso.

Riverón (2003) realizó un estudio del balance de masa y energía del horno de arco eléctrico para la obtención de ferróníquel. Los cálculos se realizaron para en proceso de prerreducción en un horno de soleras múltiples. Sin embargo esta tecnología no se prevé utilizar para la producción de FeNi en Moa. El desarrollo de cálculos de los balances se basa en la determinación de los coeficientes de distribución y de los grados de transformación de las reacciones, de forma asumida. Por lo que se presentan errores de cálculos y diferencias inexplicables de los resultados obtenidos.

Reyes (2011) desarrolló una metodología de cálculo teórico para determinar el consumo de Fuel-oil en el Horno de Soleras Múltiples. Se tuvieron en cuenta los principales parámetros como masa, composición mineralógica de la mena alimentada y la eficiencia del horno a partir de las transformaciones físico químicas en las diferentes zonas del horno, en el régimen de explotación normal. Sin embargo esta metodología no es aplicable para las características del proceso de fundición en los hornos de arco eléctrico

1.1. Esquema tecnológico de obtención de FeNi

La planta de FeNi (Aneka) se localiza en la isla de Sulamessi en Indonesia, fue autorizada en 1975 pero en 1995 fue añadida una segunda línea para incrementar la capacidad de la planta a 11 000 t de níquel al año. El material es tratado por la tecnología de calcinación en horno de tambor rotatorio, fusión en horno eléctricos obteniéndose como producto un FeNi con 19 % de Ni el cual es refinado en hornos de cuchara y para esto se utiliza un agitado con agitadores refractarios usando CaC_2 y Na_2CO_3 para desulfurado. El metal es refinado posteriormente en cucharas vibratorias por inyección de O_2 usando CaCO_3 , CaO , CaF_2 y polvo de hierro, como se muestra en la figura 1, (Bergman, 2010).

El diagrama de flujo de Hyuga reutiliza los gases producto de la fusión, en los secadores rotatorio y se agrega el CaO_2 en los hornos de inducción de baja frecuencia obteniéndose FeNi de alto carbón. Para el esquema tecnológico de Larco es inyectado oxígeno en los convertidores produciendo un FeNi de 25 % de contenido de níquel. En la obtención de ferróníquel por SLN ERAMET se utiliza una Cuba agitadora después de la fusión con introducción de CaC_2 , CaO donde se alcanza un contenido de níquel en el FeNi de 30 %.

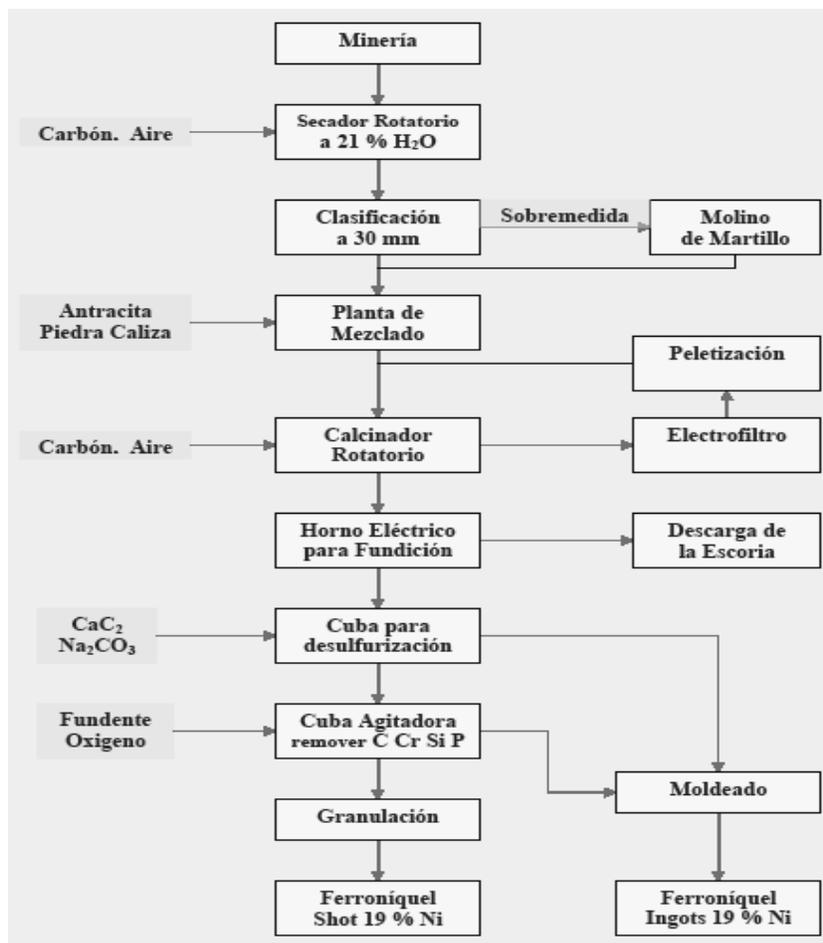


Figura1. Diagrama de flujo de obtención de FeNi en Aneka.

En el esquema anterior se representa el diagrama de flujo para la obtención de ferroniquel crudo en Aneka el cual utiliza como etapa siguiente la refinación en hornos de Cuba encargado de la desulfuración no siendo este esquema generalizado en la industria ferroniquelífera.

La planta de Cerro Matoso S. A unas de las principales en el mercado del FeNi está localizada en Colombia y comenzó su operación en 1982. Una segunda línea entró a comienzos de noviembre del 2000. Su capacidad de producción en estos momentos se estima en 60 000 t/año. El material es calcinado en horno de tambor rotatorio y luego es fundido en horno de arco eléctrico con lo que se obtiene un FeNi con 43,5 % de Ni. Este es refinado en la estación de cuchara usando una escoria básica, el metal es calmado con FeSi y el azufre es removido con escoria básica bajo condiciones reductoras. La mezcla de carbón bituminoso y antracita es añadida a la alimentación a razón de 4 % de la masa de mineral seco.

1.1.1. Características del horno de arco eléctrico

En la figura 2 se muestra los componentes esenciales del Horno de Arco Eléctrico.

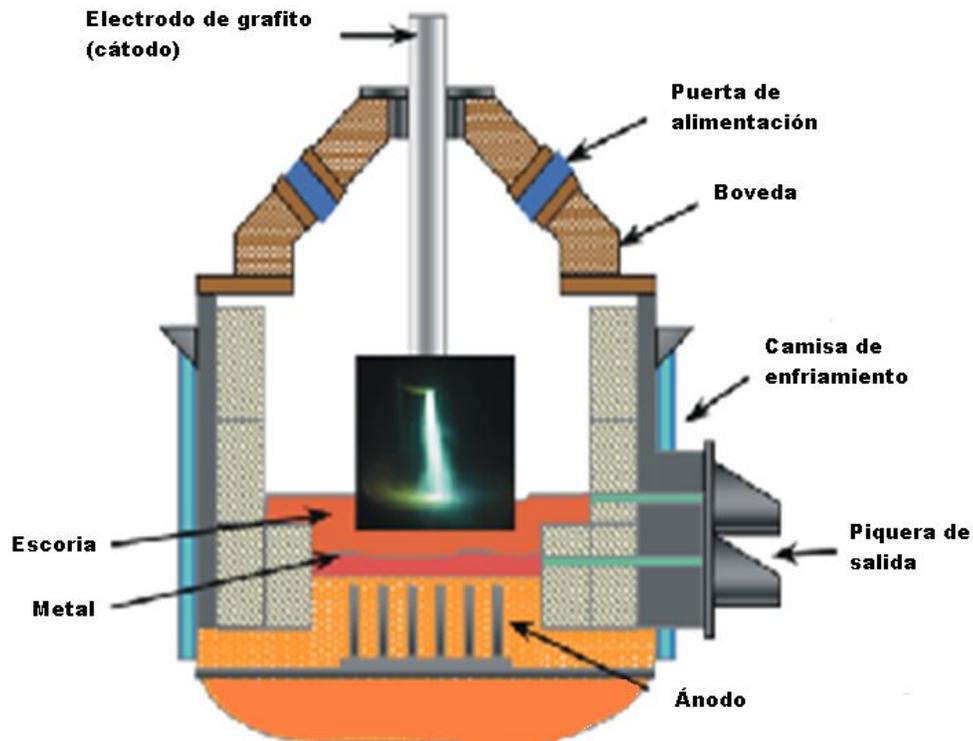


Figura 2. Esquema del horno de arco eléctrico.

El horno de corriente directa (D.C) de arco eléctrico consiste esencialmente en un cilindro, con sistema de enfriamiento en las paredes y la solera ó tapa. En esta última se ubican los electrodos al lado del agujero de evacuación de gases. Los electrodos se conectan al cátodo por una unión enfriada por agua la cual se coloca en un brazo móvil. El cual se aísla eléctricamente de la conexión con el cátodo. Los electrodos de grafito (cátodo) se posicionan sobre el baño líquido subiendo o bajando en dependencia de la velocidad de fusión de la carga.

El ánodo está conformado de barras de acero múltiples empotradas en el refractario del hogar. Las barras se conectan a un plato de acero instalado en el hogar en contacto con el baño fundido completando el circuito eléctrico. El horno se alimenta a través de puestos de alimentación ubicado en la solera. El sistema de limpieza de gases consiste en una tubería que va desde la parte superior del horno a una cámara enfriada por agua, a un enfriador de gases y después a un filtro de manga donde se recupera de 1 a 3 % de polvo, (Kotse, 2010).

1.1.2. Principio de funcionamiento de la conversión de la energía eléctrica en térmica

Al acercarse el cátodo que es el electrodo, al ánodo que es el metal, se produce un corto donde las partículas cargadas que se encuentran entre ellos aumentan su velocidad producto al movimiento caótico y desordenado entre ellas chocando entre si produciendo calor debido a la fricción fusionando la carga por radiación. Como se muestra en la figura 3.

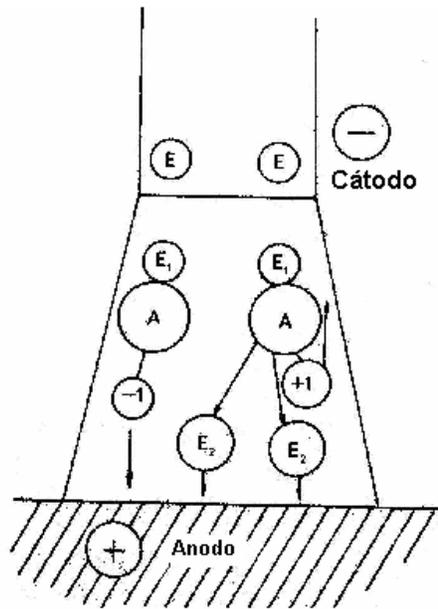


Figura 3: Formación del arco eléctrico entre el electrodo y el metal.

Los Hornos de Arco Eléctricos son capaces de alcanzar la temperatura requerida para fundir el mineral sin la necesidad de adicionar fundente y así obtener una escoria lo suficientemente fluida la cual permita la separación satisfactoria de los metales reducidos. El mineral calcinado llega al horno a una temperatura de 800 °C la cual permite un buen balance de calor y evita que se sinterice el mineral lo que permite poca fluidez. Además esta temperatura permite una mejor manipulación del mineral con recipientes refractarios para su introducción al Horno de Arco Eléctrico (Hernández & Onichin, 1973).

