



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

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de

INGENIERO MECÁNICO

TITULO: Evaluación del proceso de transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la empresa “Comandante René Ramos Latour”.

AUTOR: Albanis Vargas Pérez

TUTOR: Ms.C. Ever Góngora Leyva

“Año 50 de la Revolución”
Moa, 2008

RESUMEN

La presente investigación titulada: "Evaluación del proceso transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la empresa "Comandante René Ramos Latour" se desarrolló con el objetivo de determinar el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral laterítico en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa "René Ramos Latour".

Se realizó la revisión y el análisis de los trabajos precedentes que sobre la temática estudiada han sido publicados, valorando el estado actual del proceso objeto de estudio.

Finalmente se determina el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral laterítico en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa "René Ramos Latour" y se efectúa la valoración económica y medioambiental asociada al mismo.

ABSTRACTS

Present put a title to investigation: "Evaluation of the process transference of heat of the mineral laterítico shortened in horizontal rotatory cylinders at the company Comandante René Ramos Latour developed for the sake of determining the behavior of the principal variables that intervene in the process of cooling of mineral laterítico in Hornos's plant of company Reduction René Ramos Latour.

Revision was accomplished and I object the analysis of the preceding works that have been over the studied subject matter published, appreciating the present condition of the process of study.

Finally the behavior of the principal variables determines itself that they tap in the process of cooling of mineral laterítico in Hornos's plant of company Reduction René Ramos Latour and the cost-reducing assessment takes effect and environmental associate to the same.

Contenido	Págs.
<i>Introducción</i>	4
Capítulo I <i>Marco teórico- metodológico de la investigación</i>	8
1.1- <i>Introducción</i>	8
1.2- <i>Trabajos precedentes</i>	8
1.3- <i>Descripción de los procesos tecnológicos</i>	11
1.4- <i>Proceso tecnológico de la Planta de Hornos de Reducción</i>	12
1.5- <i>Conclusiones</i>	18
Capítulo II <i>Materiales y métodos</i>	19
2.1- <i>Introducción</i>	19
2.2- <i>Determinación del por ciento del enfriador que se halla expuesto sobre la superficie</i>	19
2.3- <i>Evaluación del proceso transferencia de calor a través del agua</i>	21
2.4- <i>Balance de masa y energía.</i>	22
2.5- <i>Conclusiones</i>	26
Capítulo III <i>Análisis de los resultados, valoración económica e impacto ambiental</i>	27
3.1- <i>Introducción</i>	27
3.2- <i>Selección de las variables</i>	27
3.3- <i>Valoración económica</i>	32
3.4- <i>Impacto ambiental asociado al proceso</i>	33
3.5- <i>Conclusiones</i>	38
<i>Conclusiones Generales</i>	39
<i>Recomendaciones</i>	40
<i>Bibliografía.</i>	41
<i>Anexos.</i>	43

INTRODUCCION

Cuba ocupa hoy un lugar importante en la producción mundial de Níquel y fabrica cerca del 20 % del cobalto del orbe. De los renglones exportables con que cuenta el país, este es uno de los de mayores perspectivas de crecimiento. En el último lustro, modernizaciones en la industria han posibilitado implantar más de un récord de facturación y reducir los costos. Las acciones que ya se ejecutan en las plantas productoras y entidades aseguradoras, están encaminadas a superar la actual cifra de toneladas anuales que se producen (Bohemia. Año 95. No.8).

La Unión del Níquel usa dos tecnologías en la obtención del mineral. Un proceso ácido de alta precisión, montado en la Pedro Sotto Alba, ofrece una eficiencia metalúrgica del 91 % y entrega como producto final el sulfuro de níquel y cobalto. La Ramos Latour, así como la Che Guevara, que sin lugar a dudas han contribuido exitosamente a la reanimación de nuestra economía, dando valiosos aportes económicos en aras del desarrollo social, operan bajo el procedimiento del carbonato amoniacal, más conocido como lixiviación, este es a presión atmosférica, aporta una eficiencia del 75 % y devuelve sínter de níquel con altísima pureza; además permite separar el cobalto (elemento mucho más caro en el mercado) y convertirlo en un producto independiente.

La Empresa “**Cmdte René Ramos Latour**” esta enclavada en el Norte de la Provincia Holguín en el Municipio de Mayarí, en un pueblo conocido como Nicaro, no muy lejos del poblado de Felton, con las siguientes coordenadas: al norte la Bahía de Levisa, al sur la Bahía de Arrollo Blanco, al este la Sierra Cristal y al oeste Saetía. Los centros urbanos Portuarios más próximos son Felton, Central Guatemala y Antilla.

La configuración de Nicaro es de una pequeña península, por lo que desde el siglo antepasado los españoles la denominaron Lengua de Pájaro, nombre que se mantuvo hasta 1940 en que generó el actual Nicaro, posiblemente con el resultado de la fusión del símbolo químico del Níquel (Ni) con el apellido del profesor de nacionalidad holandesa, **Martinus Hendricus Caron** creador del proceso amoniacal aplicado a la Hidrometalurgia del Níquel y el Cobalto.

El proceso tecnológico de la fábrica “*René Ramos Latour*”, como expresara anteriormente, está basado en el proceso CARON, o esquema de lixiviación carbonato – amoniacal, según el cual el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente. Esta tecnología comienza con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos de níquel, incorporándose al flujo tecnológico, por la planta de Secaderos y Molinos, a partir de este momento el material circula por las diferentes plantas del proceso entre las que se

encuentran: la planta de Hornos de Reducción, la planta de Lixiviación y Lavado, y la planta de Calcinación y Sinterización, donde culmina el proceso con la obtención del sinter de níquel más cobalto.

Esta tecnología puesta en práctica durante muchos años en nuestro país, ha funcionado según dicho esquema en la fábrica de Nicaro, fundada en los años de la segunda guerra mundial, además, de forma Global en esta fábrica se han aplicado en estos años trabajos de ampliación, rehabilitación y modernización introduciéndose en ella nuevas técnicas de la ciencia y el cuidado del Medio Ambiente.

Fundamento de la investigación

Las nuevas tendencias relacionadas con el incremento de los niveles productivos y el vertiginoso desarrollo de La Unión del Níquel, demandan que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficiencia metalúrgica de los mismos.

Dentro de una industria metalúrgica existen complejos sistemas que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas, algunos de esos están ubicados en la planta de Hornos de Reducción y son los enfriadores de mineral, quienes juegan un papel esencial dentro del proceso, pues en ellos se debe enfriar el mineral desde la temperatura ($t=650-700^{\circ}\text{C}$) a la salida del horno hasta la temperatura ($t=200^{\circ}\text{C}$) que sale del enfriador para pasar al proceso de Lixiviación y Lavado.

Los enfriadores cilíndricos rotatorios son muy utilizados en las industrias de procesos aunque pocos difundidos para el enfriamiento de mineral. Se han realizado varios estudios sobre estos equipos de transferencia de calor pero muy pocos se han centrado en evaluar el proceso de intercambio de calor que se realiza en los mismos, de ahí la importancia de la presente investigación.

Desde hace varios años los enfriadores han presentado problemas con el enfriamiento del mineral que llega a ellos proveniente de los hornos de reducción.

La situación actual del proceso de enfriamiento en la planta de hornos de reducción de la empresa "Cmdte René Ramos Latour" se caracteriza por las siguientes *deficiencias*:

- ✓ El insuficiente conocimiento teórico acerca del mismo.
- ✓ La baja eficiencia térmica del proceso de transferencia de calor presente en los enfriadores.
- ✓ Las limitaciones de los métodos existentes para la selección y cálculo de los parámetros racionales del proceso de enfriamiento.

A partir de las deficiencias expresadas se declara como **situación problemática** actual:

El desconocimiento de la influencia de los diferentes parámetros y variables que intervienen en el proceso de transferencia de calor en los cilindros horizontales rotatorios de la planta de hornos de reducción de la empresa “René Ramos Latour”, impiden el desarrollo eficiente del proceso.

Como **objeto de estudio de la investigación** se plantea:

El proceso de transferencia de calor en los cilindros horizontales rotatorios de la planta de Hornos de Reducción.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis científica**:

Es posible, a través de la evaluación del proceso de transferencia de calor, la identificación de las principales variables que influyen en el enfriamiento del mineral.

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

Determinar el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral laterítico en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa “René Ramos Latour”.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo**.

- 1- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el proceso de enfriamiento del mineral reducido, y el estado actual de la temática en la empresa.
- 2- Establecer los procedimientos de cálculo para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud.
- 3- realizar el monitoreo y el registro de los diferentes parámetros que intervienen en el proceso de transferencia de calor en el enfriamiento de mineral.
- 4- Obtener la valoración técnico-económica del proceso y las afectaciones que este provoca al medio ambiente.

Los **resultados** más relevantes **esperados** de la investigación son:

- 1- El estado del arte sobre la temática tratada.
- 2- El modelo Físico-Matemático que describa el comportamiento dinámico del proceso de enfriamiento del mineral reducido.
- 3- La valoración técnico-económica del proceso y las afectaciones provocadas al medio ambiente.

De acuerdo con la hipótesis y el objetivo propuesto, se establece como **novedad científica**:

El establecimiento del modelo empírico-teórico del proceso de enfriamiento del mineral reducido en los cilindros rotatorios de la empresa "Cmdte René Ramos Latour" de Nicaro.

En el desarrollo de la investigación se aplican los siguientes **métodos**:

- ✓ Método de investigación documental y bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- ✓ Método de modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento basado en los principios físicos de la transferencia de calor.
- ✓ Método experimental para la preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud.
- ✓ Técnicas computacionales existentes para la validación del modelo.

Para el desarrollo de la investigación se toman como base los estudios que sobre el tema de modelación matemática de procesos industriales se han efectuado por Columbié (2001); Guzmán (2001); Torres (2003), Góngora (2004), así como la información recopilada de trabajos de investigación y tesis de grado realizadas en la planta de Hornos de Reducción de las Empresas Comandantes René Ramos Latour y Ernesto Che Guevara.

MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

La planta de Hornos de Reducción es el corazón del proceso de obtención del Níquel. Su importancia radica en que el níquel presente en el mineral solo puede ser lixiviado después de su reducción selectiva, por cuanto, es en esta donde se crean las condiciones (reducción de los óxidos de Níquel y Cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica y son los enfriadores de mineral (donde ocurre el proceso de enfriamiento), quienes juegan un papel esencial para la realización óptima del proceso de Lixiviación y Lavado.

Los enfriadores cilíndricos rotatorios son muy utilizados en las industrias de procesos aunque pocos difundidos para el enfriamiento de mineral. Se han realizado varios estudios sobre estos equipos de transferencia de calor pero muy pocos se han centrado en evaluar el proceso de intercambio de calor que se realiza en los mismos, de ahí que el **objetivo** del presente capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos del proceso de enfriamiento del mineral como base para realizar la evaluación del proceso de transferencia de calor en el mismo en la empresa "Cmdte René Ramos Latour".

1.2 Trabajos precedentes

Se consultaron diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica 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 práctico se han efectuado en los últimos años.

Resulta muy útil la revisión de los trabajos de **Mesarovich** (1996) que aborda la temática relacionada con la teoría general de los sistemas y la metodología de las investigaciones sistémicas. **Hurtado** (1999) y **Guzmán** (2001) conceptualizan con claridad los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador su empleo para sustentar teóricamente la investigación. A pesar de que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia se mantiene vigente.

Aportaron considerablemente los conceptos de **Incropera** (2003), que abordan la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de masa y calor, en esta

publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas.

Por su parte **Houge** (1978) establece los aspectos fundamentales de la transferencia de la materia y las leyes de conservación de la energía.

La tesis doctoral de **Torres** (2003), a pesar de estar encaminada hacia otro tema específico del conocimiento, muestra un correcto diseño de la metodología de la investigación.

Sai et al. (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 de las condiciones de operación, la velocidad en la alimentación del sólido, la velocidad de rotación y la inclinación del cilindro.

Perron y Bui (1994) propusieron un modelo no lineal para predecir la respuesta transitoria en los cilindros rotatorios teniendo en cuenta la velocidad total en la cama que sigue al modo despacio. Ellos validaron el modelo usando los datos reportados por **Sai et al.** (1992). La validación del modelo fue basado en una corrida experimental para la velocidad del sólido alimentado, velocidad de rotación e inclinación del cilindro.

El descubrimiento más significativo en este sentido es la importancia del mezclado del sólido para la transferencia total de calor a la capa, obtenido por **Folliot** (1955), quien realizó mediciones del flujo de calor en un horno experimental de cemento y fue de los primeros en enfatizar este hecho. Él estableció que el flujo de calor hacia la capa puede ser visto como un proceso en dos etapas que incluyen la transferencia de calor a una fina capa hacia el interior del mismo.

Correa (2000), 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, expone además las consideraciones en las que debe estar basado el modelo físico-matemático de estos equipos. Un modelo tal fue subsecuentemente elaborado por **Retirado** (2004) y **Góngora** (2004), quienes concluyeron que los parámetros más influyentes en la transferencia de calor en el proceso son la temperatura de entrada y el flujo másico de mineral.

En el Centro de Proyectos del Níquel se han realizado numerosos esfuerzos encaminados a la disminución de la temperatura en la descarga del enfriador, su objetivo principal se basa en el incremento de la capacidad de mezclado del mineral a la entrada del equipo y al incremento del peso de la cuchilla de cada carro.

La Universidad de Oriente propone la instalación de numerosas cadenas en la zona caliente y la garantía de que manipulando 45 t/h reducidas se obtendrá una descarga inferior a los 200 °C.

PRIOR INDUSTRIES AUSTRALIA está en desacuerdo con el concepto de un enfriador simple alimentado por dos hornos.

TUNRA encargada a la investigación de las propiedades del mineral concluyó que la conductividad térmica del mineral es deficiente y se reduce con la disminución de la temperatura, de modo que solamente el mineral más próximo al shell es enfriado. Sus recomendaciones son encaminadas a incrementar el área efectiva de los enfriadores o asegurar un buen mezclado de mineral en su interior para obtener 150 °C a 38 t/h reducidas.

Cala (2005), demuestra que la temperatura de la pared del enfriador de mineral laterítico no sobrepasa la temperatura de saturación del agua, o sea, nunca alcanza valores superiores a los 100 °C por lo que no existe transferencia de calor por ebullición en el proceso.

Se revisó la bibliografía existente en los archivos de la biblioteca en la empresa “Cmdte René Ramos Latour”, constatándose que la mayoría de los datos utilizados en los mismos se encuentran desactualizados por haberse realizado en períodos anteriores a las modificaciones realizadas en las diferentes plantas.

Lobaina y Campos (1995) estudian el proceso de molienda del mineral laterítico, con adición de petróleo aditivo en diferentes % y el comportamiento de los diferentes parámetros operativos de la reducción del mineral laterítico procesado a escala industrial (hornos de reducción), con variación del consumo de gas reductor a partir del análisis estadístico para cada etapa.

Los autores consideran que manteniendo el flujo de gas de 40 m³/t de mineral se obtienen mejores % del extractable, pero no se refieren a la incidencia en los parámetros que intervienen en el proceso de enfriamiento pues argumentan que la investigación se vio afectada seriamente por desperfectos técnicos y déficit de amoníaco.

Cordero (1985) demuestra la importancia y necesidad de instalar una transmisión motriz auxiliar en enfriadores de mineral de hornos de reducción.

Roque (2003) realiza un estudio pormenorizado de los primeros 60 años de vida de la empresa “Cmdte René Ramos Latour”, deteniéndose muy acertadamente en las

diferentes etapas de su historia y señalando los principales cambios tecnológicos realizados desde entonces.

La revisión bibliográfica muestra que la mayor cantidad de investigaciones está dirigida al estudio del proceso tecnológico y características de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara” mostrándose además pobreza de información acerca del proceso de transferencia de calor en los enfriadores de mineral.

1.3 Descripción del Proceso Tecnológico

El proceso tecnológico, de la empresa “Cmdte René Ramos Latour”, está basado en la lixiviación carbonato- amoniacal (tecnología CARON), en el cual el mineral oxidado es reducido selectivamente, siendo posteriormente sometido a una lixiviación amoniacal en determinadas condiciones, donde el níquel metálico fundamentalmente pasa a la solución. Esta solución rica en níquel (licor preñado) se somete a una destilación, precipitando en forma de carbonato de níquel, el que por un proceso de calcinación y/o Sinterización es llevado hasta óxido de níquel y/o sínter.

Esta tecnología comienza con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos de níquel de Pinares de Mayarí, con una ley aproximadamente de 1.14 % de níquel, siendo transportado hasta el complejo industrial primeramente por camiones, luego a través del Transportador de Banda de 11 km de distancia y por vía férrea.

La Industria consta de cinco plantas fundamentales en el proceso de obtención del níquel que son:

- Planta de preparación de Minerales
- Planta de Hornos de Reducción
- Planta de Lixiviación y lavado
- Planta de Separación de Cobalto
- Planta de Recuperación de Amoníaco y Sinterización.

El mineral antes de ser llevado a la cámara de reducción se somete a un proceso de secado y molienda en la planta de preparación del mineral. En esta planta al mineral se le elimina la humedad hasta un 4% aproximadamente y se muele hasta una fineza de un 80-83 %. El mineral después de pasar por la sección de molienda, es enviado mediante transporte neumático a los silos (14 en total, 8 en planta vieja y 6 en planta nueva) los cuales tienen una capacidad de 1086 t cada uno, facilitando una operación estable en los hornos de reducción. En la sección de los silos se encuentran 4 bombas tipo Fuller - Kinyo de descarga lateral de una capacidad de 150 t/h , mediante las

cuales el mineral es bombeado hasta las tolvas de los hornos dispuestas una para cada horno.

Una vez el mineral en las tolvas pasa a través de las romanas dosificándose al horno por el hogar H - 0 que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del pesaje que esta realiza de acuerdo al tonelaje fijado, estos equipos tienen una capacidad hasta 25 t/h .

El mineral se somete a un proceso de reducción en hornos de hogares múltiples para convertir el Níquel y el Cobalto presentes en el Mineral como óxidos y silicatos, al estado metálico y de esta forma está listo para su Lixiviación en el proceso carbonato amoniacal.

El mineral una vez reducido se transporta desde la descarga del hogar 16 hasta el enfriador por un conductor rotatorio tubular (Jacoby) este enfriador se encuentra parcialmente sumergido en una piscina con agua para lograr bajar la temperatura del Mineral reducido, que es descargado a una canal inclinado que recibe licor de la planta de Lixiviación y Lavado para preparar la pulpa que se alimenta a este circuito.

Desde la canal la pulpa formada por el Mineral reducido y Licor (Níquel disuelto en Amoniac) de 1ra y 2da etapa pasan a un tanque agitador para después ser bombeado hasta un distribuidor rotatorio que alimenta las Series de Turbo aereadores.

El aire suministrado a cada Turbo se dispersa con una copa de burbujeros situada debajo del impelente inferior. Existe un banco de enfriadores que garantiza el balance térmico de la planta.

El circuito de lavado tiene la finalidad de reducir al mínimo las perdidas de Níquel en el licor del fondo de los Sedimentadores. Los gases de los aereadores, el venteo de los Sedimentadores y tanques de la planta se lavan para recuperar el amoniaco en torres de absorción con empaques de Rejillas de Madera.

1.4 Proceso tecnológico de la Planta de Hornos de Reducción

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 11 hornos e igual número de transportadores rotatorios y enfriadores.

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 (CO-H_2) para ello el horno

dispone de 10 cámaras de combustión con quemadores de alta presión para la combustión incompleta del petróleo, el cual permite además de lograr el perfil de temperatura, enriquecer la atmósfera reductora. El proceso de reducción se efectúa en hornos de hogares múltiples de 21.43 m de alto y 6.33 m de diámetro con 17 hogares o soleras con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar) estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas con las que, mediante la rotación del eje central, facilitan el traslado del mineral de un hogar a otro.

