



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 TÉCNICO – ECONÓMICA DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL MINERAL LATERÍTICO REDUCIDO EN CILINDROS HORIZONTALES ROTATORIOS EN LA EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA”.

AUTOR: Oliesky Santana Perceval.

TUTORES: M.Sc. Ever Góngora Leyva.
M.Sc. Marbelis Lamorú Urgelles.

“Año del 50 Aniversario de la Revolución”
Moa, 2009

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi fiel amigo, mi Rey y único Dios Jesucristo, porque todo se lo debo a Él, a mis hermosas madres Dignora, Valentina, Florencia, Mami y Noemí, a mis padres Argelio, Manuel, Felipe, Roberto, Oracio, y Gerardo; a mis tremendos hermanos, Orgelis y Ever, sin olvidar a mis hermanos de la gran familia de la fe, el pueblo de Dios, que no los nombraré porque son muchos y la hoja no me alcanzaría, a mi tutor y buen compañero Ever Góngora al que siempre recordaré, a mi tutora Marbelis Lamorú, a mis compañeros de aula que son como mis hermanos y a todo el claustro de profesores, amigos que me brindaron su apoyo; a todos les doy las gracias, y les digo esto hoy, y quiero que siempre lo recuerden: “No tengo oro ni plata pero de lo que tengo les doy”, mi sincera amistad y todo el amor que Dios a derramado en mi corazón, muchas gracias a todos.



DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a mi Dios por quien vivo, a mis hermosas madres Dignora, Valentina, Florencia, Mami y Noemí, a mis padres Argelio, Manuel, Felipe, Roberto, Horacio y Gerardo, a mis tremendos hermanos, Orgelis y Ever, sin olvidar a mis hermanos de la gran familia de la fe, el pueblo de Dios, a mis vecinos del barrio en fin a todas las personas que me brindaron su mano amiga para que esto fuese posible.



PENSAMIENTO

Yo mismo no pretendo haberlo ya alcanzado; pero una cosa hago: olvidando ciertamente lo que queda atrás, y extendiéndome a lo que esta delante, prosigo a la meta, al premio del supremo llamamiento de Dios en Cristo Jesús.

"Apóstol Pablo"



RESUMEN

Con el aumento de la capacidad de producción de la Empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara", se ha visto afectado el funcionamiento de los enfriadores de mineral, los cuales no logran temperaturas del mineral a la salida en el rango establecido para el proceso, alterando el proceso posterior de (lixiviación y lavado).

En este trabajo se mencionan una serie de aspectos teóricos relacionados con los cilindros horizontales rotatorios tales como: parámetros de trabajo, principio de funcionamiento y flujo tecnológico de la planta en que esta instalado el equipo. Se hace una evaluación del proceso de transferencia de calor siguiendo la metodología establecida por Valle (2000), donde se determina que el proceso de transferencia de calor por conducción es el predominante en el enfriamiento del mineral; se comprueba que el porcentaje de llenado con el que trabaja el equipo es alto, ocasionando el mal funcionamiento de los mecanismos internos; además, se muestra además la evaluación técnico – económica del funcionamiento de los enfriadores, donde se destacan los costos por concepto de mantenimiento, consumo de agua, de energía y por pérdidas de amoníaco por evaporación.



SUMMARY

The increase of the production capacity in "Ernesto Che Guevara" Company has affected the performance of the ore coolers, which are not able to perform the right temperatures for the ore, according to the design rank, distorting the following processes of leaching and washed.

This work considers some theoretical aspects related to the horizontal rotary cylinders: cooler performance parameters, work principle and the technological flow of the plant where the equipment is installed. A technical and economical assessment of the coolers performance is showed, following the methodology established by Valle (2000), which determines the heat transference process by conduction is the predominant heat transference in ore cooling. The equipment is working with a high filling quantity, what may cause a bad working order of the internal mechanisms; besides, the costs for maintenance, water, energy consumption and the cost of the ammonia evaporation losses are showed too.



ÍNDICE

CONTENIDO	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. Marco teórico-metodológico de la investigación.	5
1.1- <i>Introducción</i>	5
1.2- <i>Estado del arte</i>	5
1.3- <i>Trabajos precedentes</i>	6
1.4- <i>Descripción del flujo tecnológico de la planta</i>	11
1.5- <i>Descripción de la instalación.</i>	12
1.6- <i>Estado actual de la automatización del proceso de enfriamiento del mineral</i>	14
1.7- <i>Características de los materiales que entran en el enfriador:</i>	16
<i>Conclusiones del Capítulo I</i>	17
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1- <i>Introducción</i>	18
2.2- <i>Métodos de medición empleado</i>	18
2.3- <i>Procedimiento de cálculo a emplear. Balance de masa y energía</i>	19
2.4- <i>Balance termo energético en los canales que conducen el mineral reducido hacia los tanques de contacto.</i>	29
2.5- <i>Mediciones realizadas en el enfriador de mineral # 9</i>	33
2.6- <i>Conclusiones del Capítulo II</i>	33
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA. IMPACTO AMBIENTAL	34
3.1- <i>Introducción</i>	34
3.2- <i>Análisis de los resultados obtenidos del balance térmico</i>	34
3.3- <i>Resultado del cálculo de la cantidad de amoníaco que se evapora</i>	38
3.4- <i>Valoración económica</i>	39
3.5- <i>Valoración del impacto ambiental</i>	43
3.6- <i>Conclusiones del Capítulo III</i>	46
CONCLUSIONES GENERALES	47
<i>Recomendaciones</i>	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
Anexos	

INTRODUCCIÓN

En nuestro país, diversos son los rublos sobre los cuales se sustenta la economía cubana; rublos que permitieron a nuestro país salir adelante durante todos estos años de bloqueo económico. La industria cubana del níquel juega un papel importante dentro de estos, es por ello que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos. En la actualidad la industria del níquel se encuentra enfrascada en dos grandes procesos: El de modernización de sus plantas, y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional.

Existen dos fábricas en funcionamiento para la obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología carbonato amoniacal: una, la Empresa "René Ramos Latour (RRL)", y la Empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara", esta última se ha desarrollado a partir de la década anterior, reflejándose el mismo por medio de los índices de producción presente en ella, que sin lugar a dudas han contribuido exitosamente a la reanimación de la economía, dando valiosos aportes económicos en aras del desarrollo social.

Se encuentra situada al norte del yacimiento de mineral de Punta Gorda, provincia de Holguín entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la ciudad de Moa y a 2 km del pueblo de Punta Gorda, al noroeste a 3 km se encuentra el puerto marítimo.

El proceso tecnológico de la fábrica de níquel de Punta Gorda está basado en el esquema de lixiviación carbonato – amoniacal, o proceso CARON, según el cual el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente.

La decisión de utilizar el proceso de lixiviación carbonato – amoniacal en la fábrica "Cmdte. Ernesto Che Guevara" se explica por las ventajas propias de esta tecnología, la misma, es un proceso continuo que se realiza en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplia utilización de los aparatos conocidos como:

- Hornos de soleras múltiples
- Espesadores

-Columnas de destilación

Estas características favorecen la producción con un alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniacoal admite la elaboración de las mezclas de los minerales lateríticos y serpentínicos, mientras que el esquema de lixiviación de ácido sulfúrico permite solamente la elaboración de la fracción laterítica.

De igual forma este proceso se realiza con un consumo de reactivo relativamente pequeño. El único reactivo utilizado en cantidades grandes es el amoníaco; el consumo del cual es necesario solo para compensar las pérdidas mecánicas.

Este complejo minero metalúrgico de níquel comprende varias entidades, entre ellas la planta de Hornos de Reducción, la cual debido a la modificación de sus cámaras de combustión trajo como resultado la posibilidad de aumentar la cantidad de mineral reducido, a más del doble de producción, obtenida por la planta desde su inauguración hasta el momento de la modificación anterior. Al producirse un aumento brusco en la capacidad de los hornos, comenzaron a existir una serie de problemas en todo el equipamiento posterior a dichos hornos. Una de las problemáticas principales surgidas es la incapacidad de los enfriadores de mineral de lograr enfriar el mineral reducido de 700 hasta 170 °C que es la temperatura de diseño para el mineral después de los enfriadores. Este trabajo forma parte del estudio del proceso de enfriamiento de los enfriadores de mineral de la Empresa " Cmdte. Ernesto Che Guevara".

Fundamento de la investigación

Muy utilizados, son los enfriadores horizontales, de estructura cilíndrica rotatoria en las industrias; aunque pocos difundidos para el enfriamiento de mineral. Se han realizado varios estudios sobre estos equipos; pero muy pocos tienen en cuenta las incidencias económicas, de las altas temperaturas a la que sale el mineral reducido de 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, el cual se ha mantenido de manera insoluble hasta el momento.

La situación actual del proceso de enfriamiento en la planta de Hornos de Reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" se caracteriza por las siguientes deficiencias:

- La baja eficiencia térmica del proceso de transferencia de calor presente en los enfriadores.

Situación problemática actual

Uno de los problemas presentes en los enfriadores de mineral ubicados en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" es la incapacidad de lograr llevar al mineral reducido de 700 °C hasta 170 °C que es la temperatura de diseño para el mineral a la descarga del enfriador y que no existe un control de los gastos por concepto de enfriamiento del mineral reducido.

Problema de la investigación

Se desconocen cuáles son los costos del proceso de enfriamiento para una tonelada de mineral reducido en los cilindros horizontales rotatorios de la planta de Hornos de Reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara",

Objeto de estudio

El proceso de enfriamiento del mineral reducido en cilindros horizontales rotatorios de la planta de Hornos de Reducción.

Hipótesis

Es posible a través de una evaluación técnico – económica del proceso de enfriamiento del mineral establecer los costos por operación y por consumo de portadores energéticos.

Objetivo general del trabajo

Determinar los costos por concepto de enfriamiento de mineral laterítico en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Tareas

1. Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el proceso de enfriamiento del mineral reducido, y estado actual de la temática en estudio.



2. Realizar el monitoreo y el registro de los diferentes parámetros que intervienen en el proceso enfriamiento de mineral.
3. Establecer el algoritmo de cálculo para la realización del balance de masa y energía en cilindros horizontales rotatorios.
4. Desarrollar la valoración técnico-económica del proceso y las afectaciones que este provoca al medio ambiente.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Para la obtención del níquel en la industria, uno de los procesos mas importante lo constituye la planta de Hornos de Reducción, en ésta se crean las condiciones (reducción de los óxidos de Níquel y Cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica. Los enfriadores de mineral, que son los equipos en los cuales ocurre el proceso de enfriamiento, juegan un papel determinante dentro de esta planta, del buen funcionamiento de estos depende en gran medida la eficiencia del proceso de lixiviación y lavado que es el proceso que le continúa. Este capítulo tiene como objetivo establecer el estado del arte del proceso de enfriamiento del mineral en cilindros horizontales rotatorios mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

1.2 Estado del arte

El calor es una forma de energía que puede ser transferida de un cuerpo a otro como consecuencia de una diferencia de temperatura y se ha demostrado que el sentido de ese transporte (flujo de calor) es siempre desde la temperatura mayor a la menor.

Al final del siglo XVIII tuvieron resonancia las observaciones de Benjamin Thompson (más tarde Conde Rumford) quien se ocupaba de la construcción de cañones. En esos menesteres era necesario horadar el cilindro interior del cañon mediante taladros. Este trabajo generaba un gran calentamiento de la pieza y era necesario sumergir el cilindro en piletas de agua, cuya temperatura iba en aumento hasta llegar a la ebullición. Rumford argumentaba que si el calor era un fluido material invisible, entonces era posible extraer del metal una cantidad prácticamente inagotable de calórico, con tal de continuar con la tarea de perforación.

Pero la demostración precisa de la equivalencia entre energía mecánica y calor por via experimental se debe principalmente a James Prescott Joule, un notable físico británico (1818-1889). La hipótesis de Joule, es que la energía aparentemente desaparecida se ha transformado en energía cinética de las moléculas de los materiales sometidos al frotamiento. Esta idea fue demostrada por Joule mediante varios experimentos, en los cuales trabajó durante toda su vida y entre los que se destaca un dispositivo que denominamos el "molinete de Joule". Este es sencillamente un recipiente cilíndrico con

paredes adiabáticas con agua, en el cual hay un eje central con paletas giratorias y en el cual hay también unas aletas complementarias fijas a la superficie del cilindro, alternadas con las giratorias, las cuales ofrecen resistencia al movimiento del agua. Cuando hacemos girar el molinete las paletas móviles agitan el agua, pero las fijas a las paredes se oponen al movimiento. Evidentemente, en el molinete de Joule existe un fuerte rozamiento y toda la energía transmitida al eje giratorio se pierde rápidamente; Este experimento de Joule fue sin duda una intuición fundamental para aquella época,

1.3 Trabajos Precedentes

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: una, la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y otra, los trabajos que sobre el tema del intercambio de calor en cilindros rotatorios desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado en los últimos años.

Respecto al primer elemento, 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.

Guzmán (2001), conceptualiza 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.

Con respecto al segundo elemento se han realizado estudios con profundidad de la mecánica de movimiento del material en cilindros rotatorios, **Sverdlik, Gregoreu**

(1979), establecieron las peculiaridades del paso del movimiento de materiales en un tambor rotatorio.

Gran interés le dedican **Boateng y Barr** (1996), al comportamiento de un flujo granular en el plano transversal de un cilindro rotatorio parcialmente lleno, realizaron un estudio con el objetivo de comprender y probar las capacidades predictivas del comportamiento reológico de materiales en cilindros rotatorios.

Valle (2000), presenta una evaluación de los enfriadores de mineral de la Empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara" de Moa, donde se da los resultados obtenidos, así como la valoración del trabajo de los mismos, mostrando los principales defectos que presentan en su funcionamiento y las conclusiones a que han llegado los autores. El cual concluye que: por la piscina se transfiere por convección aproximadamente el 67 % del calor total transferido y el 33 % en la zona no sumergida mediante la vaporización de una parte de la película de agua adherida al shell. La transferencia de calor por radiación representa por lo menos el 25 % del calor total transferido, y el calor por conducción representa un poco más de 75 % del calor total, por lo que es el mecanismo predominante.

Según **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 despremiar 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.

Fue de mucho interés el trabajo realizado por **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.

Díaz (2004), en su artículo hace un estudio de los resultados numéricos obtenidos utilizando modelos estacionarios y pseudoestacionarios para determinar perfiles de temperatura en coordenadas cilíndricas. Se utiliza como modelo un cilindro sólido homogéneo de longitud infinita con propiedades físicas constantes sometido a calentamiento por convección, del mismo concluye que la temperatura en la pared obtenida con ambos modelos es muy similar obteniéndose variaciones mucho menores del 2% cuando se utilizan incrementos en las variables discretas lo suficientemente pequeños y que las diferencias en las temperaturas de los puntos cercanos a la pared se incrementan alcanzando valores cercanos al 5% en los casos de máxima discrepancia observadas, también realiza un estudio de la aplicación de las condiciones límites para la solución de ecuaciones diferenciales parciales en problemas de transferencia de calor por convección en coordenadas cilíndricas utilizando tres variantes de área de transferencia en la dirección radial y emplea como modelo un cilindro hueco que es sometido a un cambio brusco de temperatura en la pared interior.

