

Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Ingeniería Mecánica

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Evaluación del proceso de enfriamiento de mineral reducido en la empresa "Cmdte. René Ramos Latour" de Nicaro.

Diplomante: Yaril Pupo Revé.

Tutores: Ms.C. Ever Góngora Leyva.

Ms.C. Marbelis Lamorú Urgellés.

Ing. Mauricio Ricardo Pisitelle.

Año 52 de la Revolución

MOA-2010

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Diplomante: Yaril Pupo Revé

Tutor: Ms.C. Ever Góngora Leyva

Autores de este trabajo de diplomado titulado: Evaluación del proceso de enfriamiento de mineral reducido en la empresa “Cmdte. René Ramos Latour” de Nicaro, certifican su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez, el cual podrá servir de uso con fines docentes y sin ánimo de lucros.

Firma del Diplomante

Firma del Tutor

Yaril Pupo Revé

Ms.C. Ever Góngora Leyva

AGRADECIMIENTOS

A mi querida madre, que me dio la vida y el cariño incondicional y todo lo que tengo se lo debo a ella. A mi padre que a pesar de no vivir conmigo, siempre me brindó apoyo y ánimo en momentos difíciles. A mis hermanos, abuelos y familiares que siempre confiaron en mí y me dieron fuerzas para seguir este camino. Al tutor Ever que a pesar de tener que dedicarle días enteros a su labor, supo planificarse para resolver todas mis inquietudes y permitir que esta tesis saliera adelante. A la profesora Marbelis que sin su ayuda no hubiese sido posible la realización de este trabajo. A mis amigos y aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron a la realización de esta labor. A la revolución que nos brinda la oportunidad de hacer posible nuestros sueños.

A todos muchas gracias...

PENSAMIENTO

El pueblo más feliz es el que tenga mejor educado a sus hijos en la instrucción del pensamiento y en la dirección de los sentimientos. Un pueblo instruido ama el trabajo y sabe sacar provecho de él. Un pueblo virtuoso vivirá más feliz y más rico que otro lleno de vicios y se defenderá mejor de todo ataque.

José Martí.

Resumen

La presente investigación se realizó con el objetivo de evaluar el proceso de enfriamiento de mineral en cilindros horizontales rotatorios y determinar el comportamiento de los coeficientes globales de transferencia de calor.

Se realizó la revisión bibliografía y análisis de los trabajos precedentes que abordan la temática estudiada, valorando el estado actual del proceso de enfriamiento.

Luego se estableció el modelo teórico para el proceso de enfriamiento en los cilindros rotatorios de la planta hornos de reducción, así como el procedimiento de cálculo para la solución del mismo, realizándose la identificación previa de los coeficientes globales de transferencia de calor y consumo de agua en la piscina, utilizando para ello los resultados experimentales obtenidos en la instalación.

En el trabajo se refleja la valoración económica e impacto ambiental asociados al proceso emitiéndose las conclusiones y recomendaciones, las bibliografías consultadas y anexos.

Abstract

The present investigation was carried out with the objective of evaluating the process of mineral cooling in rotational horizontal cylinders and to determine the behavior of the global coefficients of transfer of heat.

It was carried out the revision bibliography and analysis of the precedent works that approach the thematic one studied, valuing the current state of the cooling process.

Then the theoretical pattern settled down for the cooling process in the rotational cylinders of the plant reduction ovens, as well as the calculation procedure for the solution of the same one, being carried out the previous identification of the global coefficients of transfer of heat and consumption of water in the pool, using for it the experimental results obtained in the installation.

In the work it is reflected the economic valuation and environmental impact associated to the process being emitted the summations and recommendations, the consulted bibliographies and annexes.

