



REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

# ***TRABAJO DE DIPLOMA***

*En opción al título  
De  
Ingeniería Mecánica*

**TITULO:** Influencia de los elementos mecánicos del enfriador horizontal en el proceso de transferencia de calor del mineral reducido en la empresa "COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA"

**AUTOR:** Yudixánder Sotto Guilarte

**TUTORES:** M.Sc. Ever Góngora Leyva

Ing. Marbelis Lamorú Urgelles

**MOA, 2007**  
**"Año 49 de la Revolución"**



## **RESUMEN-SUMMARY**

*"Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*

### **RESUMEN**

---

La presente investigación, se realizó con el objetivo de Evaluar el comportamiento de los carros raspadores de mineral para el proceso de enfriamiento en cilindros horizontales rotatorios.

Se realizó la revisión bibliografía y el análisis de los trabajos precedentes que han sido publicadas y aborda la temática estudiada, valorando el estado actual de los procesos de enfriamiento, estableciendo además las bases de la modelación matemática.

Luego se estableció el modelo teórico para el proceso de enfriamiento en los cilindros rotatorios de la planta hornos de reducción, así como el procedimiento para la solución del mismo, realizándose la preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud, utilizando para ello la media de los resultados experimentales obtenidos.

En el trabajo se refleja la valoración económica e impacto ambiental de la propuesta estudiada emitiéndose las conclusiones y recomendaciones, la bibliografía consultada y los anexos.



## **RESUMEN-SUMMARY**

*"Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*

### **SUMMARY**

---

The present titled investigation was carried out with the objective of evaluating the behavior of the cars mineral rasps for the cooling process in rotational horizontal cylinders.

He was carried out the revision bibliography and the analysis of the precedent works that have been published and it approaches the thematic one studied, valuing the current state of the cooling processes, also establishing the bases of the mathematical modulation.

Then the theoretical pattern settled down for the cooling process in the rotational cylinders of the plant reduction ovens, as well as the procedure for the solution of the same one, being carried out the preidentification of the coefficients of transfer of heat for unit of longitude, using for it the stocking of the obtained experimental results.

In the work he/she is reflected the economic valuation and environmental impact of the studied proposal being emitted the conclusions and recommendations, the consulted bibliography and the annexes.

**INTRODUCCION GENERAL**

**MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION**

**CAPITULO I**

**1.1- Introducción**

**1.2- Estado del Arte**

**1.3- Trabajo Precedentes**

**1.4- Estado actual de la temática**

**1.5- Flujo tecnológico de la planta**

**1.6- Descripción de la instalación**

**1.7- Análisis Teórico**

**1.8- Mejoras para el enfriamiento**

**1.9- Conclusiones**

**CAPITULO II**

**2.1- Introducción**

**2.2- Desarrollo**

**2.3- Selección del modelo físico y análisis del mismo**

**2.4- Método de calculote aplicación**

**2.5- Conclusiones**

**CAPITULO III**

**3.1- Introducción**

**3.2- Análisis de los resultados**

**3.2.1 Conductividad térmica  $K$  para cada resistencia**

**3.2.2 Espesores del enfriador**

**3.2.3 Resultado de la capacidad combinada**

**3.2.4 Resultado del pendiente del equipo**

**3.2.5 Resultado de la velocidad total de conductancia**

**3.2.6 Resultado del calor disipado**

**3.2.7 Coeficiente Total de transferencia de calor**

**3.2.8 Resultado de la velocidad total efectivo**

**3.2.9 Resultado del Coeficiente Total volumétrico efectivo**

**Resultado**

**3.3- Valoración económica**

**3.4- Impacto Ambiental**

**3.5- Conclusiones**

**Conclusiones y Recomendaciones**

**Referencias Bibliograficas**

**Anexos**



## INTRODUCCION

---

Desde el surgimiento de la humanidad el hombre utilizaba el níquel solo para joyería. Con el transcurso del tiempo la producción industrial del mismo comienza a desarrollarse cada vez más. A mediados del siglo XIX se descubrió la capacidad del níquel para mejorar la calidad del hierro y del acero. Debido a esto ha venido creciendo cada día el interés hacia la producción del Níquel. En la Empresa “Ernesto Che Guevara” del municipio Moa. Donde la extracción del níquel y cobalto se ha convertido en una de las principales canteras que sustenta el desarrollo del país. Desde su puesta en marcha en la década de los 80, su explotación ha sido un pilar en la economía cubana. El desarrollo de la industria del níquel exige cada día más del conocimiento de los profesionales para lograr una elevada producción y disminuir cada vez más la contaminación ambiental en el territorio. El esquema tecnológico de la fábrica de Níquel de Punta Gorda está basado en el esquema de lixiviación carbonato amoniacal del mineral reducido. La decisión de utilizar el proceso de lixiviación en la fábrica Ernesto Che Guevara se explica por las ventajas propias de esta tecnología, la misma a pesar de los elevados consumos de energía eléctrica, tiene ventajas en comparación con el proceso pirometalúrgico. El esquema amoniacal admite la elaboración de las mezclas de los minerales lateríticos y serpentínicos, mientras que el esquema de lixiviación ácida permite solamente la elaboración de la fracción laterítica. Al mismo tiempo este proceso se realiza con un consumo de reactivo relativamente pequeño. El único reactivo que se utiliza en cantidades grandes es el amoniaco, el consumo del cual es necesario solo para compensar las pérdidas mecánicas. El producto final de las fábricas de sinter y óxido de níquel es un producto estable de exportación en el mercado mundial. Este complejo minero metalúrgico de níquel comprende varias entidades, entre ellas la Planta hornos de reducción, en la cual existen varios enfriadores rotatorios de mineral de los cuales se evaluar la Influencia de los elementos mecánicos del mismo en el proceso de transferencia de calor del mineral reducido en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, los enfriadores rotatorios son tambores cilíndricos con dos tapas cónicas que giran apoyados en dos chumaceras colocadas a cada extremo del mismo y sumergido parcialmente en un estanque con agua, con lo que, al mismo tiempo enfría el mineral reducido y disminuye considerablemente el consumo de potencia del motor que acciona el mecanismo de rotación. En su interior, el enfriador dispone de los llamados carros

raspadores que limpian continuamente la superficie metálica para evitar la formación de la costra de mineral reducido que se adhiere a la pared interior del cilindro rotatorio disminuyendo la transferencia de calor a través de la pared, aumenta los valores de la temperatura de descarga del mineral en el enfriador por encima de los valores permisibles del proceso tecnológico. Estos carros se desplazan con un movimiento pendular en segmento de circunferencia del tambor cilíndrico.

## **SITUACIÓN PROBLÉMICA**

Luego de varios años de explotación los enfriadores de mineral comenzaron a presentar problemas de agrietamiento, rajadura y altas temperaturas a la salida del enfriador, esto conllevó a que se hicieran varias investigaciones buscando soluciones adecuadas a la problemática en cuestión. Dentro de algunas de las alternativas propuestas estuvieron la eliminación del primer tramo de raspadores, el cambio del ángulo de inclinación y el peso de los carros, por solo mencionar algunas, pero aún continúan los agrietamientos, las rajaduras y no se resuelve el problema de la elevada temperatura del mineral a la salida del enfriador.

A partir de las deficiencias expresadas se define como **problema de la investigación**:

El desconocimiento de la influencia de los carros raspadores en el proceso de enfriamiento de mineral no garantizan la eficiencia en el proceso de enfriamiento de mineral en la Planta de Hornos de Reducción de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” Ver Anexo Figura 1a y 1b.

Teniendo en cuenta la problemática planteada y el problema de la investigación se define como **objeto de estudio**:

El sistema de rastrillos de los enfriadores de mineral reducido en la Planta de Hornos de Reducción.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis científica**: El estudio del sistema de raspado de los enfriadores de mineral de la Planta de Hornos de reducción, permitirá conocer las Influencias que estos presentan en el proceso de transferencia de calor.

En correspondencia con la hipótesis planteada se define como **objetivo general del trabajo**:



***“Instituto Superior Minero Metalúrgico ‘Dr. Antonio Núñez Jiménez’***

Evaluar el comportamiento de los carros raspadores de mineral para el proceso de enfriamiento en cilindros horizontales rotatorios.

Para dar cumplimiento al objetivo general de la investigación se definen los siguientes **objetivos** específicos:

- Identificar los parámetros que caracterizan los raspadores de mineral: dimensiones, posición y peso.
- Evaluar el comportamiento de los carros bajo las condiciones de trabajo.

Para garantizar el desarrollo exitoso de la investigación se proponen las siguientes **tareas a realizar**:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica sobre los diferentes sistemas de raspado e instalaciones semejantes a la estudiadas.
2. Estudiar los sistemas de rastrillos y el funcionamiento de la instalación.
3. Obtener la valoración técnico-económica de la influencia de los raspadores del mineral reducido en el proceso enfriamiento.





## **CAPITULO I**

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

### **MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION**

#### **1.1 Introducción**

La planta Hornos de Reducción de la Empresa Niquelífera “Ernesto Che Guevara” tiene una gran importancia dentro del proceso de obtención del mineral ya que reduce el níquel y el cobalto del mineral secado y reducido. Por cuanto, en ésta se crean las condiciones para la extracción del mineral. Un eslabón importante de la planta lo constituyen los enfriadores de mineral (donde ocurre el proceso de enfriamiento), de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de Lixiviación y Lavado, por lo que el objetivo del presente capítulo es: Establecer los fundamentos teóricos del proceso de enfriamiento del mineral como base para realizar el balance de masa y energía.