Un modelo tal, fue subsecuentemente elaborado por **Retirado** (2004) y **Góngora** (2004), quienes demostraron que dentro de los parámetros más influyentes en la transferencia de calor en el proceso se encuentran la temperatura de entrada y el flujo másico de mineral.

Resulta muy útil la revisión de la tesis doctoral de **Torres** (2003), la misma a pesar de estar encaminada hacia otro tema específico del conocimiento, muestra un correcto diseño de la metodología de la investigación, siendo esta muy necesaria en la realización de este proyecto.

Tuvo aporte práctico a este trabajo la investigación desarrollada por **Columbié** (2001) quien 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.

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 **Foliot** (1955), quien realizó mediciones del flujo de calor en un horno experimental de cemento de 2,75x24m y fue uno 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 trabajo de gran interés, en el cual hace 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.

Perron (1994), propone un modelo no lineal, para predecir la respuesta transitoria en los cilindros horizontales rotatorios teniendo en cuenta la velocidad total en la cama que sigue al modo despacio. Este validó el modelo usando los datos reportados por **Sai** (1992). La validación del modelo fue basado en una corrida experimental para la velocidad del sólido alimentado, velocidad de rotación e inclinación del cilindro. Otros trabajos **Perdomo y Matos** (2007); **Sotto** (2007), desarrollaron el diagnóstico térmico de los enfriadores utilizados en la Empresa "Comdte. Ernesto Che Guevara", por su parte **Londres** (2007) simuló el comportamiento térmico de estos equipos a partir del empleo del software profesional ANSYS versión 7.0.

Tabera y García (2006), desarrollan un procedimiento de cálculo para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud basado en el análisis térmico del proceso de enfriamiento del mineral. Estos autores omiten la transferencia de calor por radiación en el interior del cilindro, realizan algunas suposiciones que resultan importantes en el análisis térmico del proceso.

Pujols (2007), desarrolla el diagnóstico térmico de la misma instalación haciendo uso del procedimiento de cálculo expuesto por **Tabera y García** (2006), aunque el autor

realizó su cálculo con una data experimental significativa, los instrumentos utilizados no cumplían con los requerimientos necesarios, estos elementos unido a la imprecisión del método de cálculo empleado limitaron los resultados de su investigación.

Lamorú (2008), estableció el procedimiento de cálculo para la evaluación térmica de la instalación a escala piloto haciendo uso del procedimiento de cálculo expuesto por **Tabera y García** (2006), aunque el autor realizó su cálculo con una data experimental significativa, determinó la eficiencia térmica del proceso y el flujo de agua óptimo para que la instalación trabaje de forma más eficiente.

Álvarez (2008), evalúa del proceso transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", en el cual realiza un análisis estadístico descriptivo, donde obtuvo los valores máximos, medios y mínimos de las variables estudiadas. Mostró el comportamiento de las variables del proceso de enfriamiento del mineral reducido para un período de 5 meses, en cual el flujo de agua varía de 33 a 78 m³/h para un flujo másico de 24 a 45 t/horas, con temperaturas a la salida del enfriador en el rango de 246 a 296 °C y, alega estimación que las pérdidas de amoníaco son 20 t/diarias por razones de temperatura.

Valle (2008), Identifica los modos de transferencia de calor existentes en el proceso, permitiéndole de esta forma hacer una mejor caracterización del proceso de transferencia de calor en el objeto real. Resuelve diferentes ecuaciones diferenciales en derivadas parciales a través del método de la rejilla y confecciona un software con el fin de establecer el algoritmo de cálculo para la evaluación del proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios, permitiéndole evaluar el comportamiento del proceso de transferencia de calor para el enfriamiento de mineral.

De todo lo expresado resulta evidente que la consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática en estudio. Esto impone la necesidad continuar con la investigación de modo que permita caracterizar térmicamente el proceso de enfriamiento del mineral reducido a escala industrial.

En el ámbito internacional muchos son los trabajos que se han efectuado concerniente a la temática de los cilindros horizontales rotatorios tales como:

Chen (1997), investigó la convección de doble difusividad para un cilindro calentado sumergido en una capa fluida de sal estratificada. **Hossain** (1998), estudia la interacción de la radiación-conducción en la convección mixta de un cilindro circular horizontal cuando la temperatura de la superficie es uniforme. **Mahfouz** (1999), en su artículo combina la convección (forzada y natural) de un cilindro horizontal que transmite oscilaciones rotatorias en dimensiones infinitas de fluidos. **Naumenko** (2001), considera la determinación numérica de un flujo viscoso bidimensional con la superficie libre de un cilindro horizontal estacionario usando el método de marcador y celda. También **Gschwendtner** (2002), investigó por medio de las técnicas de medición óptica el traslado de calor de un cilindro giratorio en un flujo de aire-cruzado. **Yapici** (2003), investiga las temperaturas y la distribución de tensión termalmente inducidas en un cilindro calentado, donde tiene en cuenta la conducción dentro del cilindro. **Shrager** (2004), realiza una modelación de un flujo viscoso con una superficie libre dentro de un cilindro horizontal giratorio, donde el flujo es un líquido de alta viscosidad que llena parcialmente un cilindro horizontal que gira a velocidad constante. **Peng** (1998), analiza la película de condensación laminar en el interior de la pared de un cilindro giratorio con un raspador, obteniendo así un modelo que mejora la predicción del coeficiente de transferencia de calor del medio. **Abdalla** (2005), realiza la simulación numérica de la convección natural de doble difusividad en un cilindro horizontal, demostrando que el aumento de la transferencia de calor puede lograrse aumentando la amplitud de la fuerza termal. **Nazar** (2004), hace un estudio teórico de la convección en un cilindro circular horizontal con un flujo de calor de superficie constante que se sumerge en un fluido viscoso e incompresible.

1.4 Descripción del flujo tecnológico de la planta

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniaca. Para ello la planta cuenta con la instalación de 24 hornos, 12 electrofiltros (con el objetivo de recuperar el mineral que se escapa con los gases) y 12 enfriadores.

Una vez el mineral en las tolvas, pasa a los dosificadores de pesaje automático que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del

pesaje que éstos realizan 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 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, para ello el horno dispone de 10 cámaras de combustión dispuestas en los hogares 6, 8, 10, 12 y 15 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases para el calentamiento del mineral.

La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es facilitada por el uso de ventiladores centrífugos capaces de mantener una operación estable, se cuentan con tres de ellos por cada bloque, dos en operación y uno de reserva.

El proceso de reducción se efectúa en un horno de hogares múltiples, contando con 17 hogares. Además, el horno, cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas los cuales mediante la rotación del eje central son encargados de facilitar el traslado de mineral de un hogar a otro en forma de zigzag. Los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

El mineral después de pasar por el transportador rotatorio es descargado en el enfriador rotatorio, el cual tiene como función enfriar el mineral reducido que sale del horno para luego enviarlo al proceso de lixiviación.

1.5 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 transportador rotatorio consta de un cuerpo tubular que rota en 6 rodillos de apoyo. Dentro del cuerpo está colocado un tornillo transportador. El cuerpo tiene 6 llantas, cada una se asienta en 2 rodillos de apoyo. La rotación del cuerpo se realiza por el accionamiento electromagnético. Los desplazamientos axiales posibles del cuerpo del transportador son asimilados por dos rodillos de apoyo, el cuerpo se enfría con agua.

El mineral después de pasar por el transportador rotatorio es descargado en los enfriadores rotatorios los cuales tienen las siguientes funciones:

Transportar: en el interior del enfriador existe una estructura donde cuelgan los rastrillos pendulares que transportan el mineral que se va enfriando.

Mezclar: el rastrillo, una vez que sigue el movimiento del tambor y alcanza una determinada altura, por su propio peso cae y mezcla la masa caliente a través de superposición de capas, empujando la capa caliente adyacente al cuerpo y transportando la 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 está sumergido el enfriador. Debiendo disminuir la temperatura del mineral por debajo de 200 °C en la descarga.

Durante el régimen de trabajo del enfriador es suministrada el agua en una piscina a temperatura ambiente, la cual fluye a contracorriente con el mineral, controlándose el nivel de agua en la piscina a través de unas anillas en la zona caliente de evacuación en función del tonelaje que se está alimentando. El tiempo de retención del mineral en el interior del enfriador es de 30 minutos. La temperatura del agua a la salida de la piscina es de 70 a 85 °C.

El accionamiento está compuesto por el grupo motor - reductor auxiliar que se acoplan a través de un embrague frontal. En el cuerpo existen dos puntos de apoyos (rodillos) los cuales están en constante fricción con las chumaceras, éstos son revestidos por un material sintético conocidos como textilita.

El material enfriado es un mineral que contiene una granulometría de 200 mesh (0,074mm) que pasa al tambor a través de un muñón de tope del enfriador. Con el paso del mineral, éste se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que se enfría con el agua en la piscina. De la cámara de salida, el mineral enfriado llega al transportador que no constituye parte del enfriador.

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 m³.

Parámetros de trabajo del enfriador	Valores Nominales
Temperatura del mineral a la entrada	650 a 700 °C
Temperatura del mineral a la salida	200 °C
Temperatura del agua en la entrada	29,5 °C
Presión de trabajo	0,01 a 0,02 kPa
Presión excesiva del agua	300 kPa
Consumo de agua para enfriar el tambor.	107 m ³ /h
Temperatura del agua a la salida.	70 a 75 °C
Díámetro exterior	3,08 m
Espesor de pared	0.016 m
Longitud del cilindro	32,54 m
Coeficiente de llenado del tambor con el material.	9%

1.6 Estado actual de la automatización del proceso de enfriamiento del mineral

Actualmente el proceso de enfriamiento del mineral en la Empresa "Comandante. Ernesto Che Guevara" se encuentra desde el punto de vista de su automatización y control, en una etapa primaria, pues sólo contempla la medición y registro de varios parámetros del proceso, para ello se utiliza el sistema de supervisión y control de procesos CITECT (Ver Anexo).

A continuación se muestran los parámetros que se registran con sus correspondientes instrumentos de medición y las características técnicas de los mismos.

PARÁMETRO: flujo de mineral alimentando el enfriador.

EQUIPO: báscula de pesaje continuo, tipo WESTERDAM.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

Alimentación 220 V AC

Entrada 0 – 18 t/h

Salida 4 – 20 mA

PARÁMETRO: temperatura del mineral a la entrada y salida del enfriador.

EQUIPO: termómetro de resistencia PT-100 con vaina y cabezal de conexión de roscado con convertidor de señal programable mediante la PC alojado en el cabezal.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

Temperatura de servicio hasta 873 K

Cabezal de conexión tipo B, construido de material ligero, para alojar un convertidor.

Convertidor de señal programable con rango ajustado.

PARÁMETRO: temperatura del agua en la piscina.

EQUIPO: termómetro de resistencia PT-100 con vaina y cabezal de conexión de roscado con convertidor de señal programable mediante PC alojado en el cabezal.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

Longitud de inmersión 250 mm

Convertidor de señal programable con rango ajustado. 273 – 393 K

PARÁMETRO: flujo de agua que entra a la piscina.

EQUIPOS: elemento primario de caudal tipo PITOT delta.

TUBE modelo 301 - AK - 10 - AD para agua.

Transmisor de presión diferencial para la medida de caudal, inteligente, no smart, modelo SITRANS P serie HK.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

Alcance de medida ajustable 2,5 - 25 kPa

Margen de medida ajustado 0 - 15 kPa

Precisión mejor que el 1 % incluido la histéresis y la repetibilidad.

Rangeabilidad 1 - 10

Indicador local incorporado, analógico escala 0 - 100 %

Conexión eléctrica conector HAN 7D

PARÁMETRO: velocidad de rotación del enfriador

EQUIPO: tacogenerador.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

0 – 8,0 rev/min 0 – 10 V

El sistema de control se realiza mediante la medición de cada uno de estos parámetros por su equipo correspondiente, luego envían la señal a la PC donde se registra la información y se muestra la interrelación entre los parámetros antes mencionados.

1.7 Características de los materiales que entran en el enfriador:

Masa de mineral reducido vertido es de 550-1100 kg/m³

Estructura química del mineral:

Níquel	1.53 %
Cobalto	0.122 %
Hierro/metal	2.1 %
Porcentaje de hierro total en forma de óxido y metal	44.6 %
Carbono	0.8 %
Azufre	0.6 %

Composición del ambiente gaseoso en el interior del enfriador:

Monóxido de carbono	23 %
Hidrógeno	18 %
Anhídrido carbónico	1 %
Vapor de agua	10 %
Nitrógeno	47.65 %

Hidrógeno-gas, el límite superior e inferior de explosividad es de 75.05 y 4.15 % respectivamente. El gas es caliente y explosivo.

Monóxido de carbono, la concentración extrema otorgada al aire es de 20 mg/m³, límite inferior de explosividad 12.15% y superior 75%

Vapor, presión de trabajo 7-1 kg/cm², y el paso respectivamente es de 200 kg/h.

1.8 Conclusiones

- En la bibliografía consultada se observa que pocos se han dedicado a estudiar el comportamiento de las diferentes variables que caracterizan el proceso de enfriamiento en cilindros horizontales rotatorios a escala industrial.
- El estado actual de la automatización del proceso de enfriamiento del mineral evidenció la no existencia de un sistema de control integral y la etapa primaria en que éste se encuentra, limitando el mismo a solo algunas mediciones de control aisladas, entre ellas: temperatura del mineral a la entrada y a la salida del enfriador respectivamente.
- La realización de un estudio profundo, con un elevado nivel de precisión, está limitado; por la carencia de equipos que permitan realizar mediciones en el interior del enfriador.
- No se cuenta con estudios que den al traste con pérdidas que proporciona el proceso de enfriamiento en la producción.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

El conocimiento del proceso, parámetros y variables que comprenden el enfriamiento del mineral laterítico y, el desarrollo de expresiones matemática que representen los fenómenos físicos del sistema; es un temática de mucha importancia en el desarrollo actual del sector industrial. Debido a que el conocimiento de los mismos permitirá tener un mayor control de la temperatura del mineral a la salida de los enfriadores y así aumentar la eficiencia del proceso.

En este capítulo se plantea como objetivo:

Establecer los procedimientos para realizar el balance de masa y energía en el proceso de enfriamiento del mineral y el planteamiento de un balance termo-energético para determinar la cantidad de amoníaco que se evapora, producto a las altas temperaturas de salida del mineral de los cilindros horizontales rotatorios.

2.2 Métodos de medición empleado

El sistema de control de la planta está formado por tres paneles de control, distribuidos uno por cada losa.

En cada panel de control, el operador tiene un puesto mediante el cual controla y dirige la operación, en dicho puesto existen dos paneles que controlan cuatro romanas para la dosificación de cuatro hornos, los reguladores de la presión en H-16 y la temperatura de H-4 en estos cuatro hornos en un primer panel y dos reguladores para la regulación de la presión en los dos primeros filtros.

Además en cada panel el operador tiene una computadora con un sistema de control informativo que es la encargada de realizar los reportes por turnos, así como de registrar el comportamiento de las distintas variables del proceso.

También tiene en su puesto un equipo indicador con una pantalla digital que se denomina OP-35 mediante el cual es posible ejecutar los diferentes mandos, paradas o arranques de los motores eléctricos acoplados a los diferentes equipos tecnológicos, así como abrir o cerrar válvulas automáticas y en control ON-OFF.