Índice

Contenido	página
Introducción	1
Capítulo I. Marco Teórico de la Investigación	4
1.1- Introducción	4
1.2- Trabajos precedentes	4
1.3- Proceso tecnológico de la industria	11
1.4- Estado actual de la planta de hornos	15
1.5- Efecto de la temperatura de reducción	16
1.6- Mejoras para el enfriamiento	18
1.7- Características técnicas y constructivas del cilindro rotatorio horizontal tipo Baker	20
1.8- Principales causas de averías	26
1.9 - Conclusiones del capítulo	26
Capítulo II. Materiales y Métodos	27
2.1- Introducción	27
2.2- Definición del modelo teórico para el proceso de enfriamiento	27
2.3- Metodología de cálculo para el proceso de enfriamiento	29
2.3.1- Transferencia de calor por conducción	29
2.3.2- Transferencia de calor por convección	30
2.3.3- Cantidad de agua que se evapora	32
2.3.4- Determinación de los coeficientes globales de transferencia de calor	33
2.4- Conclusiones del capítulo	38

Capítulo III. Análisis de los resultados. Valoración económica, e impacto ambiental	39
3.1- Introducción	39
3.2- Identificación de las zonas de transferencia de calor	39
3.3- Resultado de las mediciones	40
3.4- Análisis de los resultados mediante el cálculo	42
3.4.1- Cálculo del flujo de calor	42
3.4.2- Cantidad de agua que se evapora	42
3.4.3- Determinación del flujo de calor y coeficientes de transferencia de calor para cada zona	45
3.5 - Valoración Económica	46
3.6 - Impacto ambiental	48
3.7- Conclusiones del capítulo	51
Conclusiones	52
Recomendaciones	53
Bibliografía	54
Anexos	

Introducción

Uno de los rublos más importante de la economía cubana además del turismo lo constituye la industria del Níquel. En la zona nordeste oriental, en específico la provincia de Holguín, se encuentra la mayor reserva de yacimientos lateríticos de todo el país; en el que existe dos fábricas en funcionamiento para la obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología carbonato – amoniaco: la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara", y la empresa "Cmdte. René Ramos Latour". Esta última, pionera en el níquel cubano y con producción capital 100% cubana, se encuentra ubicada en el poblado de Nicaro municipio de Mayarí.

El proceso productivo de la fábrica está basado en el esquema de lixiviación carbonato amoniacal, o proceso CARON, en el que intervienen seis instalaciones encargadas de reducir el mineral selectivamente a óxido de níquel. El punto de partida es la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos de níquel de Pinares de Mayarí; incorporándose al flujo tecnológico de la planta de Preparación de Mineral donde el mineral es secado y homogenizado, dando paso a la molienda con empleo de molinos de bolas quien lo entregará con la granulometría requerida. Luego es bombeado a la planta de hornos para la reducción en hornos de hogares múltiples y enfriado en cilindros rotatorios semisumergidos en una piscina de agua. De esta forma se prepara la pulpa en tanques de contacto para la lixiviación y lavado donde se obtiene un licor producto enriquecido en níquel y cobalto. Una vez destilado el licor producto con hidrosulfuro de amonio y precipitado el carbonato, se pasa al sistema de Calcinación y Zinter obteniéndose como producto final el óxido de níquel sinterizado.

Por el complejo sistema de instalaciones que componen esta industria, se ha venido trabajando en incrementar la eficiencia de los equipos que se encargan de ejecutar el proceso de obtención del níquel metálico, para hacerla más productiva y competitiva en el mercado internacional. Dentro de la entidad, se puede encontrar los enfriadores de mineral de la Planta de Hornos de Reducción; que cumplen como función fundamental la de enfriar el mineral reducido que proviene de los hornos a una

temperatura entre los 770 y 500 °C hasta una temperatura aproximadamente de 170 °C donde se requiere que el mineral llegue para su posterior Lixiviación.

El proceso de enfriamiento de mineral reducido ha sido objeto de estudio con el objetivo de profundizar sobre los fenómenos que intervienen durante el proceso. Son varios los estudios realizados por Góngora (2004), (2007), (2009) y Lamorú (2008); sobre el proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios horizontales pero todavía no se ha resuelto la problemática en estos equipos de intercambio de calor, de ahí la importancia de la presente investigación.