#### **1.2 Estado del Arte**

La historia de la fábrica Che Guevara se inicia el 22 de diciembre de 1972, cuando el Comandante en Jefe Fidel Castro, visita a la antigua Unión Soviética, firma varios convenios de colaboración entre nuestro país y la URSS, entre ellos los relacionados con el desarrollo de la zona minera del nordeste oriental, la construcción y montaje de una nueva planta productora de níquel y la rehabilitación de las fábricas Comandantes Pedro Sotto Alba, de Moa, y René Ramos Latour, de Nicaro. Apenas dos meses después el 15 de febrero de 1973 el Comandante en Jefe visita la recién creada Región Minera y, sobre el terreno, precisa detalles acerca del futuro desarrollo de la industria del níquel y del entorno social del territorio y aprueba la propuesta de construir la nueva planta en la meseta de Yagrumaje. Las pruebas de planta piloto, previas a la construcción de la segunda fábrica niquelera de Moa, se realizaron en la Empresa Comandante René Ramos Latour. Dificultades técnicas y con ciertos materiales constructivos requirieron de modificaciones y ajustes que motivaron que la “Che Guevara” no comenzara a estabilizar su producción hasta el año 1988, gracias al aporte de técnico de especialistas de las Empresas Comandantes René Ramos Latour y Pedro Sotto Alba. Pocos años después, con el inicio de la década de los 90 y desaparición del campo socialista y la desintegración de la URSS, la falta de recursos materiales y financieros afecta sensiblemente a la joven industria moense, que no logra estabilizar sus operaciones y mucho menos alcanzar su producción de diseño. La Empresa Comandante Ernesto Che Guevara es la más joven de las tres fábricas de la Industria Cubana del Níquel, sin embargo, al finalizar 1999 es la mayor productora y cerró el año con el establecimiento de un récord productivo y sobrepasando

## CAPITULO I

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

ligeramente su capacidad original de diseño. En dicha empresa se han efectuados en todas las plantas varias investigativos. Ejemplo, en la planta de hornos de reducción se han hechos trabajos en los enfriadores de minerales por las elevadas temperatura a la salida del mismo. Este problema existe en los enfriadores desde su puesta en marcha en 1942 en Nicaro. Inicialmente se empleaban vigas sueltas dentro del enfriador con la idea de que estas rasparan el metal, con el transcurso del tiempo se fueron sustituyendo por carros raspadores para poder disminuir las elevadas temperaturas a la salida del mismo.

### 1.3 Trabajo Precedentes

A la humanidad solo le interesan las fuentes de energía que puedan controlarse, ser usadas a discreción y almacenarse convenientemente, las fuentes disponibles son muchas pero no todas tienen los requisitos anteriores, al menos con los recursos actuales de la técnica. La tendencia moderna hacia la racionalización y mejor aprovechamiento de esquemas e instalaciones de procesos industriales impone necesidad la de la máxima utilización de la energía contenida en los agentes portadores. Toda investigación científica debe estar sustentada por una investigación teórica y empírica, donde se utilizan métodos que caracterizan a cada una de ellas; para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objetivo del problema, la hipótesis y las tareas de la investigación (**Arostegi,1970**).

Mediante el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes bibliografías, su revisión estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: la información relacionada con el enfoque teórico-metodológico y los trabajos que sobre el tema del intercambio de calor en los cilindros rotatorios desde el punto de vista científico, técnico y practico se han realizado en los últimos años.

**Rodríguez (1977).** Analiza la influencia que tienen los raspadores interiores de los enfriadores del mineral reducido de la planta de hornos de reducción, sobre la velocidad de transferencia de calor. Pone de manifiesto, analíticamente, importancia determinante que posee, trabajar con películas finas de mineral reducido en la capa estática a través de la cual tiene que transferirse el calor por conducción desde la masa de mineral hasta la plancha de acero de la pared.



## **CAPITULO I**

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

**Houge (1978).** Establece los aspectos fundamentales de la transferencia de la materia y las leyes de conservación de la energía.

**Sverdlik y Gregoreu (1979).** Establecieron las peculiaridades del paso del movimiento de materiales en un tambor rotatorio

**Sai y otros (1992).** Reportaron los datos experimentales para la respuesta transitoria de los cilindros rotatorios en término de la variación en la velocidad de descarga del sólido para un tiempo en el intervalo en las condiciones de operación; la velocidad en la alimentación del sólido, la velocidad de rotación y la inclinación del cilindro.

**Boateng y Barr (1996),** al comportamiento de un flujo granular en el plano transversal de un cilindro rotatorio parcialmente lleno, ellos realizaron un estudio con el objetivo de comprender y probar las capacidades predictivas del comportamiento geológico de materiales en cilindros rotatorios. En este caso fueron medidas características de flujo tales como: la velocidad de las partículas, la temperatura granular y la concentración de sólido para diferentes materiales, teniendo un amplio rango de los coeficientes de restitución.

**Bui (1997).** Este realizó un trabajo sobre modelos de procesos que incluyen el flujo de fluidos y la transferencia de calor y se extiende a todas las categorías importante de los procesos encontrados en la industria primaria del aluminio, desde el procesamiento de la materia prima y la reducción, hasta la fundición y el reciclaje. Se incluye una amplia variedad de procesos desde los precipitadores, calcinadores, hornos rotatorios, celdas de reducción y hornos de mezclado y de fundición, hasta los hornos de reciclaje y filtración de metales; se lleva a cabo un repaso del trabajo de modelación, las aplicaciones y necesidades expresadas no solo en el análisis y diseño sino también el control del proceso, optimización y supervisión, incluyendo el entrenamiento del operador. Se da un sumario de los problemas percibidos, fundamentalmente en el campo de los parámetros de los modelos y la validación de estos, además de las indicaciones de las tendencias futuras.

**Ortiz (1999).** Determino las ecuaciones de modelos matemáticas que predice resultados finales tales como: leyes, recuperaciones y radio de concentración que un mineral reportará cuando sea procesado por flotación a escala industrial con información obtenida de pruebas batch a nivel de laboratorio, método que se puede aplicar a una amplia variedad de minerales y poder evaluarlos técnica y económicamente.

## CAPITULO I

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

**1999.** Estableció un método que mediante la aplicación de las ecuaciones de movimiento a un tambor rotatorio, el uso de los datos de diseño de los enfriadores de mineral reducido de la planta de hornos de la fabrica de nicaro y de los criterios de semejanza de los procesos tecnológicos, permite calcular el consumo de potencia del motor de accionamiento de equipos similares de mayores dimensiones.

**Correa (2000)**, en éste se realiza un balance energético a los enfriadores de mineral y muestra aspectos importantes relacionados con el fenómeno físico que tiene lugar dentro de los mismos, exponiendo además las consideraciones en las que debe estar basado el modelo físico-matemático de estos equipos, entre las que se pueden citar:

- ✓ El crecimiento de la película de agua en la superficie del tambor desde el instante  $t_1$  en el punto de contacto hasta la última capa  $t_f$  en el punto  $\beta_2$ .
- ✓ La transferencia de calor a través de la película de agua en la superficie del tambor es gobernado por el flujo de calor conectivo en estado no estacionario unidimensional.
- ✓ El contacto térmico entre la película del líquido puede no ser perfecto, propensa a la formación de burbujas de aire.
- ✓ No hay deslizamiento entre el tambor y la película del líquido durante la rotación.
- ✓ Las propiedades termo-físicas de la película de agua y del tambor son asumidas independiente de la temperatura.
- ✓ La evaporación del agua ocurre a temperatura constante teniendo como promedio la temperatura del tambor y la de la película de agua y las pérdidas de calor a través de la pared de la piscina son despreciables.

**Columbié (2001)** estableció el modelo matemático para el control integral del proceso de calcinación del Carbonato Básico de Níquel en el horno tubular rotatorio, quedando este conformado por 9 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el comportamiento dinámico del objeto, determinó la dirección del proceso definiéndose como criterio de calidad, el mantenimiento del perfil térmico del horno, este trabajo también aporta ecuaciones importantes que por primera vez aparecen en la bibliografía para el análisis de los procesos de transferencia de calor de gran complejidad

## CAPITULO I

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

**Guzmán (2001).** La modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas de procesos, ofrece un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones derivadas de la modelación de toda una planta o parte de la producción. Los últimos avances en el campo de la simulación, en programas como el MATLAB, permiten obtener con gran exactitud estas soluciones a una gran velocidad, se pueden seleccionar para ello varios métodos numéricos. De igual forma para componer las ecuaciones de un objeto en la industria metalúrgica, los que representan complejos sistemas dinámicos, es necesario despreciar una serie de factores secundarios y sí tener en cuenta los principales: de entrada, salida y perturbaciones que influyen en la dinámica del mismo; a la vez, la sencillez del modelo conformado debe contener las principales peculiaridades del proceso investigado.

**Ascacibar (2003).** Estableció una metodología que, mediante el uso de algoritmos genéticos y redes neuronales, permite la optimización de las curvas de consigna del horno y velocidades de la banda entre bobinas de diferentes dimensiones, reduciendo la diferencia de temperatura esperada de la banda y la real. Un clasificador de bobinas según la composición de los aceros que ha resultado ser una excelente herramienta para la predicción de roturas de banda o para detectar otro tipo de problemas debidos a bobinas con aceros anómalos. Un censor-software que proyecta los puntos de operación del horno y que puede ayudar considerablemente en las tareas de visualización de la tendencia de los puntos de operación del horno.

Como se puede apreciar no existe suficiente información sobre el proceso de enfriamiento del mineral en los materiales consultados. En el manual de operaciones de la planta de hornos de reducción de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (1985) solo se encuentran algunos datos de la instalación utilizada actualmente. De todo lo expresado resulta evidente que la consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática en estudio. En su mayoría aborda elementos aislados del proceso de transferencia de calor en cilindros rotatorios el cual se encuentra poco estudiado desde los puntos de vista aquí tratados. Esto impone la necesidad de realizar una investigación que contribuya a una mayor eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral reducido, lo cual representará una incursión novedosa en este campo para las industrias cubanas del níquel con tecnología carbonato amoniaca

## **CAPITULO I**

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

### **1.4 Estado actual de la temática**

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal. Para ello la planta cuenta con la instalación de 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores.

