



Instituto Superior Minero- Metalúrgico
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONSUMO DE FUEL-OIL DEL
HORNO INDUSTRIAL HERRESHOFF.**

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALURGICO.

HENRRY PANTOJA SANTIESTEBAN

Moa, Cuba

2008

Año 50 de la Revolución.



Instituto Superior Minero- Metalúrgico
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONSUMO DE FUEL-OIL DEL
HORNO INDUSTRIAL HERRESHOFF.**

TESIS EN OPCIÓN AL TITULO DE INGENIERO METALURGICO.

HENRRY PANTOJA SANTIESTEBAN

TUTORES: DrC. ANTONIO R. CHANG CARDONA.
ING. JORGE LUIS REYES OLIVEROS.

Moa, Cuba
2008
Año 50 de la Revolución.



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Henry Pantoja Santiesteban, autor de este trabajo de diploma certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez” y la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, para su posterior uso con fines docentes, educativos e investigativos.

Firma del Diplomante

Firma del Tutor

Firma del Tutor

Julio del 2008

Dedicatoria



En el largo camino que es la vida, el destino nos depara cual si fuese premeditación a veces caer, a veces levantarnos. Sirva esta dedicatoria de homenaje a todos aquellos que una forma u otra me ayudaron a levantarme.

A mis padres Justo y Marlenis por su confianza y amor incondicional.

A mi hermana Arianna, por eso, por saber ser mi hermana.

A todos mis amigos y compañeros de grupo.



Agradecimientos

Muchas gracias son dos palabras que significan gratitud, las cuales derivan de la mano tendida cuando la espina reflejaba la sangre, de la preocupación compartida y sobre todo de esa virtud que se llama comprensión.

Mis más sinceros sentimientos de gratitud.

A mis padres Justo y Marlenis y a mi hermana Arianna por tenderme siempre sus manos en este valle con espinas.

A mis tutores el Drc. Antonio R. Chang Cardona e Ing. Jorge L. Reyes Oliveros, al Ing Orleidis Loyola Breff y a mi compañero de grupo Gilber Escalona Tamayo a todos gracias por su preocupación compartida.

A todos mis amigos y compañeros de grupo por tratar de soportarme y más que eso de comprenderme.



INDICE

página	
Introducción	
.....	1
Capítulo: I Fundamentos teóricos de la investigación.....	6
1.0. Introducción del Capítulo.....	6
1.1 Análisis bibliográfico.....	6
1.1.2 Trabajos sobre pérdidas de energía y aprovechamiento del calor.....	7
1.1.3 Influencia de la composición mineralógica en el proceso de reducción.....	8
1.1.4. Trabajos sobre uso, consumo e influencia del petróleo aditivo en el proceso de reducción.....	10
1.1.5. Balances de masa y energía en el horno Herreshoff.....	11
1.2. Descripción del flujo tecnológico de la Fábrica.....	14
1.2.1. Descripción del diagrama de flujo de la planta.....	15
1.2.2. Transformaciones físico-químicas principales en las diferentes zonas del horno de reducción.....	17
1.2.3. Particularidades del Proceso de Reducción.....	20
1.2.4. Factores que influyen en la Operación del Horno.....	21
1.2.5. Descripción de la instalación de	



estudio.....23

1.2.6. Conclusiones del
Capítulo.....24

Capitulo II. Materiales y
métodos.....25

2.1. Toma de las muestras y
mediciones.....25

2.2. Equipos y métodos utilizados en la determinación de los
resultados.....26

2.3. Resultados de las mediciones y análisis
realizados.....27

2.4. Conclusiones del
capítulo.....28

Capitulo III. Balances de Masa y
Energía.....30

3.0. Balance de
masa.....30

3.1. Cálculo de la composición racional de la mena
seca.....31

3.1.2. Determinación de la masa de la mena
húmeda.....32

3.2. Cálculo de la composición racional del petróleo
aditivo.....35

3.3 Cálculo de la combustión incompleta del petróleo
tecnológico.....38

3.4. Cálculo del producto
tostado.....52

3.5 Composición racional del polvo.
.....67

3.6. Balance y ajuste de los gases de salida del horno entre los hogares H0-
H6.....76

3.7. Cálculo de la cantidad de CO y H₂ que se quema en H₄ y
H₆.....79



3.8.	Balance	energético	del	horno	
	Herreshoff.....				84
	Capítulo IV Análisis de los				
	resultados.....				97
	Valoración económica del ahorro de fuel oil para la planta de				
	horno.....				104
	Conclusiones.....				
				105
	Bibliografía				
				106
	ANEXOS				