El movimiento o traslado de mineral de un hogar a otro se realiza en forma de zig zag ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro. La rotación del eje central es de 1.1 - 1.33 rpm .

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, la planta cuenta con un sistema de limpieza de gases formado por 2 ciclones en cada horno y 4 electrofiltros.

De los hornos, el mineral recuperado, cae por gravedad al horno a través del hogar H-0. El mineral que se recupera en los electrofiltros es bombeado hacia los silos donde se homogeniza con el mineral de secaderos, ya que este mineral posee muy bajo peso volumétrico y su pesaje se dificulta.

El proceso de reducción es eminentemente endotérmico, por este motivo el horno dispone de 10 cámaras 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 calientes para el calentamiento del mineral, a la vez que enriquece la atmósfera reductora del horno ya que trabaja con combustión incompleta.

La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es de 14 kPa, facilitado por el uso de ventiladores centrífugos capaces de mantener una operación estable en dicha área, cada bloque cuenta con 3 de ellos (2 en operación y 1 de reserva).

Así, tenemos que 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 CO_2 / CO en H – 10 que debe ser de 1.2 %.

En estas condiciones es posible el desarrollo de las reacciones de reducción a pesar del corto tiempo de retención del mineral en el horno:

1. $\text{NiO}_{(s)} + \text{CO}_{(H_2)} \rightarrow \text{Ni met} + \text{CO}_2_{(H_2O)}_{(g)}$
2. $3\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)} + \text{CO}_{(H_2)} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2_{(H_2O)}_{(g)}$
3. $\text{Fe}_3\text{O}_{4(s)} + \text{CO}_{(H_2)} \rightarrow 3\text{FeO} + \text{CO}_2_{(H_2O)}_{(g)}$
4. $\text{FeO}_{(s)} + \text{CO}_{(H_2)} \rightarrow \text{Fe met} + \text{CO}_2_{(H_2O)}_{(g)}$

Esta operación se complementa con la introducción de aire en los hogares 4 y 6 para la postcombustión de los gases en un cierto contenido de CO y H₂ no consumidos en la reacción química, para evitar un incremento de las concentraciones de los mismos en el sistema de limpieza de gases (precipitador electrostático que nunca debe sobrepasar el valor de 3%), al mismo tiempo se aprovecha el calor de reacción exotérmica liberado en la combustión para facilitar el secado del mineral en los hogares superiores.

- $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 67\,600 \text{ kcal/kmol}$
- $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 57\,800 \text{ kcal/kmol}$

Después de reducido el NiO y los óxidos superiores de hierro a níquel metálico y hierro metálico (según las reacciones anteriores 1, 2, 3 y 4), el mineral es descargado del horno al transportador rotatorio, a su vez, este entrega el mineral a una temperatura de 650 - 700 °C al enfriador, el cual tiene el objetivo de enfriar el mineral hasta una temperatura por debajo de los 250 °C. Para ello posee carros raspadores, que se encargan de remover el mineral y raspar la superficie interior del enfriador evitando así que el mineral se pegue e interfiera en el proceso de transferencia o intercambio de calor. Este enfriador rota en una piscina con agua donde se encuentra parcialmente sumergido. El agua entra a la piscina a una temperatura aproximada de 30 °C y sale de esta sobre los 70 °C y es enviada mediante bombas hacia la planta eléctrica.

El mineral que sale del enfriador cae a una de las canales de lixiviación por donde circula licor amoniacal y una solución carbonato amoniacal formando una pulpa que va a los tanques de contacto. Esta pulpa es bombeada a la planta de lixiviación y lavado a través de las bombas instaladas.

ENFRIADOR ROTATORIO.

Una vez descargado el mineral en la parte inferior del horno y trasladado por el Transportador Rotatorio este es descargado al interior del Enfriador Rotatorio

continuando una nueva etapa del proceso tecnológico que consiste en el enfriamiento perdiendo el mineral parte del calor ganado en el proceso de reducción y facilitar el de Lixiviación.

La variación térmica esta en el rango de:

Planta	Entrada	Salida
Planta Vieja	371°C	200°C
Planta Nueva	371°C	175°C

El mineral reducido es de color negro, tóxico, abrasivo y pegajoso, el mineral reducido en contacto con el aire se reoxida, perdiéndose parte de níquel.

Peso a granel	0.08 a 1.4 ton/m ³
Densidad	3.3 a 3,5 ton/m ³
Granulometría	
0.15 mm	14.3 %
16 a -0,074 mm	17,4 %
0.074 a -0.044 mm	13.6 %
0.044 a -0.044 mm	54.07 %

DESCRIPCION DEL ENFRIADOR

Es un cuerpo cilíndrico simétrico construido en dos secciones en planchas de acero laminado, secciones que mediante bridas con encaje macho hembra se unen usando pernos y por los extremos se unen a dos piezas llamadas guijos de alimentación y

descarga (respectivamente) las que le sirven de puntos de apoyo. Los guijos están formados por dos secciones una que es un tronco cono fabricado en plancha de acero laminado y una segunda de forma cilíndrica irregular de acero fundido las que son unidas mediante soldadura y posteriormente sometidas al maquinado y pulido, sirviendo esta última como el gorrón de apoyo.

Los gorriones se apoyan sobre un juego de tablillas de micarta de las que posteriormente haremos mención, las que se montan en el sector interior e inferior de una pieza autoalineable que descansa sobre una base estacionaria ambas construidas en acero fundido.

La superficie interior longitudinal es dividida en secciones equidistantes, mediante rines cerrados, entre los que se balancea apoyada una estructura rectangular de acero laminado y soldada, a la que denominamos carros, los que evitan que el material en proceso de enfriamiento y traslación se pegue, facilitan el intercambio térmico entre el mineral caliente y la superficie interior del enfriador el que está semi-sumergido en agua, unido a ello para facilitar la operación anterior se dispone en la primera sección entre los rines, de canales colocadas en espiral con un ángulo de 45° en sentido inverso a la rotación, siguiéndoles un número bien determinado de aletones inclinados que facilitan la traslación del mineral hasta las 4 cucharas o paletas de descarga.

Como prolongación del gorrón de descarga localizamos acoplado el cuerpo del sinfín que su función es la de extraer el mineral entregado por las cuatro cucharas y descargarlo en una caja estacionaria provista de dos válvulas de compuerta para ponerla a descargar por una de las canales en las que inicia el circuito de lixiviación.

Por la cabeza de descarga y coincidiendo con el eje del sinfín se instala una tubería estacionaria por la que se suministra vapor al interior del enfriador, ella es soportada en un punto deslizante ubicado en el tercer ring a partir del de la descarga.

Entre el cuerpo cilíndrico del sinfín y la caja estacionaria se montan sellos circulares de carbón que impiden el escape de polvo al medio ambiente.

En la misma prolongación del guijo de descarga se ubica el cuerpo estrella soporte de la catalina dentada por la que es accionado el enfriador; el enfriador rota a la derecha visto desde el guijo de alimentación

Todo el conjunto anteriormente descrito está dentro de un tanque de hormigón al que se alimenta agua a temperatura ambiente, de forma continua para lograr el enfriamiento del mineral por debajo de los 200 °C .

El agua de la piscina debe salir a una temperatura no menos de 70 °C la que es bombeada a un tanque ubicado en Planta Eléctrica para su tratamiento químico y posterior utilización en las calderas.

Datos de interés	Planta Vieja	Planta Nueva
Diámetro interior	2.642 m	3.048 m
Longitud	18.288 m	25.908 m
Espesor de pared	0.012 m	0.016 m

APOYO DE MICARTA

El enfriador se apoya en sus dos extremos en un juego de tablillas de micarta las que son fabricadas de tejido de algodón impregnado en resina vítrea con Sulfuro de Molibdeno, es un material económico y apropiado para numerosas aplicaciones en las que se exige buenas propiedades, mecánicas, químicas y eléctricas.

Las cualidades fundamentales de este material son:

- Bajo coeficiente de fricción
- Autolubricada.
- Mínima absorción de agua.
- Resistencia a la compresión, flexión y vibraciones, etc.
- Facilidad de cambio.
- Bajo costo.

Las que hacen que sea el material ideal para las condiciones de trabajo a la que están expuestas.

RESUMEN DE LA VELOCIDAD DE ROTACION DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES

Equipo	Planta Vieja	Planta Nueva
Hornos de Reducción	1.317 rpm	1.317 rpm
Transportador rotatorio	19.97 rpm	19.92 rpm
Enfriador de mineral	6.38 rpm	4.64 rpm

1.5 Conclusiones.

1. Pocos autores se han dedicado a estudiar el comportamiento de las variables que intervienen en la transferencia de calor durante el proceso de enfriamiento del mineral reducido a escala industrial.
2. Para realizar un estudio del comportamiento de las variables que intervienen en la transferencia de calor durante el proceso de enfriamiento del mineral reducido en la empresa "Cmdte René Ramos Latour" es necesario realizar el monitoreo en ambas plantas debido a que las características entre una y otra difieren en cuanto a varios aspectos.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

Conociendo la influencia que ejercen los distintos factores que intervienen en la transferencia de calor durante el proceso de enfriamiento del mineral se pueden establecer los valores recomendables que garanticen el aumento de la eficiencia en el mismo y disminuir efectos negativos tales como la contaminación al medio ambiente y otros. El conocimiento del proceso y la utilización del modelo matemático más acertado es netamente importante para lograr los objetivos propuestos.

Se hace imprescindible, para el estudio de cualquier fenómeno, investigación científica o el buen funcionamiento de un proceso industrial, detallarlo en sus múltiples y continuas aproximaciones, conocer las variaciones que experimentan las sustancias de trabajo y establecer comparaciones con patrones predeterminados que permitan concluir si los resultados finales son o no los esperados. En este capítulo se plantea como **objetivo:**

Establecer los procedimientos para realizar el balance térmico y de masa en el proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción de la empresa "Comandante René Ramos Latour".