1.1.3. Parámetros de control que influyen en la operación del horno de Arco Eléctrico

- Energía necesaria para fundir: se puede estimar en 550 kWh, con ligeras variaciones. El calor requerido para fundir una tonelada de mineral se puede desglosar como calor para fundir la escoria, el que representa 80 a 85 % del total, y el calor para fundir y reducir el metal. Estas dos cantidades de calor varían inversamente, (Hernández, 1972).
- Consumo del Agente Reductor: este parámetro depende de la reducción de los metales. Los finos de coque se añaden a los recipientes. Durante el transporte de estos en los carros son automáticamente pesados en una tova que los registra y añade al recipiente del mineral calcinado, (Hernández, 1972).
- Contenido de Níquel en la escoria: está representada por la pérdida de níquel en la escoria la que muestra cuanto níquel no se transformó y se quedó como óxido y cuanto níquel pasó al FeNi. Con un alto contenido de níquel y hierro en el mineral, se obtiene más metal, mientras que se requiere más calor para reducir se obtiene menor cantidad de escoria (Hernández, 1972).
- Propiedades químicas físicas del mineral alimentado: la periodicidad del horno y el voltaje a seleccionar para una potencia dada son ambas afectada por la granulometría del mineral si este está fino requiere de un mayor voltaje para fundirse, si hay tantas partículas finas como gruesas se coloca bajo el electrodo interrumpiendo el flujo de electricidad. También es afectada la productividad del horno por las propiedades químicas del mineral, como por ejemplo, la relación sílice/magnesio afectan el punto de fusión de la escoria ya que si es grande hay un mayor contenido de silicio aumentando su punto de fusión, el contenido de FeO en la escoria aumenta la conductividad en esta lo que provoca una temperatura constante beneficiando los procesos que ocurren en la escoria. (Hernández, 1972).
- Mala manipulación operacional de horno.

Los principales parámetros de control a determinar en el trabajo son, el consumo del agente reductor que permite conocer los valores reales de consumo de carbón responsable de la reducción completa de los metales fundamentales, contenido de níquel, hierro, cobalto en la escoria la cual da una medida de ocurrencia de las reacciones de

reducción pudiéndose encontrar el comportamiento de los valores de transformación de cada metal, además sirve de apoyo para determinar el comportamiento de la masa de ferróníquel y de las masas de cada elemento en esta.

El proceso de fundición para la producción de ferróníquel se caracteriza principalmente por la magnitud de las reducciones de los elementos que pasan al ferróníquel crudo. Dichos elementos son directamente proporcionales a la masa de ferróníquel, mientras mayor es el grado de reducción, mayor son las masas de estos elementos en el producto principal (Hernández, 1972).

1.1.4. Ciclo típico de reducción

- 1) Aproximadamente 11 toneladas de mineral fundido a 2940 hasta 3000 °F son vertidas de un horno de fundición a una cazuela de reacción de 280 pie³ Es pesado, según se va vertiendo, mediante una romana situada en el piso de la pista de reacción.
- 2) La cazuela contenida con mineral fundido se sitúa al lado de otra idéntica con 9 - 14 t de ferróníquel fundido. La reducción es muy rápida y se despide una gran cantidad de calor.
- 3) El vertido de una cazuela a otra se continúa hasta un total de cinco vertidas.
- 4) La cazuela de reacción llena es elevada y la escoria es decantada cuidadosamente de la superficie del metal.
- 5) La cazuela de escoria es transportada hasta la posición de granulación en la pared exterior del edificio de fundición.

La granulación se efectúa en piscinas o por chorros de agua a presión para luego utilizarse en otros procesos como la obtención de refractarios termoaislantes.

Mientras que la escoria es vertida el otro horno de fusión es vaciado preparando el ciclo de reducción. El ciclo de reacción toma un promedio de 15 a 16 min (Hernández, 1972) distribuidos de la forma siguiente:

Reacción o mezclado	(6 – 8 min).
Sedimentación	(3 – 4 min).
Eliminación de la escoria	(2 min).
Tratado de las cazuelas	(2 – 3 min).

Conclusiones del capítulo

- Al tomar como bases la revisión bibliográfica, prácticamente ningún material hace alusión al cálculo de los grados de reducción. Estos valores se asumen.
- No se ha logrado desarrollar una metodología de cálculo de los balances metalúrgicos para el proceso de fundición en el horno de arco eléctrico.
- Los parámetros fundamentales que se consideran durante el proceso de fundición en el horno de arco eléctrico son: el grado de extracción de níquel, consumo del agente reductor, masa de ferróníquel crudo, masa de escoria, entre otros.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

En el presente capítulo se explica el fundamento de la metodología de cálculo que se elaboró para la realización de los balances de masa y energía del proceso de fundición.

2.1. Metodología de cálculo de balance metalúrgico para el proceso de fundición

2.1.1. Metodología de balance de masa

La metodología del balance de material se apoyó fundamentalmente en la ley de contenido de los elementos así como los cálculos estequiométricos y principalmente de la ley de conservación de la masa, la que anuncia que la materia no se crea ni se destruye, se transforma por lo que se puede decir que para un sistema la sumatoria de lo que entra es igual a la sumatoria de los productos que salen.

$$\sum m(\text{entra}) = \sum m(\text{Sale})$$

Uno de los pasos importante de la metodología de balance es la esquematización del sistema material, el cual para el caso del horno eléctrico se representa por la figura 4.

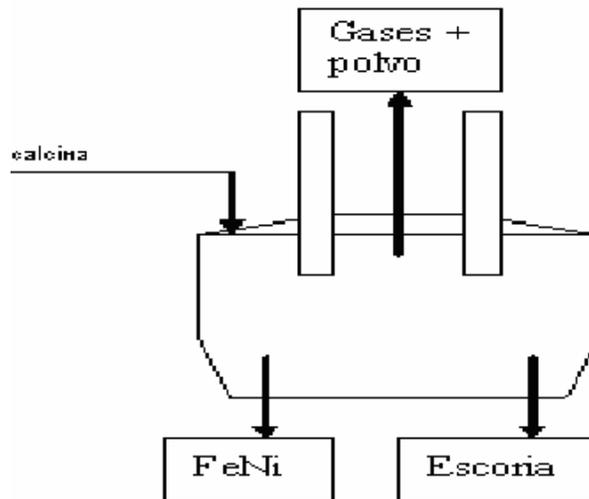


Figura 4. Esquema del balance de materiales.

En el la figura 4, se observa que los principales componentes de entrada al sistema son: la materia prima, el agente reductor, pasta de electrodo y como componentes de la salida, el ferróniquel crudo la escoria los gases y el polvo.

2.1.2. Cálculos termodinámicos de las reacciones

El cálculo de las variaciones de energía libre de las reacciones, ΔG , se realiza con la utilización de la ecuación de Gibbs Helmontz, a las temperaturas en las que se producen, (Matos & Hing, 1988).

$$\Delta G_R = \Delta H_R - T \cdot \Delta S \quad (1)$$

Las principales reacciones que tienen lugar durante el proceso de fundición en la producción de ferroníquel, se muestran a continuación.

Según los cálculos termodinámicos realizados, el orden de reacción se establece por lo siguiente:



Los valores de ΔG de formación se tomaron en (Fernández *et al.*, 2001).

La reacción del Cr_2O_3 , MgO y del Al_2O_3 no se consideraron, ya que no se tiene contenido de ellos en el ferroníquel. Por lo que pasan directamente a la escoria. La reacción del carbón con el oxígeno se consideró como la última etapa ya que se tomó en cuenta que el carbón que se oxida es el residual, que no es más que el carbón práctico menos el necesario teniendo en cuenta el desprendido por los electrodos para 100 kg de calicina procesada.

2.1.3. Cálculo de la masa de FeNi

Para el desarrollo del cálculo, se designa como masa de ferroníquel (X), como la masa de la escoria (Y), por lo que a través de la ecuación fundamental de balance general y la ecuación de balance de níquel en el proceso se procede a realizar un sistema de ecuaciones el cual representa con veracidad el contenido de los elementos en las masa de cada producto de la fusión.

$$m(FeNi) = \frac{m(Ni)_{FeNi} \cdot 100}{\%(Ni)_{FeNi}} \quad (2)$$

donde:

$m(FeNi)$: masa de ferroníquel denominada (X), kg .

$m(Ni)_{FeNi}$: masa de níquel en el ferroníquel kg .

$\%(Ni)_{FeNi}$: contenido de níquel en el ferroníquel .

La masa de Ni en el ferroníquel se determina por la ecuación de balance del níquel.

$$m(Ni)_{FeNi} = m(Ni)_{calc} - [m(Ni)_{esc} + m(Ni)_{polv}] \quad (3)$$

donde:

$m(Ni)_{calc}$: masa de níquel en la calcina, kg .

$m(Ni)_{esc}$: masa de níquel en la escoria, kg .

$m(Ni)_{polv}$: masa de níquel en el polvo kg .

Se descompone la ecuación de balance general.

$$m(MP) + m(carbon) = m(FeNi) + m(escoria) + m(gases) + m(polvo) \quad (4)$$

$m(MP)$: masa de la calcina kg .

$m(carbón)$: masa de carbón práctico a introducir en el horno kg .

$m(escoria)$: masa de escoria producto en el horno kg .

$m(gases)$: masa de gases desprendido kg .

$m(polvo)$: masa de polvo kg .

2.1.3.1. Datos utilizados para el desarrollo de los balances

Los principales datos que se deben gestionar para el desarrollo de la metodología de cálculo se exponen a continuación.

La composición química promedio de la carga se representa en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química de la carga.

Elemento	Ni	Fe	Co	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	C	S	P
%	2,07	18,75	0,07	37,69	25,69	3,97	1,12	1,77	0,08	0,02

Es sumamente importante conocer la composición química de ferroníquel crudo y de la escoria para la implementación de la metodología propuesta, la cual se representa en las tablas 2 y 3.

Tabla 2 Composición química de FeNi crudo.

Elementos	Ni	Fe	Co	SiO ₂	C	S	P
%	31	66,55	0,6	0,8	0,85	0,1	0,1

En la tabla 2 se presenta el contenido del ferroníquel crudo que está estrechamente relacionada con la calidad de este.

Tabla 3 Composición química de la escoria.

Componentes	NiO	FeO	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	S	C	Otros
%	0,08	6,64	50,6	33,83	1,47	0,12	0,02	7,22

Como se observa en la tabla 3, los componentes principales de la escoria son los óxido de hierro (II), sílice, magnesio; una pequeña cantidad de níquel en centésima se pierde junto con la escoria por lo que surge la necesidad de plantear un balance para el níquel como se muestra en la ecuación (3).

Temperatura de producto: 1500 °C .

Temperatura de la escoria: 1600 °C .

Temperatura de gases de salida: 1000 °C .

Productividad: 44,4 t/h .

Arrastre de polvo: 0,5 -0,7 % .

2.1.3.2. Determinación de las masas de los compuestos en el ferróníquel y escoria

Para continuar con el procedimiento de cálculo se determinan las masas de los compuestos en el ferróníquel y en la escoria a partir de las tablas 2 y 3 de contenidos de ambos productos además de la ecuación (2).

$$m(Ni)_{FeNi} = \frac{\%(Ni)_{FeNi} \cdot m(FeNi)}{100}$$

$$m(Ni)_{FeNi} = 0,310 \cdot X \quad (5)$$

$$m(Fe)_{FeNi} = 0,666 \cdot X \quad (6)$$

$$m(Co)_{FeNi} = 0,006 \cdot X \quad (7)$$

$$m(SiO_2)_{FeNi} = 0,008 \cdot X \quad (8)$$

$$m(C)_{FeNi} = 0,009 \cdot X \quad (9)$$

$$m(S)_{FeNi} = 0,001 \cdot X \quad (10)$$

$$m(P)_{FeNi} = 0,001 \cdot X \quad (11)$$

Para la escoria se tiene que:

$$m(NiO)_{esc} = 0,0008 \cdot Y \quad (12)$$

$$m(FeO)_{esc} = 0,066 \cdot Y \quad (13)$$

$$m(SiO_2)_{esc} = 0,506 \cdot Y \quad (14)$$

$$m(MgO)_{esc} = 0,338 \cdot Y \quad (15)$$

$$m(Cr_2O_3)_{esc} = 0,015 \cdot Y \quad (16)$$

$$m(S)_{esc} = 0,001 \cdot Y \quad (17)$$

$$m(C)_{esc} = 0,000 \cdot Y \quad (18)$$

2.1.4. Cálculo de la masa de carbón necesario para la reducción

Estableciendo los valores de la ecuación 4 tenemos que

$$m(C) = m(C)_1 + m(C)_2 + m(C)_3 + m(C)_4 + m(C)_5 \quad (19)$$

donde:

$m(C)_1$: carbón necesario para la reducción del Fe_2O_3 kg .