El mineral, después de pasar por la sección de molienda, es enviado mediante transporte neumático a los silos (225 – SI) como forma de almacenaje. El llenado de los silos se hace de forma cruzada para mantener equilibrado el peso y que la estructura no se deforme. Las tuberías (1, 2, 4) alimentan los silos impares y las tuberías (3, 5, 6) alimentan los silos pares, estas tuberías están dotadas de conmutadores (tres por cada silo) de forma tal que garantice el llenado del silo, una vez que el este está cargado con ayuda del conmutador se desvía la alimentación para el siguiente silo, a diferencia de los silos 5 y 6 que no poseen conmutadores y su llenado se realiza de forma directa. En la sección de los silos se encuentran 9 bombas tipo TA-36 (225- BO) de una capacidad de 120 t/h, mediante las cuales el mineral es bombeado hasta las tolvas de los hornos (225 TV) que son 12 en total, dispuestas una para cada dos hornos. Estas tolvas permiten realizar una operación de 8 horas a cada horno.

Una vez el mineral en las tolvas, este pasa a los dosificadores de pesaje automático (225 – BA – 201) que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del pesaje que este realiza de acuerdo al tonelaje fijado, estos equipos tienen una capacidad hasta de 22 t/h.

Después que el mineral es pesado, se produce la descarga del mismo al sinfín alimentador (225- TR- 202) el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero.

El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores ( $\text{CO} - \text{H}_2$ ) para ello el horno dispone de 10 cámara de combustión dispuestas en los hogares 15, 12, 10, 8 y 6 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases para el calentamiento del mineral, lo cual permite, además de lograr el perfil de temperatura, enriquecer la atmósfera reductora del horno ya que trabaja con combustión incompleta.

El proceso de reducción se efectúa en un horno de hogares múltiples tipo IIM 17 K- 6,8 de 23,5 m de alto y 6,8 m de diámetro, con 17 hogares ó soleras. Además, el horno (225- HR- 205). Cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos

## CAPITULO I

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

brazos tienen dispuestos dientes o paletas con la que mediante la rotación del eje central facilitan el traslado de mineral de un hogar a otro.

Este movimiento o traslado del mineral de un hogar a otro se realiza en forma de zigzag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

Los gases que salen del horno arrastran consigo partículas muy finas de mineral, las cuales se hace necesario recuperar para evitar mayores pérdidas en el proceso, para ello, el taller cuenta con un sistema de limpieza de gases formado por un grupo de 6 ciclones en cada horno, 12 electrofiltros y un electro filtro en la sección de los silos para la purificación del aire del transporte neumático y del aire de succión de las tolvas.

El mineral recuperado en la batería de ciclones cae por gravedad al horno a través del hogar 0. El mineral que se recupera en los electrofiltros es transportado por unos transportadores de paleta hacia una tolva, debajo de la cual se encuentran unas bombas neumáticas de 120 t/h de capacidad, las cuales envían el mineral hacia las tolvas de los molinos para más tarde ser bombeado hacia los silos formando así el ciclo de la planta de Hornos de reducción.

Así el mineral en su descenso es sometido a un perfil ascendente de temperatura que permite un calentamiento gradual, a la vez que penetra en un perfil gaseoso que garantiza un aumento en la concentración de reductores. La atmósfera reductora es controlada mediante la relación  $\text{CO}_2 / \text{CO}$  en H-10 que debe ser de 1,2 %.

### **1.5 Flujo tecnológico de la planta**

La función fundamental de la planta Hornos de Reducción dentro del proceso de obtención de níquel es reducir el níquel y el cobalto del mineral seco y reducido que fue almacenado en los silos. Para ello cuenta con 24 hornos de múltiples hogares y 12 electrofiltros con el objetivo de recuperar el mineral que se escapa con los gases. El mineral es recepcionado en los silos con un 4% de humedad. Luego se suministra por un grupo de bombas neumáticas a presión hacia la tolva de los hornos, cuya capacidad es de 320tn. El mineral es dosificado a los hornos a través de una romana que pesa el tonelaje que se alimenta y luego mediante un transportador sin fin se alimenta el hogar cero. Una vez que el horno ha sido encamado, la temperatura desciende como consecuencia de la cama que se ha alimentado en el interior de los hogares. A partir de esta condición



## CAPITULO I

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

comienza el régimen normal de operaciones (mineral alimentado, horno en rotación, perfil de temperatura en la cámara, perfil de temperatura en hogares e ignición del hogar 4 y 6 para quemar el CO que extraen los ventiladores y lo hacen pasar a través de los electrofiltros para su purificación). En cada uno de los hogares ocurre una cinética de reacciones químicas que permiten la selección extractiva del níquel y el cobalto y la reducción del hierro que conforma el mineral alimentado. El tiempo de retención de mineral desde que se alimenta hasta que se descarga por la parte inferior del horno es de 90 minutos. El mineral después de reducido, es descargado al transportador rotatorio que lo conduce al tambor enfriador de donde sale hacia los canales de contacto de la planta Lixiviación y Lavado.

### 1.6 Descripción de la instalación

Después que el mineral sale de los hornos es transportado por el tambor rotatorio cuya función es transportar el mineral reducido de los hornos hasta el enfriador. El enfriador de mineral tiene tres funciones: transportar, remover y enfriar el mineral. **Transportar**: en el interior del enfriador existe una estructura donde cuelgan los rastrillos pendulares que transportan el mineral que se va enfriando. **Remover**: el rastrillo, una vez que sigue el movimiento del tambor y alcanza una determinada altura, por su propio peso cae y revuelve la masa caliente a través de superposición de capas, empujando la capa caliente adyacente al cuerpo y transportando capa fría. **Enfriar**: es el intercambio calórico entre el calor que aporta el mineral, al shell y al agua de la piscina en el cual esta sumergido el enfriador. Disminuye la temperatura del mineral de (200 °C) en la descarga. En el régimen de operación del enfriador se suministra agua a una temperatura de 30 °C a contracorriente con el mineral, controlándose el nivel a través de unos anillos en la zona caliente de evacuación en función del tonelaje que se esta alimentando. El tiempo de retención de mineral en el interior del enfriador es de 30 minutos. La temperatura del agua a la salida de la piscina es de 70 °C. El mineral después de pasar por el transportador rotatorio es descargado en el enfriador rotatorio horizontal, el cual tiene como función enfriar el mineral reducido que sale del horno hasta una temperatura por debajo de 200 °C para luego enviarlo al proceso de Lixiviación. Ellos están diseñados para enfriar el mineral reducido que contiene Níquel y una parte de hierro oxidado con vapor en el proceso de



## CAPITULO I

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

tratamiento del mineral níquelífero por el método amoniacal en las siguientes condiciones de trabajo:

Parámetros de trabajo del enfriador	Valores Nominales
Temperatura del mineral a la entrada	650 - 700 °C
Temperatura a la salida	200 °C
Temperatura del agua en la entrada	Ambiente
Presión de trabajo	0,01-0,02 kPa
Presión excesiva del agua	300 kPa
Consumo de agua para enfriar el tambor.	107 m <sup>3</sup> /h
Temperatura del agua a la salida.	70-75 °C
Diámetro exterior	3,08 m
Espesor de pared	0.016 m
Longitud del cilindro	31 m
Coeficiente de llenado del tambor con el material	9%

El material enfriado es un mineral que contiene una granulometría de 200 mesh (0.074 mm) que pasa al tambor a través de un muñón de tope del enfriador. Con el paso de mineral, este se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que es enfriado por el agua de la piscina. De la cámara de salida, el mineral enfriado llega al transportador que no constituye parte del enfriador.

1- El mineral que sale del enfriador cae a una de las canales de lixiviación por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal formando una pulpa que va a los tanques de contacto (225-TK-213) los cuales tienen una capacidad de 70 m<sup>3</sup>. Esta pulpa es bombeada a la planta de lixiviación y lavado.

### 1.7 Análisis Teórico

#### Detalles de los enfriadores



## CAPITULO I

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

El estudio realizado a las variaciones de temperaturas de descarga de los enfriadores es el resultado del mal trabajo o trabajo nulo de los dispositivos internos (carros). Su función en un 80 % es remover el mineral aprovechando el movimiento de giro del tambor y teniendo en cuenta su peso para un mejor área de fricción, subir fuera de la masa de mineral, mantener un movimiento de aproximadamente 65 0C como mínimo y al caer debe quitar el mineral más frío de la pared inferior y permitir que el caliente llegue hasta dicha pared. El 20 % restante es mantener el avance hacia la descarga, cuestión esta que no se logra por estar el nivel superior de la masa mineral por encima de la altura de los rastrillos. Sucede en las tres cuartas partes del tambor. Los rastrillos actuales no son idóneos para esta función por el peso y configuración estructural. Hasta hace poco tiempo se dejaban que estos se apoyaran en dos puntos: la cuchilla y las puntas traseras de los rastrillos. Esto causó daños al cuerpo con zanjás cada 200 mm que en algunos casos debilitaron la resistencia del metal desde 16 mm de espesor hasta unos 6 mm en algunos casos. Entonces surgió la necesidad emergente de parar estos equipos por roturas peligrosas; las partes dañadas fueron cambiadas. La única forma de trabajo del rastrillo es apoyando la cuchilla solamente; pero esto genera la mínima área de apoyo lo que empeora el ángulo de trabajo quedando sumergidos dentro de la masa de mineral permanente. Otro estudio al respecto es que si se incrementa peso al rastrillo, los esfuerzos a la estructuras del tambor crecerán y no es conveniente para evitar paradas por averías de los elementos internos que se hacen muy débiles con la Temperatura fundamentalmente en la entrada de mineral. Se ha comprobado que con alimentación de mineral hasta 18 tn/h de mineral bruto, se logran temperaturas en la descarga de 130 0C para un solo horno y entre 195 0C y 220 0C para ambos hornos en operación. A esto se une la operación permanente del agua que no puede ser operada anualmente. Las pruebas demostrativas realizadas son de mucha exigencia y durante 24 horas se han estudiados estos equipos de forma manual; pero se ha demostrado que existe una temperatura aproximada definida donde el metal de estos equipos tiene la mayor transferencia de calor. Se han realizado pruebas con el nivel de agua, cuestión esta que tampoco se puede operar de forma manual por las reiteradas variaciones de peso del tambor dada las inestabilidades de la velocidad de descarga en función de la temperatura. Existe en Hornos un trabajo pendiente a poner en práctica con dos objetivos importantes:

## CAPITULO I

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

1. Para el control del nivel de agua con un dispositivo mecánico de bajo costo; pero muy eficiente que ya fue probado ( fabricado con para prueba con un metal CT-3 qué duró muy poco ante la acción oxidante). Con buenos resultados evitando los desgastes de fusibles en las chumaceras, exceso de flexibilidad del cuerpo, roturas del cuerpo por exceso de esfuerzos del metal, etc.
2. En paralelo con el control de nivel de agua mencionado, se pretende controlar la entrada de agua a contracorriente de la entrada del mineral caliente. Esta alimentación automática obedecerá a una temperatura en la piscina, fijada por ser la más optima para la transferencia de calor.