2.3 Procedimiento de cálculo a emplear. Balance de masa y energía

Para la realización de este trabajo se tuvo en cuenta la metodología que propone **(Valle, 2000)** que tiene como objetivo realizar un estudio de los enfriadores de mineral para ganar elementos de juicio del funcionamiento de estos equipos.

La masa aparente del mineral dentro del tambor se determina según la ecuación (2.1) que depende del flujo másico y del tiempo medio de residencia que se obtuvo a partir del procesamiento de los datos suministrados sobre la curva de distribución de tiempo de residencia.

$$M_m = M \cdot t \quad (2.1)$$

Donde:

$M_m \Rightarrow$ Masa aparente del mineral; kg / s

$M \Rightarrow$ Flujo Másico del mineral; kg / s

$t \Rightarrow$ Tiempo medio de residencia; s

El volumen aparente del tambor ocupado por mineral se determina por la expresión (2.2) que depende de la masa aparente del mineral dentro del tambor y la densidad aparente del mineral esta última fue suministrada por el personal técnico de la empresa.

$$V_m = \frac{M_m}{\rho_a} \quad (2.2)$$

Donde:

$V_m \Rightarrow$ Volumen aparente del mineral; m^3

$\rho_a \Rightarrow$ Densidad aparente del mineral; kg / m^3

El volumen del enfriador se determina según la ecuación (2.3).

$$V_e = 3.14 \cdot D^2 \cdot \frac{Le}{4} \quad (2.3)$$

Donde:

$V_e \Rightarrow$ Volumen del enfriador en; m^3

$D \Rightarrow$ Diámetro del enfriador; m

$Le \Rightarrow$ Longitud del enfriador; m

El por ciento de llenado aparente se determina según la expresión (2.4) que depende del volumen aparente del tambor ocupado por mineral y el volumen del enfriador.

$$\%LL = V_m \cdot \frac{100}{V_e} \quad (2.4)$$

Donde:

$\%LL \Rightarrow$ Por ciento de llenado; %

$V_m \Rightarrow$ Volumen aparente del tambor ocupado por mineral; m^3

$V_e \Rightarrow$ Volumen del enfriador; m^3

La sección ocupada por el mineral se determina por la ecuación (2.5) la misma depende del por ciento de llenado y el diámetro del enfriador.

$$S_o = \%LL \cdot \Pi \cdot \frac{D^2}{400} \quad (2.5)$$

Donde:

$S_o \Rightarrow$ Sección ocupada por el mineral; m^2

El estimado de la altura aparente de la capa de mineral dentro del enfriador lo determina la expresión (2.6) la misma depende del radio del enfriador y la sección ocupada por el mineral.

$$\frac{h}{R} = 0.5460 \quad (2.6)$$

Donde:

$h \Rightarrow$ Altura aparente de la capa de mineral

$R \Rightarrow$ Radio del enfriador; m

La longitud de la cuerda se determina por la ecuación (2.7), que se selecciona de la tabla 1-3a del Perry al igual que el ángulo de inclinación aparente de la capa de mineral dentro del enfriador.

$$\frac{C}{R} = 1.7820 \quad (2.7)$$

$$\theta = 126^{\circ}$$

Donde:

$C \Rightarrow$ Cuerda; m

$R \Rightarrow$ Radio del enfriador; m

$\theta \Rightarrow$ Ángulo de inclinación aparente de la capa de mineral dentro del enfriador.

La velocidad de superficie del tambor se determina por la expresión (2.8) la misma depende del radio del enfriador y de la velocidad de rotación del tambor.

$$V = \Pi \cdot R \cdot \frac{N}{30} \quad (2.8)$$

Donde:

$N \Rightarrow$ Velocidad de rotación del tambor; r.p.m

El ángulo de inclinación del mineral debido al movimiento del tambor se determina según Andreiev por la ecuación (2.9) la misma depende de la velocidad de superficie del tambor, el radio del enfriador y la gravedad. Ver Anexo figura 8

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{V^2}{R \cdot g} \right) \quad (2.9)$$

Donde:

$\alpha \Rightarrow$ Ángulo de inclinación del mineral; $^{\circ}$

$V \Rightarrow$ Velocidad de superficie del tambor; m/s

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

El ángulo de inclinación aparente del mineral en la zona de perturbación del enfriador se determina por la expresión (2.10).

$$\theta'' = 2 \cdot ((\alpha + \theta) - 180^{\circ}) \quad (2.10)$$

Donde:

$\theta \Rightarrow$ Ángulo de inclinación aparente de la capa de mineral dentro del enfriador; °

Las alturas aparentes de la capa de mineral en la zona de perturbación del enfriador se determinan por las ecuaciones (2.11) y (2.12).

$$h'' = (1 - \cos(\theta'' / 2)) \cdot R \quad (2.11)$$

Donde:

$\theta'' \Rightarrow$ Ángulo de inclinación aparente del mineral en la zona de perturbación del enfriador.

$R \Rightarrow$ Radio del enfriador; m

$$h''' = R \cdot \sin(90^\circ - \alpha) \quad (2.12)$$

Donde:

$\alpha \Rightarrow$ Ángulo de inclinación del mineral debido al movimiento del tambor.

$R \Rightarrow$ Radio del enfriador; m

La longitud de la zona de perturbación se determina por la expresión (2.13) la cual depende de las diferentes alturas aparentes de la capa de mineral en la zona de perturbación del enfriador y de ángulo de reposo (20°). Ver Anexo figuras 6 y 7.

$$L_1 = (R + h''' - h'') / \tan(\sigma) \quad (2.13)$$

Donde:

$h''; h''' \Rightarrow$ Alturas aparentes de la capa de mineral en la zona de perturbación del enfriador; m

$R \Rightarrow$ Radio del enfriador; m

$\sigma \Rightarrow$ Ángulo de reposo.

El área de transferencia de calor en contacto con el mineral se determina por la ecuación (2.14) la misma depende del radio y la longitud del enfriador.

$$A_{m1} = R \cdot \theta \cdot L_e \quad (2.14)$$

Donde:

$D \Rightarrow$ Diámetro del enfriador; m

$Le \Rightarrow$ Longitud del enfriador; m

$\theta \Rightarrow$ Ángulo de inclinación aparente de la capa de mineral dentro del enfriador; °

El área del tambor se determina por la expresión (2.15)

$$A_t = \Pi \cdot D \cdot Le \quad (2.15)$$

Donde:

$D \Rightarrow$ Diámetro del enfriador; m

$Le \Rightarrow$ Longitud del enfriador; m

El área del tambor que no está en contacto con el mineral se determina por la ecuación (2.16) que depende del área del tambor y del área de transferencia de calor en contacto con el mineral.

$$A_{m2} = A_t - A_{m1} \quad (2.16)$$

En el ángulo de inclinación aparente está distribuido el mineral en la parte del enfriador sumergido en la piscina el mismo depende del radio del enfriador y la altura del agua en la piscina que puede variar en dependencia de la cantidad de mineral que se vierta en el enfriador, esta se determina a través de la ecuación (2.17).

$$\beta = 2 \cdot \cos^{-1} \left(1 - \left(\frac{H}{R} \right) \right) \quad (2.17)$$

Donde:

$\beta \Rightarrow$ Ángulo de inclinación aparente; °

$H \Rightarrow$ Altura del agua en la piscina; m

$R \Rightarrow$ Radio del enfriador de mineral; m

El área de transferencia de calor sumergida se obtiene por la expresión (2.18) la misma depende del ángulo de inclinación aparente en el que está distribuido el mineral en la parte del enfriador sumergido en la piscina, del radio del enfriador y de la longitud del mismo.

$$A_s = R \cdot \beta \cdot Le \quad (2.18)$$

El flujo de calor extraído del mineral está dado por la expresión (2.19) la misma depende del flujo másico del mineral, de la capacidad calorífica y la temperatura de entrada y salida.

$$Q = M \cdot Cp \cdot (T_s - T_e) \quad (2.19)$$

Donde:

$Q \Rightarrow$ Calor extraído del mineral; W

$M \Rightarrow$ Flujo másico del mineral; kg / s

$Cp \Rightarrow$ Capacidad calorífica del mineral; kJ / kg °C

$T_s \Rightarrow$ Temperatura de salida del mineral; K

$T_e \Rightarrow$ Temperatura de entrada del mineral; K

Las áreas de transferencia de calor se determinan por las ecuaciones (2.20) y (2.21).

$$A_1 = C \cdot \Delta Z \quad (2.20)$$

Donde:

$C \Rightarrow$ Longitud de la cuerda; m

$\Delta Z \Rightarrow$ Longitudes del cilindro; m

$$A_2 = R \cdot (3.14 - \theta) \cdot \Delta Z \quad (2.21)$$

Donde:

$\theta \Rightarrow$ Ángulo de inclinación aparente de la capa de mineral dentro del enfriador; radianes

Las cantidades de calor que se transfieren por radiación se determinan por la expresión (2.22) la cual debido a que el mineral reducido es de color negro, al efecto del polvo y al apantallamiento del eje central dependerá de varios coeficientes de igual valor para su cálculo.

$$Q_{rad} = \sum_{z=0}^i \frac{\sigma \cdot (T_m^4 - T_p^4)}{\frac{(1-e_1)}{e_1 \cdot A_1} + \frac{1}{F_{12} \cdot A_1} + \frac{(1-e_1)}{e_2 - A_2}} \quad (2.22)$$

Donde:

$Q_{rad} \Rightarrow$ Calor transferido por radiación; W

$\sigma \Rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor; $W / m^2 K$

$A_1 \Rightarrow A_2 \Rightarrow$ Áreas de transferencia de calor; m^2

$T_m \Rightarrow$ Temperatura de entrada al enfriador de mineral; K

$T_p \Rightarrow$ Temperatura de la pared del enfriador; K

$e_1 \Rightarrow e_2 \Rightarrow F_{12} \Rightarrow$ Coeficientes que varían según el color del mineral reducido.

La cantidad de calor que se transfiere por conducción en el enfriador está dado por la ecuación (2.23) la cual depende del flujo de calor extraído del mineral y el calor total de radiación transferido a lo largo de los 30 m de longitud del enfriador.

$$Q_{cond} = Q - Q_{rad} \quad (2.23)$$

Donde:

$Q_{cond} \Rightarrow$ Calor transferido por conducción, W

$Q \Rightarrow$ Flujo de calor extraído del mineral; W

$Q_{rad} \Rightarrow$ Cantidad de calor que se transfiere por radiación; W

La intensidad de flujo de calor en la zona de la pared del enfriador en contacto con el mineral se determina por la ecuación (2.24) la misma depende de las cantidades de calor que se transfieren por conducción y el área de transferencia de calor en contacto con el mineral.

$$I_c = Q_{cond} / A_{m1} \quad (2.24)$$

Donde:

$I_c \Rightarrow$ Intensidad de flujo de calor; W / m^2

$A_{m1} \Rightarrow$ Área de transferencia de calor en contacto con el mineral; m^2

La intensidad del flujo de calor en la zona de la pared del enfriador que no está en contacto con el mineral está dado por la expresión (2.25) la misma depende de las

cantidades de calor que se transfieren por conducción y el área del tambor que no está en contacto con el mineral.

$$I_{nc} = Q_{rad} / A_{m2} \quad (2.25)$$

Donde:

$A_{m2} \Rightarrow$ Área del tambor que no está en contacto con el mineral; m^2

La cantidad de calor que se transfiere por la piscina se determina por la ecuación (2.26) la cual depende del radio y longitud del enfriador, del ángulo de inclinación aparente en el que está distribuido el mineral en la parte del enfriador sumergido en la piscina, el ángulo de inclinación aparente del mineral en la zona de perturbación del enfriador y la intensidad de flujo de calor en la zona de la pared del enfriador que está en contacto con el mineral y las que no están en contacto con el mineral.

$$Q_{tpisc} = R \cdot Le \cdot (0.5(\beta + \theta'') \cdot I_c + 0.5 \cdot (\beta - \theta'') \cdot I_{nc}) \quad (2.26)$$

Donde:

$Q_{tpisc} \Rightarrow$ Cantidad de calor que se transfiere por la piscina; W

$\theta'' \Rightarrow$ Ángulo de inclinación aparente del mineral en la zona de perturbación del enfriador.

$\beta \Rightarrow$ Ángulo de inclinación aparente en el que está distribuido el mineral en la parte del enfriador sumergido en la piscina.

$R \Rightarrow$ Radio del enfriador; m

$Le \Rightarrow$ Longitud del enfriador; m

$I_c \Rightarrow$ Intensidad de flujo de calor en la zona de la pared del enfriador en contacto con el mineral; W / m^2

$I_{nc} \Rightarrow$ Intensidad del flujo de calor en la zona de la pared del enfriador que no está en contacto con el mineral; W / m^2

El coeficiente de transferencia de calor del mineral hacia la pared del shell está dado por la ecuación (2.27) la misma depende de la cantidad de calor que se transfiere por conducción, del área de transferencia de calor que está en contacto con el mineral, la temperatura de entrada del mineral al enfriador y la temperatura de la pared del enfriador.

$$U_{\min} = \frac{Q_{\text{cond}}}{A_{m1} \cdot (T_m - T_p)} \quad (2.27)$$

Donde:

$U_{\min} \Rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor del mineral a la pared del Shell; $W / m^2 \cdot K$

$A_{m1} \Rightarrow$ Área de transferencia de calor en contacto con el mineral; m^2

$T_m \Rightarrow$ Temperatura de entrada al enfriador de mineral; K

$T_p \Rightarrow$ Temperatura de la pared del enfriador; K

El coeficiente de transferencia de calor de la pared del shell a la piscina se determina por la siguiente expresión.

$$U_{\text{pisc}} = \frac{Q_{\text{tpisc}}}{A_s \cdot (T_p - t_{\text{pisc}})} \quad (2.28)$$

Donde:

$Q_{\text{tpisc}} \Rightarrow$ Cantidad de calor que se transfiere por la piscina; W

$A_s \Rightarrow$ Área de transferencia de calor sumergida; m^2

$t_{\text{pisc}} \Rightarrow$ Temperatura del agua en la piscina; K

La cantidad de agua que se vaporizan en la zona no sumergida está dado por la ecuación (2.29) en la misma se propondrá que el calor que se transfiere en la zona no sumergida se utilizará para calentar a la película, que luego se vaporizará desde la temperatura de la piscina hasta la temperatura de la pared del shell, y que a esta temperatura ocurrirá la vaporización.

$$mv = \frac{Q - Q_{\text{tpisc}}}{\lambda_{\text{vap}} + Cp + (T_p - t_{\text{pisc}})} \quad (2.29)$$

Donde:

$mv \Rightarrow$ Cantidad de agua que se evapora; kg / s

$\lambda_{vap} \Rightarrow$ Calor latente de vaporización; kJ / kg

$t_{pisc} \Rightarrow$ Temperatura del agua en la piscina; K

$T_p \Rightarrow$ Temperatura de la pared del enfriador; K

$Q_{tpisc} \Rightarrow$ Cantidad de calor que se transfiere por la piscina; W

$Q \Rightarrow$ Flujo de calor extraído del mineral; W

$C_p \Rightarrow$ Capacidad calorífica del agua; $kJ / kg^{\circ}C$

El volumen de agua vaporizada se determina por la ecuación (2.30).

$$V_v = mv \cdot (360^{\circ} - \beta) \frac{1}{N \cdot \rho_{agua}} \quad (2.30)$$

Donde:

$mv \Rightarrow$ Cantidad de agua que se vaporiza en la zona no sumergida; kg / s

$\beta \Rightarrow$ Ángulo de inclinación aparente en el que está distribuido el mineral en la parte del enfriador sumergido en la piscina.