Debido a la complejidad de operación en la que intervienen los enfriadores de mineral, la situación actual del proceso de enfriamiento en los cilindros rotatorios se caracteriza por las siguientes deficiencias:

- Las limitaciones de los métodos existentes para la selección y cálculo de los parámetros racionales del proceso.
- La baja eficiencia térmica del proceso de transferencia de calor presente en los enfriadores.
- Elevadas temperaturas del mineral a la salida del enfriador (mayores de 240 °C).
- Las limitaciones para realizar las mediciones de las variables a escala industrial, que imposibilita emitir criterios certeros sobre su funcionamiento.

Situación problemática

Desconocimiento del comportamiento de los parámetros y diferentes coeficientes de transferencia de calor, para las condiciones de operación de los enfriadores de mineral de planta nueva y planta vieja de la empresa "Comandante René Ramos Latour" de Nicaro.

Objeto de estudio

El proceso de enfriamiento de mineral reducido en cilindros rotatorios horizontales de la empresa "Cmdte. René Ramos Latour".

Hipótesis

Realizando el estudio detallado de las leyes que rigen la transferencia de calor, será posible obtener el comportamiento de los parámetros que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral reducido y los coeficientes de transferencia de calor en un cilindro rotatorio horizontal para el enfriamiento de mineral reducido.

Objetivo general

- Determinar el comportamiento de los parámetros que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral reducido en los cilindros rotatorios horizontales.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean:

Tareas del trabajo

- Realizar el análisis bibliográfico sobre el proceso de enfriamiento de mineral reducido, que permita el establecimiento del estado actual de la temática.
- Caracterizar el proceso de enfriamiento del mineral.
- Identificar las principales variables del proceso y puntos para su medición.
- Establecer la metodología de cálculo para la evaluación del proceso.
- Análisis de los resultados obtenidos.
- Obtener la valoración económica e impacto ambiental asociados al proceso.

Capítulo I. Marco Teórico de la Investigación

1.1- Introducción

Para la obtención del níquel en la industria, es necesario la reducción del mineral a níquel metálico en la Planta de Hornos con el empleo de hornos de múltiples hogares. Seguido a esto, resulta de gran importancia el enfriamiento del mineral en los cilindros rotatorios horizontales que facilitan el que se efectúe exitosamente el proceso de Lixiviación y Lavado.

Por lo expuesto, el siguiente capítulo tiene como objetivo exponer los fundamentos del estado del arte del proceso de enfriamiento del mineral mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

1.2- Trabajos Precedentes

Con la intervención norteamericana en la península de Lengua de Pájaro en 1942, se inicia la construcción de una planta procesadora de níquel gracias al invento del profesor holandés Hendrikus Caron, logrando su primera producción a finales de 1943. En 1947 la planta cierra sus operaciones para cubrir las necesidades de su industria bélica hasta 1952, que es la fecha oficial que señala el reinicio de las operaciones.

En 1960 la planta fue nacionalizada pasando a ser una de las fuentes principales de divisa para el país. Con el inicio de las relaciones económicas entre Cuba y el campo socialista, la URSS se convierte en el principal mercado del mineral cubano y suministrador de materia prima y colaboración técnica para la rehabilitación de la fábrica niquelífera de Nicaro.

Para el desarrollo de la investigación, se consultaron diferentes bibliografías, que estuvieron dirigidas a aquellos trabajos precedentes que abordan criterios sobre el intercambio de calor en cilindros horizontales rotatorios desde el punto de vista científico, técnico y práctico que se han efectuado en los últimos años.