RESUMEN

En el presente trabajo se expone un algoritmo de cálculo para la normalización del consumo de fuel oil en el horno industrial Herreshoff, mediante la determinación del mismo en condiciones reales de explotación de la planta de hornos de reducción. Para ello se realizaron mediciones de parámetros tecnológicos del proceso de reducción como volumen de aire en H4 y H6 y de gases a la salida del horno. Todo ello combinado con los cálculos de los balances de masa y energía los cuales se encuentran en función de la variación del tonelaje alimentado, composición mineralógica de la mena y de otros parámetros importantes del proceso de reducción; permitieron determinar que existe un exceso de energía suministrada al horno lo que presupone un gasto adicional de combustible que pudiese ahorrarse.

Palabras Claves: Consumo de fuel oil, Horno Herreshoff, Proceso de Reducción.



ABSTRACT

In the present work an algorithm of calculation for the normalization of the oil fuel consumption is exposed in the industrial furnace Herreshoff, is determined in real conditions of operation of the plant of reduction furnaces. For its measurements of technological parameters of the process of reduction like gas and air volume were made when coming out in H4 and H6 of the furnace. All it combined with the calculations of the mass balance and energy which are based on the variation of the alimented tonnage to its, comp mineralogical composition of the mena and other parameters importance of the reduction process; they allowed to determine that an excess of energy provided to the furnace exists which estimates an additional cost of fuel that could be saved.

Key words: Consumption of oil fuel, Herreshoff Furnace, Process of Reduction.



Introducción

El proceso CARON, por medio del cual se extrae el níquel de los yacimientos lateríticos lixiviando el mineral reducido con una solución de carbonato de amonio a presión atmosférica, ha sido un proceso importante en la refinación de las lateritas con alto contenido de hierro. El mismo se aplica en nuestro país en las empresas Comandante René Ramos Latour de Nicaro y en la Empresa Ernesto Che Guevara ubicada en Punta Gorda, Moa.

La fábrica de Nicaro fue la primera en el mundo en implementar la tecnología Carbonato – Amoniacal (Proceso CARON) en el año 1943 patrocinada por la Freeport Sulphur Co. (E, U, A) .La misma fue desarrollada posteriormente por las siguientes industrias.

1962 - SERED (antigua Checoslovaquia). Procesó minerales importados de Albania.

1974 – Marinduque en Filipinas, actual NONOC.

1974- GREENVALE en Australia. Actualmente se están agotando sus yacimientos y proceso un elevado porcentaje de minerales importados de Indonesia y Nueva Caledonia, esta industria a pasado a llamarse QUEENSLAND NICKEL.

1980 – Inicia sus operaciones el Complejo Industrial TOCANTINS en Brasil.

1987- Inicia sus operaciones la Empresa Ernesto Che Guevara ubicada en Punta Gorda, Moa, Cuba.

Esta tecnología esta caracterizada por el alto consumo de fuel oil que representa aproximadamente un 70% (en el caso de Cuba) del costo unitario por libra de Ni+Co producida. Dentro de este porcentaje alrededor de una tercera parte se consume en el proceso de Reducción en los Hornos Herreshoff. Es importante señalar que en el proceso de reducción se emplea el fuel oil como reactivo químico, pues debido a la combustión incompleta del mismo en el horno se crea una atmósfera reductora a base de monóxido de carbono e hidrogeno. Además se emplea como aditivo para catalizar el proceso reductor, con lo que se logra el equilibrio térmico en la cinética de reducción del níquel y el cobalto.