$m(C)_2$: carbón necesario para la reducción del NiO kg .

$m(C)_3$: carbón necesario para reducción de CoO kg .

$m(C)_4$: carbón necesario para la reducción del FeO kg .

$m(C)_5$: carbón necesario para la reducción de SiO_2 kg .

Cálculo de la masa de carbón necesario para la reducción .

Para el cálculo de las masas de carbón necesaria se tiene que .

$$m(C)_1 = \frac{m(FeO)_1 \cdot MM(C)}{MM(FeO)} \quad (20)$$

donde:

$m(FeO)_1$: masa de óxido de hierro inicial.

$$m(FeO)_1 = m(FeO)_3 + m(FeO)_{esc} \quad (20.1)$$

$m(FeO)_3$: es la masa de óxido de hierro que no se transformó kg .

$m(FeO)_{esc}$: masa de óxido de hierro en la escoria kg .

$MM(C)$: molar de carbón g/mol .

$MM(FeO)$: masa molar del óxido de hierro g/mol .

Las masa de óxido de hierro en el FeNi y la escoria se determinan por

$$m(FeO)_{li} = \frac{m(Fe)_{FeNi} \cdot MM(FeO) \cdot X}{MM(Fe)} \quad (21)$$

donde:

X : masa ferroníquel total kg .

$MM(Fe)$: masa molar del hierro g/mol .

$$m(FeO)_{esc} = 0,066 \cdot Y \quad (22)$$

donde:

Y : masa total de escoria kg .

Por tanto la masa de $(FeO)_1$ es:

$$m(FeO)_1 = 0,856X + 0,066Y \quad (22.1)$$

y la masa de carbón para la reacción 1 es:

$$m(C)_1 = \frac{[10,274X + 0,797Y]}{55,85} \quad (23)$$

$$m(C)_2 = \frac{m(Ni)_{FeNi} \cdot MM(C)}{MM(Ni)} \quad (24)$$

donde:

$m(Ni)_{FeNi}$: masa de hierro en el ferroníquel, kg .

$$m(C)_3 = \frac{m(Co)_{FeNi} \cdot MM(C)}{MM(Co)} \quad (25)$$

$$m(C)_4 = \frac{m(Fe)_{FeNi} \cdot MM(C)}{MM(Fe)} \quad (26)$$

$$m(C)_5 = \frac{m(SiO_2)_{FeNi} \cdot MM(C)}{MM(SiO_2)} \quad (27)$$

Se obtiene el valor de la masa de carbón necesaria en la función.

2.1.5. Cálculo de la masa de gases producto de la reducción

El cálculo de los gases se realiza de igual manera pero con la masa de carbón necesario.

$$m(gases) = m(CO)_1 + m(CO)_2 + m(CO)_3 + m(CO)_4 + m(CO)_5 \quad (28)$$

$$m(CO)_1 = \frac{m(C)_1 \cdot MM(CO)}{MM(C)} \quad (28)$$

$$m(CO)_2 = \frac{m(C)_2 \cdot MM(CO)}{MM(C)} \quad (29)$$

$$m(CO)_3 = \frac{m(C)_3 \cdot MM(CO)}{MM(C)} \quad (30)$$

$$m(CO)_4 = \frac{m(C)_4 \cdot MM(CO)}{MM(C)} \quad (31)$$

$$m(CO)_5 = \frac{m(C)_5 \cdot MM(CO)}{MM(C)} \quad (32)$$

Así se calcula la masa de CO la cual queda en función de la masa de ferróniquel y de escoria.

Al sustituir las masas de carbón y de monóxido de carbono totales en función del ferróniquel y la escoria en la ecuación (4) de balance general se obtiene el sistema de ecuaciones donde se determinó la masa de ferróniquel y de escoria producto en el proceso.

Con las masas de ferróniquel y de escoria sustituimos en las ecuaciones (19) y (28) y se calcula el CO total desprendida y la masa de C necesario respectivamente.

2.2. Cálculo de la composición racional de la materia prima

Este cálculo se realiza teniendo en cuenta la tabla 1. Contenidos de los compuestos en la carga, además de la utilización de la ley de contenido.

$$\frac{\%(comp)}{100} = \frac{m(comp)}{m(total)} \quad (33)$$

Se realiza el cálculo de cada compuesto de la calcina, luego por leyes estequiométricas se procede al cálculo de cada elemento siguiendo el orden de las reacciones.

$$r = r''$$

$$\frac{n(met)}{n(comp)} = \frac{1}{1}$$

$$\frac{m(met)}{mM(met)} = \frac{m(comp)}{mM(comp)} \quad (34)$$

2.2.1. Cálculo de composición racional del polvo

Para este cálculo, la composición química del polvo se toma igual que la de la calcina, teniendo en cuenta que el arrastre de polvo es de 0,5 % según datos prácticos aplicando la ley de contenido, ecuación (33)

$$\frac{\%(polvo)}{100} = \frac{m(polvo)}{m(MP)} \quad (35)$$

donde:

$\%(polvo)$: porcentaje de arrastre de polvo % .

$m(polvo)$: masa de polvo kg .

$m(MP)$: masa de materia prima kg .

2.3. Metodología de cálculo al balance de energía

El sistema está basado en el aporte de energía y en los consumo de estas por lo que podemos decir que:

$$\sum (energía)_{entrada} = \sum (energía)_{salida}$$

Al igual que el balance de masa, el balance de energía puede considerarse como una técnica fundamental de la ingeniería en general o de la ingeniería metalúrgica en particular. Generalmente está relacionado con aspectos comunes como el diseño y evaluación de equipos o procesos en una planta industrial (Le, 2010).

Para ello se establecen acápites de aporte de energía, de consumo y como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Acápites generales del balance de energía.

No	Título de acápite	Ecuación para su cálculo
Entrada de energía		
1	Calor aportado por la corriente eléctrica	$Q_1 = E \cdot X$
2	Calor aportado por la materia prima	$Q_2 = m(MP) \cdot Cp_{esp} \cdot t_{carg}$
3	Calor aportado por la reacción exotérmica	$Q_3 = \frac{m(comp) \cdot \Delta H_r}{MM(comp)}$
Consumo y pérdida de energía		
4	Calor consumido para la obtención de los productos	$Q_4 = \sum m(prod) \cdot Cp_{esp} \cdot t_{prod}$
5	Calor consumido por las reacciones endotérmicas	$Q_5 = \sum Qi_{endot}$
6	Calor perdido por los gases saliente	$Q_6 = V_{gases} \cdot Cp_{volum} \cdot t_{gases}$
7	Calor perdido por el polvo	$Q_7 = m(polvo) \cdot Cp_{esp} \cdot t_{polv}$
8	Calor perdido a través del revestimiento	$Q_8 = \text{por diferencia de masa}$

En el acápite 3 y 4 de calor aportado por la reacción exotérmica y calor consumido por las reacciones endotérmicas.

El ΔH_r se calcula por la ecuación de Kirchhoff (Krestovnikov & Vigdorovich, 1980).

$$\Delta H_r = \Delta H_{r(298)} + \int_{1073}^{1773} \Delta C_p dt \quad (36)$$

Los ΔC_p de las reacciones se calculan teniendo en cuenta los Δa , Δb , Δc , de cada compuesto en la reacción, (Glasstone, 1979). Y con apoyo de la tabla de Cpm de los compuestos anexo (3).

$$\Delta a = \sum \Delta a_{prod} - \sum \Delta a_{reaccio}$$

$$\Delta b = \sum \Delta b_{prod} - \sum \Delta b_{reaccio}$$

$$\Delta c = \sum \Delta c_{prod} - \sum \Delta c_{reaccio}$$

Los valores de entalpias a 298 K, anexo 10.

El balance de materiales en buena parte se corresponde con las tomas de decisiones, relacionadas con los centros de proyectos e investigaciones de algunas empresas (Chang, 2000).

Las diferencias fundamentales están en la norma de consumo del portador energético y que la contabilidad metalúrgica se vuelve compleja producto a la difícil medición y ausencia de datos sobre algunos compuestos y materiales (Le, 2010).

Los programas que se utilizan durante la elaboración del trabajo son:

- **Microsoft Office Word 2007.**
- **Microsoft Office Excel 2007.**
- **Paint.**

Conclusiones del capítulo

- Los métodos aplicados establecen una base de cálculo de los balances de masa y energía los cuales pueden automatizarse.
- La representación gráfica de los balances ayudan a la comprensión de los mismos.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se desarrolla la base de cálculo dinámico para los balances metalúrgicos basados en las metodologías antes mencionadas, dicha base de cálculo permitirá de forma dinámica obtener los resultados de los principales parámetros de control así como los grados de transformación de los metales fundamentales en el proceso.

3.1. Base de cálculo dinámico de los balances

Sobre la base de la metodología de balances que se explica en el capítulo 2, se obtuvo como resultado principal, la base de cálculo dinámico de balances metalúrgicos del proceso de fundición para la producción de ferroníquel.

La determinación por medio de tablas dinámicas en el EXCEL de los principales parámetros de control del proceso de fundición está entre las principales funciones de esta base.

Los parámetros de control que no se determinan en dicha base de cálculo son la composición físico química del mineral, el consumo de la energía eléctrica, los cuales se toman de datos bibliográficos reales del proceso y análisis de laboratorio.

3.1.1. Algoritmo del balance de masa

Se efectúa con el objetivo de crear la base de cálculo del balance de masa del proceso de fusión en el horno de arco eléctrico.

A partir de la ley fundamental de conservación se llega a una de las principales ecuaciones del sistema, el balance de níquel en el sistema por lo que se plantea como entrada las masas de la materia prima y consumo de carbón y masas de salida la de ferroníquel, escoria, gases y polvo obteniendo un sistema de ecuaciones en función de la masa de ferroníquel y escoria que permite hallar la masa de gases, polvo, encontrar el consumo de agente reductor así como los demás parámetros mencionados, y se establece así la comprobación de igualdad en la entrada y salida donde al existir una variación se reajusta con las masas de otros en al calcina y en la escoria introduciéndola en la entrada.