Resulta muy útil lo aportado por Presillas (1977), quien hace un resumen de las modificaciones realizadas a los enfriadores de mineral en el período de 1943 a 1946. Debido a que los enfriadores de mineral no enfriaban se hicieron varias

modificaciones en el interior, en ninguna de las opciones mejoró notablemente la eficiencia. A partir de 1952 se trató de mejorar el diseño de las vigas con forma Z, para esto se limpio el enfriador por dentro, los levantadores que fueron cortados en 1942 dejaron protuberancias que luego fueron mejoradas y pulidas, el resultado fue que la temperatura del mineral a la salida fue mayor, se asume que la razón del empeoramiento de la eficiencia se debía a que mientras existían las protuberancias, éstas hacían que las vigas en forma de Z subiera, y al bajar golpeará produciendo una vibración, haciendo que la capa adherida a la pared cayera y se mejorara el intercambio. En base a esta idea se diseñó el carro añadiendo la paleta raspadora y manteniendo los raíles de la forma que el peso estuviera concentrado en la parte inferior. Se introdujo vapor al enfriador con el fin de mejorar las extracciones y se observó que la temperatura bajó notablemente.

Con el fin de conocer los efectos que provoca la adición de vapor en los enfriadores de minerales, Alepuz (1977); realiza una evaluación tomando como experimento los enfriadores de mineral 7 y 8 operándose los mismos con 50 lb./h y 200 lb./h de vapor respectivamente. En los resultados se observó que en el cooler 8 la temperatura del mineral y el amperaje era menor que en el No.7. De igual forma, las mediciones hechas del calor desprendido del cooler 7 fueron mayores que la del No.8, efecto que corresponde por habersele suministrado mayor cantidad de vapor al enfriador No.8. Como el mineral en este último estuvo expuesto a una mayor oxidación, el promedio diario de contenido de magnesio también fue mayor, de lo cual se deduce que la cantidad de gases introducidos es un factor fundamental de las concentraciones de H_2 y vapor en el enfriador aunque no de su relación.

Es muy importante la investigación aportada por Rodríguez (1977) dirigidas a los enfriadores de mineral reducido. La misma estuvo orientada al mecanismo de los raspadores interiores de los enfriadores de mineral y su influencia sobre la transmisión de calor. En la investigación quedó demostrado, gráfica y analíticamente la importancia de trabajar con películas finas de mineral reducido en la capa estática donde tiene lugar la transferencia de calor desde la masa de mineral hasta la superficie del enfriador, lo que se obtiene con un correcto diseño de los carros raspadores.

Otra de las contribuciones desarrolladas por Rodríguez (1978), estuvo orientada con el objetivo de analizar teóricamente los cambios que experimentan los mecanismos de transferencia de calor en el enfriador al inyectar vapor de agua al interior del enfriador. Después de realizarse varias pruebas se llegó a las siguientes conclusiones:

- ✓ La adición de vapor de agua al mineral reducido produce la oxidación del hierro por medio de una reacción exotérmica de poca magnitud.
- ✓ Es necesario que el vapor se ponga en contacto con el mineral reducido más caliente.
- ✓ El cambio que se produce en la composición de la fase gaseosa produce un aumento en el calor transferido por convección.
- ✓ El mecanismo de radiación aumenta siendo este cambio el determinante en esta operación.
- ✓ Debe mejorarse el coeficiente de transferencia de calor del enfriador para que el calor de reacción pase al agua y se pueda obtener una reducción neta de calor.
- ✓ La adición de vapor provoca una reducción en el consumo de potencia del enfriador siendo este efecto explotado en la operación de la planta.

Chacón (1982), expone que los raspadores exteriores son también factores influyentes, los Cooler de planta vieja según el original del fabricante poseían un sistema de limpieza exterior constituido por unos cepillos de acero situados a nivel de su diámetro horizontal y la actuación de estos sobre el cuerpo del enfriador era regulado por contrapesos. Estos impedían la formación de costras en el exterior del cuerpo del enfriador, favoreciendo el enfriamiento. Actualmente se ha eliminado en su totalidad y no se tiene constancia que respalde tal decisión.