La composición de las menas procesadas por estas industrias en cuanto al contenido de Fe, SiO₂, Ni y Co es variable (según datos tabla 1) pues los valores de estos componentes oscilan en un amplio rango lo que se explica por las diferencias mineralógicas entre los yacimientos. Sin embargo, el número de hogares del horno y los principales parámetros tecnológicos de la tostación reductora para todos los minerales son prácticamente los mismos. En el caso del diámetro excluyendo a los hornos cubanos, el resto poseen el mismo.

Tabla 1. Composición química del mineral alimentado a las plantas industriales.

Plantas	Ni (%)	Co (%)	Fe (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)
Nicaró	1,16	0,089	38,6	6 - 8	12 - 16
Punta Gorda	1,27	0,09	38 - 39	5 - 6	10 - 12
NONOC	1,22	0,10	38 - 39	6,3	-
SERED	0,945	0,063	51,4	1,7	7,55
Greenvale (GRV)	1,35	0,11	22 - 23	5 - 6	35
Queensland (QNI)	1,5 - 1,6	0,12 - 0,2	35 - 40	6 - 8	12 - 16
Tocantín	1,5	0,13	25-27	6-8	20-25

En Cuba el encendido de los primeros hornos de reducción se efectuó el 29 de septiembre de 1943 en Nicaró, en lo que se conoce en la actualidad como planta vieja. La tecnología original utilizada en el proceso de reducción puede describirse de la siguiente forma:

El mineral seco y molido llegaba a la Planta, la alimentación se llevaba a efecto a través de alimentadores helicoidales sustituidos más adelante por alimentadores de estrella. El mineral viajaba hogar a hogar con descarga alternativa central y periférica a contracorriente con el gas reductor (antracita tipo Bunker C). Los 17 hogares, se dividían en dos zonas, la de ignición y la reducción; del 0 al 5 comprendía la zona de ignición y del 6 al 16 la de reducción. Más de la mitad de los reductores eran aportados por gas manufacturado partiendo de carbón, en tanto que la mayor parte del calor,



tanto para la remoción de agua de hidratación como para llevar el mineral a una temperatura de reacción, era suplido por el calentamiento directo de los hornos con petróleo. El combustible era quemado bajo condiciones de sólo 60% de aireación para mantener la atmósfera de los hornos rica en monóxido de carbono e hidrógeno. Debido al tipo de mineral procesado en esa época la concentración de los gases en los hornos de reducción era tal, que con las temperaturas existentes, una mayor porción (+ del 80%) del níquel era reducida a níquel metálico y solamente 3 a 4% de hierro, reducido a hierro metálico.

En el año 1960 se nacionaliza la fábrica en este periodo la producción se mantuvo a un ritmo relativamente bajo debido a las dificultades para la operación y mantenimiento de la planta. Al comenzar 1961 sólo estaban en operación 14 hornos, de los 21 existentes. A medida que se fue asegurando el abastecimiento de carbón y petróleo se fueron poniendo en operación los hornos que estaban inactivos.

En enero de 1995 se produjo una seria avería en la Planta productora de gas pobre por lo que se tomó la decisión de operar la Planta de Hornos con petróleo aditivo que se introducía en las correas calientes de la Planta de Secaderos, como solución al descalabro sufrido, años más tarde se demolió la Planta de Gas. La adición de petróleo al mineral trae:

- Formación de gas reductor dentro de la masa de mineral
- Mejora el contacto gas – sólido.
- Aumenta la concentración de reductores.

En este mismo año se lleva acabo el Programa de modernización de la Planta de Hornos de Reducción. Este proyecto estuvo enmarcado en el programa de modernización de la fábrica en su conjunto. Mediante el cual se implemento el sistema de combustión PRIOR además de realizarse serias reparaciones capitales. Con el objetivo de alcanzar valores de níquel extractable por encima del 80 % además de reducir el consumo específico de petróleo por debajo de 50 Kg./t de mineral procesado.

Por su parte la fábrica Ernesto Che Guevara surgida en vísperas del derrumbe del campo socialista (1987) y con la misma tecnología que la de Nicaro, a lo largo de estos años ha ido a la par de la misma en las modificaciones en su proceso carbonato amoniacal. Siempre aprovechando la



experiencia que se ha acumulado durante el proceso de explotación de la fábrica de Nicaro.