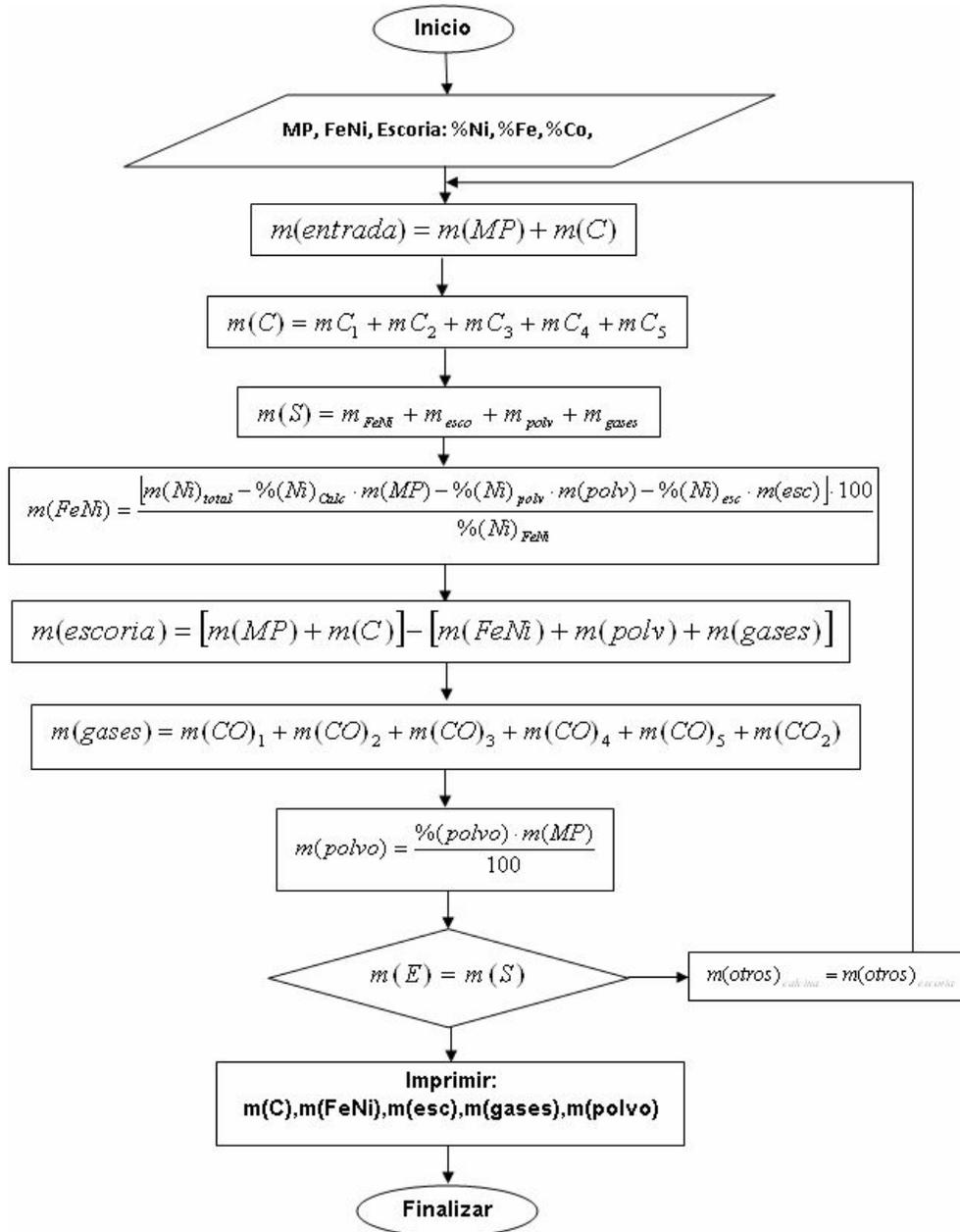


Figura 5. Diagrama de bloques de balance de masa del proceso de fundición.

La utilización del esquema algorítmico es de vital importancia en el desarrollo de los cálculos que a continuación se representan ya que permite seguir un orden lógico de realización de los mismos.

3.1.1.1. Cálculo del balance de material

Para realizar los cálculos en el presente capítulo se apoya en los datos de análisis de laboratorio obtenidos en la práctica además de las ecuaciones del capítulo anterior.

Por lo que se parte del cálculo de la masa de ferróniquel y escoria las cuales están en función de las incógnitas (X) y (Y).

Según las ecuaciones (5 - 18) de las masas de los compuestos en el ferróniquel y escoria sucesivamente en función de (X) y (Y) se procede a calcular.

3.1.1.2. Cálculo de la masa de ferróniquel y escoria

Por la ecuación 2 de ferróniquel se tiene que,

$$m(FeNi) = \frac{[m(Ni)_{total} - m(Ni)_{esc} - m(Ni)_{polv}] \cdot 100}{\%Ni(FeNi)} \quad (37)$$

Pero como $m(Ni)_{esc} = \frac{\%Ni_{esc} \cdot m(esc)}{100}$ y sustituyendo en la ecuación 36

$$m(FeNi) = \frac{[m(Ni)_{total} - \frac{\%Ni_{esc} \cdot m(esc)}{100} - m(Ni)_{polv}]}{\%Ni(FeNi)}$$

$$31X = [2,070 - \frac{0,08Y}{100} - 0,010] \cdot 100$$

$$31X = 207 - 0,08Y - 1$$

$$31X + 0,08Y = 205,965 \quad (38)$$

Para hallar la otra ecuación del sistema empezamos por la ecuación 4 la cual es la ecuación de balance general

$$m(MP) + m(carbon) = m(FeNi) + m(escoria) + m(gases) + m(polvo)$$

Se desglosa la ecuación y tenemos que

$$m(C) = m(C)_1 + m(C)_2 + m(C)_3 + m(C)_4 + m(C)_5$$

$$m(C)_1 = \frac{m(FeO)_1 \cdot MM(C)}{MM(FeO)_1}$$

donde:

$$m(FeO)_1 = m(FeO)_3 + m(FeO)_{esc}$$

$$m(FeO)_3 = 0,856X$$

$$m(FeO)_{esc} = 0,066Y$$

$$m(FeO)_1 = 0,856X + 0,066Y$$

$$m(C)_1 = \frac{(0,856X + 0,066Y) \cdot 12}{55,85}$$

$$m(C)_1 = \frac{[10,274X + 0,797Y]}{55,85}$$

Se sustituye las masas de carbón en la ecuación en la ecuación 19.

$$m(C)_{total} = \frac{10,274X + 0,797Y}{55,85} + 0,143X + 0,063X + 0,001X + 0,002X$$

$$m(C)_{total} = \frac{10,274X + 0,797Y + 11,683X}{55,85}$$

$$m(C)_{total} = \frac{21,957X + 0,797Y}{55,85} \quad (39)$$

Para el cálculo de la masa de CO desprendida en el proceso se apoya en la ecuación (28).

$$m(gases) = m(CO)_1 + m(CO)_2 + m(CO)_3 + m(CO)_4 + m(CO)_5$$

Según las ecuaciones de la masa de CO en cada reacción de la (28 a la 32) del capítulo anterior se sustituyen en la ecuación (38) y queda.

$$m(CO)_{total} = \frac{614,788X + 22,310Y}{670,2} \quad (40)$$

Sustituyendo las ecuaciones de masa total de carbón y de masa total de CO en la ecuación de balance general.

$$m(MP) + m(carbon) = m(FeNi) + m(escoria) + m(gases) + m(polvo)$$

$$100 + \frac{21,957X + 0,797Y}{55,85} = X + Y + \frac{614,788X + 22,310Y}{670,2} + 0,5 \quad (41)$$

$$66684,9 = 1021,508X + 682,949Y \quad (42)$$

Con la ecuación (41) se procede a realizar el sistema de ecuaciones

$$[31X + 0,08Y = 205,965](-32,952)$$

$$66684,9 = 1021,508X + 682,949Y$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones presente se tiene.

$$-1021,508X - 2,636Y = -6786,930$$

$$1021,508X + 682,949Y = 66684,9$$

$$680,313Y = 59897,970$$

$$Y = \frac{59897,970}{680,313}$$

$$Y = 87,973 \text{ kg}$$

Se sustituye el valor de (Y) en la ecuación (1) tenemos.

$$X = 6,417 \text{ kg}$$

Al sustituir X y Y en las ecuaciones (38) y (39) da la masa de carbón total y la masa de CO total.

$$m(C)_{total} = \frac{21,957(6,417) + 0,797(87,973)}{55,85}$$

$$m(C)_{total} = 2,027 \text{ kg}$$

Pero este es el carbón necesario para que ocurra la reducción por lo que tenemos que introducir un carbón práctico el cual sería

$$m(C)_{practico} = 2,229 \text{ kg}$$

Para hallar la masa de CO a partir de la ecuación (39):

$$m(CO)_{total} = \frac{614,788(6,417) + 22,310(87,973)}{670,2}$$

$$m(CO)_{total} = 6,415 \text{ kg}$$

Por lo que se halla la masa de carbón residual que se quema con el oxígeno

$$m(C)_{residual} = m(C)_{practico} - m(C)_{necesario} - m(C)_{electrodo}$$

$$m(C)_{residual} = 0,253 \text{ kg}$$

3.1.1.3. Determinación de los grados de transformación

La realización de los cálculos de los grados de transformación da la medida de cuanto metal se redujo y paso al ferroníquel. Estos se obtuvieron a través del uso de la base dinámica. No es más que la relación entre la masa de níquel que se transformó y la masa de níquel total.

$$Gr_{transf(Ni)} = \frac{m(Ni)_{FeNi} \cdot 100}{m(Ni)_{total}} \quad (43)$$

$$Gr_{transf(Ni)} = \frac{2,004 \cdot 100}{2,070}$$

$$Gr_{transf(Ni)} = 97 \%$$

$$Gr_{transf(Fe)} = \frac{m(Fe)_{FeNi} \cdot 100}{m(Fe)_{total}} \quad (44)$$

$$Gr_{transf(Fe)} = \frac{4,302 \cdot 100}{18,750}$$

$$Gr_{transf(Fe)} = 23 \%$$

$$Gr_{transf(Co)} = \frac{m(Co)_{FeNi} \cdot 100}{m(Co)_{total}} \quad (45)$$

$$Gr_{transf(Co)} = \frac{0,039 \cdot 100}{0,07}$$

$$Gr_{transf(Co)} = 55 \%$$

$$Gr_{transf(SiO_2)} = \frac{m(SiO_2)_{FeNi} \cdot 100}{m(Co)_{total}} \quad (46)$$

$$Gr_{transf(SiO_2)} = \frac{0,052 \cdot 100}{37,69}$$

$$Gr_{transf(SiO_2)} = 0,14 \%$$

$$Gr_{transf(S)} = \frac{0,006 \cdot 100}{0,08} \quad (47)$$

$$Gr_{transf(S)} = 8 \%$$

$$Gr_{transf(P)} = \frac{0,006 \cdot 100}{0,02} \quad (48)$$

$$Gr_{transf(P)} = 32 \%$$

Masa de dióxido de carbono producto a la quema del carbón residual con el oxígeno necesario para que el proceso se produzca.

$$m(CO_2) = \frac{m(C)_{resid} \cdot MM(CO_2)}{MM(C)}$$

$$m(CO_2) = 0,926 \text{ kg}$$

Después de realizados los cálculos la masa de oxígeno necesario es,

$$m(O_2) = 0,674 \text{ kg}$$

Con la masa de oxígeno se halla la masa de aire necesario para inyectar al sistema.

$$m(aire) = \frac{m(O_2) \cdot 100}{\%(O_2)_{aire}}$$

$\%(O_2)$: porción másica que ocupa el oxígeno en el aire, (Chang & Yuzhaninov, 1997).

$$m(aire) = 1,684 \text{ kg}$$

A continuación se presenta la tabla 5 de composición racional de los gases salientes, tabla 6 de composición racional del ferroníquel, para la tabla de composición racional de la escoria, ver anexo 4.

Tabla 5. Composición racional de los gases salientes.

Compuesto	Masas kg	Total kg	%
CO	6,415	6,415	71,073
aire	1,684	1,684	18,663
CO₂	0,926	0,926	10,264
total	-	9,026	100,000

En la tabla 5 de composición racional de los gases se puede apreciar que el monóxido de carbono producto a la reducción de los óxidos representa un 71,073 % de la masa total, lo que representa un exceso de esta sustancia nociva al medio ya que es el principal compuesto causante del efecto invernadero el cual se agrava cada año sin soluciones a corto plazo.

Tabla 6 Composición racional de ferroníquel.