$N \Rightarrow$ Velocidad de rotación del tambor; rev / min

$\rho_{agua} \Rightarrow$ Densidad del agua; kg / m^3

Suponiendo que en el tambor se produce una vaporización uniforme entonces a través de la ecuación (2.31) se puede determinar el espesor de la capa de agua vaporizada.

$$\psi = \frac{V_v}{(A_t - A_s)} \quad (2.31)$$

Donde:

$\psi \Rightarrow$ Espesor de la capa de agua vaporizada; m

$A_t \Rightarrow$ Área del tambor; m^2

$A_s \Rightarrow$ Área de transferencia de calor sumergida; m^2

$V_v \Rightarrow$ Volumen de agua vaporizada; m^3

2.4 Balance termo energético en los canales que conducen el mineral reducido hacia los tanques de contacto.

De conocimientos de la termodinámica se tiene que en todo balance, de masa y/o energía, la sumatoria de los parámetros de entrada es igual a la sumatoria de los parámetros de salida, según la ecuación 2.32. Ver Anexo figura 5

$$\sum Q_{ENT} = \sum Q_{SAL} \quad (2.32)$$

En el caso de estudio se tiene que; la sumatoria del calor del mineral reducido, mas el calor del licor amoniacal a la entrada de la canal, que se puede determinar a través de la ecuación 2.33.

$$\sum Q_{ENT} = Q_{eMR} + Q_{eLC} \quad (2.33)$$

Es igual a la sumatoria de los calores salientes (calor de la mezcla de mineral reducido y licor amoniacal a la salida de la canal, calor de evaporación del licor amoniacal y el calor desprendido por el calor latente de vaporización del licor amoniacal); la cual se determina según la ecuación (2.34).

$$\sum Q_{SAL} = Q_{sMEZ} + Q_{L-NH_3} + Q_{E-NH_3} \quad (2.34)$$

Q_{eMR} : calor de entrada del mineral reducido en los tanques de contacto; W

Q_{eLC} : calor de entrada del licor amoniacal a los tanques de contacto; W

Q_{sMEZ} : calor de salida de la mezcla de los tanques de contacto; W

Q_{LatLC} : calor latente de evaporación del amoniaco; W

Q_{evapLC} : calor de evaporación del amoniaco; W

2.4.1 Cálculo del flujo másico del mineral reducido que llega a los enfriadores de mineral.

Conociendo que los hornos de reducción son dosificados con 420 t/h , la cantidad de mineral reducido que entra a los enfriadores de mineral será:

$$m_{MR} = m \cdot f \cdot f_c \quad (2.35)$$

Que depende de:

m : flujo másico de mineral de entrada a los hornos de reducción; t/h

f : factor que depende del por ciento de humedad, petróleo aditivo, de reciclo y de pérdida de gases; su valor es 0.92

f_c : factor de contracción y su valor es de 0.862

2.4.2 Cálculo del calor contenido en el mineral a la salida del enfriador.

La cantidad de calor con que entra el mineral reducido a la canal se determina por la ecuación (2.36), que depende de: el flujo másico del mineral reducido que entra a la canal, de la temperatura a la que este se encuentra y del calor específico que corresponde a esa temperatura.

$$Q_{eMR} = m_{eMR} \cdot C_{pMR} \cdot T_{eMR} \quad (2.36)$$

Donde:

m_{eMR} : flujo volumétrico de entrada del mineral reducido; t/h

C_{pMR} : calor específico del mineral reducido; $kJ/kg \cdot K$

T_{eMR} : temperatura de entrada del mineral reducido; K

2.4.3 Ecuaciones para determinar flujo másico de licor amoniacal y el calor contenido en este.

Para determinar la cantidad de licor amoniacal (ecuación 2.37) que corresponde al flujo másico de mineral reducido es de gran importancia tener en cuenta la relación líquido sólido, la cual depende de las densidades del líquido, del sólido y la densidad de la pulpa, y debe de estar un rango de (5.5 -6.8); este se denota R_{LS} .

$$m_{eL} = m_{MR} \cdot R_{LS} \quad (2.37)$$

La cantidad de calor contenido en el flujo másico de licor amoniacal, se determina por la expresión (2.38), ésta depende del flujo másico de licor amoniacal, de la temperatura que este posee y del calor específico que corresponde a esa temperatura.

$$Q_{eLC} = m_{eLC} \cdot Cp_{LC} \cdot T_{eLC} \quad (2.38)$$

Donde:

m_{eLC} : flujo másico de entrada del licor amoniacal; t/h

Cp_{LC} : calor específico del licor amoniacal; $\frac{KJ}{kg \cdot K}$

T_{eLC} : temperatura de entrada del licor amoniacal K

2.4.4 Ecuaciones para determinar el calor contenido en la mezcla de mineral reducido y licor amoniacal.

La ecuación 2.39, se deriva de un balance de flujo másico realizado a la canal que conduce a la mezcla de mineral reducido más licor amoniacal hacia los tanques de contacto, y depende en este caso del flujo másico de licor que sale y del amoníaco que se evapora al ambiente.

$$m_{eLC} = m_{sLC} + m_{evapLC} \quad (2.39)$$

Donde:

m_{sLC} : flujo de salida de licor amoniacal en; t/h

m_{evapLC} : cantidad de amoníaco que se evapora en; t/h

El calor contenido en la mezcla de mineral reducido y licor amoniacal se determina por la ecuación (2.41), dependiendo del flujo másico de la mezcla de mineral reducido y licor amoniacal, de la temperatura a la que este se encuentra y del calor específico que corresponde a esa temperatura.

Flujo másico de la mezcla; ecuación (2.40)

$$m_{MEZ} = M_{eMR} + (m_{eLC} - m_{evapLC}) \quad (2.40)$$

$$Q_{MEZ} = m_{MEZ} \cdot Cp_{MEZ} \cdot T_{MEZ} \quad (2.41)$$

Donde:

Cp_{MEZ} : calor específico de la mezcla; $\frac{KJ}{kg \cdot K}$

T_{MEZ} : temperatura de la mezcla; K

2.4.5 Ecuaciones para determinar el calor contenido en el flujo de licor amoniacal que se evapora y el calor asociado al calor latente de vaporización.

La cantidad de calor que lleva consigo el flujo de licor amoniacal que se evapora se determina por la expresión (2.42), el mismo depende del flujo de licor amoniacal que se evapora, de la temperatura a la que se evapora y del calor específico correspondiente a esa temperatura.

$$Q_{evap LC} = m_{evap LC} \cdot Cp_{evap LC} \cdot T_{evap LC} \quad (2.42)$$

Donde:

$Cp_{evap LC}$: calor específico de evaporación del amoniaco; $\frac{KJ}{kg \cdot K}$

$T_{evap LC}$: temperatura de evaporación del amoniaco K

El calor que trae consigo, el calor latente de evaporación del licor amoniacal se determina a través de la ecuación (2.43), el mismo depende del calor latente de vaporización del licor amoniacal y del flujo másico de licor amoniacal que se evapora.

$$Q_{Lat LC} = m_{evap LC} \cdot \lambda \quad (2.43)$$

λ : calor latente de evaporación del amoniaco; $\frac{KJ}{kg}$

2.4.6 Ecuación para determinar la cantidad de amoníaco que se evapora.

Sustituyendo (2.36; 38; 41; 42; 43) en 2.44 y, despejando a $m_{evap LC}$ se obtendrá la cantidad de licor evaporado.

$$m_{evap LC} = \frac{[Q_{eMR} + Q_{eLC}] - [m_{eMR} + m_{eLC}] \cdot Cp_{MEZ} \cdot T_{MEZ}}{\lambda + Cp_{evap LC} \cdot T_{evap LC} - Cp_{MEZ} \cdot T_{MEZ}} \quad (2.44)$$

2.5 Mediciones realizadas en el enfriador de mineral # 9

Datos obtenidos del mineral reducido que entra a los enfriadores de mineral:

- Flujo másico: 12.11 kg/s
- Temperatura de entrada: 648.2 °C
- Temperatura de salida: 286.5 °C
- Tiempo de resistencia: 54 min

Datos obtenidos del agua dentro de la piscina del enfriador:

- Temperatura de entrada: 30 °C
- Temperatura del agua en la piscina: 73.2 °C
- Velocidad de rotación del tambor: 6.3 r.p.m
- Temperatura de la pared del enfriador: 84.2 °C

Tabla 2.1 Mediciones realizadas de temperatura en 7 tramos del enfriador de mineral.

Longitud del enfriador (m)	Temperatura (°C)	
	Entra el mineral	Pared del cilindro
2.2	621.67	84.33
3.5	605.99	90.33
4.8	590.31	97.00
8.7	543.28	92.33
13.8	481.77	70.33
18.9	420.27	70.67
30.0	286.50	63.66

2.6 Conclusiones del capítulo II

- Quedaron establecidas las metodologías para la evaluación de los enfriadores de mineral y para la obtención del NH₃ que se evapora en proceso carbonato-amoniaco.

CAPITULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN TECNICA Y ECONÓMICA. IMPACTO AMBIENTAL

3.1 Introducción

Para la identificación de las zonas de transferencia de calor en los cilindros rotatorios horizontales, se exige la toma de mediciones que permitan determinar el comportamiento de los parámetros que caracterizan el proceso de enfriamiento de mineral en la instalación. El objetivo del capítulo es mostrar los resultados de la metodología mostrada en el Capítulo II, así como la valoración económica asociada al enfriamiento de mineral y las afectaciones de este proceso al medio ambiente.

3.2 Análisis de los resultados obtenidos del balance térmico

Siguiendo la metodología expuesta en el capítulo anterior, con los datos obtenidos del enfriador # 9 a través de un PLC y llevados hasta una computadora que se encuentra en el panel de control de la planta se obtuvieron los principales parámetros del enfriador, los cuales se resumen en la tabla 3.1 .

Parámetros	Valor Calculado	Unidad de medida	Ecuación
%LL	21,943	%	2.4
h	0,841	m	2.6
Q	4091	kW	2.19
Qrad	180,5	kW	2.22
Qcond	3209	kW	2.23
Qtpisc	2729	kW	2.26
Umin	241,491	W/m ² K	2.27
Upisc	2085	W/m ² K	2.28
m _{evap}	0,36	t/h	2.44

Tabla 3.1 Valores medios de los principales resultados obtenidos

De la evaluación realizada al enfriador # 9 se desprende que el equipo trabajó con un por ciento de llenado de 21.94 %, lo que hace que exista un espesor de la capa de mineral muy elevado que provoca un incremento de la resistencia a la transferencia de calor por conducción.

En la entrada al enfriador hay una zona de perturbación estimada aproximadamente de 4 m en la cual la capa de mineral es más alta que en las restantes partes del equipo.

Teniendo en cuenta que todo el calor que entrega el mineral es recibido por la pared del cilindro y ésta lo utiliza para elevar su temperatura a la vez que la entrega al agua. La Figura 3.2 muestra que la transferencia de calor por radiación representa el 6 % del calor total transferido, y por conducción se transfiere el 90 % del calor total, siendo éste el mecanismo predominante y sobre el que se debe incidir para mejorar el proceso de enfriamiento.

Modos de Transferencia de Calor

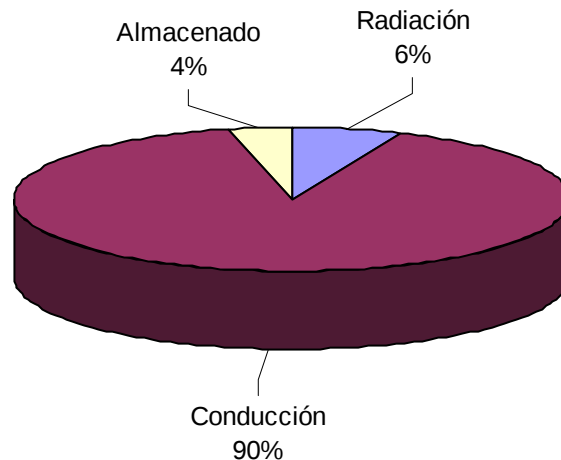


Figura 3.2 Representación de los modos de transferencia de calor predominantes en el interior del cilindro.

Se debe destacar que todo el calor recibido por la pared del cilindro es entregado al agua, ya que ésta cubre en su totalidad al cilindro y luego le entrega parte del calor absorbido al aire. A través de la piscina se transfiere el 67 % del calor extraído al mineral, y el otro 33 % se transfiere en la zona no sumergida mediante la vaporización de la película de agua adherida a la pared del cilindro al aire, a condiciones medioambientales, ver la Figura 3.3.

Modos de transferencia de calor

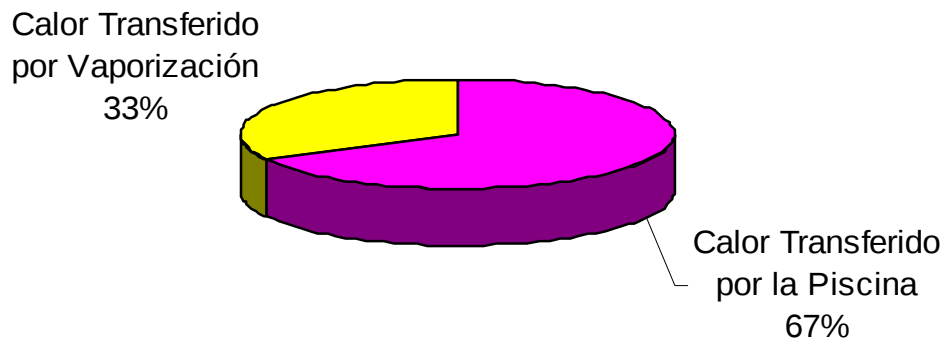


Figura 3.3 Modos de transferencia de calor predominantes en el exterior del cilindro.

El coeficiente de transferencia de calor estimado del mineral a la pared del cilindro se considera bajo $402.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, comparado con el coeficiente de transferencia de calor de la pared del cilindro a la piscina $3045,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, lo que sugiere la existencia de grandes gradientes de temperatura dentro de la capa de mineral; la diferencia de temperatura entre la pared del cilindro y la piscina debe ser aproximadamente de 23°C en las condiciones operacionales actuales, debido al gran coeficiente de transferencia de calor en la piscina, este coeficiente corresponde a condiciones de convección forzada, debido en lo fundamental a la velocidad superficial del tambor ($1,02 \text{ m/s}$), que según Pavlov (1976), para corrientes de agua en movimiento forzado a velocidad de agua entre $0,2$ y $1,5 \text{ m/s}$ se deben esperar coeficiente de transferencia de calor entre 1200 y $5800 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

A continuación se muestra el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor del mineral hacia la pared del cilindro con respecto a la temperatura del mineral a la entrada del enfriador (Figura 3.3), representando una disminución simultánea de ambos debido a que el coeficiente de transferencia de calor dependerá fundamentalmente del nivel de mezclado existente dentro de la masa de mineral.