2.2 Determinación del por ciento del enfriador que se halla expuesto sobre la superficie

Es necesario tener en cuenta la ley de Arquímedes para calcular que % del enfriador se halla expuesto sobre la superficie, para determinar los modos de transferencia de calor de las paredes del cilindro al agua y de ésta al aire.

$$V_{enf} = \pi \cdot R_2^2 \cdot L \quad (2.1)$$

donde:

$L \Rightarrow$ longitud del enfriador; m

$R_2 \Rightarrow$ radio exterior del cilindro; m

$$V_{agua} = H_{agua} \cdot L_{agua} \cdot A_{agua pisc} \quad (2.2)$$

donde:

$A_{agua pisc} \Rightarrow$ ancho que ocupa el agua en la piscina; m

$L_{agua} \Rightarrow$ longitud que ocupa el agua en la piscina; m

$H_{agua} \Rightarrow$ nivel o altura del agua en la piscina; m

$$\rho_{enf} = \frac{P_{enf}}{V_{enf}} \quad (2.3)$$

donde:

$P_{enf} \Rightarrow$ peso del enfriador; kg

$V_{enf} \Rightarrow$ volumen del enfriador; m³

$$\rho_{agua} = \frac{\rho_{enf} \cdot V_{enf} \cdot g}{V_{agua} \cdot g} \quad (2.4)$$

donde:

$g \Rightarrow$ aceleración de la gravedad; m/s^2

$V_{agua} \Rightarrow$ volumen del agua; m³

$\rho_{agua} \Rightarrow$ densidad del agua; kg/m³

El peso del enfriador es:

$$W_{enf} = \rho_{enf} \cdot V_{enf} \cdot g \quad (2.5)$$

donde:

$\rho_{enf} \Rightarrow$ densidad del enfriador; kg/m³

$V_{enf} \Rightarrow$ es el volumen del enfriador. El peso del volumen V_a del agua desalojada (o, lo que es lo mismo, del volumen de la parte sumergida del enfriador) es la fuerza de flotación.

$$F_b = \rho_{agua} \cdot V_{agua} \cdot g \quad (2.6)$$

donde:

$F_b = W_{enf}$, porque el enfriador está en equilibrio

de modo que:

$$\rho_{agua} \cdot V_{agua} \cdot g = \rho_{enf} \cdot V_{enf} \cdot g \quad (2.7)$$

usando las densidades calculadas,

$$\frac{V_{agua}}{V_{enf}} = \frac{\rho_{enf}}{\rho_{agua}} = \% \quad (2.8)$$

El volumen del agua desalojada V_a es el volumen de la porción sumergida del enfriador, de modo que el otro % del enfriador se halla expuesto sobre la superficie.

2.3 Evaluación del proceso de transferencia de calor a través del agua

Para evaluar la influencia del agua en el proceso de enfriamiento de mineral Góngora (2004), estableció la ecuación (2.9) en la cual se tiene en cuenta el modo de transferencia de calor del agua al aire.

$$\rho_{agua} \cdot C_{agua} \cdot A_{agua} dx \frac{\partial \theta_{agua}(x,t)}{\partial t} = C_{agua} \dot{m}_{agua} \theta_{agua}(x,t) - C_{agua} \dot{m}_{agua} \theta_{agua}(x+dx,t) + K_2(\theta_p - \theta_{agua})dx - K_4(\theta_{agua} - \theta_{aire})dx \quad (2.9)$$

donde:

$\rho_{agua} \Rightarrow$ densidad del agua; kg/m³

$C_{agua} \Rightarrow$ calor específico del agua; kJ/kg K

$A_{agua} \Rightarrow$ área ocupada por agua; m²

$\dot{m}_{agua} \Rightarrow$ flujo de agua; kg/s

$\theta_{agua}, \theta_{aire} \Rightarrow$ temperatura del agua y del aire; K

$K_4 \Rightarrow$ Coeficiente superficial de transferencia de calor del agua al medio por unidad de longitud; W/m K

El calor específico del agua es mínimo a 35 °C y aumenta proporcionalmente cuanto más nos alejamos de esta temperatura. A temperatura ambiente la capacidad calorífica específica del agua es superior a la de cualquier líquido o sólido. La capacidad calorífica específica elevada del agua implica que ésta mantiene muy bien su temperatura o, lo que es lo mismo, que la pierde con gran dificultad, razones por las que se utiliza como medio efectivo de calentamiento o enfriamiento.

En otros casos, el calor suministrado se utiliza en la producción de un cambio de fase (sólido a líquido, líquido a gas). Generalmente estos cambios se producen a una temperatura determinada (temperatura de fusión, de ebullición. El calor latente se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a un gramo de sustancia para que ésta cambie totalmente de fase.

$C_p \Rightarrow$ a pesar de ser una función de la temperatura el calor específico del agua puede ser considerado constante dentro de ciertos intervalos. El error máximo que se comete al considerar el $C_p_{H_2O}$ constante es de 0,8%.

$$\frac{1kcal}{kg \cdot ^\circ C} = 4,1868 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

2.4 Balance de masa y energía

En este trabajo se evaluará a partir de un balance de masa y energía la equivalencia entre los calores que entran y salen del sistema. Una aplicación importante del calor y analogía de transferencia de masa es el enfriamiento evaporativo, que ocurre siempre que un flujo de gas fluye sobre un líquido.

La evaporación debe ocurrir de la superficie líquida y la energía asociada al cambio de la fase es el calor latente del líquido.

La evaporación ocurre cuando las moléculas líquidas cerca de la superficie experimentan colisiones que aumentan su energía, sobre eso necesitan superar la superficie obligatoria de unión (lazo).

La energía exigida para obtener la evaporación debe venir de la energía interior del líquido, que entonces debe experimentar una reducción en la temperatura. (efecto de enfriamiento).

Sin embargo, si las condiciones de mantener el estado son constantes, la energía latente perdida por el líquido debido a la evaporación debe ser llenado por el traslado de la energía del líquido.

La ecuación (2.10) describe el balance térmico del proceso en estudio:

$$Q_{trans.H_2O} = Q_{em} - (Q_{sm} + Q_{M.amb}) \quad (2.10)$$

El calor transferido al agua se determina por la ecuación (2.11).

$$Q_{trans.H_2O} = \dot{V}_{H_2O} \cdot C_{pH_2O} \cdot (t_{sH_2O} - t_{eH_2O}) \quad (2.11)$$

donde:

$\dot{V}_{H_2O} \Rightarrow$ Flujo másico del agua; kg/s

$C_{pH_2O} \Rightarrow$ Calor específico del agua; J/kgK

$t_{sH_2O} \Rightarrow$ Temperatura de salida del agua de la piscina; K

$t_{eH_2O} \Rightarrow$ Temperatura de entrada del agua a la piscina; K

Para determinar el calor que entra y que sale con el mineral se utiliza las ecuaciones

$$Q_{em} = \dot{m}_e \cdot C_{pm} \cdot t_{em} \quad (2.12)$$

$$Q_{sm} = \dot{m}_s \cdot C_{pm} \cdot t_{sm} \quad (2.13)$$

donde:

$\dot{m}_e = \dot{m}_s \Rightarrow$ Flujo másico del mineral; kg/s

$t_{em} \Rightarrow$ Temperatura de entrada del mineral; K

$t_{sm} \Rightarrow$ Temperatura de salida del mineral; K

$C_{pm} \Rightarrow$ Calor específico del mineral; J/kgK

$C_{pm} \Rightarrow$ Constante para no tener en cuenta las fluctuaciones del mismo, en dependencia de la composición química del mineral y de su temperatura.

Las ecuaciones (2.10), (2.11), (2.12) y (2.13) dependen de las propiedades, parámetros del mineral y del agua de enfriamiento, pero para determinar la cantidad de calor transferida al medio ambiente es necesario tener en cuenta los métodos de transferencia de calor, en este caso convección.

Factores a considerar:

$\dot{V}_{H_2O} \Rightarrow$ Flujo másico del agua

$t_{superf} \Rightarrow$ Esta influye en la producción de mineral (t/h) y la t_{entrad} , y en las incrustaciones.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio es necesario tener en cuenta la cantidad de calor que se transfiere por evaporación del agua. La energía exigida para la evaporación proviene de la energía interior del líquido que entonces trae consigo reducciones en la temperatura del mismo.

Aplicando la ley de conservación de energía a un control de superficie sobre el líquido, se obtiene la expresión (2.14).

$$q''_{conv} + q''_{add} = q''_{evap} \quad (2.14)$$

Si no hay ninguna suma de calor por otros medios, la ecuación (2.14) se reduce a un equilibrio entre la transmisión de calor por convección del gas y el calor perdido por evaporación desde el líquido representada en la ecuación (2.15).

$$q''_{conv} = q''_{evap} \quad (2.15)$$

donde:

$q''_{evap} \Rightarrow$ flujo de calor por evaporación

Este puede calcularse como el producto de flujo de masa de evaporado y el calor latente de vaporización, ecuación (2.16).

$$q''_{evap} = n''_A \cdot h_{fgv} \quad (2.16)$$

donde:

$n''_A \Rightarrow$ flujo de agua que se evapora; kg/s

$h_{fgv} \Rightarrow$ calor latente de vaporización; J/kg

El flujo de agua que se evapora se determina según la ecuación:

$$n''_A = h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.17)$$

donde:

$h_m \Rightarrow$ coeficiente de transferencia de masa; m/s

$\rho_{A,sat} \Rightarrow$ densidad del vapor de agua saturado a la temperatura de la superficie; kg/m³

$\rho_{A,\infty} \Rightarrow$ densidad del vapor de agua saturado a la temperatura del aire; kg/m³

El número de Sherwood es igual al gradiente de concentración adimensional de la superficie, y proporciona una medida de la transferencia de masa por convección de la superficie y se obtiene a través de la ecuación:

$$Sh = 0.0296 \cdot R_e^{\frac{4}{5}} \cdot S_C^{\frac{1}{3}} \quad (2.18)$$

donde:

$S_C \Rightarrow$ número de Schmidt

El número de Reynolds se determina a través de la ecuación:

$$R_{eD} = \frac{\nu_{aire} \cdot D_e}{\nu_{aire}} \quad (2.19)$$

donde:

$v_{aire} \Rightarrow$ velocidad del aire; m/s

$\nu_{aire} \Rightarrow$ coeficiente cinemático de viscosidad del aire; m²/s

La velocidad del aire la planta de Hornos de Reducción varia entre 0,2 y 2 m/s aproximadamente este fenómeno se puede apreciar con claridad en los anexos 2 y 3 respectivamente cuando el agua se evapora no ocurre un desplazamiento tan rápido.