Un detalle importante es que durante años, al comienzo de las operaciones, se utilizaron carros similares a Nacaro; pero fueron cambiados por ineficiencias que ya conocidos.

Hoy en la René Ramos Latour existen muy poco de estos carros y pienso que si acaso uno o dos enfriadores tienen todos los carros completos. Estos se han eliminado hasta quedar uno o dos en algunos casos por el deterioro del shell durante la fricción que ha disminuido el espesor hasta la rotura con rajaduras. En uno u otro caso, la temperatura de descarga es alta en relación a la Ernesto Che Guevara.

De otra forma explico que en 1991 cuando se puso en operación la línea 11 de la Ernesto Che Guevara y hasta 1997, operó con los carros de 60 °C. Este equipo mantuvo su linealidad original,

### **Detalles externos.**

1. Los hornos, luego de una operación continua superior a 16 meses, han demostrado formaciones de sólidos gruesos compactos en su interior, estos dan lugar a pérdidas de dientes, ladrillos y brazos.

La mezcla de mineral – petróleo no es la mejor para confirmar la relación idónea. Estas averías internas demuestran que quedan dentro del mineral, residuos de combustible crudo o semi crudos que pasan al enfriamiento y al pasar por la cuchilla de los rastrillos, se rompen y comienzan a descomponerse generando un volumen de gas que limita también el enfriamiento del mineral.

Es necesario comprobarlo con una muestra de mineral tomado en el GRIZZLY de los hornos, enfriarlo rápido en Baño María y comprobar la existencia de residuos combustibles.

## **CAPITULO I**

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

2. Se ha comprobado que el vapor que generado no es nada bueno para alimentarlo al interior de enfriador. Pruebas realizadas así lo demuestran, algunas de estas han provocado expansiones de gases muy fuertes.

### **1.8 Mejoras para el enfriamiento**

#### **1. Comprobar que no lleguen residuos de combustibles crudos al enfriador.**

En el informe de detalles de los enfriadores, se le hace referencias a este punto.

Su importancia está dada en las dudas existentes del volumen de gas tan grande que permanece en el tambor. De estos gases, no todos pasan por el transportador teniendo un área tan pequeña de transportación y que esta es ocupada totalmente por el mineral con productividades superiores a 16 tn/h secas.

Se conoce que para lograr una mayor velocidad de enfriamiento, es necesario enfriar el 60 % del volumen de gas contenido por lo que mientras mayor sea el volumen, más área de disipación necesitamos; esta última no se puede cambiar y debemos disminuir el volumen de gas. De echo, hay que estudiarlo y disminuirlo.

- ✓ Alimentar el combustible de reducción óptimo. La mejor ventaja es explotar la alimentación directa en H-0.
- ✓ Mantener todos los dientes, brazos y bóvedas en buen estado para lograr la mejor combustión en la zona de reducción. Se evita formaciones de gránulos de mineral con gotas de petróleo en su interior que pasan al enfriador y se rompen en la zona caliente generando gases.
- ✓ Tomar muestras de mineral en la descarga del horno, enfriarlo rápido y analizar la posibilidad de combustible.

#### **2. Optimizar la función del agua de enfriamiento.**

- ✓ Realizar la prueba pendiente del control de nivel mecánico y la alimentación automática del agua con control de temperatura.
- ✓ Alimentar el agua tratada a la piscina. Evitar costras.

#### **3. Análisis de los carros o rastrillos existentes.**

Este aspecto es definitivo para lograr un mejor resultado en la temperatura de descarga.



## **CAPITULO I**

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

Profundizando en los resultados prácticos obtenidos es definitivo pensar que los rastrillos no son idóneos porque se ha mantenido altas temperaturas desde su surgimiento y los motivos que inciden son: El poco peso, estructura abierta con muy poca área de fricción y esfuerzos mecánicos creados al tambor.

El carro debe caracterizarse por tener dos paredes, frontal y trasera para empujar el mineral durante su recorrido hacia delante y atrás. Estas paredes deben tener la mayor área de apoyo posible al shell y teniendo en cuenta su peso de acuerdo a la masa mineral a enfriar, se completará en cada giro un recorrido superior a los 65 °C hacia delante y algo menor hacia atrás. He aquí el trabajo de deslizar el mineral frío de la pared inferior para que caiga el caliente hacia dicha pared.

No se debe dejar de tener en cuenta el centro de gravedad del carro.

### **4. Excentricidad.**

Las modificaciones realizadas para evitar las reiteradas rajaduras conllevaron sufrir desperfectos actuales que van en contra del buen funcionamiento del tambor. La eliminación de la brida no se realizó con el mejor cuidado para mantener la centricidad del cilindro observándose grandes oscilaciones del agua durante 1rpm que hacen difícil el control del nivel, el movimiento desordenado del tambor no es más que flotar y apoyarse en sus extremos en cada giro completo. Así se completan muchas fatigas al metal que lo hacen perder su resistencia mecánica y generan rajaduras. La falta y el exceso de agua también es causa de estas averías. Se conoce que la eliminación de la brida rigidizó el centro del cilindro y trasladó los esfuerzos céntricos hacia los extremos (cabezales y área cercana a las puertas) donde más tarde comenzaron a existir rajaduras.

## **1.9 Conclusiones**

En la bibliografía consultada no se hace referencia a estas instalaciones, solo aparecen una serie de informes donde se muestran las modificaciones realizadas a los carros raspadores desde su surgimiento, las soluciones técnicas propuestas en las empresas no han sido publicados y carecen de validación alguna.

## CAPITULO II

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

### 2.1- INTRODUCCION

El problema de los enfriadores de minerales reducido existe desde inicio de su operación. Inicialmente se empleaban vigas sueltas dentro del enfriador con la idea de que estas rasparan el metal. El resultado obtenido no era satisfactorio, manteniéndose temperaturas elevadas a la descarga lo cual obligaba a un régimen bajo de producción en la planta. Considerando que esta deficiencia de las vigas podía deberse al muy poco peso (insuficiente para raspar el fondo del enfriador) y a no realizar el raspado en el metal en el momento de emerger este de la masa del mineral reducido, el Ing. Demetrio Presilla diseñó el tipo carro existente luego de realizar numerosas pruebas en la planta y consiguió que la temperatura a la descarga de los enfriadores disminuyera considerablemente, permitiendo esto alcanzar la capacidad de diseño de los Hornos con una temperatura aceptable en el mineral reducido descargado por los enfriadores.

Por tanto en este capítulo se plantea como **objetivo**:

Estudiar el modelo físico-matemático ya establecido para los carros rapadores para remover el mineral y el enfriamiento del mismo.

### 2.2- DESARROLLO

El empleo de equipos que son adaptaciones de transporte de materiales. Estos equipos transportan físicamente al material durante el proceso térmico mientras que con las fases líquidas a gaseosas donde los fluidos se mueven con bombas y ventiladores, estas están situadas lejos y no tienen relación con el equipo de intercambio de calor o con el comportamiento del material dentro del equipo. Otra diferencia adicional es la movilidad relativamente pequeñas de los sólidos de ahí que las propiedades térmicas de los sólidos son las que controlan la velocidad de Holt (6) defina como “Capabilidad” a la velocidad de transferencia de calor continua de la cual es capaz el equipo que lo conduce. Es conveniente establecer esta propiedad como factor aparte:

- ✓ En 1<sup>er</sup> lugar porque como un criterio de diseño permite la comparación entre los equipos disponibles y su capacidad para suministrar extraer calor, claramente el papel secundario de los detalles de construcción respecto al funcionamiento total.
- ✓ En 2<sup>do</sup> lugar, porque permite concentrar todo el esfuerzo sobre el factor principal que es la característica de los sólidos y la preparación para su manipulación.

## CAPITULO II

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

- ✓ En 3<sup>er</sup> lugar permite la investigación rápida de un equipo dado dentro de un rango amplio de condiciones de operación.

La capacidad se establece por las ecuaciones fundamentales de conducción.

$$\varepsilon = \frac{1}{\left(\frac{1}{hce_1}\right) + \left(\frac{1}{hce_2}\right) + \left(\frac{1}{hce_3}\right)} \quad (2.1)$$

Donde:

$$hce_3 = \frac{K_3}{L_3}; hce_2 = \frac{K_2}{L_2}; hce_1 = \frac{K_1}{L_1} \quad (2.2)$$

- ✓  $\varepsilon \Rightarrow$  Capacidad combinada de conductancia  $\left(\frac{\text{watt}}{m^2 K}\right)$
- ✓  $hce_1 \Rightarrow$  Conductancia individual de la película exterior, en nuestro caso, el agua.  
 $\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$
- ✓  $hce_2 \Rightarrow$  Conductancia individual de la pared  $\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$
- ✓  $hce_3 \Rightarrow$  Conductancia individual de la película del lado de los sólidos  $\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$
- ✓  $K_1 \Rightarrow$  Conductancia térmica de la película exterior  $\left(\frac{W}{mK}\right)$
- ✓  $K_2 \Rightarrow$  Conductancia térmica de la pared  $\left(\frac{W}{mK}\right)$
- ✓  $K_3 \Rightarrow$  Conductancia térmica de la película del lado de los sólidos  $\left(\frac{W}{mK}\right)$
- ✓  $L_1 \Rightarrow$  Espesor de la, costra del mineral reducido (m)
- ✓  $L_2 \Rightarrow$  Espesor de la Plancha del enfriador (m)
- ✓  $L_3 \Rightarrow$  Espesor de la película de agua (m)

## CAPITULO II

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

**La velocidad total de conductancia o coeficiente total de transferencia de calor, para procesos térmicos con sólidos divididos es.**

$$V_{co_n} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) + \left(\frac{1}{V_{hco}}\right)} \quad (2.3)$$

Donde:

✓  $V_{co_n} \Rightarrow$  velocidad total de conductancia.  $\left(\frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \text{K}}\right)$

✓  $V_{hco} \Rightarrow$  velocidad de conductancia individual de los sólidos procesados.  $\left(\frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \text{K}}\right)$

El calor se transmite hacia ( $\varepsilon$ ) desde la cama de sólido pero también se transmite a través de las películas y paredes. Por tanto para la cama de sólidos el espesor efectivo del conductor es menor que el espesor mientras que para películas y paredes es el espesor completo. Para la cama de sólidos el valor efectivo se determina por el factor de forma que en caso del enfriador de mineral se puede tomar como 0.5 sin introducir error apreciable. Vamos a considerar un proceso térmico desde una cama estática o laminar de espesor ( $dm_n$ ). El calor se transfiere desde la cama de sólidos a través de tres resistencias en serie.