Elemento	Ni	Fe	Co	SiO ₂	C	S	P	Total kg
FeNi kg	2,004	4,302	0,039	0,052	0,055	0,006	0,006	6,465
%	31,000	66,550	0,600	0,800	0,850	0,100	0,100	100,000

En la tabla 6 se representa la composición racional del ferroníquel donde la masa de níquel, hierro, y cobalto representan un 31, 16, 0.3 % de la masa total respectivamente demostrando un grado de reducción del níquel aceptable para el proceso.

3.1.1.4. Cálculo de la composición racional de materia prima

El cálculo se basa en el contenido de los compuestos en la carga representados en la tabla 3 del capítulo anterior, los cuales se muestran en los subacápites posteriores.

3.1.1.5. Cálculo de la masa de Fe

Este cálculo se realiza por la ecuación (33), donde se plantea que:

$$m(Fe) = \frac{\%(Fe)_{cal} \cdot 100}{m(total)}$$

$$m(Fe) = 18,75 \text{ kg}$$

3.1.1.6. Cálculo de la masa de Fe₂O₃

$$m(Fe_2O_3) = \frac{m(Fe) \cdot MM(Fe_2O_3)}{2 \cdot MM(Fe)}$$

$$m(Fe_2O_3) = 26,807 \text{ kg}$$

3.1.1.7. Cálculo de la masa de FeO₁

Según la ecuación (22.1) tenemos que la masa es;

$$m(FeO)_1 = 0,856X + 0,066Y$$

Se sustituyen los valores de las masas de ferroníquel y de escoria la masa de FeO queda,

$$m(FeO)_1 = 11,376 \text{ kg}$$

La masa de oxígeno contenida en la hematita se calcula por la diferencia entre la masa de Fe₂O₃ y la masa de Fe.

$$m(O) = m(Fe_2O_3) - m(Fe)$$

$$m(O) = 26,807 - 18,75$$

$$m(O) = 8,057 \text{ kg}$$

3.1.1.8. Cálculo de la masa de níquel

Por la ley de contenido se tiene la ecuación (33).

$$m(Ni)_{calc} = \frac{\%(Ni)_{calc} \cdot m(total)}{100}$$

$$m(Ni)_{calc} = \frac{2,07 \cdot 100}{100}$$

$$m(Ni)_{calc} = 2,07 \text{ kg}$$

3.1.1.9. Cálculo de la masa de óxido de níquel

La masa de óxido de níquel se calcula por estequiometría ecuación (34)

$$m(NiO) = 2,624 \text{ kg}$$

Por lo que la masa de oxígeno en el óxido se calcula por diferencia

$$m(O) = m(NiO) - m(Ni)$$

$$m(O) = 0,554 \text{ kg}$$

3.1.1.10. Cálculo de la masa de dióxido de silicio

Se realiza por la ecuación (33)

$$m(SiO_2) = \frac{37,69 \cdot 100}{100}$$

$$m(SiO_2) = 37,69 \text{ kg}$$

3.1.1.11. La masa de silicio se halla por estequiometría

$$m(Si) = \frac{m(SiO_2) \cdot MM(Si)}{MM(SiO_2)}$$

$$m(Si) = \frac{37,69 \cdot 28,09}{60,09}$$

$$m(Si) = 17,619 \text{ kg}$$

La masa de oxígeno se halla por diferencia.

$$m(O) = m(SiO_2) - m(Si)$$

$$m(O) = 20,071 \text{ kg}$$

3.1.1.12. Cálculo de la masa de cobalto

La masa de cobalto se calcula por la ley de contenido ecuación (33).

$$m(Co) = \frac{\%(Co)_{calc} \cdot m(total)}{100}$$

$$m(Co) = 0,07 \text{ kg}$$

3.1.1.13. Cálculo de la masa de óxido de cobalto

La masa de CoO se calcula mediante la ecuación (34).

$$m(CoO) = \frac{m(Co) \cdot MM(CoO)}{MM(Co)}$$

$$m(CoO) = \frac{0,07 \cdot 74,9}{58,9}$$

$$m(CoO) = 0,089 \text{ kg}$$

La masa de oxígeno se calcula por diferencia de masa.

$$m(O)_{CoO} = m(CoO) - m(Co)$$

$$m(O)_{CoO} = 0,019 \text{ kg}$$

3.1.1.14. Cálculo da la masa de MgO, Cr₂O₃, Al₂O₃

Pero como los contenidos de MgO, Cr₂O₃, Al₂O₃ compuestos no están por datos en la composición de ferroníquel no se tiene en cuenta las reacciones de ellos por lo que pasan directo a la escoria.

La masa de MgO se calcula por la ley de contenido ecuación (33):

$$m(MgO) = \frac{\%(MgO)_{calc} \cdot m(total)}{100}$$

$$m(MgO) = \frac{25,69 \cdot 100}{100}$$

$$m(MgO) = 25,69 \text{ kg}$$

La masa de la cromita es

$$m(Cr_2O_3) = 1,12 \text{ kg}$$

La masa del Al_2O_3 se calcula quedando:

$$m(Al_2O_3) = 3,97 \text{ kg}$$

3.1.2. Cálculo de la masa de carbón necesario

Para el cálculo de la masa de carbón que entra con la calcina se procede por la ecuación (33) de la ley de contenido.

$$m(C)_{calc} = \frac{\%(C)_{calc} \cdot m(total)}{100}$$

$$m(C)_{calc} = 1,77 \text{ kg}$$

Este carbón no es el que reacciona con el oxígeno ya que al añadir la masa de carbón práctica existe un excedente de carbón (carbón residual) que es el se quema con el oxígeno inyectado al sistema.

3.1.3. Cálculo de la masa de azufre y la masa de fósforo en la calcina

Las masas de estos elementos se calculan por la ecuación (33)

$$m(S)_{calc} = \frac{\%(S)_{calc} \cdot m(total)}{100}$$

$$m(S)_{calc} = 0,08 \text{ kg}$$

$$m(P)_{calc} = \frac{\%(P)_{calc} \cdot m(total)}{100}$$

$$m(P)_{calc} = 0,02 \text{ kg}$$

La tabla de composición racional de la carga se presenta en el anexo 2.

Las masas de Cr_2O_3 , Al_2O_3 , MgO como pasan directo a la escoria estas se suman en la masa de escoria afectando el contenido de otros en la escoria. Las cuales se ajustan como se hizo en el epígrafe de cálculo de la masa de ferroníquel y escoria.

3.1.4. Cálculo de la masa de polvo

Esta masa se calcula asumiendo el contenido de los elementos del polvo igual al de la materia prima.

Por la práctica el arrastre de polvo en los hornos de arco eléctrico es de 0,5 a 0,7 %

Por lo que se procede a calcular la masa de polvo arrastrada por los gases

$$m(polvo) = \frac{\%(polvo) \cdot m(total)}{100}$$

$$m(polvo) = 0,5 \text{ kg}$$

La tabla de composición racional del polvo se representa en los (anexo 3)

Resultado del balance general de masa

En la tabla 6 se muestra el balance general de entrada y salida en el horno de arco eléctrico.

Tabla 6. Balance de masa

Entrada	kg	%
Producto tostado	100,000	96,187
Carbón	2,229	2,144
electrodo	0,050	0,048
Aire	1,684	1,620
Total	103,964	100,000
Salida	-	-
FeNi crudo	6,465	6,218
Escoria	87,973	84,619
Gases	9,026	8,682
polvo	0,500	0,481
Total	103,964	100,000

En la tabla 6 se verifica que para 100 kg de calcina se necesitan 2,229 kg de carbón reductor y 1,684 kg de aire para quemar el carbón residual que queda en exceso. Desprendiendo 9,026 kg de gases y 0,5 kg de polvo como consecuencia a la reducción.

3.1.5. Algoritmo del balance de energía

Unas de las técnicas más empleadas como ayuda al algoritmo son los diagramas de bloques los cuales trazan los pasos a seguir durante su confección.

El cálculo del balance energético se basa en la metodología del cálculo expuesta en el capítulo anterior. Se parte de datos experimentales reales como la temperatura alcanzada por los diferentes componentes en el horno donde se realiza un conteo detallado de los calores entrantes y salientes el cual arrojó como resultado que los principales portadores de energía al sistema son el calor aportado por la corriente eléctrica y el calor aportado por la materia prima, los principales consumo son el calor consumido por las reacciones endotérmicas, calor consumido para obtener la escoria y el ferróníquel y como principales pérdidas se tiene el calor perdido por el revestimiento.

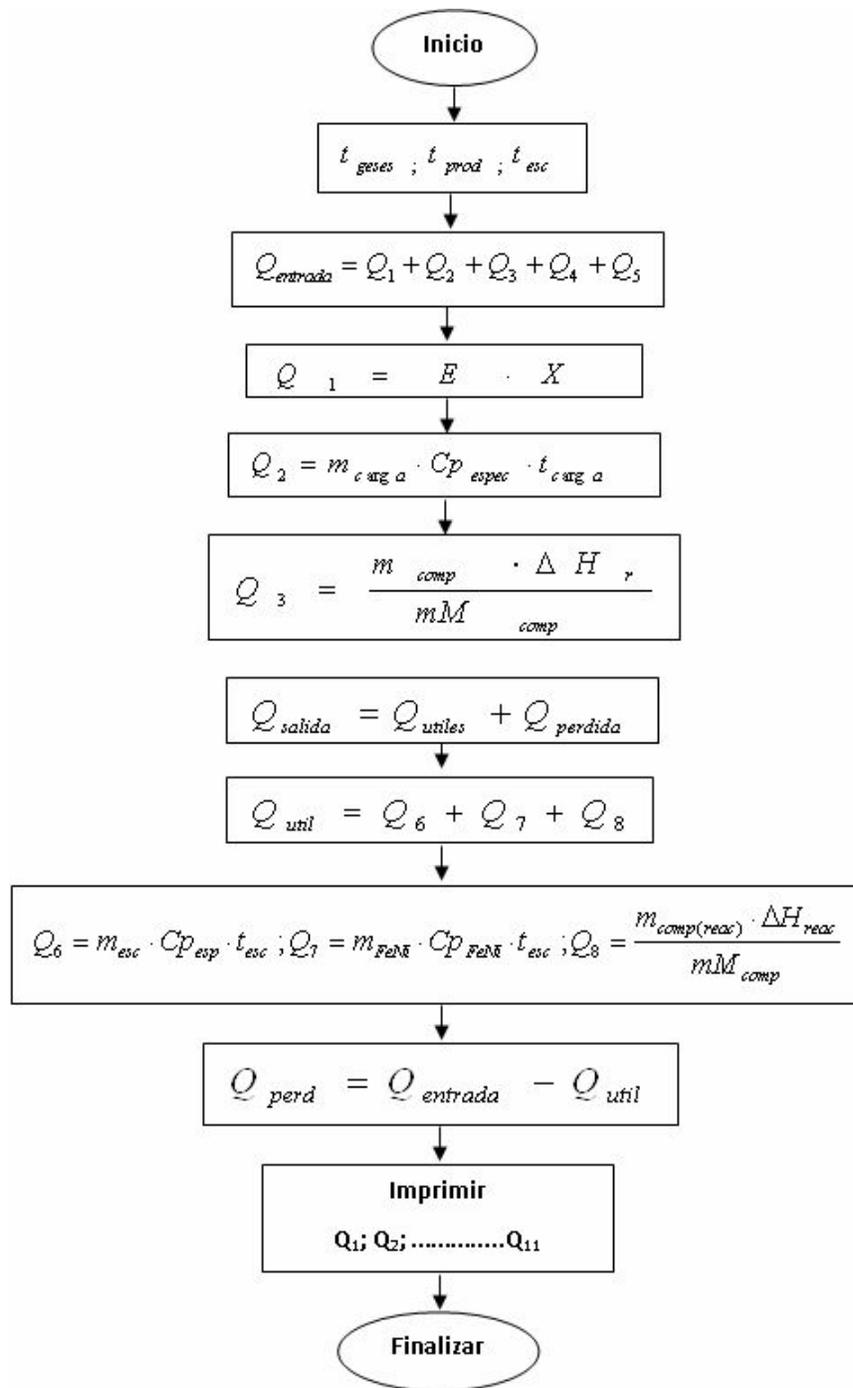


Figura 6. Diagrama de bloques de balance de energía del proceso de fundición.