Esta opera con el mismo esquema tecnológico que la planta de Nicaro en el caso de los hornos de reducción el mineral se distribuye de la misma forma mediante una descarga alternativa central y periférica a contracorriente con los gases reductores. El horno se divide en tres zonas la de calentamiento, la de transición y la de reducción.

En la planta de hornos se pueden mencionar como los principales cambios en los últimos años los siguientes:

- Modificación de las cámaras por el sistema de combustión PRIOR
- Modificación del sistema de pesaje de mineral.
- Sustitución del Gas Reductor por petróleo aditivo como reactivo químico.
- Reducción de averías de los transportadores y enfriadores de mineral, lográndose mayor estabilidad operativa.

De acuerdo con los reactivos que se emplean en la Empresa Ernesto Guevara, es necesario tener en consideración los siguientes factores: las características de la cinética de reacción, la distribución del tamaño de los sólidos y el modelo de flujo del sólido y le gas.

Como se puede apreciar las especificaciones tecnológicas de ambas plantas cubanas son casi idénticas, lo mismo sucede en la explotación de los hornos.

Pues ambas han aprovechado las experiencias mutuas para sus principales cambios y variaciones tecnológicas. Además en el caso del horno Herreshof se puede decir que su explotación en Cuba no difiere mucho del principio tecnológico de las plantas existentes en otros países.

El elevado consumo de fuel oil en esta tecnología nos obliga a optimizar los parámetros tecnológicos de operación del horno. Para lograr mejores valores de eficiencia, el tema del consumo de combustible es de vital importancia, pues el precio del barril esta en la media de los 120 dólares. Debido a la inestabilidad de la paz mundial, motivada por la supuesta cruzada contra el terrorismo que lleva a cabo la administración Bush.

A modo de ejemplo se puede señalar que en el año fiscal 1957-1958 el índice de consumo de fuel por tonelada de mineral procesado fue de 47 Kg contra un 52-56Kg hasta hoy día y con valores de eficiencia menores.



Después de este amplio recorrido introductorio podemos decir que a nivel industrial se observan variaciones en el consumo de fuel oil en el proceso de reducción en los Hornos Herreshoff, debido a la variación en la composición química en las menas alimentadas. Por lo cual los índices de consumo no corresponden con la planificación minera. Por lo cual identificamos como:

Problema de la investigación

La no existencia de modelos para predecir el comportamiento del consumo real de fuel oil en el horno industrial Herreshoff.

Para su solución se plantea la siguiente:

Hipótesis

Si se determina mediante la realización de los balances de masa y energía el modelo o modelos matemáticos que describan la relación del consumo de fuel oil respecto a la variación de la composición química y mineralógica de la mena alimentada. Se podrá pronosticar el consumo real de fuel oil para cualquier tipo de mena procesada. En las condiciones actuales de operación de la planta de Hornos de Reducción.

Objeto de estudio

Los Balances de Masa y Energía de la reducción de las menas lateríticas actuales en el horno Herreshoff.

Objetivo General

Normalizar el consumo de fuel-oil en los hornos Herreshoff para ahorrar energía en correspondencia con el tipo de mena a procesar.

Objetivos específicos

- a) Planificar el consumo de fuel oil para los planes de producción de acuerdo a la planificación minera.
- b) Obtención de modelos para la creación de un software.

Tareas a realizar

1. Revisión bibliográfica de trabajos investigativos relacionados con la tecnología de reducción en el horno industrial Herreshoff y en especial los relacionados con los balances de masa y energía en el proceso citado.



2. Desarrollo de los balances de masa y energía con datos reales a nivel industrial mediante la realización de mediciones que verifiquen los mismos.
3. Procesamiento de la información y evaluación de los resultados.

Capítulo: I Fundamentos teóricos de la investigación.

1. Introducción del Capítulo

En la realización de cada trabajo investigativo es necesario realizar una amplia revisión bibliográfica de los antecedentes de la temática a investigar. Todo esto posibilita una buena comprensión teórica del tema a estudiar, lo que facilita un juicio real de la situación actual en que se encuentra esa línea de investigación. Además es necesario tener visión clara de los fundamentos teóricos del proceso de reducción para una mejor comprensión de la investigación. Todo esto ayudara a la elaboración de un algoritmo de cálculo en función del problema de estudio y los objetivos planteados.