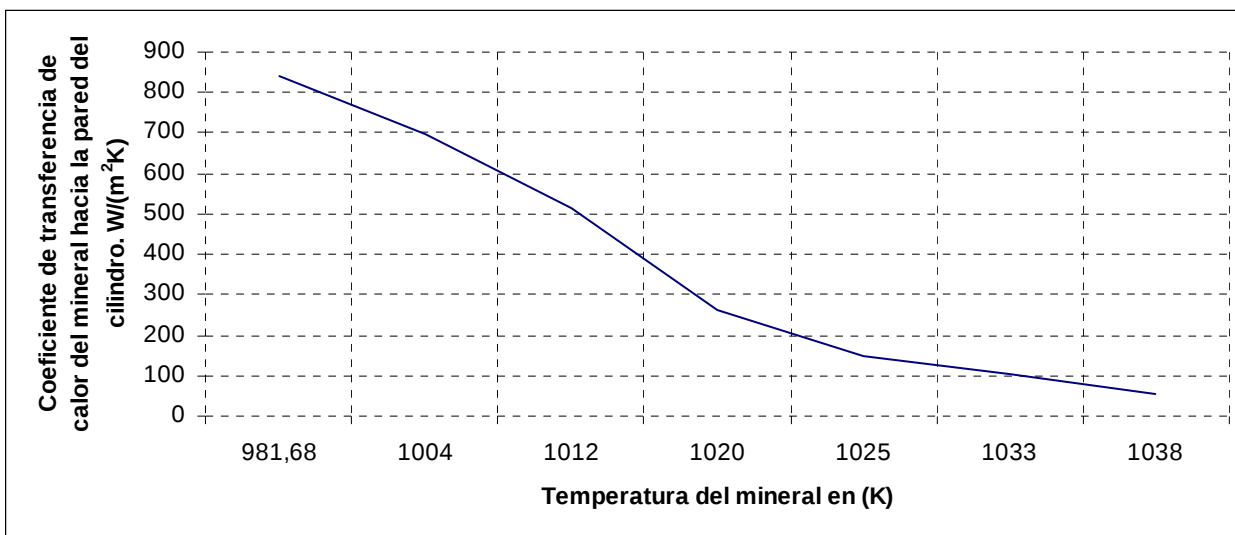


Figura 3.4 Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor del mineral a la pared del cilindro contra temperatura a la entrada del enfriador.

También se muestra como este coeficiente disminuye a medida que aumenta el tamaño de la capa del mineral que la misma va a depender del por ciento de llenado del enfriador. Figura 3.5

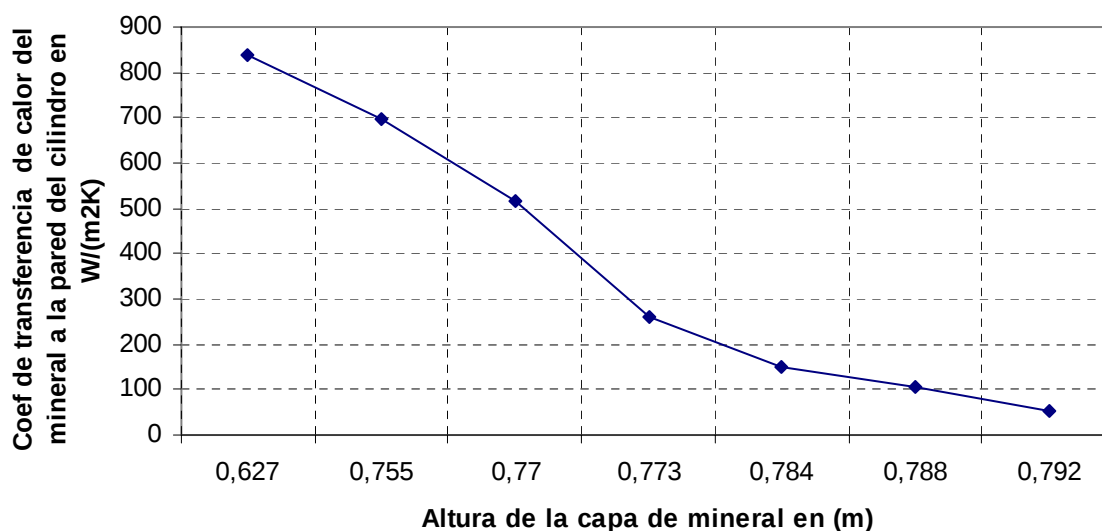


Figura 3.5 Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor del mineral a la pared del cilindro respecto a la temperatura a la entrada del enfriador.

Teniendo en cuenta la variación que experimenta la temperatura de la pared del cilindro a lo largo del enfriador, la Figura 3.6 muestra la incidencia que tiene ésta sobre el

coeficiente de transferencia de calor de la piscina; ya que a medida que disminuye la temperatura de la pared del cilindro en toda su longitud, el coeficiente de transferencia de calor a través del agua en la piscina disminuye de igual manera.

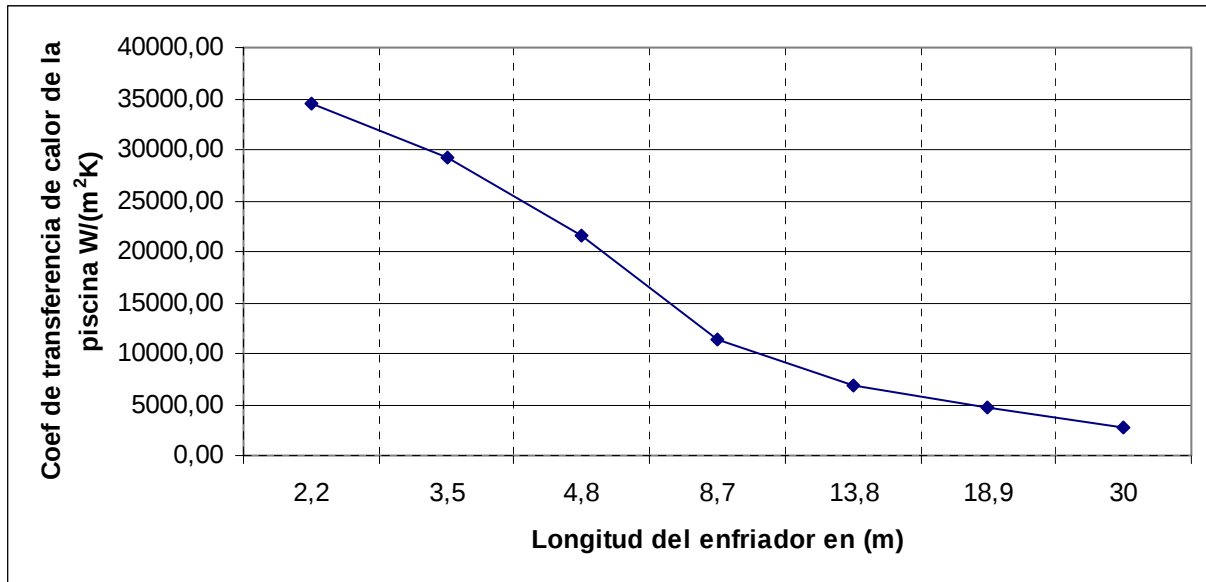


Figura 3.6 Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor del mineral a la pared del cilindro en función de la longitud del cilindro.

3.3 Resultados del cálculo de la cantidad de amoníaco que se evapora.

Luego de efectuar el cálculo del balance termo-energético se determinó por medio de la ecuación (2.44) que la cantidad de amoníaco promedio que se pierde al medio ambiente por evaporación es de 0.36 t/h, representando este un 16 % de la cantidad de licor amoniacal total que entra a los canales que conducen el mineral hacia los tanques de contacto, siendo entonces alrededor del 84 % la cantidad que sigue el proceso, ver la Figura 3.7.

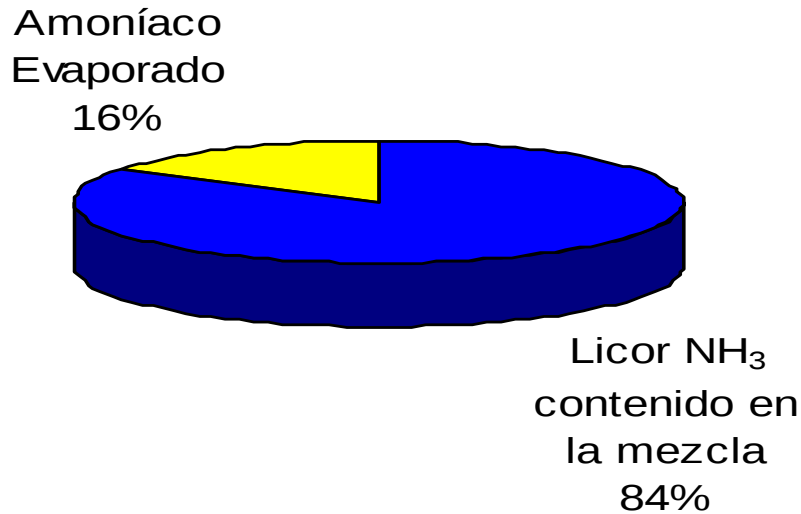


Figura 3.7 Representación del licor amoniacal al entrar a la canal.

3.4 Valoración económica

A la variedad y la multiplicidad de las situaciones económicas le antepone muchas tareas de carácter autónomo; el conocimiento de las mismas es de vital importancia, para la posterior toma de decisiones en cualquier situación económica que se pueda gestar. A continuación se muestra cada uno de los aspectos a tener en cuenta para el análisis económico.

3.4.1 Fundamentación del análisis económico

Análisis Económico:

Debe sustentarse por el cumplimiento de las tareas económicas propuestas por las áreas organizativas, actividades, epígrafes, fuentes y destinos de los flujos operativos así como indicadores de eficiencia económica que correlacionen los ingresos y gastos con los niveles de actividad.

Debe sustentarse de los siguientes criterios:

Sistematicidad: mensualmente.

Flexibilidad: adaptarse a las características de la entidad y necesidades de cada momento.

Homogeneidad: los indicadores utilizados deben ser homogéneos de tal forma que permitan su agregación y comparación con entidades similares.

Utilidad y Oportunidad: los resultados del análisis deben ser útiles y oportunos para la toma de decisiones, debe poner las señales de alerta acerca de las desviaciones no deseadas y utilizarse como herramienta operativa de dirección y medir la eficacia y la eficiencia de la organización.

Simplicidad: los indicadores deben ser pocos y los procedimientos de cálculo sencillos, sin sintetizar la eficiencia de la entidad.

Desagregación: debe desagregarse por unidades organizativas y actividades.

Objeto del análisis económico.

El análisis económico también tiene su propio objeto de estudio en el cual se entienden los procesos económicos de las organizaciones que se conforman por la acción de factores objetivos y subjetivos.

El significado y el contenido del análisis económico determinan las tareas que este debe resolver. Entre las más importantes de estas tareas se encuentran:

- 1- La elevación de la fundamentación científico económica de los planes y de las normativas (en el proceso de su elaboración)
- 2- La investigación objetiva y multilateral del cumplimiento de los planes y la observación de las normas (según los datos de la contabilidad y de los informes)
- 3- La determinación de la efectividad económica, de la utilización de los recursos humanos, materiales y financieros (cada uno por separado y en conjunto).
- 4- El descubrimiento y medición de las reservas internas (en todos los estadios del proceso de producción).

3.4.3 Evaluación integral de los indicadores:

La evaluación integral de la actividad gestora consiste en la caracterización de esta acción, obtenida como consecuencia de una investigación integral, o sea, del estudio simultáneo y compatibilizado del conjunto de indicadores que reflejan todos o muchos de los aspectos de los procesos económicos y que contiene conclusiones generalizadoras sobre los resultados de estas utilidades apoyados en la aclaración de

las diferencias, cuantitativas y cualitativas respecto a una base de comparación (el plan, las normas, los períodos anteriores, los logros de otros objetos análogos, otras posibilidades de variantes de desarrollo, etc.).

3.4.4 Impacto económico de los enfriadores de mineral.

El análisis de las pérdidas de amoníaco que existen actualmente son provocada fundamentalmente por el proceso de enfriamiento en la planta de Hornos de Reducción, el cual repercute en los tanques de contacto que es donde incide el efecto de las altas temperaturas, influyendo directamente en la eficiencia de extracción de níquel en el proceso; estas pérdidas se clasifican en:

- Pérdidas por evaporación de amoníaco (NH_3)
- Pérdidas por mantenimiento.

3.4.5 Pérdidas por evaporación de amoníaco (NH_3).

Estas se ven implícitas cuando sale el mineral reducido de los enfriadores y es mezclado con el licor amoniacal para su posterior paso a los tanques de contacto; son provocadas debido al deficiente proceso de enfriamiento, repercutiendo el mismo negativamente en la planta de Lixiviación. Teniendo en cuenta lo dicho y observando los cálculos efectuados en el Capítulo 2, (ver ANEXO), se determinó que las pérdidas por evaporación de amoníaco es de 0.36 t/h, equivalente a 8.64 t/día que, teniendo en cuenta el costo del amoníaco en el mercado mundial 584 CUC/t, el costos de las pérdidas por evaporación de amoníaco es de 5 045.76 CUC/día; siendo el impacto económico para un año de trabajo continuo de 1 841 702.4 CUC/año.

3.4.6 Pérdidas por mantenimiento.

El deterioro prematuro de algunos elementos y accesorios que componen el sistema de los tanques de contacto provocan las pérdidas por mantenimiento; este problema está dado porque el magnesio a altas temperaturas se hace soluble en la pulpa, se incrusta en las paredes de los tanques y todo el sistema interno del mismo, lo que provoca que muchas piezas sean renovadas aproximadamente cada 4 meses, (ver anexo 3 y 4); generando una pérdida de 8, 393.69 CUC por concepto de materiales.

Aparejado a esto, se encuentra el costo de la mano de obra que asciende a un valor de 418. 45 CUC.

Otros consumos:

Analizando los elementos que influyen en la eficiencia energética de la empresa y considerando como portadores energéticos la energía eléctrica y el agua la instalación consume entre 38 y 65 kW·h de energía eléctrica y entre 20 y 80 m³/h de agua aproximadamente, por cada enfriador de 12 con los que cuenta la planta, dando un total de 452 y 776 kW·h de energía eléctrica y entre 240 y 960 m³/h diario con los 12 enfriadores funcionando por lo que en un día se consumen entre 11 y 19 MW/día de energía eléctrica y entre 5760 y 23040 m³/día . Como se puede observar los volúmenes de agua y la energía eléctrica son considerables, más aún cuando no existe un modelo matemático que permita simular los parámetros que caracterizan el proceso, es decir en la actualidad no se conoce cual es el flujo de agua y la temperatura que ésta debe alcanzar en la piscina para garantizar la menor temperatura del mineral a la descarga. Además garantizando una temperatura adecuada del agua y nivel de la piscina, se garantiza la flotación del cilindro y a su vez se disminuye el consumo de energía eléctrica ya que se evita el apoyo en los extremos y el sobre consumo en los motores. En los enfriadores el promedio mensual del consumo de agua es de 271 066 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 910 781 CUC por año.