Si  $Lm$  es el espesor efectivo del conductor y ( $dm_n$ ) el espesor de la cama

$$Lm = \frac{dm_n}{2}$$

Arreglando la (2. 3)

$$V_{co_n} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + V_{hco}} \cdot V_{hco} \quad (2.4)$$

Sustituyendo ( $V_{hco}$ )

$$V_{co_n} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2 \cdot \left(\frac{km}{dm_n}\right)} \cdot 2 \cdot \left(\frac{km}{dm_n}\right) \quad (2.5)$$



## CAPITULO II

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

Como la mayor parte de los equipos de transferencia de calor para sólidos, son adaptaciones de equipos de transporte, es de suma importancia tener en cuenta los aspectos relacionados con el transporte y manejo de sólidos. El factor principal, común a todos los equipos, es la función volumétrica. Por esa razón es conveniente emplear la capacidad calorífica volumétrica de los sólidos. Según la expresión de Mc Adams para la definición de difusividad térmica.

$$km = Cpv \cdot D_T = cp \cdot d \cdot D_T \quad (2.6)$$

Donde:

- ✓  $km \Rightarrow$  Conductividad térmica
- ✓  $cp \Rightarrow$  Calor específico del agua  $\left(\frac{j}{kg \cdot K}\right)$
- ✓  $cpm \Rightarrow$  Calor específico del mineral  $\left(\frac{j}{kg \cdot K}\right)$
- ✓  $d \Rightarrow$  Densidad de los sólidos  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- ✓  $Cpv \Rightarrow$  Calor específico volumétrico  $\left(\frac{kcal}{m^3 \cdot K}\right)$
- ✓  $D_T \Rightarrow$  Difusividad térmica  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Sustituyendo en la Ecuación (2.5) tenemos:

$$Vco_n = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \left(\frac{2 \cdot Cpv \cdot D_T}{dm_n}\right)} \cdot \left(\frac{2 \cdot Cpv \cdot D_T}{dm_n}\right) \quad (2.7)$$

Simplificando queda:

$$Vco_n = \frac{\varepsilon \cdot 2 \cdot Cpv \cdot D_T}{\varepsilon \cdot (dm_n) + (2 \cdot Cpv \cdot D_T)} \quad (2.8)$$

## CAPITULO II

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

Graficando esta ecuación (2.8), se determinan las curvas de velocidad de conductancia de calor en función del espesor de la cama estática, que se utilizan para conducción de calor a sólidos en régimen estático o laminar. Esta grafica aparece en la gráfica #1 de los anexos. Aunque esta gráfica solamente se aplican a los procesos térmicos en régimen estático o laminar, las ventajas de trabajar con películas finas también se aplican a camas agitadas como en los equipos rotatorios.

### 2.3- SELECCION DEL MODELO FISICO Y ANALISIS DEL MISMO

Para obtener una relación entre la velocidad total de conductancia, ( $V_{co_n}$ ), y las variables que controlan la plancha de la pared del enfriador, se debe comprender que esa relación es la representación matemática del modelo físico seleccionado. Si el modelo corresponde correctamente con lo que realmente sucede, la expresión de velocidad real del modelo predecirá correctamente la velocidad real de transmisión de calor en el enfriador. Si el modelo brinda resultados que difieren ampliamente de los resultados empíricos, la expresión matemática carecerá de utilidad. Así pues, el requisito que deberá cumplir un modelo con el cual se desarrollaran las ecuaciones de transmisión de calor es que sea la representación más exacta del fenómeno real y que pueda ser empleado para predicciones de operación y diseño sin complejidades matemáticas. Para este caso, se necesita preparar el modelo físico de la acción del carro dentro del enfriador antes de poder derivar las ecuaciones matemáticas.

### 2.4- METODO DE CÁLCULO DE APLICACION

Para calcular el funcionamiento de equipos que transportan los sólidos de flujo laminar o estático estable se aplica la (2.7) o para mas comodidad se plotea la curva de ( $V_{co_n}$  vs.  $dm_n$ ) como aparece en la grafica #1

Evidentemente debido a la características del fluidez del mineral reducido caliente, su pequeño ángulo de reposo, su contenido de carbón alto, su fineza considerable y la poca turbulencia que provoca el carro, puede afirmarse que la carga del enfriador esta en régimen agitado pero de poca intensidad y la velocidad de transferencia es mayor que el flujo laminar.

Así pues, cuando la agitación produce un movimiento de partículas al azar a través de toda la cama que se mueve hacia delante se requiere introducir un coeficiente que se

## CAPITULO II

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

aplica a la difusividad térmica ( $D_T$ ), para incorporar el efecto de la agitación sobre ( $V_{coe_n}$ ) en la (2.7)

Quedaría así:

$$V_{coe_n} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \left( \frac{2 \cdot C_{pv} \cdot D_T}{dm_n} \right)} \cdot (C_{pv} \cdot Ae) \quad (2.9)$$

$$Ae = Le \cdot L_c$$

Donde

- ✓  $Ae \Rightarrow$  Área efectiva
- ✓  $V_{coe_n} \Rightarrow$  Velocidad total de conductancia efectiva.

En la grafica 2 se establece la longitud efectiva.

A pesar de que la explicación y aplicación de la modificación y su empleo, se efectúa con precisión, no hay datos disponibles en la literatura de forma que permita el uso del coeficiente y luego el calculo de ( $Ae$ ). Según Fridman y Marshall, para secaderos rotatorios recomiendan el empleo de:

$$T = \frac{0.23L}{S \cdot N^{0.9} \cdot D} \pm \left( \frac{0.6 \cdot B \cdot L \cdot G}{F} \right) \quad (2.10)$$

$$B = 5(Dp)^{-0.5}$$

Donde

- ✓  $T \Rightarrow$  Tiempo medio de residencia (s).
- ✓  $B \Rightarrow$  Constante que depende del material utilizado
- ✓  $Sm \Rightarrow$  Pendiente del equipo
- ✓  $L_c \Rightarrow$  Longitud del equipo (m)
- ✓  $\phi \Rightarrow$  Diámetro (m)
- ✓  $V_{rot} \Rightarrow$  Velocidad de rotación (rpm)
- ✓  $G \Rightarrow$  Velocidad de la masa de aire (kg/s.m<sup>2</sup>)
- ✓  $(+) \Rightarrow$  Se define a flujo paralelo
- ✓  $(-) \Rightarrow$  Se define a flujo contracorriente
- ✓  $Dp \Rightarrow$  Tamaño promedio de la partícula del material

## CAPITULO II

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

El segundo término es un factor de corrección que es positivo para flujo contra corriente y negativo para flujo paralelo. En este caso donde el flujo de gas es casi cero puede despreciarse este término. En la ecuación (2.10), ( $T$ ) es el tiempo medio de residencia del mismo mineral.

Esta ecuación se deriva de la ecuación fundamental de Soeman.

$$T = \frac{0.318 \cdot L_c \cdot \sin \theta}{S_m \cdot V_{rot} \cdot \phi} \quad (2.11)$$

Donde ( $\theta$ ) es el ángulo de reposo de los sólidos divididos.

El tiempo de residencia del mineral esta estipulado a 45 minutos.

$\theta = 20^\circ$  (Tomando el valor promedio para el mineral caliente según pruebas dinámicas realizadas en planta piloto)

$$V_{cov_1} = 188.4 \left( \frac{S_m}{L_c} \right) C_{pv} \cdot \phi \cdot V_{rot} \cdot \left( \frac{1}{\sin 20^\circ} \right) \quad (2.12)$$

$V_{cov_1} \Rightarrow$  Coeficiente volumétrico de transferencia.

Esta ecuación se evidencia que los factores principales que controlan ( $V_{cov_n}$ ) son las características de los sólidos y su manipulación y que los demás parámetros como numero de paletas empujadores, levantadores, corte de los levantadores, tubos, etc. tienen menos importancia aunque deben considerarse en diseño. Aplicando estas ecuaciones a los enfriadores de la planta metalúrgica puede comprobarse su precisión, chequeando contra los resultados de ( $V_{cov_1}$ ) de operación.

Aplicando la **ecuación 2.11** se calcula ( $S$ )

$$S_m = \frac{0.318 \cdot L_c \cdot \sin \theta}{T \cdot V_{rot} \cdot \phi} \quad (2.13)$$

En el caso de los enfriadores de mineral, estos equipos no tienen inclinación, considerándose el movimiento de la cama hacia delante por medio de los empujadores y

## CAPITULO II

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

por un gradiente de altura que posee el mineral entre la entrada y salida. El valor ( $S_m$ ) en este caso es una pendiente equivalente de ambos efectos. Esto confirma los resultados de mediciones experimentales del espesor de la cama que arroja valores de 1 m en la zona de los dos registros del enfriador

El coeficiente volumétrico de transferencia se calcula por la ecuación

### Área superficial del enfriador

$$A_T = 3.14 \cdot \phi \cdot L_c \quad (2.14)$$

Donde:

✓  $A_T \Rightarrow$  Área superficial ( $m^2$ )

### Coeficiente total de transferencia de calor basado en el área total del equipo

$$Vco_T = \frac{Q_d}{A_T \cdot (LMTD)} \quad (2.15)$$

Donde:

✓  $Vco_T \Rightarrow$  Coeficiente total de transferencia de calor  $\left(\frac{watt}{m^2 K}\right)$

✓  $LMTD \Rightarrow$  Media Logarítmica de temperatura K

### Calor disipado

$$Q_d = W_1 \cdot Cpm \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.16)$$

### Volumen retenido

$$Vm = As \cdot L_c \quad (2.17)$$

✓  $As \Rightarrow$  Área de la sección sombreada ( $m^2$ )

## CAPITULO II

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

### Coeficiente Total efectivo.

$$V_{coe_1} = V_{co_T} \cdot \frac{A_T}{A_e} \quad (2.18)$$

Donde

- ✓  $V_{coe_1} \Rightarrow$  Coeficiente Total efectivo.
- ✓  $A_e \Rightarrow$  Área efectiva.