1.1 Análisis bibliográfico

En el proceso de reducción de la tecnología CARON mediante el empleo de los hornos Herreshoff se han efectuado varias investigaciones que posibilitan un enfoque y comprensión más amplia de este trabajo. Los principales temas abordados en la tecnología de reducción son:

1.1.1 Trabajos referentes a la cinética de las reacciones químicas en el proceso de reducción con el empleo de petróleo aditivo.

La reducción del mineral mediante el uso de agentes reductores procedentes del fuel oil es un fenómeno químico que gobierna las reacciones químicas. En su trabajo sobre el tema Castellano y Otros (1979) exponen que el sistema en cuestión es heterogéneo debido a que la materia que lo compone se encuentra en diferentes estados de agregación. Las porciones físicamente distintas de un sistema heterogéneo se conocen con el nombre de fase y se encuentran separadas por límites definidos, en este caso el mineral constituye una fase sólida y los gases producto de la combustión y craqueo constituyen la gaseosa. Este trabajo nos da una visión de la influencia en el proceso de reducción del empleo del petróleo aditivo como catalizador de las reacciones de reducción. Además establece las principales fases que componen este sistema heterogéneo de gran complejidad. Con el conocimiento de estos factores se



podrá dar un enfoque más acertado a los balances de masa y energía y a la influencia del petróleo aditivo en el consumo de fuel -oil.

Por su parte **Viera, R. (1991)** en sus experiencias en las fábricas de Nicaro y Moa plantea que el modelo cinético que se adecua es el del centro sin reaccionar, de igual forma **Rodríguez, M. (1976)** en la prueba realizada en la Planta Piloto de Nicaro plantea que en este sistema gas-sólido para que ocurra la reacción deben de sucederse varios pasos a saber:

- Difusión del gas hacia el sólido.
- Absorción de la fase gaseosa.
- Reacción química en la superficie sólida.
- Desorción de los productos gaseosos.
- Difusión de los productos gaseosos.

Estos trabajos se exponen el modelo cinético y los pasos necesarios para que se lleve a cabo el proceso de reducción. La velocidad de reacción va a estar determinada principalmente por **la difusión del gas al interior de las partículas** esta a su vez va a estar determinada por la concentración de agentes reductores No obstante este puede variar de acuerdo a la variación de parámetros tales como temperatura, presión, concentración etc. Si se controla la reacción química, el rendimiento será muy sensible a la temperatura. Todo esto posibilita una mejor comprensión del proceso de reducción así como en la interpretación de resultados, pues de un buen desarrollo de la cinética de reacción depende el empleo eficiente de los gases reductores en el horno, lo cual contribuye al uso racional del fuel –oil.

1.1.2 Trabajos sobre pérdidas de energía y aprovechamiento del calor.

Por su parte **González, R. (1979)** en su trabajo sobre el aire secundario en los hogares H-4 y H-6 expresó que se puede aprovechar el poder calorífico de estos gases en los hogares lo cual posibilita una disminución del consumo de combustible.

En el trabajo realizado sobre las pérdidas de calor a través de los ejes centrales **Castellanos, F y Causse, M.R (1981)** describen que según el estimado de los americanos en 1954 las pérdidas de calor por el tiro natural de



aire se encontraban en un rango de un 3-4% del calor cedido al proceso y se recomendó utilizar parte de este calor en el calentamiento del aire de post-combustión en los hogares H-4 y H-6.

En estos trabajos se da una panorámica de cómo se puede disminuir el consumo de fuel-oil aprovechando valores calóricos que antes no eran aprovechados. Además de perfeccionar la operación del horno.

Además en **Pineda Marín, A y otros (1980)** realizan una serie de métodos para contabilizar de forma más eficiente las pérdidas de calor (orificios y mirillas del horno), así como el cálculo del calor químico, calor sensible, obteniendo de esta manera resultados relevantes sobre las pérdidas de energía.