Para el calcular el número de Schmidt se emplea la ecuación:

$$S_C = \frac{\nu_{aire}}{D_{AB}} \quad (2.20)$$

donde:

$\nu_{aire} \Rightarrow$ viscosidad cinemática; m²/s

$D_{AB} \Rightarrow$ coeficiente de difusión de masa; m²/s

Conociendo las ecuaciones (2.18), (2.19), (2.20), y a través de la ecuación (2.21) se puede determinar el coeficiente de transferencia de masa.

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} \quad (2.21)$$

donde:

$L \Rightarrow$ longitud característica; m

El calor transmitido por convección del agua al aire se determina a través de la ecuación:

$$q''_{evap} = \alpha_{agua} (\theta_{agua} - \theta_{aire}) \quad (2.22)$$

donde:

$\alpha_{agua} \Rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio;
W/m²K

Sustituyendo las ecuaciones (2.16) y (2.22) en la ecuación (2.15) y despejando el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire α_{agua} , se obtiene la ecuación (2.23).

$$\alpha_{agua} = \frac{h_{fg} \cdot h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty})}{(\theta_{agua} - \theta_{aire})} \quad (2.23)$$

Entonces el coeficiente de transferencia de calor a través del agua por unidad de longitud al medio se determina por la ecuación:

$$Q_{perma} = \alpha_{agua} \cdot A_{agua} \cdot (t_{aguapisc} - t_{aire}) \quad (2.24)$$

2.5 Conclusiones

1. En el presente capítulo quedó establecido el procedimiento de cálculo para realizar el balance de masa y energía en el proceso de enfriamiento de mineral.
2. Para la realización del balance se tuvieron en cuenta los modos de transferencia de calor del agua al aire.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

3.1- Introducción

Durante el desarrollo de esta investigación se hizo necesaria la obtención de los principales parámetros que caracterizan el objeto de estudio. La carencia de algunos instrumentos de medición, en ocasiones, propició el uso de métodos menos convencionales así como asumir algunos valores apoyados en otras investigaciones y/o la opinión de expertos. En las instalaciones industriales es, en ocasiones, comprometedor variar un parámetro para monitorear su influencia en otras variables si el resultado final de la prueba (a riesgo) pudiera afectar de alguna manera indicadores sensibles como la producción.

Durante la investigación los valores de los parámetros de medición fueron recogidos por espacio de 1 mes (cada 30 minutos) a través del EROS, programa especializado que registra y contabiliza en la computadora, de forma continua, el desarrollo de todo este proceso.

3.2- Selección de las variables

Si se analiza detalladamente el proceso de enfriamiento teniendo como elementos fundamentales la revisión bibliográfica y la opinión argumentada de los expertos, la temperatura del mineral a la salida del enfriador depende fundamentalmente de los coeficientes de transferencia de calor y éstos a su vez de los siguientes parámetros:

- ❖ Flujo másico de mineral
- ❖ Temperatura del mineral a la entrada del enfriador
- ❖ Flujo de agua de enfriamiento
- ❖ Temperatura del agua de enfriamiento

Flujo másico de mineral a la entrada del enfriador

Autores como Góngora (2004), Tabera y García (2006); Pujols (2007) plantean que el flujo de mineral es el parámetro más influyente en la temperatura de salida del mineral. Durante la investigación se realizaron mediciones con diferentes flujos de mineral que avalan la conclusión de los autores antes mencionados.

Temperatura del mineral a la entrada del enfriador

Esta variable influye considerablemente en la temperatura del mineral a la salida del enfriador, concediéndole una posición importante dentro del proceso.

Flujo de agua de enfriamiento

Este es otro de los parámetros fundamentales dentro del proceso, es quien absorbe el calor aportado por el mineral garantizando el enfriamiento eficiente de éste hasta los valores óptimos exigidos, determinando en gran medida, la efectividad de la transferencia de calor.

Limita la investigación, la falta de un flujómetro en la instalación que hiciera posible determinar con exactitud la cantidad de agua que entra a la piscina por unidad de tiempo.

Temperatura del agua de enfriamiento.

Este parámetro no es controlado a la entrada del líquido en la piscina, por lo que se midió por medios propios comprobando que los valores obtenidos oscilan entre (303,17 y 305,17) K y que los valores registrados como temperatura a la salida se corresponden realmente con la temperatura en la piscina aunque al medir los valores reales de salida solo difieren de estos en escasos dos grados.

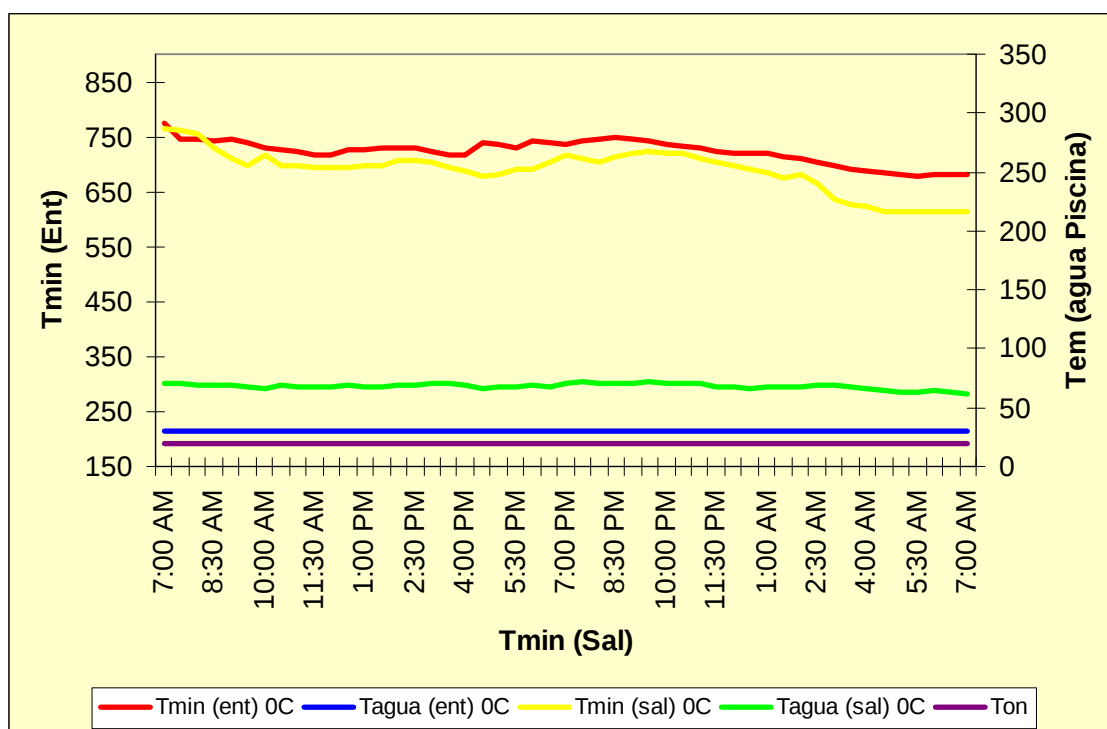
De negativa incidencia y muy importante es mencionar el caso de la imposibilidad para medir el volumen de agua dentro de la piscina por estar ésta ocupada en gran parte por mineral derramado que obstaculiza la medición, incluso aproximada, del parámetro. También el movimiento del enfriador se ve afectado a causa de esta situación y en ocasiones, lejos de flotar, roza en el mineral derramado disminuyendo su velocidad de rotación obligando al motor a trabajar bajo un régimen forzado y limitando la transferencia de calor.

	Temperatura Enfriador		Temperatura Agua		Ton
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	t/h
Mínimo	678,97	215,60	29,70	61,90	20,00
Media	722,82	251,43	29,88	68,13	20,00
Máximo	776,00	287,00	30,00	71,50	20,00

Tabla 3.1. Parámetros del análisis estadístico descriptivo

(Máximos, mínimos y medios) en Planta Vieja.

En la tabla 3.1 se aprecian los valores medios, mínimos y máximos de los parámetros medidos el día 23 de junio de 2008 del Cooler N^o. 6 de Planta vieja. Son notables los altos índices de temperatura a la salida del enfriador que pueden ser explicados a partir de la situación descrita al inicio de este capítulo relacionada con los sedimentos producto a la realización de mantenimientos en el enfriador, durante los cuales se vierte mineral en las piscinas, que luego afecta considerablemente el proceso de enfriamiento.