El planteamiento del algoritmo determina los pasos a seguir para la realización de los cálculos pertinentes y obtener como resultado una base de cálculo eficiente.

3.1.6. Cálculo del balance energético

Los cálculos se basan en la ley de conservación de la energía la cual expresa que la energía ni se crea ni se destruye solo se transforma y según los acápites descritos en la tabla 4 del capítulo anterior.

3.1.7. Acápites de entrada

3.1.7.1. Cálculo del calor aportado por la corriente eléctrica

Q_1 ; Calor aportado por la corriente eléctrica

$$Q_1 = E \cdot Y$$

donde:

E: equivalente térmico de la corriente eléctrica, (kJ/kWh) .

Y: consumo de la energía eléctrica y se toma por datos prácticos (kWh) .

$E = 3600$ kJ/kWh (Batista, 2003).

Cálculo del consumo de la corriente eléctrica.

El valor de (Y),(Hernández, 1972).

Y= 510 kwh por cada 1 tonelada lo cual se lleva a kwh por cada 100 kg .

$$Y = \frac{510 \cdot 100}{1000} \quad \left[\frac{kW \cdot kg \cdot h \cdot t}{kg \cdot t} \right]$$

$$Y = 183600 \text{ kWh} \quad [kWh]$$

$$Q_1 = 183600 \text{ kJ}$$

3.1.7.2. Cálculo del calor aportado por la materia prima

$$Q_2 = \sum m(MP) \cdot C_{p_{esp}}(MP) \cdot t_{MP} \quad (49)$$

donde:

$C_{p_{esp}}(MP)$: suma de las capacidades caloríficas de la materia prima. (kJ/kg K) .

$m(MP)$: suma de las masas de los componentes de la materia prima kg .

t_{MP} : temperatura con que entra la materia prima en Kelvin $t_{MP} = 1073 \text{ K}$.

$$Cp_{esp}(MP) = \sum Cp_{esp}(comp)_{MP}$$

$$Cp_{esp}(MP) = 5,087 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$Q_2 = 545881,881 \text{ kJ} \quad [kJ]$$

3.1.7.3. Cálculo del calor aportado por la reacción exotérmica

$$Q_3 = Q_{i,exot}$$

$$Q_{i,exot} = \frac{m(comp) \cdot \Delta H_r \cdot 1000}{MM(comp)}$$

Realizando los cálculos pertinentes a partir de la ecuación 36 se obtiene el valor de ΔH_r .

$$\Delta H_r = -398,228 \text{ kJ/mol}$$

$$Q_3 = 6288,735 \text{ kJ}$$

3.1.7.4. Cálculo del calor físico del aire

$$Q_4 = V_{(aire)} \cdot Cp_{v(aire)} \cdot t_{aire} \quad (50)$$

donde:

$V_{(aire)}$: volumen del aire calculado m^3 .

$$V_{(aire)} = \frac{m(aire) \cdot 22,4}{MM(aire)} \quad (51)$$

donde:

22,4 volumen que ocupa un gas por cada 1kmol de sustancia sacada de, (Chang & Yuzhaninov, 1997).

$$V_{(aire)} = 1,255 \text{ m}^3$$

El $Cp_{aire} = 1,3009 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$ (Chang & Yuzhaninov, 1997).

$$Q_4 = 445,697 \text{ kJ}$$

3.1.7.5. Cálculo del calor aportado por la combustión del electrodo

$$Q_5 = m(\text{electrodo}) \cdot Cp(\text{electrodo}) \cdot t_{\text{electrodo}} \quad (52)$$

donde:

La masa del electrodo se toma por datos prácticos igual a 0,050 kg por cada 100 kg de materia prima, (Beregoski & Kistiakoski, 1972).

$$Q_5 = 25,661 \text{ kJ}$$

3.1.8. Acápites de salida

3.1.8.1. Cálculo del calor necesario para la obtención del ferroníquel

$$Q_6 = m(\text{FeNi}) \cdot Cp_{\text{esp}}(\text{FeNi}) \cdot t_{\text{FeNi}} \quad (53)$$

donde:

$Cp_{\text{esp}} = 1,179 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ capacidad calorífica de los compuestos del ferroníquel, (anexo 5).

$m(\text{FeNi})$: masa de ferroníquel, kg .

t_{FeNi} : temperatura de ferroníquel, K .

$$Q_6 = 13518,092 \text{ kJ}$$

3.1.8.2. Cálculo del calor necesario para obtener la escoria

$$Q_7 = m(\text{escoria}) \cdot Cp_{\text{esp}} \cdot t_{\text{esc}} \quad (54)$$

donde:

$m(\text{escoria})$: masa de escoria obtenida en el proceso, kg.

$$m(\text{escoria}) = 87,973 \text{ kg}$$

La capacidad calorífica de la escoria se saca del (anexo 6).

$$Cp_{\text{esp}} = 3,8796 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$Q_7 = 250396,1051 \text{ kJ}$$

3.1.8.3. Cálculo del calor necesario consumidos por las reacciones endotérmicas

$$Q_8 = \sum Q_{iend}$$

$$Q_{iend} = \frac{m(comp) \cdot \Delta H_R}{MM(comp)}$$

Los cálculos se realizan por la tabla de $\Delta H_{r(298)}$ (anexo 9) y las capacidades caloríficas de las reacciones endotérmicas.

Se obtiene el valor de calor consumido por las reacciones.

$$Q_8 = 398235,237 \text{ kJ}$$

3.1.9. Pérdidas de calor

3.1.9.1. Calor perdido por los gases

$$Q_9 = V_{(gases)} \cdot Cp_{esp} \cdot t_{gases} \quad (55)$$

Como elementos de los gases se tiene (O_2 ; N_2 ; CO ; CO_2).

El volumen de los gases se calcula por la ecuación (45).

Cp_{esp} : de los elementos de los gases, (Chang & Yuzhaninov, 1997).

$$Q_9 = 11952,399 \text{ kJ}$$

3.1.9.2. Cálculo del calor perdido por el polvo

$$Q_{10} = m(polvo) \cdot Cp_{esp} \cdot t_{polv} \quad (56)$$

donde:

El ΔCp_{polvo} se encuentra en el (anexo 8).

$$Q_{10} = 2890,940 \text{ kJ}$$

3.1.9.3. Cálculo del calor perdido por el revestimiento

Este cálculo se realiza por diferencia de masa.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}$$

$$Q_{11} = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5) - (Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10})$$

$$Q_{11} = 59249,201 \text{ kJ}$$

A continuación se representa la tabla 7 de los acápites del balance de energía.

Tabla 7. Balance energético.

ACAPITES DEL BALANCE DE ENERGIA	TOTAL	
ENTRADA DE ENERGIA		
	kJ	%
Calor aportado por la corriente eléctrica	183600	24,937
Calor físico aportado por la materia prima	545881	74,144
Calor aportado por la reacción exotérmica	6288	0,854
Calor físico del aire	445,697	0,061
Calor aportado por la combustión del electrodo	25,661	0,003
total de calores de entrada	736241	100,000
CONSUMO Y PÉRDIDAS DE ENERGÍA		
Calor consumido para obtener ferroníquel	13518	1,836
Calor consumido para obtener escoria	250396	34,010
Calor consumido por las reacciones endotérmica	398235	54,090
Calor perdido por los gases	11952	1,623
Calor perdido por el polvo	2890	0,393
Calor perdido por el revestimiento	59249	8,048
Total de calores de salida	736241	100,000

En la tabla 7 se observa los acápites de entrada y salida de energía al sistema evidenciándose que los acápites con mayor consumo de energía son el calor consumido por las reacciones endotérmicas y el calor consumido para obtener la escoria con un 50 y 32 % respectivamente.

3.2. Análisis del balance de materiales

Los análisis de los parámetros se realizaron a través del uso de la base de cálculo dinámica en el cual al hacer variar los valores de los parámetros se obtiene de forma automática el comportamiento numérico de las variables productos como masa de ferróníquel, masa de los elementos en este y grados de transformación de los principales metales a procesar.

En la figura 5 se representa el comportamiento de la masa de ferróníquel en función del contenido de níquel en la escoria.

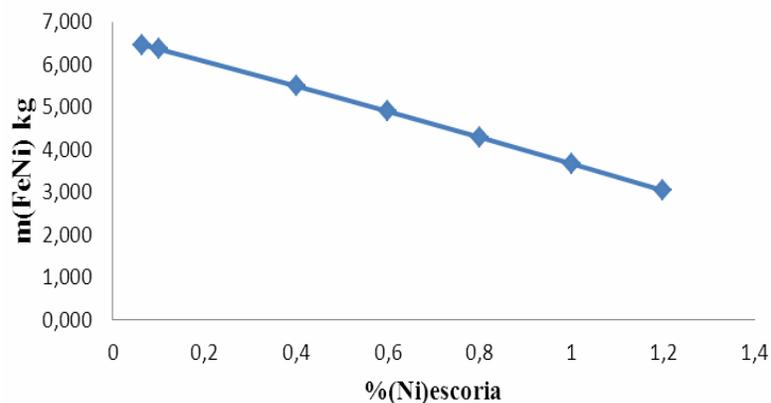


Figura 5. Comportamiento de la masa de ferróníquel en función del contenido de níquel en la escoria.

Se observa que para un 0,063 % de níquel en la escoria, se obtiene 6,465 kg de ferróníquel y para un 1,2 % de níquel se obtiene 3,04 kg de ferróníquel, lo que demuestra que para menores contenidos de níquel en la escoria se obtienen mayores masas de ferróníquel.

En la figura 6 se muestra el comportamiento de la masa de ferroníquel en función del contenido de Ni en el Ferroníquel.

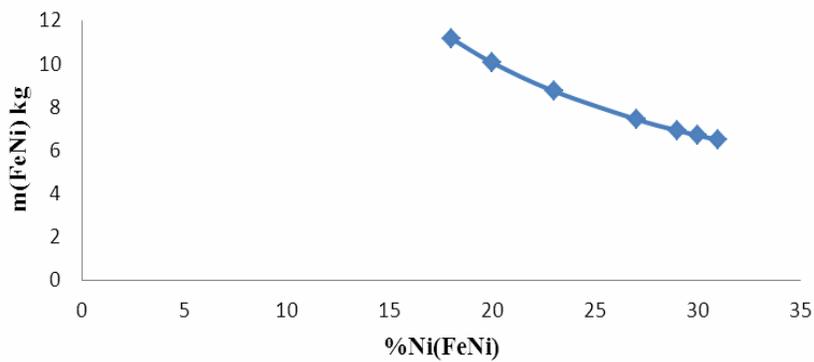


Figura 6. Comportamiento de la masa de ferroníquel en función del contenido de níquel en el ferroníquel.

Se observa que para mayores contenidos de níquel en el ferroníquel se obtienen mayores masas de ferroníquel. Para un contenido de níquel de 31 % se obtiene 6,465 kg de ferroníquel y para un contenido de níquel de 18 % se obtiene una masa de ferroníquel de 11,161 kg con esto se evidencia que existe una relación directamente proporcional entre el ferroníquel y el níquel contenido en este.

El comportamiento de los grados de transformación del níquel e hierro en función del contenido de Ni en la escoria se representan en la figura 7.