Resumen de los costos

Costo de Mano de Obra	\$ 836.90
Costo de Materiales	\$ 16787.32
Costo de las pérdidas por evaporación de NH ₃	\$ 1841702.40
Costo del consumo de agua	\$ 910 781.00
Costo del consumo de energía	\$ 4376.35
Costo Total	\$ 2770107.62

La situación anteriormente analizada tiene un impacto directo sobre el costo del producto, lo que provoca un encarecimiento del mismo y un deterioro en el margen de contribución necesaria para cubrir a los gastos de administración y otros gastos financieros que la entidad requiere satisfacer.

Para representar una breve valoración del impacto económico y financiero que tiene este resultado sobre las metas de producción de la empresa, se analiza el impacto en el costo de producción que tuvo para el 2008 el mantenimiento no planificado y el

sobreconsumo de amoníaco provocado por la elevada temperatura, de esta forma en el resultado final se obtuvo que; para el 2008 la entidad dejó de ganar 1 859 326.62 CUC. La siguiente información se deriva de la sumatoria de todas las órdenes de servicios derivadas de mantenimiento, que ascendió a 17624,22 CUC y en el caso del sobreconsumo del amoníaco se determinó la cantidad aproximada que se evapora del mismo, la cual ascendió a 0.36 t/h. Como el proceso en la entidad es continuo se determinó a partir del precio promedio en el mercado del amoníaco (584.00 CUC la tonelada), que el costo de la pérdida asciende a 1841702,4 CUC.

3.5 Impacto ambiental

En la fábrica "Comdte. Ernesto Che Guevara" se intensifica el esfuerzo para garantizar el uso racional de los recursos naturales, minimizando su impacto en el entorno, pensando en el futuro de la región. La entidad participa además en la reforestación popular territorial, mediante la siembra de un promedio anual de 50 000 posturas de árboles maderables y frutales. También el proceso de modernización y el incremento de la eficiencia metalúrgica de la fábrica han repercutido favorablemente en la situación medioambiental.

En esta área se producen emanaciones de polvo principalmente por salideros en la parte superior de los silos (rajaduras), esto ocurre cuando los silos son llenados a máxima capacidad, esta contaminación afecta el área de trabajo. La limpieza que se realiza en esta parte es manual.

En esta planta la contaminación es provocada por salideros de mineral, en romanas, alimentadores, sinfines de polvo, etc. El derrame de mineral cae a los pisos inferiores y este es eliminado mediante el soplado con aire (provocando contaminación en el área y en el exterior de la planta).

El derrame y salideros de mineral en la planta por los sellos de los transportadores, cae a la planta baja, este mineral se somete a la limpieza con agua y es trasladado por canales hacia tres pozos (uno para cada ocho hornos), mediante bombas la pulpa se envía hacia la canalización oeste de la fábrica, que lo descarga al río Moa (este residual contiene gran cantidades de sólidos y grasas) sin tratamiento previo.

Otro foco de contaminación es provocado por los salideros de grasas (escotillas, mirillas, cámaras, sellos de los transportadores), estos gases contienen CO_2 , H_2 , CO y son expulsado a la atmósfera y al área de trabajo.

Los gases de la planta son ventilados hacia secaderos y parte oeste de la planta, cuando cambia el sentido del aire estos gases afectan la fábrica en general y áreas aledañas.

El agua en la piscina de los enfriadores se contamina con polvo y grasa por los salideros de los sellos del enfriador del mineral y por las grasas de la transmisión del mismo que necesita para su movimiento. También puede ser afectada por las rajaduras del shell lo cual permite la entrada de agua al interior del mismo y esto provoca la contaminación de la misma. Otra afectación que provoca este equipo es la salida del mineral a una temperatura por encima de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ que trae consigo la evaporación del licor fresco hacia la atmósfera en la sección de contacto.

En la planta la contaminación del aire por el polvo reduce la visibilidad resultante de absorción y dispersión de la luz por los materiales líquidos y sólidos arrastrados por el aire. La visibilidad se altera por las partículas que se forman en la atmósfera, por las reacciones en las partes gaseosas. Su reducción no solo resulta desagradable para el individuo, sino que puede sufrir fuertes efectos psicológicos. Además se presentan algunos peligros que afectan la seguridad.

- **Efectos de las partículas (en el aire) sobre la salud humana**

Las partículas, solas o en combinación con otras contaminantes representan un peligro muy grave para la salud. Los contaminantes entran principalmente al cuerpo humano por las vías respiratorias, los daños pueden presentarse directamente, ya que se ha estimado que el 50 % de las partículas que penetran a las cavidades pulmonares se depositan en el mismo.

- **Influencia del polvo en el medio ambiente**

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad, además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medio artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración de partículas, pero así mismo influye el tamaño de estas. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetros comprendido entre 0.1 a 1 μm .

Estas influyen sobre los materiales, entre los efectos que pueden tener sobre estos tenemos:

- Abrasión: realizadas por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).
- Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente, tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

La partícula de tamaño superior a 5 μm de diámetro quedan retenida en los bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la traquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0.5 y 5 μm son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los caso sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

Las partículas sólidas de pequeño tamaño generalmente menores de 10 μm de diámetro, son de gran importancia porque dado su tamaño permanecen en el aire antes de sedimentarse.

Efectos tóxicos:

1. Pueden ser intrínsecamente tóxicas por las características inherentes químicas.
2. Pueden interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
3. Puede actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida en su superficie.

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues en este medio es donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentran el polvo industrial, ruidos, gases, etc.

Medidas para mitigar estos efectos

1. Lograr que los trabajadores desarrollen una cultura laboral e industrial.
2. Uso obligatorio de los medios de protección con sanciones administrativas a los infractores.
3. Aplicar proyectos de automatización con vista a disminuir la influencia de altas temperaturas en las zonas de trabajo.
4. Dar tratamiento a los residuales en el SD-01 evitando así arrastre a las canalizaciones.
5. Implementar un programa de mejoras continuas para alcanzar una operación estable.
6. Continuar la prueba de sellos de alta resistencia a las temperaturas de descarga de los alimentadores.

3.6 Conclusiones del capítulo III

- Se presentaron los resultados de la evaluación realizada al enfriador 9, así como la valoración del trabajo del mismo, mostrando los principales defectos que presentan en su funcionamiento.
- Las altas temperaturas del mineral a la salida del proceso de enfriamiento repercuten negativamente en la planta de Lixiviación y Lavado, destacándose las pérdidas por evaporación de amoníaco en los tanques de contacto.

CONCLUSIONES GENERALES

1. En la bibliografía consultada se observa que la problemática del enfriamiento del mineral reducido aun no se resuelve y que pocos se han dedicado a estudiar el comportamiento de los diferentes parámetros que caracterizan el proceso a escala industrial.
2. La transferencia de calor por radiación representa el 6 % del calor total transferido, y por conducción se transfiere el 90 % del calor total, siendo éste el mecanismo predominante y sobre el que se debe incidir para mejorar el proceso de enfriamiento.
3. Por la piscina se transfiere aproximadamente el 67 % del calor total transferido y el otro 33 % en la zona no sumergida mediante la vaporización de una parte de la película de agua adherida a la pared del cilindro.
4. Debido a las altas temperaturas del mineral a la descarga del enfriador, la evaporación de amoníaco se hace mayor, generando pérdidas monetarias de un valor promedio de 1 841 702.4 CUC/anual.
5. El costo generado en la producción de níquel anual es de 2770107.62 CUC.

RECOMENDACIONES

1. Continuar con el estudio de la temática en cuestión contribuyendo al perfeccionamiento de la metodología propuesta.
2. Instalar la instrumentación requerida que registre el comportamiento de todas las variables para obtener resultados fiables que garanticen la caracterización del proceso de enfriamiento tanto de entrada como de salida.
3. Disminuir la temperatura de salida del mineral del enfriador para lograr una menor pérdida de amoníaco y contribuir así a la mejor eficiencia de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ ÁLVAREZ, R. *Evaluación del proceso transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la empresa "comandante ernesto che guevara"*. Ever Góngora Leyva; Ángel Oscar Columbie Navarro (tutores). Trabajo de diploma. ISMMM. 2008. 73 h.
- CALA HINOJOSA, E. *Estudio del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios horizontales como objeto de modelación matemática*. Ever Góngora Leyva (tutor). Trabajo de diploma. ISMMM. 2006. 72h.
- CORREA SEVILA, N.L. *Balance energético en el enfriador de mineral en la planta de Hornos de reducción de la Empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara"*. Ramón, Gonzáles Marrero (tutor). Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2000. 43p.
- Folliot: Publication technique centre d'estudet de Recherche de l'Industries des Liants Hydrauliques. No.70. Paris, 1955.
- Fundamentals of Heat and Mass Transfer Tomo I, II. III. [S.L]. [s.n]. [s.a]
- GÓNGORA LEYVA, E. *Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la Planta Hornos de Reducción de la Empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara"*. Columbié Navarro, A (tutor). Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2004. 83p.
- HOASSIN M. A. Radiation-conduction interaction on mixed convection from a horizontal circular cylinder. *Heat and Mass Transfer* 35 .1999 307-314 p.
- ISACHENKO, V. P. *Heat Transfer*. Barcelona: Editorial Marcombo. S.A de Boixareu, 1973.
- KERN, D. Q. *Procesos de transferencia de calor*. La Habana: Instituto cubano del libro, 1969.
- LAMORÚ URGELLÉS, M. *Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico para diferentes condiciones de trabajo*. Góngora, E, Columbié, A. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2008. 54p.

- Manual de Operaciones de la planta Hornos de Reducción de la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara", 1985. 219 p.
- MAHFOUZ, F. M. *Transient free convection from a horizontal cylinder placed in a micropolar fluid*. Heat and Mass Transfer 39, 2003. pp. 455–462.
- MESAROVICH, M. *Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas*. URSS: Editorial MIR., 1996.
- MOLLA, M. *Natural convection flow from an isothermal horizontal circular cylinder with temperature dependent viscosity*. Heat Mass Transfer 41, 2004. pp. 594–598.
- NAUMENKO, Y. V. *Numerical calculation of the flow regimes of a fluid partially filling a horizontal rotating heat-exchange cylinder*. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 74, No. 3, 2001. pp. 736-744.
- NAZAR, R. *Mixed convection boundary-layer flow from a horizontal circular cylinder with a constant surface heat flux*. Heat and Mass Transfer 40, 2004. pp. 219–227.
- OLIVAS, P. *On unsteady electrochemical coating of a cylinder at moderately large Reynolds number*. Journal of Applied Electrochemistry 27, 1997. pp. 1369-1379.
- PAVLOV, K. F. *Problemas y ejemplos para el Curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química*. Moscú: Editorial Mir, 1976. 610 p.
- PERRY ROBERT, H. *Chemical Engineers Handbook*. La habana: Edición Revolucionaria. 1967.
- QUINTERO GONZÁLEZ, E.; Verdecia Reyes, A. *Construcción de un enfriador cilíndrico rotatorio a escala de laboratorio*. Ever Góngora Leyva; Ángel Oscar Columbié Navarro. (tutores) Trabajo de diploma. ISMMM. 2008. 60 h.
- RABELL GONZALEZ D. *Evaluación de los Enfriadores de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Manuel Valle Matos; Manuel García Pérez; Margarita Penedo Medilla. Trabajo de diploma. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. 1998. 65 h.
- RETIRADO MEDIACEJA, Y. *Modelación matemática del proceso de enfriamiento del mineral laterítico en la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara"*. Ever Góngora (Tutor) Tesis de Grado. ISMMANJ. Moa. 2004.



SVERDLIK G. I. Gregoreu G. G. Peculiaridades del paso del movimiento de materiales en un tambor rotatorio a un régimen de cataratas. Revista Ts.M.1979. No.1pp.9-12.

VALLE MATOS M. ; et all. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara" de Moa (1). *Tecnología Química* Vol. XX, No. 1, 2000.

Metodología de evaluación de los enfriadores de mineral de la Empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara".

$n := 0, 1.. 6$

1. Masa aparente del mineral dentro del tambor

Flujo másico de mineral

Tiempo de retención del mineral

$M_{\text{mineral}_n} :=$

TR := 54 min

Masa aparente del mineral dentro del tambor

$$Mm_n := M_{\text{mineral}_n} \cdot TR$$

$Mm_n =$

$29 \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$
$37.80 \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$
$38.80 \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$
$39 \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$
$40.07 \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$
$40.25 \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$
$40.67 \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$

$2.61 \cdot 10^4$	kg
$3.402 \cdot 10^4$	
$3.492 \cdot 10^4$	
$3.51 \cdot 10^4$	
$3.606 \cdot 10^4$	
$3.623 \cdot 10^4$	
$3.66 \cdot 10^4$	

2. Volumen aparente del mineral dentro del tambor

Densidad del mineral

Volumen aparente del mineral

$$\rho_{\text{mineral}} := 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Vm_n := \frac{Mm_n}{\rho_{\text{mineral}}}$$

$Vm_n =$

$3.263 \cdot 10^4$	L
$4.253 \cdot 10^4$	
$4.365 \cdot 10^4$	
$4.388 \cdot 10^4$	
$4.508 \cdot 10^4$	
$4.528 \cdot 10^4$	
$4.575 \cdot 10^4$	

3. Volumen del enfriador (Ve):

$D := 3.080\text{m}$

Diámetro del enfriador

$Le := 30\text{m}$

Longitud del enfriador

$$Ve := \pi \cdot D^2 \cdot \frac{Le}{4}$$

Volumen del enfriador

$$Ve = 2.235 \times 10^5 \text{ L}$$

4. Por ciento de llenado aparente:

$$\%LL_n := Vm_n \cdot \frac{100}{Ve}$$

$\%LL_n =$

14.596
19.025
19.529
19.629
20.168
20.258
20.47

5. Sección ocupada por el mineral:

$$So_n := \%LL_n \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{400}$$

$So_n =$

1.088	m^2
1.417	
1.455	
1.463	
1.503	
1.509	
1.525	

6. Altura aparente de la capa de mineral dentro del enfriador:

Para la estimación de la altura de la capa de mineral en la tabla 1-5a de Perry con:
Radio del enfriador

se determinó:

$$b_n :=$$

Coeficiente que depende de la relación $\frac{S_{0n}}{R_{cooler}^2}$

$$R_{\text{cooler}} := \frac{D}{2}$$

$$h_n := R_{\text{cooler}} \cdot b_n$$

Altura aparente de la capa de mineral

$$\frac{S_{0n}}{R_{\text{cooler}}^2} =$$

$$h_n = \boxed{0.627} \text{ m}$$

$$C_c := R_{\text{cooler}} \cdot 1.7820$$

0.407
0.49
0.5
0.502
0.509
0.512
0.514

0.459
0.598
0.614
0.617
0.634
0.636
0.643

0.627
0.755
0.77
0.773
0.784
0.788
0.792

m

$$\theta := 126 \cdot \text{deg}$$

$$C_C = 2.744 \text{ m}$$

7. Velocidad de superficie del tambor:

$$N_c := 6.3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$V_C := \pi \cdot R_{\text{cooler}} \cdot \frac{N_C}{30}$$

$$N_c = 6.3 \frac{1}{s}$$

$$V_c = 1.016 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

8. Angulo de inclinación del mineral debido al movimiento del tambor:

Según Andreiev:

$$\alpha := \arccos \left(\frac{V_c^2}{R_{\text{cooler}} \cdot g} \right)$$

Como se puede observar según Andreiev el ángulo de inclinación solo depende de la velocidad del cilindro, ya que las demás variables son constantes, para el caso de estudio.