Gráfica 3.1. Comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral. Cooler N^o. 6 de Planta vieja

En la gráfica 3.1 se muestra el comportamiento estable de las variables que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral del Cooler N^o. 6 de Planta vieja (temperatura de entrada y salida del mineral y temperatura de salida del agua) observándose una dependencia lineal entre éstas con cierta diferencia en el tiempo de reacción de una con respecto a la otra, que oscila entre los 28 y 30 min . En este caso

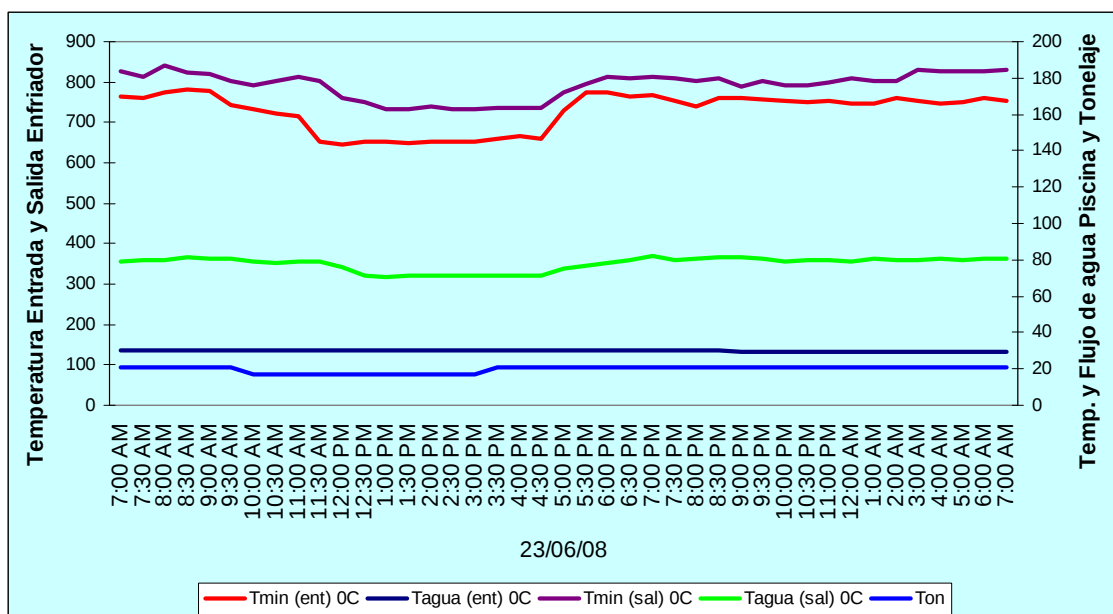
se mantienen constante el flujo másico de mineral y la temperatura de entrada del agua al enfriador.

	Temperatura Enfriador		Temperatura Agua		Ton
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	t/h
Mínimo	645,00	162,60	29,70	70,30	17,00
Media	727,20	175,92	29,91	77,57	19,93
Máximo	781,00	187,00	30,00	81,80	21,00

Tabla 3.2. Parámetros del análisis estadístico descriptivo

(Máximos, mínimos y medios) en Planta Nueva.

En la tabla 3.2 se aprecian los valores medios, mínimos y máximos de los parámetros medidos el día 23 de junio de 2008 del cooler N^{ro}.7 de Planta Nueva.



Gráfica 3.2. Comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral. Cooler N^{ro}. 7 de Planta Nueva

En la gráfica 3.2 se puede observar el comportamiento de los parámetros (Temperatura del mineral a la entrada, a la salida y temperatura del agua a la salida) durante cinco horas, desde las 10.00 a.m. hasta las 3.00 p.m. del día 23 de junio de 2008, en que se disminuyó el flujo másico de mineral de 21 t/h a 17 t/h, obteniéndose como resultado la disminución de la temperatura de entrada del mineral al enfriador 1 ½ h después, esta a su vez provocó una disminución de aproximadamente 6 °C en la temperatura del agua a la salida y de 16 °C en la temperatura de salida del mineral ½ h más tarde.

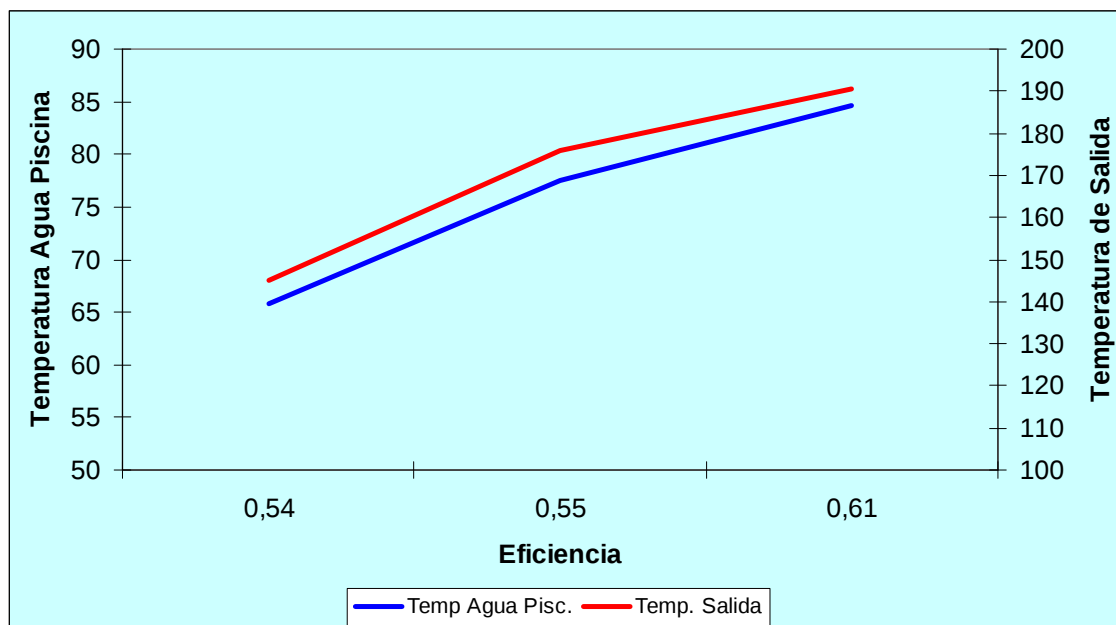
Como se puede apreciar existe una diferencia entre las temperaturas de planta nueva y planta vieja de la fábrica Comandante “René Ramos Latour”, la cual oscila en planta nueva desde 160 °C – 180 °C debido a que los enfriadores de esta parte de la planta tienen mayor dimensión con respecto a planta vieja que son de menor dimensión y como se puede apreciar en, Epígrafe 1.4, **datos de interés**, la descarga del enfriador es de 260 °C – 280 °C , según criterios de especialistas y trabajadores de las plantas (planta nueva y planta vieja) se realiza una mejor transferencia de calor en los Cooler de planta nueva debido a su mayor longitud y mejor estado técnico de los equipo.

	Temperatura Enfriador		Temperatura Agua		Ton
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	t/h
Mínimo	640,70	145,00	29,70	65,80	12,00
Media	727,20	175,92	29,91	77,57	19,93
Máximo	800,30	190,40	30,00	84,60	22,00

Tabla 3.3. Parámetros del análisis estadístico descriptivo del mes de junio

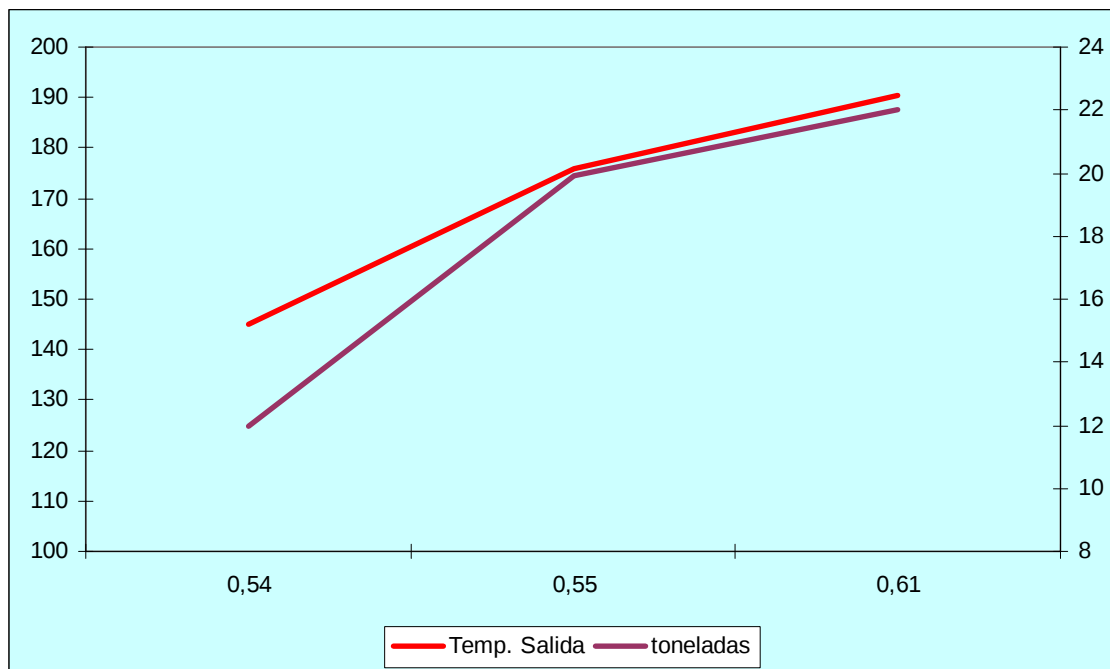
(Máximos, mínimos y medios) en Planta vieja.

En la tabla 3.3 se recogen los valores (Máximos, mínimos y medios) del análisis descriptivo del mes de junio en planta vieja los cuales nos dan la posibilidad de evaluar la eficiencia para estos rangos (ver anexo 1).



Gráfica 3.3. Comportamiento de la temperatura del agua en la piscina y del mineral a la salida del enfriador vs eficiencia.

En la gráfica 3.3 se observa como, de forma lineal, al aumentar la temperatura del agua en la piscina y del mineral a la salida del enfriador aumenta la eficiencia lográndose los valores más elevados de ésta para los máximos valores de las otras dos variables (temperatura del agua en la piscina y del mineral a la salida del enfriador).



Gráfica 3.4. Comportamiento de la temperatura del mineral a la salida del enfriador vs flujo másico de mineral.

En la gráfica 3.4 se observa como, de forma también lineal, al aumentar el flujo másico de mineral aumenta la temperatura del mineral a la salida del enfriador consiguiéndose los máximos valores de ésta para las mayores cuantías del flujo másico.

3.3 Valoración económica

La valoración técnica – económica del proceso de enfriamiento debe realizarse mediante el análisis de las pérdidas que existen actualmente en el sistema de tanque de contacto por ser en este donde tiene repercusión el proceso analizado, las cuales se clasifican en:

- Pérdidas por evaporación de amoníaco (NH_3)
- Pérdidas por mantenimiento no planificado.

Las temperaturas elevadas del mineral que salen del enfriador debido al deficiente proceso de enfriamiento provocan en la Planta de Lixiviación la evaporación del amoníaco, el cual en investigaciones realizadas se demuestra que existe una pérdida

aproximada de 28,4 t/día. Considerando que el precio actual del amoníaco es 587 CUC/t, el daño económico para un año de trabajo continuo es 5999140.00 CUC.