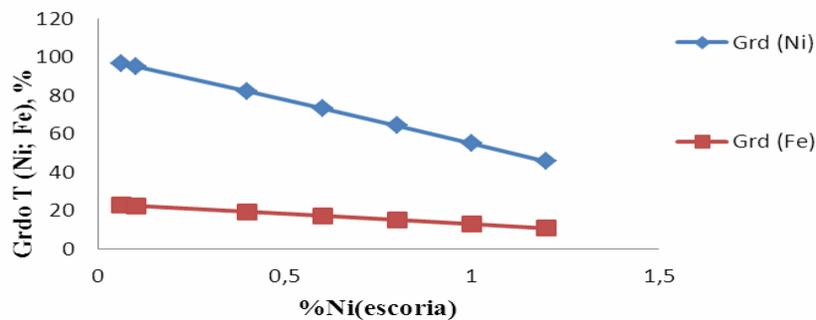


Figura 7. Comportamiento de los grados de transformación del Ni y Fe en función del % Ni en la escoria.

En la figura anterior se muestra para un contenido de níquel en la escoria de 0,6 % se transforma 73,32 % de níquel y 17,38 % de hierro en el ferroníquel y para un contenido de níquel en la escoria de 1,2 % se transforma 45,53 % de níquel y 10,79 % de hierro en el ferroníquel, lo que demuestra que a menores contenidos de níquel en la escoria, mayor será el grado de transformación del níquel e hierro, lo que trae consigo menor porcentaje de éstos elementos en la escoria.

En la figura 8 se representa el comportamiento de la masa de C, Ni, Fe y SiO₂ en el FeNi en función del contenido de Ni en la carga.

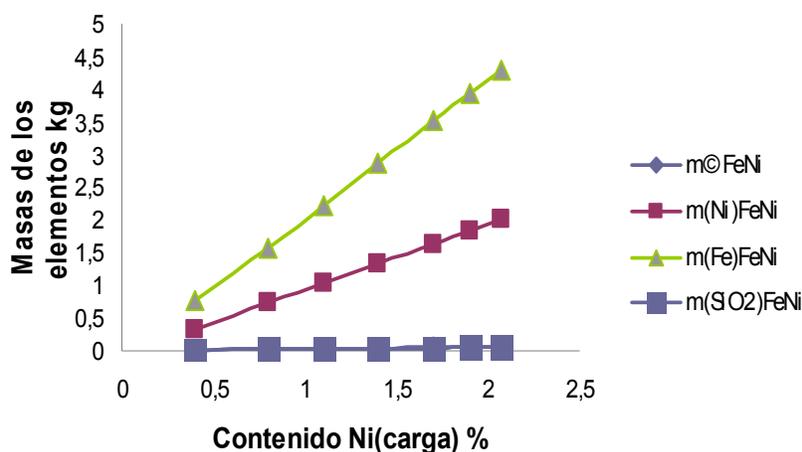


Figura 8. Comportamiento de la masa de C, Ni, Fe y SiO₂ en el ferroníquel en función del contenido de Ni en la carga.

En la figura anterior se observa que mientras menor sea el contenido de níquel en la carga, menores son las masas de C, Ni, Fe y SiO₂ en el ferroníquel, obteniéndose valores de hasta 0,225 y 0,483 kg de níquel e hierro respectivamente, siendo éstos los más representativos en la composición del ferroníquel.

En la figura 9 se muestra el comportamiento de las masas de los elementos Ni, Fe y C con respecto al contenido de Ni en la escoria.

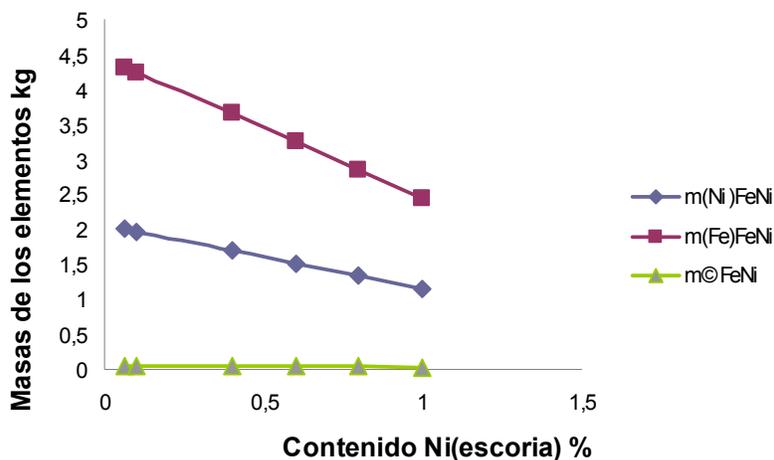


Figura 9. Comportamiento de las masas de los elementos Ni, Fe y C con respecto al contenido de níquel en la escoria.

En la figura anterior se observa que para mayores contenidos de níquel en la escoria menores serán las masas de C, Ni, Fe en el ferróníquel, para 1 % de níquel en la escoria, se obtiene 1,138 kg de níquel, 2,443 kg de hierro y 0,031 kg de carbono en el ferróníquel, siendo el más representativo el hierro.

En la figura 10 se representa el comportamiento de la masa de agente reductor (carbón práctico) con respecto al contenido de níquel en la escoria.

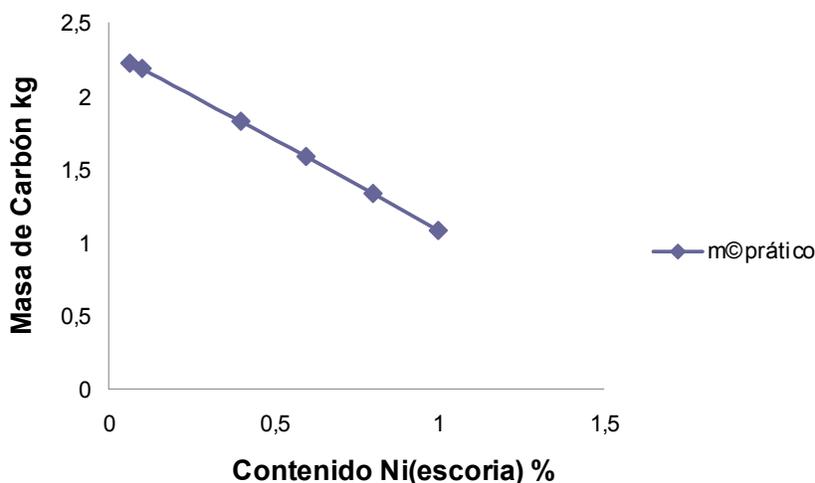


Figura 10. Comportamiento de la masa de agente reductor (carbón práctico) con respecto al contenido de níquel en la escoria.

En la figura anterior se observa que para un contenido de níquel en la escoria de 1 % se obtiene 1,087 kg de carbón práctico, lo que evidencia que un aumento de níquel en la escoria trae consigo una disminución del agente reductor.

3.3. Análisis del balance energético

La utilización de los gráficos para la comprensión de los procesos energéticos ocurridos dentro del horno de arco eléctrico parte de los resultados obtenidos por la base de cálculo dinámico.

En la figura 11 se muestra la distribución de los calores de entrada al sistema.

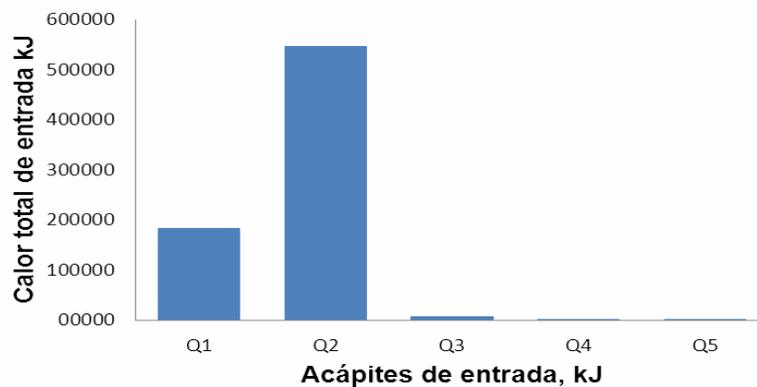


Figura 11. Distribución de los calores de entrada.

La distribución de los calores de entrada está relacionada con la eficiencia del proceso ya que de éstos dependen las transformaciones físico químicas que ocurren dentro del horno, en la figura anterior se observa que los principales aportes son, calor aportado por la corriente eléctrica (Q_1), y calor aportado por la carga (Q_2).

En la figura 12 se muestra la distribución de los calores de salida del sistema.

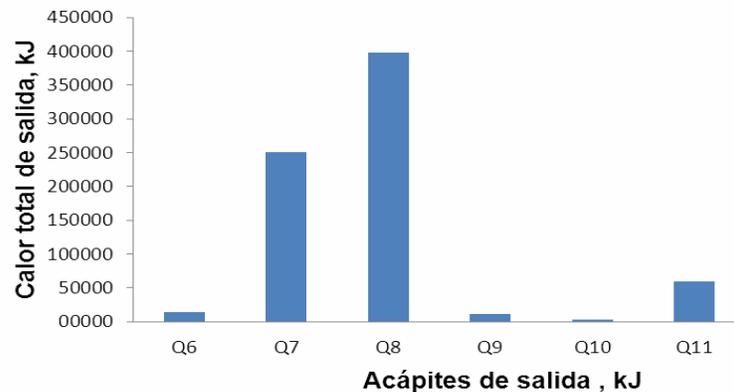


Figura 12. Distribución de los calores de salida.

En la figura anterior se observa que las principales fuentes consumidoras de energía son, el calor necesario para obtener la escoria (Q_7) y el calor absorbido por las reacciones endotérmicas (Q_8).

3.4. Comparación con los Procesos Industriales

El fundamento de la comparación es encontrar la semejanza desde el punto de vista tecnológico de los parámetros de control, con respecto a la práctica industrial.

Esta comparación se realiza en cuanto a la recuperación de níquel y el análisis por laboratorio de los contenidos en la escoria, como se representa en la tabla 8.

Tabla 8. Comparación de la recuperación de níquel y su contenido en la escoria en las principales plantas industriales.

Plantas Industriales	Recuperación Ni (%)	Contenido Ni en la escoria (%)
Trabajo actual	97	0,060
Aneka	96	0,070
Tambang	93	0,020
Falcondo	92	0,140
Hyuga	97	0,070
Larco	88	0,150
Loma de níquel	93	1,110
SLN	96	0,140
Nippon Yankin	92	0,230

En la tabla anterior se realiza la validación de los resultados de la bases de cálculo con los resultados de algunas de las principales plantas de producción de ferroníquel donde se evidencia que con un contenido de níquel en la escoria menor, más níquel se redujo, por lo que mayor es el grado de extracción de éste.

En la figura 15. se muestra el comportamiento de los grados de transformación con respecto al contenido de níquel en la escoria.

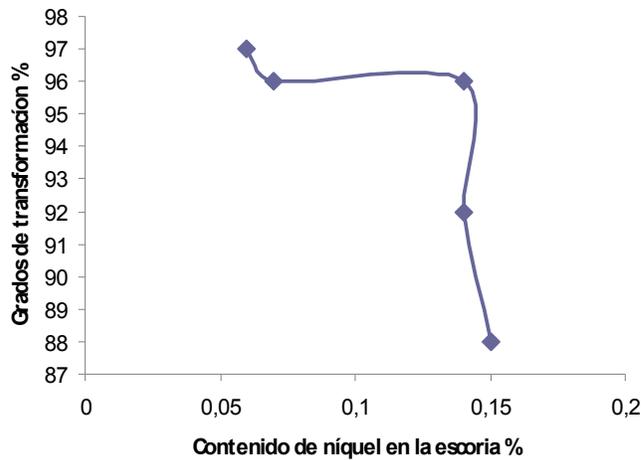


Figura 15. Comportamiento de los grados de transformación con respecto al contenido de níquel en la escoria.