$$\alpha = 86.081\text{deg}$$

Luego:

$$\theta'' := 2 \cdot [(\alpha + \theta) - 180 \cdot \text{deg}]$$

$$\theta'' = 64.162\text{deg}$$

$$h'' := \left(1 - \cos\left(\frac{\theta''}{2}\right) \right) \cdot R$$

$$h'''' := R \cdot \sin(90.\text{deg} - \alpha)$$

$$h''' = 0.038 \text{ K}$$

$$h'' = 0.085 \text{ K}$$

Ángulo de inclinación aparente del mineral en la zona de perturbación del enfriador, θ' ; °

Altura aparente en la capa de mineral en la zona de perturbación del enfriador, h' , h''' ; m

9. Longitud de la zona de perturbación (L1):

$$\sigma := 20 \cdot \text{deg}$$

Ángulo de reposo.

$$L1 := \frac{R + h''' - h''}{\tan(\sigma)}$$

$$L1 = 1.398 \text{ K}$$

10. Área de transferencia de calor en contacto con el mineral:

$$Am1 := R_{\text{cooler}} \cdot \theta \cdot Le$$

$$Am1 = 101.599 \text{ m}^2$$

11. Área del tambor (At):

$$At := \pi \cdot D \cdot Le$$

$$At = 290.283 \text{ m}^2$$

12. Área del tambor que no está en contacto con el mineral será:

$$Am2 := At - Am1$$

$$Am2 = 188.684 \text{ m}^2$$

13. Área de transferencia de calor sumergida:

Según Perry:

Altura del agua en la piscina, H; m

$$H := 1.1 \text{ m}$$

$$\beta := 2 \cdot \arccos \left[1 - \left(\frac{H}{R_{\text{cooler}}} \right) \right]$$

Ángulo de inclinación aparente, β ; °

$$\beta = 147.573 \text{ deg}$$

$$As := R_{\text{cooler}} \cdot \beta \cdot Le$$

$$As = 118.994 \text{ m}^2$$

Cálculos térmicos:

14. Flujo de calor extraído del mineral (Q):

$$Cp_{\text{mineral}} := 934 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Calor específico del mineral

$$Te_n :=$$

$$Ts_n :=$$

Temperatura de entrada del mineral al cilindro

Temperatura de salida del mineral al cilindro

981.68K
1004K
1012K
1020K
1025K
1033K
1038K

434.16K
450.78K
464.49K
476.68K
512.68K
534.67K
539.86K

$$Q_n := M_{\text{mineral}_n} \cdot C_{p\text{mineral}} \cdot (T_{en} - T_{sn})$$

$$Q_n =$$

4.119·10 ⁶	W
5.425·10 ⁶	
5.511·10 ⁶	
5.497·10 ⁶	
5.326·10 ⁶	
5.204·10 ⁶	
5.256·10 ⁶	

15. Cantidad de calor que se transfiere por radiación:

NOTA: Por ser el mineral reducido de color negro debido al efecto del polvo y al apantallamiento del eje central.

e1 := 0.9 Coeficientes que varían según el calor del mineral reducido, e1, e2, F₁₂

e2 := 0.9

F₁₂ := 0.9

$$\Delta Z_n := A1_n := C_c \cdot \Delta Z_n \quad A2_n := R_{\text{cooler}} \cdot (\pi - \theta) \cdot \Delta Z_n$$

2.2·m
1.3·m
1.3·m
3.9·m
5.1·m
5.1·m
11.1·m

$$A1_n =$$

6.037
3.568
3.568
10.703
13.996
13.996
30.462

m²

$$A2_n =$$

3.193
1.887
1.887
5.661
7.402
7.402
16.111

m²

Longitud del cilindro, Z_n;m

Áreas de transferencia de calor, A₁y A₂; m²

Temperatura
del mineral

$$Tm_n :=$$

981.68K
1004K
1012K
1020K
1025K
1033K
1038·K

Temperatura
de la pared

$$Tp_n :=$$

357.33K
363.33K
370.00K
365.33K
343.33K
343.67K
336.68K

Constante de Stefan Boltzman

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

$$Q_{rad_n} := \sigma \cdot \frac{(T_{m_n})^4 - (T_{p_n})^4}{\frac{1 - e_1}{e_1 \cdot A_{1n}} + \frac{1}{F_{12} \cdot A_{1n}} + \frac{1 - e_2}{e_2 \cdot A_{2n}}}$$

$$Q_{rad_n} =$$

2.181·10 ⁵
1.41·10 ⁵
1.455·10 ⁵
4.511·10 ⁵
6.039·10 ⁵
6.232·10 ⁵
1.384·10 ⁶

W

16. Cantidad de calor que se transfiere por conducción:

$$Q_{condT_n} := \sum_{n=0}^6 Q_n - \sum_{n=0}^6 Q_{rad_n} \quad Q_{cond_n} := Q_n - Q_{rad_n}$$

$$Q_{condT_n} =$$

3.277·10 ⁷
3.277·10 ⁷
3.277·10 ⁷
3.277·10 ⁷
3.277·10 ⁷
3.277·10 ⁷
3.277·10 ⁷

W

$$Q_{cond_n} =$$

3.901·10 ⁶
5.284·10 ⁶
5.366·10 ⁶
5.046·10 ⁶
4.722·10 ⁶
4.581·10 ⁶
3.872·10 ⁶

W

17. Intensidad de flujo de calor en la zona de la pared del enfriador en contacto con el mineral (Ic):

$$L_n := \frac{Am_{1n}}{R_{cooler} \cdot \theta \cdot L_n} \quad I_{c_n} := \frac{Q_{cond_n}}{Am_{1n}}$$

2.2 m
3.5 · m
4.8 · m
8.7 · m
13.8 · m
18.9 · m
30 · m

$$Am_{1n} =$$

7.451
11.853
16.256
29.464
46.736
64.007
101.599

m²

$$I_{c_n} =$$

5.236·10 ⁵
4.458·10 ⁵
3.301·10 ⁵
1.713·10 ⁵
1.01·10 ⁵
7.157·10 ⁴
3.811·10 ⁴

$\frac{W}{m^2}$

Área de transferencia de calor en contacto con el mineral, Am1; m²

18. Intensidad de flujo de calor en la zona de la pared del enfriador que no está en contacto con el mineral (Inc):

$$Am2_n := At - Am1_n \quad Inc_n := \frac{Q_{rad_n}}{Am2_n}$$

$$Am2_n =$$

282.833
278.43
274.027
260.819
243.548
226.276
188.684

m²

$$Inc_n =$$

771.004
506.553
530.905
1.729·10 ³
2.479·10 ³
2.754·10 ³
7.337·10 ³

$\frac{W}{m^2}$

Área del tambor que no esta en contacto con el mineral, Am2; m²

19. Cantidad de calor que se transfiere por la piscina (Qtpisc):

$$Q_{tpisc_n} := R_{cooler} \cdot L_n \cdot [0.5 \cdot (\beta + \theta'') \cdot Inc_n + 0.5 \cdot (\beta - \theta'') \cdot Inc_n]$$

$$Q_{tpisc_n} =$$

3.28·10 ⁶
4.442·10 ⁶
4.511·10 ⁶
4.257·10 ⁶
4.006·10 ⁶
3.907·10 ⁶
3.5·10 ⁶

W

$$Q_n - Q_{tpisc_n} =$$

8.396·10 ⁵
9.834·10 ⁵
1·10 ⁶
1.241·10 ⁶
1.32·10 ⁶
1.297·10 ⁶
1.756·10 ⁶

W

20. Coeficiente de transferencia de calor del mineral hacia la pared del shell (Umin)

$$U_{min_n} := \frac{Q_{cond_n}}{Am1_n \cdot (T_{m_n} - T_{p_n})}$$

$$U_{min_n} =$$

838.692
695.863
514.169
261.622
148.225
103.819
54.337

$\frac{W}{m^2 K}$

21. Coeficiente de transferencia de calor de la pared del shell a la piscina (Upisc):

$$tp := 357.2 \text{ K} \quad tpisc := 346.2 \text{ K}$$

$$Upisc_n := \frac{Qtpisc_n}{As \cdot (tp - tpisc)}$$

$$Upisc_n =$$

$2.506 \cdot 10^3$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$3.394 \cdot 10^3$	
$3.447 \cdot 10^3$	
$3.252 \cdot 10^3$	
$3.061 \cdot 10^3$	
$2.985 \cdot 10^3$	
$2.674 \cdot 10^3$	

22. Cantidad de agua que se evapora en la zona no sumergida (mv):

Flujo de agua Calor específico del agua Temperatura de entrada del agua

$$M_{agua_n} :=$$

$$Cp_{agua_n} :=$$

$$Tea_n :=$$

Temperatura a la que sale el agua

$20.04 \frac{kg}{s}$
$21.14 \frac{kg}{s}$
$22.25 \frac{kg}{s}$
$22.60 \frac{kg}{s}$
$30.15 \frac{kg}{s}$
$34.24 \frac{kg}{s}$
$36.43 \frac{kg}{s}$

$4192 \frac{J}{kg \cdot K}$
$4193 \frac{J}{kg \cdot K}$
$4195 \frac{J}{kg \cdot K}$
$4195 \frac{J}{kg \cdot K}$
$4197 \frac{J}{kg \cdot K}$
$4197 \frac{J}{kg \cdot K}$
$4197 \frac{J}{kg \cdot K}$

346.01 K
347.70 K
349.51 K
349.59 K
352.06 K
352.28 K
352.73 K

$$Tsa_n :=$$

346.2 K
346.2 K
346.2 K
346.2 K
346.2 K
346.2 K
346.2 K

$$Q_{\text{absagua}_n} := M_{\text{agua}_n} \cdot C_{p_{\text{agua}_n}} \cdot (T_{\text{sa}_n} - T_{\text{ea}_n})$$

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

1.596·10 ⁴
-1.33·10 ⁵
-3.09·10 ⁵
-3.214·10 ⁵
-7.415·10 ⁵
-8.737·10 ⁵
-9.984·10 ⁵

W

$$\lambda_{\text{vap}_n} :=$$

Calor latente de vaporización
a la temperatura de la pared; λ_{vap}

540.8	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$
540.8	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$
540.8	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$
540.8	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$
540.8	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$
540.8	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$
540.8	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$
540.8	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

$$mv_n := \frac{Q_n - Q_{\text{absagua}_n}}{\lambda_{\text{vap}_n} + C_{p_{\text{agua}_n}} \cdot (T_{p_n} - t_{\text{pisc}})} \quad \text{Masa de agua evaporada}$$

$$mv_n =$$

1.776	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
2.379	
2.462	
2.482	
2.694	
2.697	
2.812	

23. Volumen de agua vaporizada (Vv):

$$\rho_{\text{agua}_n} := \text{Densidad del agua}$$

976.563	$\cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
975.61	$\cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
974.659	$\cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
974.659	$\cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
972.763	$\cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
972.763	$\cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
972.763	$\cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$Vv_n := mv_n \cdot (360 \cdot \text{deg} - \beta) \cdot \frac{1}{N \cdot \rho_{\text{agua}_n}}$$

$$Vv_n =$$

6.742	$\frac{\text{s}}{\text{m} \cdot \text{kg}}$
9.042	liter
9.366	
9.441	
10.268	
10.279	
10.718	

$$Vv_n =$$

6.742·10 ⁻³	$\frac{\text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{kg}}$
9.042·10 ⁻³	
9.366·10 ⁻³	
9.441·10 ⁻³	
0.01	
0.01	
0.011	

Suponiendo que en el tambor se produce una vaporización uniforme, el espesor de la capa de agua vaporizada será ().

$$\psi_n := \frac{V_{Vn}}{A_t - A_s}$$

$$\psi_n =$$

0.039	s
0.053	m·kg
0.055	
0.055	
0.06	
0.06	
0.063	

Balance de masa y energía del flujo amoniacal de entrada y de salida de los tanques de contacto:

24. Cálculo del flujo másico de entrada del mineral en kg.

Donde:

$$f := 0.92 \quad M := 420 \cdot \text{tonne} \quad f_c := 0.862$$

$$m_{e.MR} := M \cdot f \cdot f_c \quad m_{e.MR} = 3.331 \times 10^5 \text{ kg}$$

25. Cálculo del calor con que entra el mineral reducido a la canal en J.

$$C_{pMR} := 0.98 \cdot \frac{J}{\text{tonne} \cdot K} \quad n := 0, 1 \dots 3$$

$$Q_{1n} := m_{e.MR} \cdot C_{pMR} \cdot T_{e.MRn}$$

$$Q_{1n} =$$

1.707·10 ⁵	J
1.609·10 ⁵	
1.544·10 ⁵	
1.446·10 ⁵	

$$T_{e.MRn} :=$$

523·K
493·K
473·K
443·K

Flujo de entrada del mineral reducido ; kg

Calor específico del mineral de entrada C_{pMR} ; $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Temperatura de entrada del mineral reducido $T_{e.MR}$; K

26. Cálculo del flujo másico de licor amoniacal de entrada a la canal en kg.

$$R_{LS} := 6.617 \quad T_{e.LC} := 303 \cdot \text{K}$$

$$m_{e.L_n} := R_{LS} \cdot m_{e.MR} \quad C_{pLC} := 0.68 \cdot \frac{\text{J}}{\text{tonne} \cdot \text{K}}$$

$$n := 0, 1 \dots 3$$

$$m_{e.LC_n} :=$$

2258.1·tonne
2220·tonne
2188.1·tonne
2168·tonne

27. Cálculo del calor que lleva consigo el flujo de licor amoniacal al entrar a la canal en J.

$$Q_{2_n} := m_{e.LC_n} \cdot C_{pLC} \cdot T_{e.LC}$$

$$Q_{2_n} =$$

4.653·10 ⁵	J
4.574·10 ⁵	
4.508·10 ⁵	
4.467·10 ⁵	

Flujo de entrada de licor amoniacal a los tanques de contacto ;kg

Calor específico del Lcr-NH3 a la entrada de los TC, C_{pLC} ; $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Temperatura de entrada del Lcr-NH3 a la canal, $T_{e.LC}$; K

28. Cálculo de la cantidad de calor con la que sale la mezcla de mineral reducido y licor amoniacal en J.

$$C_{pmez_n} :=$$

$0.77 \cdot \frac{J}{tonne \cdot K}$
$0.763 \cdot \frac{J}{tonne \cdot K}$
$0.759 \cdot \frac{J}{tonne \cdot K}$
$0.755 \cdot \frac{J}{tonne \cdot K}$

$$T_{mez_n} :=$$

318·K
317·K
316·K
313·K

$$C_{p_{evap.LC}} := 0.57 \cdot \frac{J}{tonne \cdot K} \quad T_{evap.LC} := 100 \cdot K$$

Calor específico de evaporación del amoníaco; $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

Temperatura de evaporación del amoníaco $T_{evap.LC}$; K

$$\lambda := 2258 \cdot \frac{J}{tonne}$$

Calor latente de evaporación del amoníaco λ ; $\frac{kJ}{kg}$

29. Cálculo del flujo másico de amoníaco que se evapora en kg.

$$B_n := m_{e.MR} \cdot C_{pMR} \cdot T_{e.MR_n} + m_{e.LC_n} \cdot C_{pLC} \cdot T_{e.LC}$$

$$Y_n := (m_{e.MR} + m_{e.LC_n}) \cdot C_{pmez_n} \cdot T_{mez_n}$$

$$m_{evp.LC_n} := \frac{B_n - Y_n}{\lambda + C_{p_{evap.LC}} \cdot T_{evap.LC} - C_{pmez_n} \cdot T_{mez_n}} \quad m_{evp.LC_n} =$$

723.891	kg
393.746	
260.903	
122.538	

Nota: Los valores de calores específicos con los que se trabajó fueron tomados del Incrúpela y el balan de masa y energía de flujo amoniacal se realizó para una hora de trabajo

Figura 2

Resultados de los parámetros calculados en el enfriador de mineral # 9.