El deterioro prematuro de algunos elementos y accesorios que componen el sistema de los tanques de contacto 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 paredes de los tanques de contacto y en las tuberías por donde es transportado, la cuales se cambian cada dos o tres meses aproximadamente lo que genera pérdidas de 12070 CUC por cada tramo de tubería según estudios realizados por el personal de mantenimiento de la planta.

En los enfriadores el promedio mensual del consumo de agua es de 371 066 m³ con un precio de 0,28 CUC el m³, para un promedio anual es de 3 252 790 m³ lo que significa un costo de 1246781,76 CUC por año.

3.4. Impacto ambiental asociado al proceso

La preocupación por el medio ambiente es una de las corrientes socioculturales más extensas de la actualidad. El hombre está empezando a proteger el entorno porque sabe que han de vivir y sobrevivir juntos, la degradación del medio ambiente es una piedra angular en la desaparición de una u otra especie viva.

La velocidad del cambio tecnológico impulsado por el paradigma técnico-económico actual, incide directamente en todas las actividades y esferas de la vida social.

El desarrollo de la industria minero metalúrgica en la región de Nicaro, es una muestra de todo lo agresiva que puede ser la actividad humana sobre el medio ambiente, sin embargo industria y ecología no son incompatibles, se pueden compaginar y coexistir, la interacción empresa y medio ambiente ha de ser beneficiosa y llegar a formar parte del entorno físico, social y humano de la región.

La explotación de los recursos pertenecientes a la Empresa “René Ramos Latour” representa un doble impacto sobre el medio, primero produciendo residuos potencialmente negativos como la emisión de gases, ruido, polvos, vibraciones, vertidos y segundo permite el establecimiento de fuentes de empleo, desarrollo inducido en la región, etc.

Identificación de las acciones o actividades con repercusión ambiental.

- ☐ Derrame de mineral
- ☐ Escape de gases contaminantes

- ▣ Emisiones continua de polvo
- ▣ Emisiones continuas de ruido

Caracterización de los impactos

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de gran importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta del análisis desarrollado, determinando como repercuten sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar tanto en el objeto como en los elementos externos a éste.

En la tabla 4.4 se muestran los impactos ambientales en la planta de hornos de reducción, la misma servirá como base para el establecimiento de los impactos para el objeto de estudio.

Tabla 3.3 Identificación de los impactos ambientales en la planta hornos de reducción.

Acciones o Actividades	Factores ambientales	Impactos Ambientales
Derrame de mineral	Económico	Pérdidas por concepto económico
Escape de gases contaminantes	Aire	Disminución de la calidad del aire
Escape de gases contaminantes	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Escape de gases contaminantes	Económico	Pérdidas por concepto económico
Emisiones de polvo	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Emisiones de Ruido continuo	Hombre	Pérdidas de la sensibilidad auditiva

De los impactos representados en la tabla 3.3 para el proceso de enfriamiento solo se cumplen algunos y se agregan otros, estos impactos correspondientes al proceso en estudio a continuación se relacionan en la tabla 3.4.

Acciones o Actividades	Factores ambientales	Impactos Ambientales
Derrame de mineral	Económico	Pérdidas por concepto económico
Evaporación de Amoníaco	Aire	Disminución de la calidad del aire
Evaporación de Amoníaco	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Evaporación de Amoníaco	Económico	Pérdidas por concepto económico
Emisiones de Ruido continuo	Hombre	Pérdidas de la sensibilidad auditiva

Tabla 3.4 Identificación de los impactos ambientales en el proceso de enfriamiento.

Para comprender cual es la situación ambiental real que actualmente presenta la planta hornos de reducción y el proceso de enfriamiento, en el epígrafe posterior se relacionan algunos estándares del banco mundial sobre medio ambiente. De la comparación de estos valores con los existentes en la planta se puede deducir el nivel de contaminación presente en la misma.

3.4.1- Recomendaciones del banco mundial sobre medio ambiente, salud y seguridad en la minería a cielo abierto

☐ Calidad del aire en los puestos de trabajo

- El monitoreo periódico de los puestos de trabajo debe dirigirse a los contaminantes del aire relevantes en las diferentes tareas de los empleados y funcionamiento de la planta.
- Los equipos de ventilación para el control de la contaminación del aire deben mantenerse en buen estado técnico.
- Los equipos de protección respiratoria deben ser usados por los trabajadores cuando la exposición presente en el lugar de trabajo exceda las normas o los valores límites de umbral siguientes:

- Arsénico: 0,5 mg/m ³	Sulfuro de Hidrógeno: 14 mg/m ³
- Monóxido de Carbono: 29 mg/m ³	Plomo: 0,15 mg/m ³
- Cobre: 1 mg/m ³	Dióxido de Nitrógeno: 6 mg/m ³
- Sílice libre: 5 mg/m ³	Polvo inerte: 10 mg/m ³

El ruido en los puestos de trabajo

- Los controles administrativos y técnicos deben incluir la revisión de aislamiento del sonido en los equipos y salas de control y serán empleados para reducir el nivel de ruido medio en el área de trabajo.
- Deben mantenerse en buen estado técnico los equipos de la planta para minimizar los niveles de ruido.

El personal debe usar protección auditiva cuando estén expuestos a los niveles de ruido superiores a 85 dB (A).

Mediciones de ruido

Para la evaluación de las características de ruidos se determinó el nivel sonoro expresado en decibeles A (dB A), siendo esta la unidad que expresa el nivel sonoro, utilizando para su medición el filtro de ponderación A, que proporciona una respuesta muy aproximada al comportamiento del oído humano.

Para este estudio se tomó como definición de ruido, aquel sonido que por su intensidad, composición espectral u otras causas, es no deseado o puede originar daños a la salud humana. Los niveles máximos admisibles de ruido y los aspectos de protección contra este, constituyen los requisitos higiénicos sanitarios que habrán de observarse en los locales y puestos de trabajo con el objetivo de disminuir los efectos nocivos sobre los trabajadores que en ellos desarrollan su actividad laboral.

Un local de trabajo es ruidoso, cuando en el mismo hay un nivel sonoro continuo equivalente o superior a 85 dB (A). Las zonas con niveles sonoros superiores a este valor se consideran con riesgo de la pérdida de audición del trabajador y debe indicarse con señales de seguridad.

En las diferentes partes de la planta las fuentes de ruido atendiendo a su posicionamiento, se consideran fundamentalmente estática y los ruidos que estas emiten, atendiendo a la naturaleza de su espectro, se consideran continuos. Por la variabilidad en el tiempo su comportamiento es muy variado, se puede afirmar, que cada fuente emite un sonido diferente.

Efecto sobre la salud humana

El hecho de que se relacione al ruido y se le pueda considerar perjudicial, depende de tres factores: la relación de presión, la duración de la exposición y la sensibilidad del individuo.

Los impactos negativos sonoros producidos durante las fases de operacionales o industriales son: los cambios y pérdida de la audición, interferencia de la comunicación oral, molestias y disminución de la capacidad de trabajo, entre otras. Se ha demostrado que la exposición prolongada a ciertos niveles de ruido puede provocar la pérdida total de la audición. Esto se ha visto sobre todo en caso de personas que trabajan en ambientes ruidosos, un ejemplo de esto lo es: las personas que durante más de 20 años y a razón de 8 horas diarias, han sido sometidos a niveles de ruido superiores a 90 dB (A) tienen una probabilidad alta de perder el sentido del oído y por tanto convertirse en sordos.

Además de la pérdida de la audición hasta llegar a la sordera, existen otras alteraciones del oído producto al ruido:

- ▣ Tapamiento del canal auditivo al aumento de la secreción de la cera.
- ▣ Ruptura de la membrana timpánica
- ▣ Otitis

El ruido también produce en el sistema neuro-vegetativo, una serie de modificaciones funcionales que son reacciones de defensa del organismo frente a una agresión externa, por ejemplo: la elevación de la presión arterial, aceleración del ritmo cardiaco y de los movimientos respiratorios, tensión muscular, descarga de hormonas en sangre, etc. Esto ocurre sobre todo cuando el ruido es muy intenso, de carácter

impulsivo y el que escucha no está preparado para ello. Los niveles de ruido altos, están considerados como factores de riesgo ya que en la generalidad de los casos desencadenan en una enfermedad cardiovascular.

3.5 Conclusiones

1. Se puede concluir que en este capítulo que el comportamiento de las variables en el proceso de enfriamiento en planta vieja y planta nueva difieren en cuanto a la temperatura del mineral a la salida debido fundamentalmente al desperfecto técnico en planta vieja.
2. Los resultados arrojados por el Mathcad demuestran que la eficiencia óptima se logra con los resultados máximos de operación.

Conclusiones Generales.

1. El flujo de mineral a la entrada de los enfriadores varía desde 12,0 t/h hasta 22,0 t/h teniendo como valor medio 19,83 t/h con una variación de la temperatura del agua en la piscina que oscila entre los 65,8 °C y los 84,6 °C con valor medio de 77,57 °C.
2. Se obtuvieron valores de eficiencia del 65 % para los máximos valores del flujo de mineral, la temperatura del agua en la piscina y la temperatura del mineral a la salida del enfriador.
3. Las deficiencias técnicas notables en planta vieja afectan considerablemente la eficiencia en el proceso de enfriamiento del mineral.
4. La acumulación de sedimento mineral en las piscinas influye negativamente en el proceso de transferencia de calor provocando rozamiento con los cilindros rotatorios disminuyendo la velocidad de rotación de los mismos.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio que abarque la situación actual de la instrumentación en la planta de hornos de reducción, el excesivo cúmulo de sedimento mineral en las piscinas de la misma.
- Realizar estudio sobre la posibilidad de instalar motores auxiliares en los enfriadores partiendo de la experiencia de la empresa " Comandante Ernesto Che Guevara ".
- Continuar con la búsqueda bibliográfica sobre la temática tratada.