### Coeficiente Total volumétrico efectivo.

$$V_{cov_e} = V_{coe_1} \cdot \frac{A_e}{V_m} \quad (2.19)$$

$V_{cov_e} \Rightarrow$  Coeficiente Total volumétrico efectivo.

$$Tsa_n = \frac{(1-R) \cdot T_1 + \left[ 1 - e^{\left[ \frac{V_{co_n} \cdot A_1}{F_a \cdot Cp} (R-1) \right]} \right] \cdot R \cdot t_1}{1 - R \cdot e^{\left[ \frac{V_{co_n} \cdot A_1}{F_a \cdot Cp} (R-1) \right]}} \quad (2.20)$$

$$R = \frac{F_a \cdot Cp}{F_m \cdot Cpm}$$

Donde.

- ✓  $Tsa_n \Rightarrow$  Temperatura de salida del mineral teórica (K)
- ✓  $F_a \Rightarrow$  Flujo del agua  $\left( \frac{kg}{s} \right)$
- ✓  $W_1 \Rightarrow$  Flujo del mineral  $\left( \frac{kg}{s} \right)$



## **CAPITULO II**

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

### **2.5- CONCLUSIONES**

En el presente Capítulo quedó establecido la metodología para el cálculo de los carros raspadores con el fin del enfriamiento del mineral reducido en los cilindros horizontales rotatorios de la Planta de Hornos de Reducción, el modelo cuenta con 20 ecuaciones.



## CAPITULO III

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

### 3.1. Introducción

Los resultados de un trabajo investigativo tiene que pasar por un examen minucioso y crítico para poder, a partir de ellos, comprobar o no la hipótesis planteada en vista a resolver el problema. Modelo físico-matemático ya establecido para los carros rapadores para remover el mineral y el enfriamiento del mismo permitirá obtener los parámetros característicos del modelo teórico para la velocidad total de conductancia del enfriador se tuvieron que escoger valores arbitrarios del espesor de la cama para realizar el cálculo y graficar su comportamiento.

Es por eso que el **objetivo perseguido en este capítulo** es:

Realizar el análisis de los resultados por el modelo físico así como hacer una valoración económica y el impacto medio ambiental del fenómeno estudiado.

### 3.2. Análisis de los resultados

3.2.1 Según datos encontrados los valores conductividad térmica  $K$  para cada resistencia son:

$$K_1 = 0.36 \frac{W}{mK}; K_2 = 45.34 \frac{W}{mK}; K_3 = 0.65 \frac{W}{mK}$$

3.2.2 Espesores del enfriador.

Costra de mineral reducido

$$L_1 = 0.001m$$

Plancha del enfriador

$$L_2 = 0.01587m$$

Película de agua

$$L_3 = 0.000254m$$

3.2.3 Resultado de la capacidad combinada de conductancia del enfriador.

$$\varepsilon = 284.206 \frac{watt}{m^2 \cdot K}$$

3.2.4 Resultado del pendiente del equipo.

Despejando el tiempo se determina la pendiente del equipo.





## CAPITULO III

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico ‘Dr. Antonio Núñez Jiménez’*

$T = \frac{0.318 \cdot L \cdot \sin \theta}{S_m \cdot V_{rot} \cdot \phi} \Rightarrow$  Tomando ( **$T = 45 \text{ min}$  que es  $2700 \text{ s}$** ) se determina la pendiente del equipo.

Hasta ahora no se han hecho ningún experimento, todos los valores que aparecen del tiempo de retención son arbitrarios ya que en algunas bibliografía aparece ( **$45 \text{ minutos}$** ) y en otras ( **$60 \text{ minutos}$** )

*Despejando (S) obtenemos*

$$S_m = 8.189 \times 10^{-5}$$

Con el valor que dio la pendiente se calcula (T)

$$T = 2.7 \times 10^3 .s$$

3.2.5 Resultado de la velocidad total de conductancia, obteniendo 3 valores del espesor de la cama.

$$\begin{pmatrix} 0.163 \\ dm_n = 0.181 \\ 0.197 \end{pmatrix} \Rightarrow (m) \quad \begin{pmatrix} 0.883 \\ V_{co_n} = 0.795 \\ 0.731 \end{pmatrix} \Rightarrow \left( \frac{\text{watt}}{m^2 \cdot K} \right) \text{ (Ver Anexo)}$$

3.2.6 Resultado del calor disipado

$$\begin{pmatrix} 8.32 \\ W_{1n} = 9.72 \\ 11.11 \end{pmatrix} \Rightarrow \left( \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right) \quad \begin{pmatrix} 5.64 \cdot 10^6 \\ Q_{d_n} = 6.137 \cdot 10^6 \\ 6.951 \cdot 10^6 \end{pmatrix} \Rightarrow (W) \text{ (Ver Anexo)}$$

3.2.7 Coeficiente Total de transferencia de calor basado en el área total del equipo.

$$\begin{pmatrix} 402.952 \\ LMTD_n = 462.368 \\ 498.104 \end{pmatrix} \Rightarrow (K) \quad \begin{pmatrix} 42.12 \\ V_{co_{T_n}} = 44.684 \\ 46.98 \end{pmatrix} \Rightarrow \left( \frac{\text{watt}}{m^2 \cdot K} \right) A_T = 297.038 m^2$$

3.2.8 Resultado de la velocidad total efectivo obteniendo tres valores de Coeficiente Total efectivo

$$\begin{pmatrix} 120.078 \\ V_{coe_{1n}} = 113.871 \\ 119.722 \end{pmatrix} \Rightarrow \left( \frac{\text{watt}}{m^2 \cdot K} \right) \text{ (Ver Anexo)}$$



## CAPITULO III

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

3.2.9 Resultado de Coeficiente Total volumétrico efectivo.

$$\left( \begin{array}{c} 214.997 \\ V_{cov_{en}} = 203.884 \\ 214.36 \end{array} \right) \Rightarrow \left( \frac{watt}{m^2 \cdot K} \right) (\text{Ver Anexo})$$

3.2.10 Temperatura de la salida del mineral Teorica

$$\left( \begin{array}{c} 884.279 \\ Tsa_n = 978.271 \\ 1.055 \cdot 10^3 \end{array} \right) \Rightarrow (K) (\text{Ver Anexo})$$

### 3.3. Valoración económica.

Las temperaturas elevadas del mineral que salen del enfriador debido al deficiente proceso de enfriamiento provocan en la Planta de Lixiviación la *evaporación del amoniaco*, el cual en investigaciones realizadas se demuestra que existe una pérdida aproximada de **10.93 t/día**. Desde el punto de vista que el precio actual del amoniaco es **335.312 USD/t**, **1337710.45 USD** será el daño económico para un año completo de trabajo continuo.

Esto implica que en algunos elementos y accesorios que componen el sistema de los tanques de contacto, el deterioro prematuro, por lo que provocan las **pérdidas por mantenimiento no planificado**, este problema está dado porque el magnesio a altas temperaturas se hace soluble en la pulpa; se incrusta en las tuberías y en las paredes de los tanques de contacto por donde es transportado, la cuales se cambian cada dos o tres meses aproximadamente lo que genera pérdidas de 12570 USD por cada tramo de tubería según el personal de mantenimiento de la planta.



## **CAPITULO III**

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

### **3.4. Impacto Ambiental.**

#### *Impactos Ambientales generados en planta Hornos de Reducción por los enfriadores.*

1. Generación de polvo y gases fugitivos calientes por sistema de alimentación y descarga de los hornos “Herresfoff”.
2. Generación de polvo y gases fugitivos calientes por sistema de alimentación y descarga de los alimentadores “Yacoby”.
3. Arrastre de mineral crudo a las canalizaciones.
4. Altas temperaturas en las zonas de trabajo.
5. Exposición al ruido.
6. Afectaciones a la estética laboral durante el montaje y desmontaje de los equipos y componentes de la planta.
7. Contacto con el cuerpo rotatorio del enfriador.
8. Contacto con agua caliente.
9. Contacto con el mineral caliente.
10. Incrustamiento entre el cuerpo rotatorio del enfriador y la pared de la piscina.

#### *Medidas preventivas propuestas.*

1. Implementar un programa de mejoras continuas para alcanzar una operación estable.
2. Continuar la prueba de sellos de alta resistencia a las temperaturas de descarga de los alimentadores.
3. Dar tratamiento a los residuales en el SD-01 evitando así arrastre a las canalizaciones.
4. Aplicar proyectos de automatización con vista a disminuir la influencia de altas temperaturas en las zonas de trabajo.
5. Uso obligatorio de los medios de protección con sanciones administrativas a los infractores.
- ✓ Colocar señales de seguridad que alerte sobre el riesgo en el área
6. Lograr que los trabajadores desarrollen una cultura laboral e industrial.
7. Colocar barandas o barrera en el muro de la piscina que impida el contacto del operador con el cuerpo rotatorio del enfriador. Esta debe ser móvil de manera tal que facilite los trabajos de mantenimiento en el equipo.