Lo cual posibilita tener vías de cómo enfocar las pérdidas de energía al medio ambiente además de exponer diferentes formas de cálculos en dependencia de las condiciones existentes de operación. Con lo que se logra un acercamiento a las pérdidas reales por estos conceptos posibilitando una evaluación real del problema.

1.1.3 Influencia de la composición mineralógica en el proceso de reducción.

En las pruebas especiales realizadas con mineral de Punta Gorda por **Arrebola, A y otros (1972)** arrojaron como conclusión fundamental que la dilución del níquel del mineral reducido de Punta Gorda es menor que el del mineral reducido en la planta de Nicaro.

Esto se explica porque la variación de la composición entre los elementos (% Ni, Co, Fe etc.) del mineral geológico al procesado es menor. Lo cual puede estar dado por un mejor método de muestreo o una menor composición de elementos estériles o diluyentes en el mineral de Punta Gorda. Esto nos da una panorámica de cuanto pueden variar las composiciones química mineralógicas de un mismo mineral por lo que se debe de tener cuidado al enfocar el asunto sobre todo en la toma de % de los distintos elementos.

El proceso como tal presenta factores que provocan pérdidas de níquel, lo cual se puede apreciar en el trabajo de **Chang Cardona, R.A. (1999)** quien en el artículo publicado en la revista Minería -Geología expone las principales pérdidas de Ni y los riesgos que las causan haciendo énfasis en la tostación reductora de los minerales lateríticos.



Los riesgos de pérdidas se exponen por zonas siendo los más significativos:

Zona de calentamiento: Las pérdidas de Ni provocada a la variación de la temperatura del mineral en esta zona en forma de espinelas $[\text{Ni}_x \text{Fe}_{(3-x)}\text{O}_4]$, óxidos de Fe $[\text{Ni}_{(1-y)} \text{Fe}_y\text{O}]$. Un efecto similar ocurre con las partículas menores de 0.0020 mm y en especial las de 0.0010 mm debido al efecto de recalentamiento provocado por la naturaleza de su superficie activa y su variación en el comportamiento termodinámico.

Zona de transición: Las pérdidas de Ni debido a la disociación de los minerales silicatados cuya formación de productos amorfos provoca una cristalización mas temprana de estos minerales en forma de espinelas complejas de silicatos de al y Fe dentro de los cuales se puede encontrar el NiO libre.

Zona de reducción: Las pérdidas de Ni debido a que al riesgo que al riesgo de la zona anterior se le suma la descomposición de los silicatos de Mg representando una masa significativa que compete con la reducción de los otros compuestos.

Las pérdidas con la masa de minerales del grupo de la serpentina y espinelas que no se descomponen totalmente en el tiempo de retención del mineral en el horno y por la insuficiente temperatura para que se efectue dicha composición. Estas causas determinan la limitación del proceso tecnológico en el tratamiento de mayor cantidad de minerales típicos del horizonte de la serpentina alterada. El exceso de energía en la zona de calentamiento hace descomponer parte del mazut provoca pérdidas del mineral ala atmósfera y contaminación ambiental por el exceso de CO y H₂ en los gases que prohíben su paso hacia el sistema de recuperación de polvo. Esto provoca que se pierda parte de la masa de reductor aportada por el aditivo lo que aumenta el consumo de fuel-oil.

Debido a esto se proponen direcciones de trabajo que coinciden con la concepción de este trabajo para mejorar los parámetros tecnológicos y productivos del proceso. Mediante la profundización en las investigaciones cinético – energéticas para crear un software de simulación que permita la automatización activa compensadora de suministro de energía por zona u hogares en correspondencia de la calidad y cantidad de la materia prima.



1.1.4. Trabajos sobre uso, consumo e influencia del petróleo aditivo en el proceso de reducción.

En el informe técnico sobre el uso del petróleo para la reducción del mineral laterítico **Rezvanov, G y Castellanos, J (1969)** plantean que el uso del fuel oil conllevaría a un aumento del carbón en el mineral reducido, en el orden de 2-2,5 veces el cual influye en el proceso de lixiviación.