1. Bui, R. T. *Computational modelling of thermophysical processes in the light metals industry*. Reveu Generale de Termique, Septiembre 1997 vol. 36 pp. 575-591.
2. Cala, E. Estudio del proceso e enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios horizontales como objeto de modelación matemática. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2005. 71p.
3. 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.
4. Columbié Navarro, A., Guzman del Río, D., Muñoz Moner A. *Análisis del proceso de calcinación del C.B.N como objeto de regulación automática*. Revista Minería y Geología No.2, 1991.
5. Columbié, A. *Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2001. 98p.
6. Folliot: Publication technique No.70. centre d'estudet de Recherche de l'Industries des Liants Hydrauliques, Paris, 1955.
7. Góngora, E. Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la Planta Hornos de Reducción de la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2004. 83p.
8. 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.
9. Houge, O; M, Watson; R. A. Ragatz. *Principios de los procesos químicos*. T.I. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1978.
10. 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.

11. Incropera, F. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II. III.
12. Manual de Operaciones de la planta de Hornos de Reducción de la empresa "Comandante René Ramos Latour". 1995.
13. Mesarovich, M. *Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas*. Editorial MIR. URSS, pp. 422-436, 1996.
14. Perron, J. and R. T. Bui, "*Fours rotatifs: Modele dynamique du mouvement du lit*", Can. J. Chem. Eng. 72, 16-25 (1994).
15. Retirado, Y. Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la Planta Hornos de Reducción de la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2004.
16. 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).
17. Torres, E. *Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2003. 105p.
18. TUNRA. Ore Cooler Evaluation. The Uniersity of New Castle Research Associates Limited. 1998. 18p.

Anexo 1

Hoja de cálculo para la preidentificación de los coeficientes superficiales de transferencia de calor

$$n:=0,1,2$$

Datos para el calculo de Arquimides

$$L:=18.28\text{m} \quad \text{Longitud del enfriador; m}$$

$$R2=1.33\text{m} \quad \text{Radio exterior del cilindro; m}$$

$$Aaguapisc=2.90\text{m} \quad \text{Ancho que ocupa el agua en la piscina; m}$$

$$Lp=20\text{m} \quad \text{Longitud que ocupa el agua en la piscina; m}$$

$$Hagua=0.90\text{m} \quad \text{Nivel o altura del agua en la piscina; m}$$

$$Penf=16500\text{kg} \quad \text{Peso del enfriador; kg}$$

$$g=9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{Aceleración de la gravedad; m/s}^2$$

$$Venf=\pi R2^2 \cdot L \quad \text{Volumen del enfriador; m}^3$$

$$Venf=101.585\text{m}^3$$

$$Vagua=Hagua \cdot Lp \cdot Aaguapisc$$

$$Vagua=1 \quad \text{Volumen del agua; m}^3$$

$$\rhoenf=\frac{Penf}{Venf}$$

$$\rhoenf=1 \quad \text{Densidad del enfriador; kg/m}^3$$

$$\rhoagua=\frac{\rhoenf Veng}{Vagua}$$

$$\rhoagua=1 \quad \text{Densidad del agua; kg/m}^3$$

$$\rhoagua/Vagua=1$$

$$\rhoenf Veng=1$$

$$\frac{\rhoenf}{\rhoagua}=1$$

54.8 % es lo que está expuesto sobre la superficie

Cálculos de transferencia de calor

$$\rho_M := 3300 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del mineral; kg/m}^3$$

Flujo másico de mineral; kg/s

$$Mm_n :=$$

$12.0 \cdot \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$
$19.93 \cdot \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$
$22.90 \cdot \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$

Temperatura del mineral; K

$$\theta_n :=$$

$913.85 \cdot \text{K}$
$1000.35 \cdot \text{K}$
$1193.45 \cdot \text{K}$

Temperatura a la que sale el mineral; K

$$\theta_{s_n} :=$$

$418.15 \cdot \text{K}$
$449.07 \cdot \text{K}$
$463.55 \cdot \text{K}$

Temperatura del agua en la piscina; K

$$\theta_{fagua_n} :=$$

$338.95 \cdot \text{K}$
$350.72 \cdot \text{K}$
$357.75 \cdot \text{K}$

densidad de agua; kg/m³

$$\rho_{agua_n} :=$$

$980.6 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$974.9 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$967.9 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Flujo volumétrico de agua en la piscina; m³/h

$$Vagua_n :=$$

$30.0 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$
$45.2 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$
$60.07 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$

Calor específico del agua ; J/kgK

$$Cp_{agua_n} :=$$

$4186 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4192 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4200 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Flujo másico de agua; kg/s

$$M_{agua_n} := V_{agua_n} \cdot \rho_{agua_n}$$

$$M_{agua_n} =$$

8.172	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
12.24	
16.15	

$$\theta_{eagua} := 301.15 \cdot \text{K}$$

Temperatura entrada del agua a la piscina; K

$$\theta_{aire} := 305.15 \cdot \text{K}$$

Temperatura de saturación del aire; K

$$R1 := 1.32 \cdot \text{m}$$

Radio interior del cilindro; m

$$L := 18.28 \cdot \text{m}$$

Longitud del enfriador; m

$$D_i := 2 \cdot R_1$$

Diámetro interior del enfriador; m

$$D_i = 2.64 \text{ m}$$

$$D_e := 2 \cdot R_2$$

Diámetro exterior del enfriador; m

$$D_e = 2.66 \text{ m}$$

$$C_{pm} := 0.934 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Calor específico del mineral; J/kgK

$$\nu_{\text{aire}} := 15.89 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

Coefficiente cinemático de viscosidad del aire; m²/s

$$V_{\text{aire}} := 1.78 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

Velocidad del aire; m/s

$$\text{Re}_{\text{aire}} := \frac{V_{\text{aire}} L_p}{\nu_{\text{aire}}}$$

Número de Reynolds

$$\text{Re}_{\text{aire}} = 2.24 \times 10^6$$

$$D_{AB} := 0.26 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

Coefficiente de difusión de masa; m²/s

$$\text{Sc} := \frac{\nu_{\text{aire}}}{D_{AB}}$$

Número de Schmidt

$$\text{Sc} = 0.611$$

$$\text{Sh} := 0.0296 \text{Re}_{\text{aire}}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Sh} = 3.022 \times 10^3$$

Número de Sherwood

$$h_m := \frac{\text{Sh} \cdot D_{AB}}{L_p}$$

$$h_m = 3.928 \times 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Coefficiente de transferencia de masa; m/s

$$\nu_{\text{va}} := 27.90 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen específico del vapor de agua a 32°C/ m³/kg

$$\rho_{\text{va}} := \frac{1}{\nu_{\text{va}}}$$

$$\rho_{\text{va}} = 0.036 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del vapor; kg/m³

$$v_{\text{vas}} := 4.683 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen específico del vapor de agua saturado a 70°C/ m³/kg

$$\rho_{\text{vas}} := \frac{1}{v_{\text{vas}}}$$

$$\rho_{\text{vas}} = 0.214 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del vapor; kg/m³

$$h_{\text{fgv}} := 232910 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Calor latente de vaporización a 72°C/ J/kg

$$A_{\text{agua}} = \text{DeLp}$$

$$A_{\text{agua}} = 53.2 \text{ m}^2$$

Área ocupada por agua; m²

$$N_{\text{a}} := h_{\text{m}} A_{\text{agua}} (\rho_{\text{vas}} - \rho_{\text{va}})$$

$$N_{\text{a}} = 0.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Cantidad de agua vaporizada; kg/ms

$$\alpha_{\text{agua}_h} := \frac{h_{\text{fgv}} [h_{\text{m}} (\rho_{\text{vas}} - \rho_{\text{va}})]}{(\theta_{\text{fagua}_h} - \theta_{\text{aire}})}$$

$$\alpha_{\text{agua}_h} =$$

48.1	$\frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$
5.676	
0.908	

Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio; W/m²·K

$$Q_{\text{ma}_n} := \alpha_{\text{agua}_h} \cdot A_{\text{agua}} (\theta_{\text{fagua}_h} - \theta_{\text{aire}})$$

Cantidad de calor que entrega el agua al medio; W

$$Q_{\text{ma}_n} =$$

649·10 ⁴	W
649·10 ⁴	
649·10 ⁴	

$$Q_{\text{e}_n} := M_{\text{m}_n} \cdot C_{\text{pm}} \theta_n$$

$$Q_{\text{e}_n} =$$

845·10 ⁶	W
173·10 ⁶	
091·10 ⁶	

Cantidad de calor que entrega el mineral a la entrada del enfriador; W

$$Q_{\text{s}_n} := M_{\text{m}_n} \cdot C_{\text{pm}} \theta_{\text{s}_n}$$

$$Q_{s_n} =$$

Cantidad de calor que entrega el mineral a la salida del enfriador; W

$1.302 \cdot 10^6$
$2.322 \cdot 10^6$
$2.754 \cdot 10^6$

$$Q_{agua_n} := M_{agua_n} \cdot C_{p_{agua_n}} \cdot (\theta_{f_{agua_n}} - \theta_{e_{agua_n}})$$

$$Q_{agua_n} =$$

Cantidad de calor que se le transfiere al agua; W

$1.293 \cdot 10^6$
$2.544 \cdot 10^6$
$3.839 \cdot 10^6$

$$Q_{e_n} - Q_{s_n}$$

$$Q_{e_n} - Q_{s_n} - Q_{agua_n} - Q_{ma_n} =$$

$1.638 \cdot 10^5$
$2.205 \cdot 10^5$
$4.108 \cdot 10^5$

$$Q_{e_n} - Q_{s_n} =$$

$1.543 \cdot 10^6$
$2.851 \cdot 10^6$
$4.337 \cdot 10^6$

$$Q_{e_n} - Q_{s_n} - Q_{agua_n} =$$

$2.503 \cdot 10^5$
$3.07 \cdot 10^5$
$4.972 \cdot 10^5$

$$\text{Eficiencia}_n := \frac{Q_{e_n} - Q_{s_n}}{Q_{e_n}}$$

$$\text{Eficiencia}_n =$$

0.542
0.551
0.612