## **CAPITULO III**

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

- ✓ Colocar señales de seguridad que alerte sobre el riesgo en el área
- 8. Elaborar un instrumento de trabajo que permita colocar y quitar las anillas que se utilizan para controlar el nivel de agua de piscina. Este puede ser en forma de una tijera de una longitud considerable que minimice la probabilidad de contacto con el agua caliente.
- ✓ Colocar señales de seguridad que alerte sobre el riesgo en el área.
- 9. Mejorar el sello que se encuentra en la descarga del transportador al enfriador.
- ✓ Colocar señales de seguridad que alerte sobre el riesgo en el área
- 10. Elaborar una plataforma en la parte del enfriador donde se colocan las anillas como esta implementado en el enfriador 1 o elaborar un instrumento que permita hacer esta operación desde una posición más cómoda y segura.
- ✓ Mantener de manera regular la limpieza del guijo que se acumula debajo de la guardera de la catalina del enfriador con agua.

### **3.5. Conclusiones**

1. El espesor de la cama debe ser el menor posible ya que esto influye en la temperatura del mineral a la salida del enfriador, mientras mas elevado sea el espesor, la temperatura es elevada.
2. Las temperaturas del mineral a la salida del enfriador de mineral son elevadas, esto influye negativamente en algunos elementos y accesorios que componen el sistema de los tanques de contacto.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

### CONCLUSIONES

1. Trabajar con películas finas tiene una importancia determinante sobre la velocidad total de conductancia. Esta influencia se representa en la Grafica #1.
2. La temperatura de salida del mineral es elevada cuando se incrementa el espesor de la cama Grafica #2.
3. El coeficiente de transferencia de calor volumétrico efectivo y el coeficiente de calor efectivo con respecto al espesor de la cama, son contante en un punto. Grafica #3
4. Trabajando con fujos elevados el calor trasferido es mayor. Esto se ve en la Grafica #4.
5. La temperatura de salida del mineral teórica  $T_{sa}$ , es mayor que la temperatura experimental  $T_2$
6. La costra de sales que cubre la superficie exterior de la planta influye considerablemente sobre el coeficiente de transferencia calor ya que el término  $K/L$  forma parte de la expresión de la capabilidad y por tanto debe impedirse la presencia de la misma.
7. El tratamiento teórico se aplica con buenos resultados al enfriamiento del mineral reducido aunque los resultados son ligeramente superiores a los prácticos. Estas desviaciones es debida a la carencia de datos precisos de las propiedades físicas fundaméntales como, dilución térmica, conductividad térmica y capacidad calorífica.
8. Si la superficie interior del enfriador fuera uniforme y sin rugosidades, el carro, al rotar el enfriador adquiriría una posición de equilibrio y su efecto para agitar la cama y renovar capas de mineral seria mas pequeño que con la superficie con las rugosidades que crean las salientes de los cordones de las soldadura.
9. Los carros aumentan el tiempo medio de residencia del mineral reducido por ser resistencia al flujo de mineral desde la entrada hasta la salida.

### RECOMENDACIONES

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

1. Es necesario estudiar otros tipos de elementos internos que realmente remuevan la masa mineral.
2. Lograr la reestructuración interna de los hornos, incluyendo un estudio para la utilización del antiguo muro de retención de las bóvedas
3. Es de gran importancia el estudiar el comportamiento mecánico de los carros raspadores en los enfriadores para determinar cuales son los puntos por donde ellos fallan y poder aumentar su eficiencia mecánica.
4. El espesor de la cama del mineral reducido que queda adherido a la pared del enfriador debe ser el mínimo debido a la influencia negativa que ejerce sobre el coeficiente de transferencia de calor.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

1. Columbié, A. *Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2001. 98p.
2. Contaminación por ruido. [http://www.conam.gob.pe/educamb/cont\\_ruido.htm](http://www.conam.gob.pe/educamb/cont_ruido.htm). Junio 2004.
3. Contaminación por ruido  
[http://members.fortunecity.es/robertexto/archivo4/contam\\_ruidos.htm](http://members.fortunecity.es/robertexto/archivo4/contam_ruidos.htm).. Junio 2004.
4. Correa, N. *Balance energético en el enfriador de mineral en la planta de Hornos de reducción de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”*. Ramón, Gonzáles Marrero. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2000. 43p.
5. Detkov S. P. *Movimiento del mineral en horno rotatorio*; Revista Ts. M 1980. No.11, pp 54-57.
6. Guzmán D. *Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa, Cuba. 2001. 124p.
7. Hurtado, F. G. *Estudio de la Influencia en el Medio Ambiente del Sistema de Generación de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara y el Sistema de Transmisión Eléctrico Adyacente*. Tesis doctoral. ISMM, Moa. 1999. 120p.
8. Incropera, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II. III.
9. Isachenko, V; V. Osipova; A. Sukomel. *Transmisión del calor*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1979. pp 556.
10. Lesgilación sobre ruido. <http://www.ruidos.org/normas.html>. Junio 2004.
11. Manual de Operaciones de la planta Hornos de Reducción de la empresa Comandante "Ernesto Che Guevara", 1985. 219 p.
12. Mijiev.,Mijjeiva. *Fundamentos de termotransferencia*. Editorial Mir, 1979.
13. Montadas, K. *Estudio de la atmósfera dentro de los enfriadores de los hornos de reducción*. José, Oriol Rodríguez. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 1991. 55p.
14. Perron, J. and R. T. Bui, “*Fours rotatifs: Modele dynamique du mouvement du lit*”, Can. J. Chem. Eng. 72, 16-25 (1994).



## BIBLIOGRAFIA

*“Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”*

15. Perry, C; J, Perry. *Chemical Engineers hand book*. University of Oklahoma. La Habana, 1967.
16. Quintana, R. Conferencia Sobre la Industria Cubana del Níquel. II Seminario de Perfeccionamiento de Cuadros, ISMM, Octubre 1999.
17. Rioshkevich A. S, A. M Podkorbinshky, M. M Rejnik. Modelo matemático de la transferencia de calor y de masa para la tostación de menas oxidadas de níquel en hornos rotatorios. *Revista Ts.M*, 1979, No. 6 pp. 11-15.
18. Sai, P. S.T., G. D. Surender and A. D. Damodaran, “*Predicction of axial velocity profiles and solid hold-Up in a rotary klin*”, Can. J. Chen. Eng. 70, 438-44 (1992).
19. Sverdlik G. I. Gregoreu G. G. *Peculiaridades del paso del movimiento de materials en un tambor rotatorio a un régimen de cataratas*. *Revista Ts.M*. 1979. No.1pp.9-12.
20. Torres, E. *Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2003. 105p.
21. Transmisión de calor por convección correlaciones para la convección natural. <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/14.pdf>. Junio 2004.
22. Tyrrell J. *Development of an instrument for measuring inter-particle forces*. *Powder Technology*. 12: 1-16, 2001.
23. <http://www.fundaj.gov.br/rtec/not/not-056.html>[www.villacero.com.mx/esp/empresas/acero/-cintacero/templec.htm](http://www.villacero.com.mx/esp/empresas/acero/-cintacero/templec.htm)
24. [wwwep.vp.ehu.es/activida/NAPRO/codificacion\\_planos/cod\\_procesos.htm](http://wwwep.vp.ehu.es/activida/NAPRO/codificacion_planos/cod_procesos.htm)
25. [www.mlsa.es/termicos.htm](http://www.mlsa.es/termicos.htm)
26. [www.mlsa.es/termoqui.htm](http://www.mlsa.es/termoqui.htm)
27. [www.adegi.es/ttt/tttcct.htm](http://www.adegi.es/ttt/tttcct.htm)
28. [www.cga.com.co/maquinaria\\_Fr.htm](http://www.cga.com.co/maquinaria_Fr.htm)
29. [www.especialidadestermicas.com/especialidadestermicas/tratamiento05.htm](http://www.especialidadestermicas.com/especialidadestermicas/tratamiento05.htm)
30. [www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/spanish/bainitei.html](http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/spanish/bainitei.html)
31. [www.monografias.com/trabajos/aceros/aceros.html](http://www.monografias.com/trabajos/aceros/aceros.html)
32. <http://www.mediatico.com/es/revistas/ciencia/>
33. <http://www.fundaj.gov.br/rtec/not/not-056.html>
34. <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/370/37020102.pdf>
35. [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0716-02082005000100001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0716-02082005000100001&script=sci_arttext)