Parámetros	Valor calculado	Unidad de medida	Ecuación
Mm	$3.924 \cdot 10^4$	kg	(2.1)
Vm	49.046	m^3	(2.2)
Ve	223.518	m^3	(2.3)
%LL	21.943	%	(2.4)
So	1.635	m^2	(2.5)
h	0.841	m	(2.6)
C	2.744	m	(2.7)
θ	126	$^{\circ}$	(2.7)
V	1.015	m/s	(2.8)
α	86.082	$^{\circ}$	(2.9)
θ''	64.164	$^{\circ}$	(2.10)
h''	0.235	m	(2.11)
h'''	0.105	m	(2.12)
$L1$	3.874	m	(2.13)
$Am1$	101.599	m^2	(2.14)
At	290.283	m^2	(2.15)

Am_2	188.684	m^2	(2.16)
β	147.573	$^{\circ}$	(2.17)
As	118.994	m^2	(2.18)
Q	$4.091 \cdot 10^6$	W	(2.19)
$\underline{A1}$	10.703	m^2	(2.20)
$\underline{A2}$	5.651	m^2	(2.21)
$\underline{Qrad}$	$1.805 \cdot 10^5$	W	(2.22)
Q_{cond}	$3.209 \cdot 10^6$	W	(2.23)
$\underline{Ic}$	$1.089 \cdot 10^5$	W / m^2	(2.24)
$\underline{Inc}$	$3.383 \cdot 10^3$	W / m^2	(2.25)
$\underline{Qtpisc}$	$2.729 \cdot 10^6$	W	(2.26)
$\underline{U_{min}}$	241.491	$W / m^2 K$	(2.27)
$\underline{Upisc}$	$2.085 \cdot 10^3$	$W / m^2 K$	(2.28)
mv	0.518	kg / s	(2.29)
Vv	0.313	L	(2.30)
ψ	$1.826 \cdot 10^{-6}$	m	(2.31)
$\underline{m_{evap}}$	0.36	t/h	(2.44)

Nota: Los parámetros subrayados son los medios de todos los valores calculados.

Figura 3

Empleados	Tipo de Hora	Horas	Tarifa	Importe
Eugenio Devanes Sánchez	Hora Extra	2.0	\$2.910	\$5.82
Eugenio Devanes Sánchez	Hora Normal	6.0	\$2.910	\$17.46
Eugenio Devanes Sánchez	Hora Normal	8.6	\$2.910	\$25.22
Adolis Leyva Castaño	Hora Normal	8.7	\$2.910	\$25.22
Adolis Leyva Castaño	Hora Extra	10.0	\$2.910	\$34.92
Raul Labañino Moreno	Hora Extra	2.0	\$3.17	\$7.608
Raul Labañino Moreno	Hora Normal	6.0	\$3.17	\$19.02
Raul Labañino Moreno	Hora Normal	8.7	\$3.17	\$27.473
José A. Rojas Oliveros	Hora Normal	6.0	\$3.17	\$19.02
Miguel Aguirre Breff	Hora Normal	8.7	\$3.02	\$26.27
Miguel Aguirre Breff	Hora Extra	10.0	\$3.02	\$36.24
Ciro M. Hechevarria Nicot	Hora Normal	6.0	\$2.85	\$17.10
Armando G. Cstañeda	Hora Extra	2.0	\$2.85	\$6.84
Armando G. Cstañeda	Hora Normal	6.0	\$2.85	\$17.10
Armando G. Cstañeda	Hora Normal	8.7	\$2.85	\$24.70
Wilfredo Silot Silot	Hora Extra	2.0	\$2.84	\$6.81
Wilfredo Silot Silot	Hora Normal	6.0	\$2.84	\$17.04
Wilfredo Silot Silot	Hora Normal	8.7	\$2.84	\$24.61
Osmani Torres González	Hora Normal	8.7	\$2.85	\$24.70
Osmani Torres González	Hora Extra	10.0	\$2.85	\$34.20
Total Mano de Obra		134.67		\$418.45

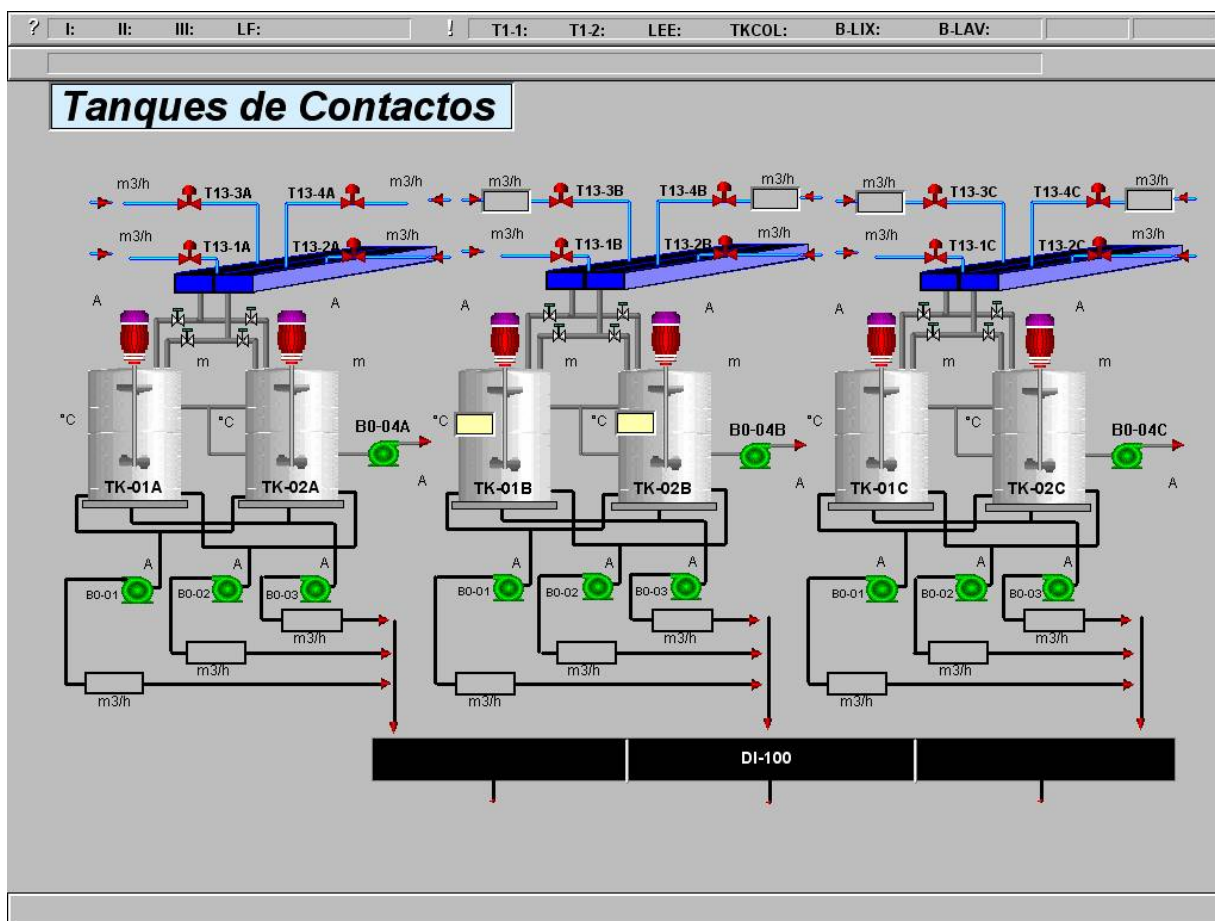
Figura 4

Material	Cantidad	UM	Precio	Importe
Electrodo FOXEVA7S 7018 4MM	10	kg	\$1.905	\$19.05
Tornillo Hexag. M30X160 INOX 310DIN	18	uno	\$27.45	\$494.029
Contratuerca M30 Exagonal DIN.936	18	uno	\$4.98	\$89.68
Tornillo C/Tuerca M20X60 8.8	24	uno	\$0.42	\$10.04
Muñón 002-4945 EG 225 0529 Hornos	2	uno	\$82.69	\$165.38
Nucleo EG 225 0529 Hoja #20 002-4945	1	uno	\$359.98	\$359.98
Pasador 002-9879 Hornos	3	uno	\$11.086	\$33.26
Electrodo E-316L 4MM	5	kg	\$13.782	\$68.91
Placa soporte EG 225 0529	1	uno	\$124.92	\$124.92
Cojinete 002-4945(7) EG225.0529 Hnos	3	uno	\$217.330	\$651.99
Tuerca de Acero INOX. M30 HEXNAL	18	uno	\$4.823	\$86.81

Raspador Modificado 002 D271 (EG 225)	1	uno	\$690.27	\$690.27
Ensamble Marca M2(CRUSETA) 002 C873	5	uno	\$709.65	\$3548.26
Buje 41X46 002 D037(EG 225 0529)	12	uno	\$11.52	\$138.24
Pata Articulada 002-M255 (EG-225-0529)	5	uno	\$382.57	\$1912.84
Total de Materiales				\$8393.66

Figura 5

Esquema de los tanques de contacto



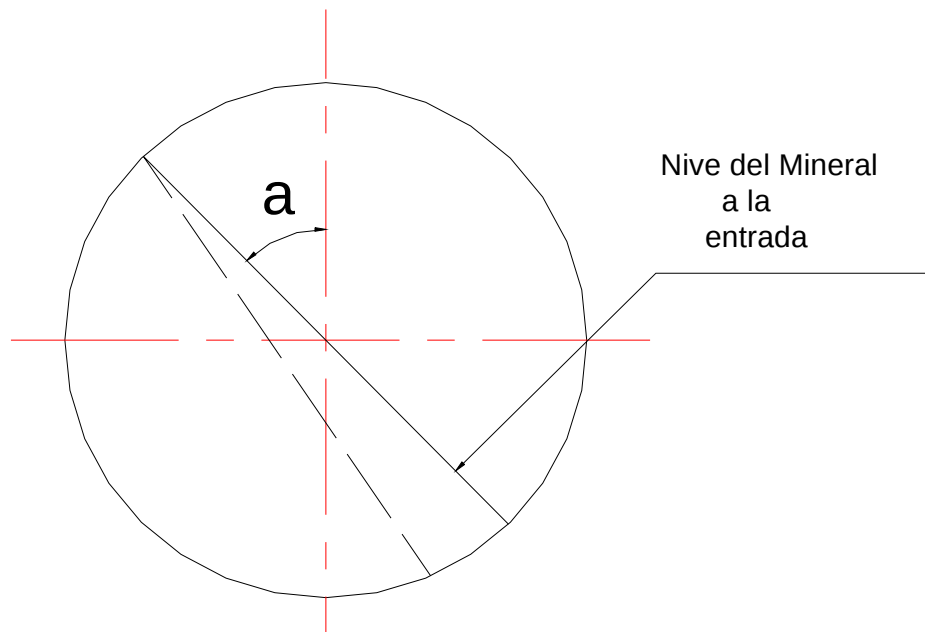


Figura 6: Vista frontal del enfriador de mineral en la zona de perturbación.

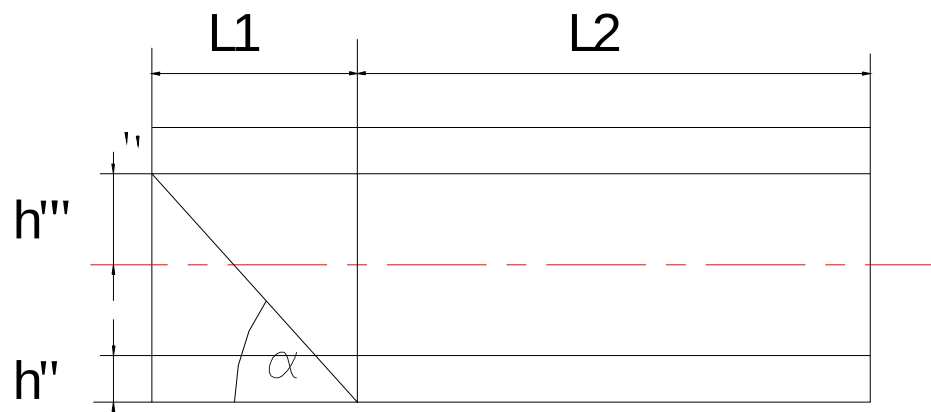


Figura 7: Vista lateral de los enfriador de mineral en operación

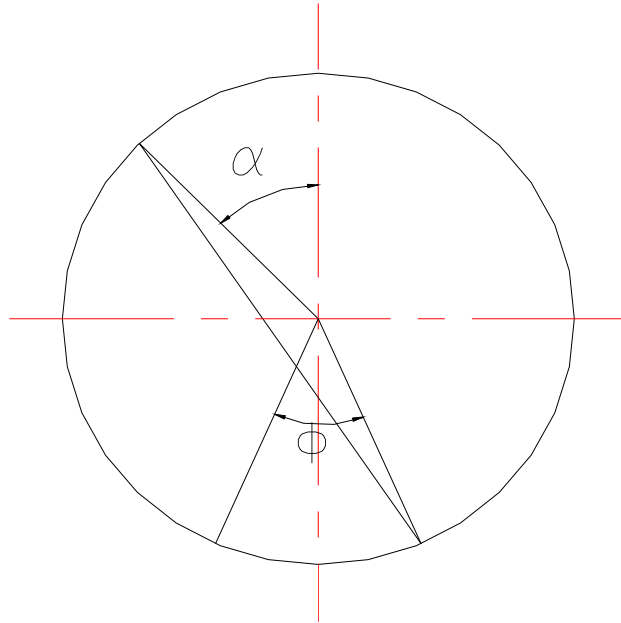


Figura 8: Vista frontal de los enfriador de mineral en reposo

Figura 9. Valores de las mediciones tomadas

Tpn (K)	Tea (K)	Tem (K)	Tsm (K)	Mm (kg)
357,33	346,01	981,68	434,16	21600
363,30	347,7	1004	450,78	34020
370,00	349,51	1012	464,49	34920
365,33	349,59	1020	476,68	35100
343,33	352,28	1025	512,68	36060
343,67	352,3	1033	534,67	36230
336,66	352,73	1038	539,86	36600

Figura 10. Esquema de la planta de Hornos de Reducción