Pues existe una disminución de la velocidad de lixiviación de Ni en la primera etapa. Además disminuye la densidad y aumenta la viscosidad de la pulpa además de la temperatura de la misma y el contenido de carbono fino en el mineral reducido el cual al pasar a la pulpa forma espuma. Lo cual nos da un reflejo de la influencia del carbono contenido en el petróleo aditivo en procesos posteriores a la reducción como la lixiviación.

Por su parte **Onishin, V. (1970)** en su trabajo sobre la utilización del fuel oil como reductor líquido para la reducción de los minerales de la fábrica de Nicaro. Demuestra el incremento de un 8-23 % en la extracción de níquel con el empleo del fuel oil, disminuyendo el consumo de gas pobre, lo que permitirá incrementar notablemente los índices técnicos de la reducción.

Este trabajo presenta las ventajas que tiene el uso del fuel-oil en el proceso de reducción en el mejoramiento de los índices técnicos de operación del horno, además ya en esa época se empezaba a apreciar las futuras ventajas de la sustitución del gas pobre por petróleo aditivo.

López Cardet, P. (1984) en su trabajo Ahorro de Combustible en los hornos de reducción de la planta de Nicaro expone que la eficiencia energética era de un 55%. Además propone varias soluciones en el ahorro de combustible como:

El precalentamiento en 100 °C del mineral, en 200 °C el aire en los quemadores y disminuir la temperatura en 15 °C en el hogar 14, además de utilizar los hogares 15 y 16 para el enfriamiento del mineral reducido. En el trabajo se hace una valoración económica del ahorro real que se lograría aplicando estas medidas.



1.1.5-Balances de masa y energía en el horno Herreshoff

En lo referente a los balances de masa y energía en el horno Herreshoff que son los trabajos que se podrían considerar como antecedentes de esta tesis. Tenemos solamente 2 los cuales presentan:

En el caso de **Medrano Fernández, I y Avila, R (1995)** un balance de masa y energía planteando una relación limonita-serpentina 3/1 con el objetivo de establecer una metodología para regular el proceso de reducción.

Hay que apuntar que el balance se realizó cuando la tecnología usaba el gas pobre como reductor, en la actualidad esto no es así y se tomara en cuenta en este balance.

Este trabajo logró cumplir su objetivo fundamental pues la metodología de cálculo es valida para el control del proceso. La cual sirve de referencia para adecuarla a la que se empleará en este trabajo. Se obtuvieron datos de alta confiabilidad debido a la amplitud de las mediciones realizadas [% C en el mineral, parámetros tecnológicos del horno (T, TON, %CO en H0), análisis en cámara (%CO y %CO₂), análisis del mineral (% Ni, Fe, Co, H₂O), contenido de óxidos en el mineral y temperatura en la superficie del horno). Lo cual posibilito que los cálculos realizados fuesen bastante cercanos a la realidad.

El balance energético mediante el cual se determino el consumo de fuel-oil se realizo detalladamente y por zonas los acápites tomados en cuenta fueron:

Zona de calentamiento, **entrada** (1-Calor físico del mineral + petróleo aditivo, 2-Calor físico del aire en H4, 3- Calor de las reacciones exotérmicas, 4- Calor de los gases de entrada.) **salida** (5-Calor físico del mineral a la salida de H4, 6-Calor físico de los gases salientes, 7-Calor para el calentamiento y la evaporación del agua, 8- calor para las reacciones endotérmicas, 9-Calor perdido al medio.)

Zona de transición, **entrada** (1- Calor físico de los gases que entran, 2- calor físico del mineral, 3- calor físico del petróleo tecnológico, 4- Calor físico del aire, 5- calor de la combustión incompleta del petróleo tecnológico, 6- Calor de las reacciones exotérmicas.) **salida** (7- Calor físico de los gases salientes, 8- Calor físico del mineral que sale H9, 9- Calor de las reacciones endotérmicas, 10- calor de evaporación del agua, 11- Calor perdido al medio a través de las paredes del horno, 12- Pérdidas de energía en cámaras a través de paredes y



orificios,13-Calor para la evaporación y sobrecalentamiento del agua presente en el combustible.)