## **ANEXO**

*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*

### **ANEXO 1**

---

**Figura # 1a**



**Figura # 1b**



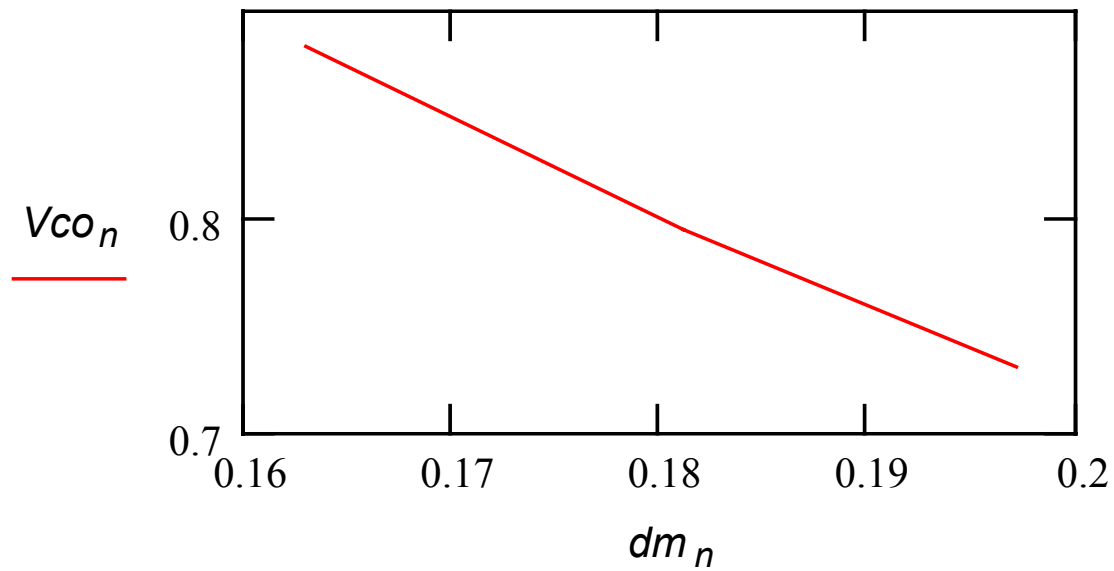
### **ANEXO 2**

---

## ANEXO

*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*

**Grafica1:**  $(V_{co_n})$  vs  $(dm_n)$



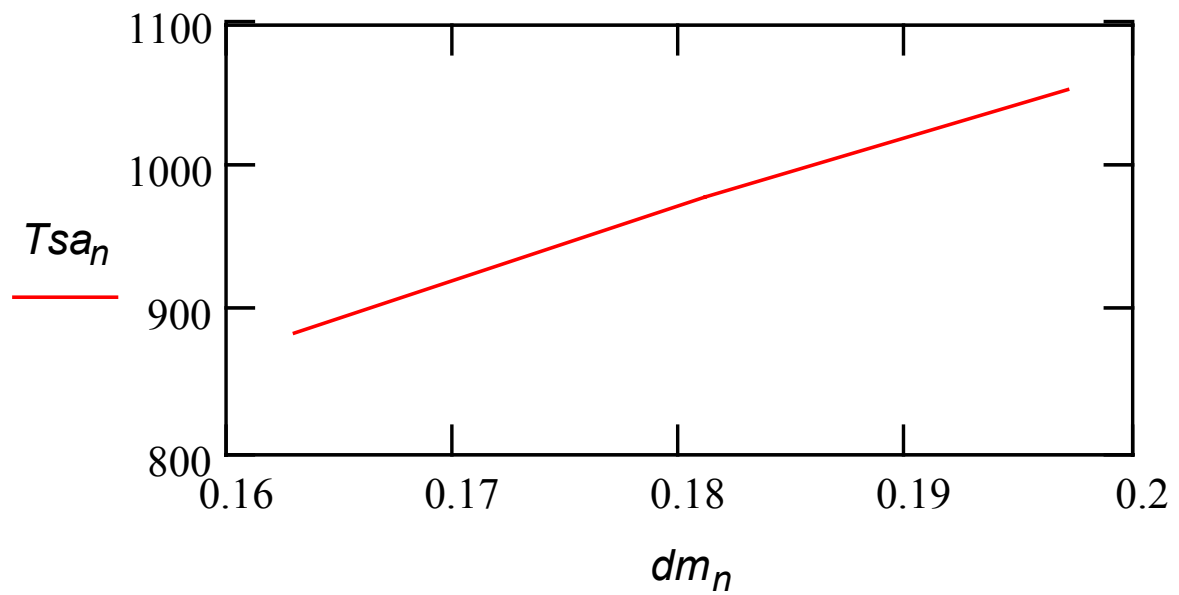
## ANEXO 3

---

## ANEXO

*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*

**Grafica2:**  $(Tsa_n)$  vs  $(dm_n)$



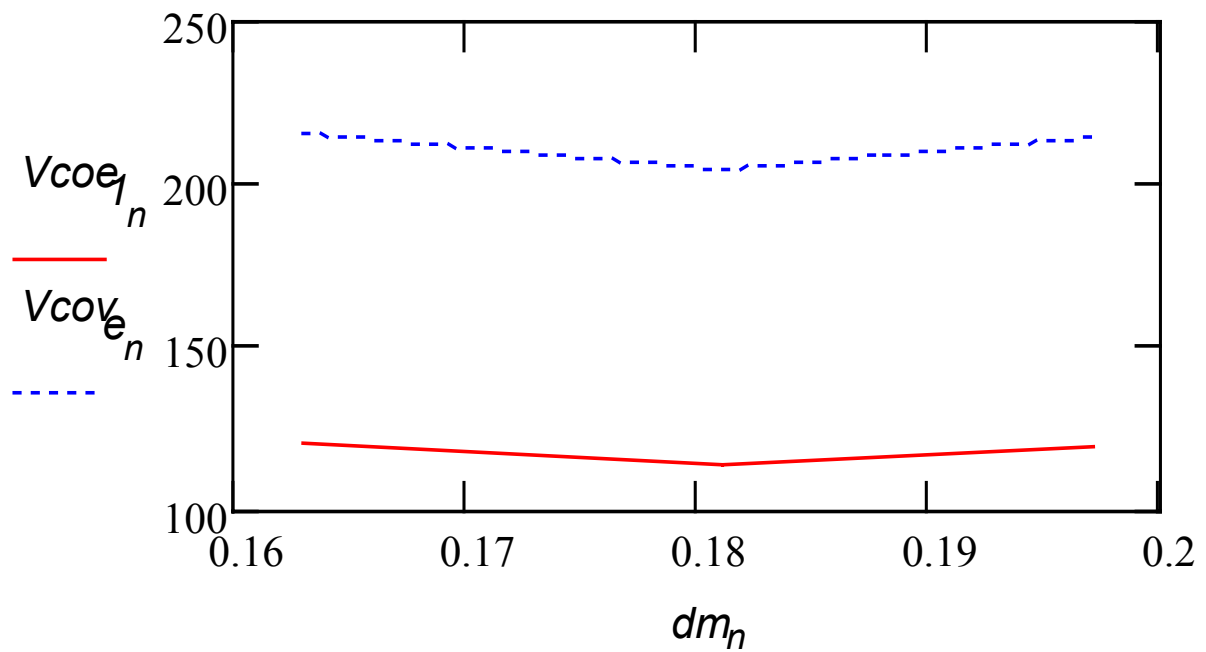
## ANEXO 4

---

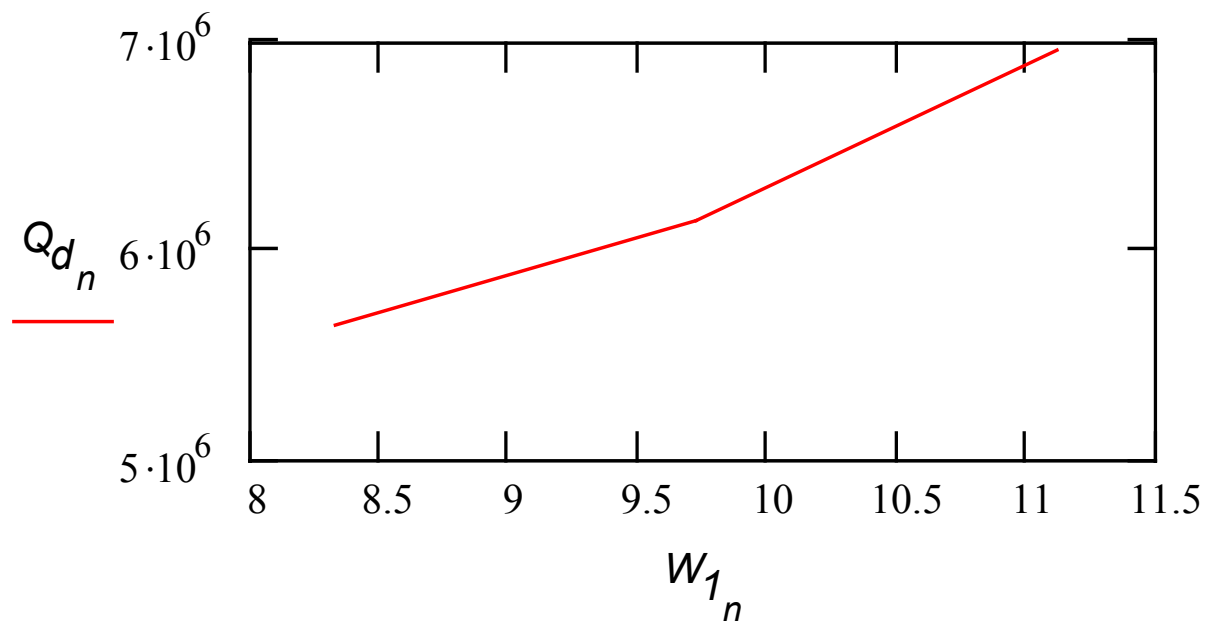
## ANEXO

*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*

**Grafica3:**  $((V \text{ cov}_{e_n})(Vce_{1_n})) \text{ vs } (dm_n)$



## ANEXO 5

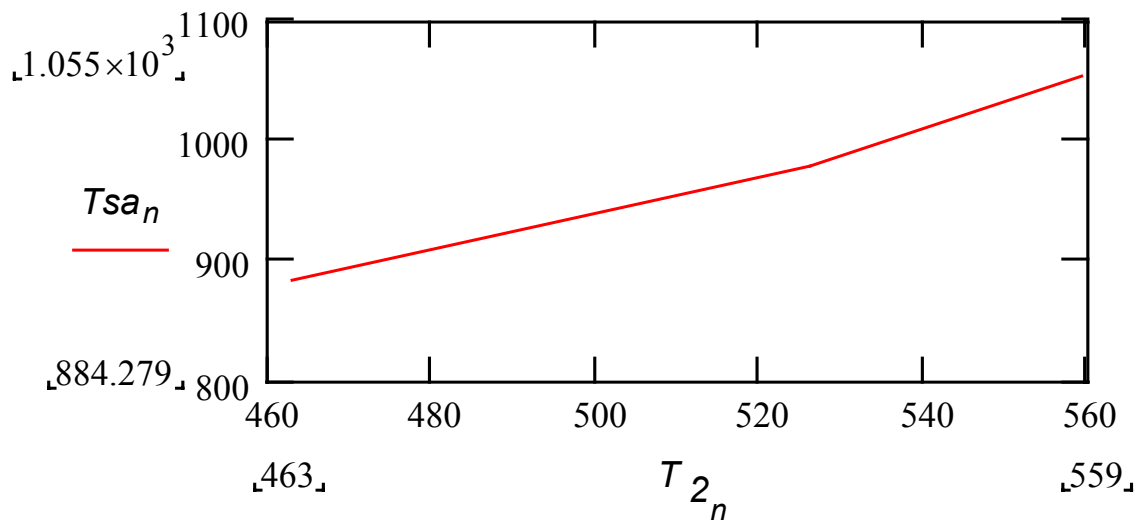
**Grafica4:**  $(Q_{d_n}) vs (W_{1n})$ 

## ANEXO 6

## ANEXO

*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*

**Grafica5:**  $(Tsa_n)$  vs  $(T_{2n})$



## ANEXO 7

**Figura#2**