La validación de los resultados de la base de cálculo con la práctica industrial representa el pilar fundamental de toda metodología al integrar los resultados teóricos con los prácticos. En la figura 15 se muestra el comportamiento de los grados de extracción de las principales industrias productoras de ferroníquel respecto al contenido de níquel en la escoria donde se corrobora que al existir un aumento de la pérdida de níquel en la escoria disminuyen los grados de extracción del metal principal.

3.5. Utilidad de la metodología de cálculo dinámico de balances metalúrgicos

La metodología de cálculo dinámico es una herramienta útil para incrementar la eficiencia de la realización de los balances metalúrgicos, y también puede ser un material de consulta importante para otros trabajos relacionados con el tema en el campo de la metalurgia.

Es un vínculo importante entre la metalurgia y la informática para que los estudiantes entiendan de forma consciente la esencia del método computacional. La metodología confirma la importancia de la formación de un profesional multidisciplinario y también crea el espacio para desarrollar habilidades de forma integral para la toma de decisiones futura.

La dinámica de las tablas en Excel de la guía permite realizar los proyectos de temas similares de forma individual en un tiempo más corto además de determinar los parámetros de control principales como el consumo del agente reductor lo que permite conocer los valores reales de consumo de carbón responsable de la reducción completa de los metales fundamentales, níquel, hierro y cobalto en la escoria, la cual da una medida de ocurrencia de las reacciones de reducción pudiéndose encontrar el comportamiento de los valores de transformación de cada metal, también sirve de apoyo para determinar el comportamiento de la masa de ferróníquel y de las masas de cada elemento en este.

Conclusiones del capítulo

- Se realizaron los cálculos correspondientes a los balances metalúrgicos permitiendo obtener así de forma dinámica la base de cálculo.
- Se realizaron los análisis gráficos del comportamiento de los grados de reducción para los principales metales y el comportamiento de la masa de ferróníquel con respecto a los contenidos de níquel en la escoria.
- Se analizaron los comportamientos en las masas de los elementos del ferróníquel en función de los contenidos de níquel en la carga.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Una vez finalizada la investigación se llegó a la siguiente conclusión:

Se elaboró una metodología de cálculo dinámico de los balances metalúrgicos del proceso de fundición para la producción de ferroníquel, teniendo en cuenta los aspectos siguientes:

- Se determinó el comportamiento de los principales parámetros de control, fundamentalmente el consumo de reductor y la extracción de níquel en el ferroníquel.
- Se demostró que para menores contenidos de níquel en la escoria se obtienen mayores masas de ferroníquel, para un 1,2 % de níquel, se obtuvo 3,04 kg de ferroníquel y además para mayores contenidos de níquel en el ferroníquel se obtuvieron mayores masas de ferroníquel, para un contenido de níquel de 18 % se obtuvo una masa de ferroníquel de 11,161 kg
- Se comprobó que a menores contenidos de níquel en la escoria, mayor es el grado de transformación del níquel y el hierro, para un contenido de níquel en la escoria de 0,6 % se transformó 73,32 % de níquel y 17,38 % de hierro en el ferroníquel
- Se demostró que los principales aportes para la distribución de los calores de entrada son, calor aportado por la corriente eléctrica (Q_1), y calor aportado por la carga (Q_2) y las principales fuentes consumidoras de energía son, el calor necesario para obtener la escoria (Q_7) y el calor absorbido por las reacciones endotérmicas (Q_8).

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIÓN

- Aplicar la metodología de cálculo en las asignaturas y proyectos pirometalúrgicos de la carrera de metalurgia.

BIBLIOGRAFÍA

- BATISTA, Y. R. 2003. Balance de masa y energía del Horno de Arco Eléctrico para la obtención de FeNi [Instituto Minero Metalúrgico de Moa].
- BEREGOSKI, V. & B. KISTIAKOSKI. 1972. *metalúrgia del cobre y del níquel*.
- BERGMAN, A. R. 2010. Nickel production from low iron laterite ores
- CHANG, A. C. & YUZHANINOV. 1997. *Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos*.
- FERNÁNDEZ, D. J.; O. N. FERNÁNDEZ & R. H. GONZÁLEZ. 2001. *Ejercicios y Problemas de Química General*.
- GLASSTONE, S. 1979. *Termodinámica para químicos*.
- HERNÁNDEZ, A. & B. ONICHIN. 1973. *Obtención de FeNi por electro fundición a partir de minerales serpentiniticos de Moa*.
- HERNÁNDEZ, E., CASTELLANO, J., GRANDA, O. CISNERO, M. & CORTES, R. 1972. *Metalurgia Extractiva de los minerales oxidados de níquel*. La Habana. Instituto cubano del Libro.
- KOTSE, I. J. 2010. Pilot Plant production of Ferronickel from nickel oxide oresand dust in arc furnace.
- KRESTOVNIKOV, A. N. & V. N. VIGDOROVICH. 1980. *Termodinámica Química*. Moscú.
- LE, M. T. 2010. Perfeccionamiento de la metodología de Proyectos de curso da la asignatura Procesos y Equipos Pirometalúrgicos II. [Intituto Superior Minero Metalúrgico de Moa].
- MATOS, R. T. & R. C. HING. 1988. *Aspectos Fundamentales de la Química Física*.
- REYES, J. O. 2011. Determinación del índice de consumo del Fuel oil del homo industrial de múltiples soleras. [Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa].
- RIVERÓN, Y. B. 2003. Balance de masa y energía del Horno de Arco Eléctrico para la obtención de FeNi [Instituto Minero Metalúrgico de Moa].
- SUÁREZ, C. 1993. Análisis de la Tecnología de prerreducción de la serpentina para la producción de FeNi

ANEXOS

Anexo 1. Composición racional de la carga para 100 kg de materia prima.

Compuesto kg	Ni	Fe	Co	Si	C	S	P	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	O	otros	Total kg	%
Fe ₂ O ₃		18,75									8,06		26,81	26,81
NiO	2,07										0,55		2,62	2,62
CoO			0,07								0,02		0,09	0,09
SiO ₂				17,62							20,07		37,69	37,69
MgO									25,69				25,69	25,69
Cr ₂ O ₃										1,12			1,12	1,12
Al ₂ O ₃								3,97					3,97	3,97
C					1,77								1,77	1,77
S						0,08							0,08	0,08
P							0,02						0,02	0,02
otros												0,14	0,14	0,14
total	2,07	18,75	0,07	17,62	1,77	0,08	0,02	3,97	25,69	1,12	28,70	0,14	100,00	
%	2,07	18,75	0,07	17,62	1,77	0,08	0,02	3,97	25,69	1,12	28,70	0,14		100,00

Anexo 2. Composición racional del polvo.

Compuestos kg	Ni	Fe	Co	Si	C	S	P	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	O	otros	Total kg	%
Fe ₂ O ₃		0,0938									0,040		0,134	26,807
NiO	0,0104										0,003		0,013	2,624
CoO			0,0004								0,000		0,000	0,089
SiO ₂				0,0881							0,100		0,188	37,690
MgO									0,1285				0,128	25,690
Cr ₂ O ₃										0,0056			0,006	1,120
Al ₂ O ₃								0,0199					0,020	3,970
C					0,0089								0,009	1,770
S						0,0004							0,000	0,080
P							0,0001						0,000	0,020
otros												0,0007	0,001	0,140
total	0,010	0,094	0,000	0,088	0,009	0,000	0,000	0,020	0,128	0,006	0,144	0,001	0,500	100,000
%	2,070	18,750	0,070	17,619	1,770	0,080	0,020	3,970	25,690	1,120	28,701	0,140		100,000

Anexo 3. Composición racional de la escoria

Compuestos kg	Ni	FeO	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	C	Co	S	P	otros	Total kg	%
escoria	0,056	5,841	44,532	29,761	1,293	3,950	0,018	0,031	0,106	0,014		85,601	97,304
otros											2,372	2,372	2,696
total	0,056	5,841	44,532	29,761	1,293	3,950	0,018	0,031	0,106	0,014	2,372	87,973	
%	0,063	6,640	50,620	33,830	1,470	4,490	0,020	0,035	0,120	0,015	2,696		100,000

Anexo 4. Capacidades caloríficas medias de los compuestos.

				Cpm de la escoria a 1600 °C kJ/mol·K	Cpm del FeNi a 1500 °C kJ/mol·K	Cpm de los gases a 1000 °C kJ/mol·K	Cpm de la calcina a 800 °C kJ/mol·K
	a (cal/mol·k)	bT (cal/mol·k)	c/T ² (cal/mol·k)				
NiO	11,3	0,00215	0	0,064	0,063	0,059	0,057
Ni	4,06	0,00704	0	0,072	0,069	0,054	0,049
CoO	11,54	0,00204	-40000	0,153	0,158	0,190	0,213
Co	5,11	0,00342	-21000	0,095	0,096	0,109	0,119
FeO	12,38	0,00162	-38000	0,149	0,153	0,185	0,207
Fe₂O₃	23,49	0,0186	-355000	1,036	1,073	1,363	1,565
Fe	8,873	0,001479	0	0,049	0,048	0,045	0,044
Cr₂O₃	28,53	0,0022	-374000	0,971	1,017	1,359	1,586
Cr	5,84	0,00236	-88000	0,239	0,249	0,326	0,378
Al₂O₃	25,48	0,00425	-682000	1,662	1,746	2,369	2,782
MgO	11,11	0,00194	-88000	0,258	0,268	0,346	0,398
SiO₂	20,6	0	0	0,086	0,086	0,086	0,086
Si	6,12	-	-	0,026	0,026	0,026	0,026
CO	6,79	0,00098	-11000	0,061	0,062	0,070	0,076
C	2,673	0,002617	-116900	0,293	0,306	0,409	0,478
P	4,57	0,00378	-	0,049	0,047	0,039	0,036
S	5,4	0,0055	-	0,066	0,063	0,052	0,047
CO₂	10,55	0,00216	-204000	-	-	-	-
O₂	8,27	0,000258	-187700	-	-	-	-

Anexo 5. Capacidades caloríficas específicas de la calcina.

	Cpesp (kJ/kg·K)
NiO	0,029
Fe₂O₃	0,073
CoO	0,001
SiO₂	0,540
MgO	2,536
Al₂O₃	1,083
Cr₂O₃	0,117
C	0,706
S	0,001
P	0,0002
Cp(total)	5,087

Anexo 6. Capacidades caloríficas específicas del FeNi.

Compuestos	Cp esp (kJ/kg·K)
Ni	0,365
Fe	0,573
Co	0,010
SiO₂	0,011
C	0,217
S	0,002
P	0,002
Cp(Total)	1,179

Anexo 7. Capacidades caloríficas específica de la escoria.

Compuestos	Cp esp (kJ/kg·K)
Ni	0,017
FeO	0,138
SiO₂	0,725
MgO	2,165
Cr₂O₃	0,094
Al₂O₃	0,732
C	0,005
S	0,002
Co	0,001

Anexo 8. Capacidades caloríficas específicas del polvo.

	C_{pesp} (kJ/kg·K)
Ni	0,019
Fe	0,151
Co	0,001
SiO₂	0,540
MgO	2,203
Al₂O₃	0,922
Cr₂O₃	0,100
C	0,603
S	0,001
P	0,0003
Cp(total)	4,542

Anexo 9. Entalpías caloríficas de las reacciones.

Reacción	ΔHr(298), kJ/mol.
ΔHr(Fe ₂ O ₃)	182,1
ΔHr(NiO)	129,2
ΔHr(FeO)	154,3
ΔHr(SiO ₂)	636,7
ΔHr(CoO)	129,85
ΔHr(C)	-393,5