Zona de reducción, **entrada** (1- Calor de combustión del petróleo tecnológico, 2-Calor físico del petróleo tecnológico, 3- Calor físico del mineral, 4- Calor físico del aire, 5-Calor físico del gas pobre, 6- Calor de las reacciones exotérmicas.) **salida** (7-Calor físico del mineral reducido, 8- Calor de los gases salientes, 9- Calor de las reacciones endotérmicas, 10-Calor para la evaporación del agua, 11-Pérdidas de calor a través de las paredes del horno, 12- Pérdidas de energía en cámaras a través de paredes y orificios,13-calor para la evaporación y sobrecalentamiento del agua presente en el combustible.)

Este balance sirve de referencia al que se realizara en este trabajo que no será por zonas.

A pesar de todas estas ventajas el trabajo tuvo sus deficiencias pues:

No se pudo llegara a la formulación de un algoritmo de control del proceso productivo. Ya que no se lograron relaciones de ecuaciones que permitieran obtener modelos que relacionaran las principales variables de operación del horno.

Además se observó una diferencia en el cálculo del consumo teórico de combustible y el real (39,1Kg/t – 54 Kg/t).Causado fundamentalmente a que no se consideraron los calores de disociación de algunos minerales complejos, como la asbolana que se contabilizó como MnO por falta de datos termodinámicos, y en otros casos se asumieron valores termodinámicos de familiares de estos minerales, además no se consideraron las pérdidas de energía a través del eje. En el calor teórico de las reacciones exotérmicas en H4 no se tuvo presente el % real de Co y H₂ lo que representa un defecto de energía aportada. Por otra parte no se pudieron medir los verdaderos valores de los grados de transformación de los óxidos. Además los efectos térmicos de todas las reacciones tanto endo como exotérmicas no consideraron la temperatura real dentro del horno.

La Nichols Engineering Research Corporation (1954) en los balances de masa y energía realizados para el procesamiento de la Limonita y la Serpentina por separado y mezclas de ambos minerales, plantean que la operación del horno tiene que conjugar con el consumo energético y de igual forma con la



velocidad de calentamiento, la combustión incompleta del fuel y con la eficiencia del proceso como tal.

Este trabajo logro cumplir con su objetivo fundamental pues se caracterizaron los aspectos energéticos de entrada y salida así como el consumo de fuel-oil para diferentes tipos de minerales (Limonita, Serpentina y Mezcla de ambos). Los cálculos fueron basados en datos de servicio, de prueba, operación del mineral de Nicaro, teóricos (Obras literarias) y de las deliberaciones técnicas.

Además se exponen para cada mineral un resumen de los requisitos de calor (cubierta, puertas y eje), de aire, petróleo y gas pobre para cada tipo de mineral. También se exponen graficas que relacionan variables del proceso tales como, calor sensible en productos de combustión incompleta por encima de 25 °C, curva de correlación para el efecto de la humedad del aire primario, relaciones del sumario CO₂/CO , H₂O para diferentes hogares. También se presentan los perfiles de temperatura para cada variante de mineral.

Los acápites del balance de energía para las tres variantes de minerales son los mismos y están dados por:

Entrada (1- Calor de la combustión incompleta del fuel –oil, 2- Calor sensible del gas pobre, 2.1- Calor potencial gases en parte quemados en los hogares 4 y 6.). **Salida** (3- Calor latente petróleo y gas, 4- Calor para el proceso (incluyendo calor sensible y calores de reacción de hidratación y evaporación del H₂O.), 5- Pérdidas radiación y convección (cubierta del horno, parte de arriba piso y puertas, cámaras de combustión y eje central), 6- Pérdidas de chimenea (calor sensible, calor potencial CO, H₂, CH₄), 7- Misceláneas (Incluyendo mirillas, líneas conductoras de petróleo etc.)

El trabajo a pesar de ser muy completo pues abarca una gran cantidad de análisis y relaciones graficadas de distintas variables no expone ninguna metodología de calculo en lo que a formulas se refiere solo se exponen los resultados, además no se exponen calores que aunque pueden ser despreciables es importante tener una visión de los mismos (calor aportado por