El informe de Rosell (1986), plantea una serie de causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral dentro de los Cooler. Entre las causas se encuentra la cantidad de carros raspadores: se ha podido conocer que en ambas plantas se acostumbra a no montar el primer carro según los planos del fabricante.

Otro aspecto que influye son las aletas o levantadores (B-300), éstos están por debajo de las cantidades especificadas por el fabricante, las que deben ser 52 en planta nueva y aproximadamente 36 en planta vieja. En cuanto a estos detalles interiores de los enfriadores se puede decir que todos en conjunto contribuyen a darle una mejor movilidad al mineral y con ello facilitar la disminución del gradiente de temperatura existente entre el mineral caliente y el agua en la piscina lo que disminuiría la temperatura de descarga de este a los tanques de contacto.

Agunaoun et al. (1994) mostró, en un estudio de transferencia de calor en película descendente sobre tubos horizontales, que el espesor de la película y la distribución de velocidades esta muy cercana de la teoría de Nusselt para $Re < 500$.

Bui (1997), efectúa un estudio sobre modelos de proceso que influyen en el flujo de fluidos y la transferencia de calor y se extiende a todas las categorías de los procesos encontrados en la industria primaria del aluminio, desde el procesamiento de la materia prima y la reducción, hasta la fundición y el reciclaje. Se incluye una amplia variedad de procesos desde los precipitadores, calcinadores, hornos rotatorios, celdas de reducción y hornos de mezclado y fundición, hasta los hornos de reciclaje y filtración de metales. Se lleva a cabo un repaso del trabajo de modelación, las aplicaciones y necesidades expresadas no solo en el análisis y diseño sino también el control del proceso, optimización y supervisión.

Kahkhar et al. (1997), dedican la atención a la segregación radial de mezclas granulares en los cilindros rotatorios horizontales y analizan la formación de costras en la superficie debido a la densidad del material. El régimen de flujo considerado es una cascada o régimen de flujo continuo donde una capa delgada de sólido fluye a lo largo del cilindro. La esencia de la formación de la costra segregada central consiste en el flujo, el mezclado y la segregación en la capa en el régimen de cascada.

Por otra parte Peng (1998), realiza un estudio donde se analiza la película de condensación laminar en el interior de la pared de un cilindro giratorio con un raspador, con el que obtiene un modelo que mejora la predicción del coeficiente de transferencia de calor y deduce que la velocidad de rotación tiene un efecto

significativo en las características hidrodinámicas y la distribución de los coeficientes de transferencia de calor local.

Gran interés le dedica Hossain (1998), a la interacción de la radiación-conducción en la convección mixta de un cilindro circular horizontal cuando la temperatura de la superficie es uniforme, usando el método de diferencia finita, donde muestra el efecto de los parámetros, como, los números de Planck, la temperatura de la superficie y el coeficiente de transferencia de calor local.

Tunra (1998), encargada para la investigación de las propiedades del mineral concluyó que la conductividad térmica del mineral es deficiente y se reduce con la disminución de la temperatura, de modo que solamente el mineral más próximo al shell es enfriado. Sus recomendaciones son encaminadas a incrementar el área efectiva de los enfriadores o asegurar un buen mezclado de mineral en su interior para obtener una temperatura del mineral a la salida de 150 °C a 38 t/h reducidas.

Correa (2000), realiza un balance energético de 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.

Valle (2000 a, b), hace una evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara" de Moa, mostrando los principales defectos que presentan en su funcionamiento, llegando a las siguientes conclusiones. Por la piscina se transfiere 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.

Naumenko (2001), realiza la determinación numérica de un flujo viscoso bidimensional llevado a cabo por los procesos de intercambio de calor en una superficie libre de un cilindro horizontal estacionario, usando el método de marcador y celda en un sistema de coordenada polar analiza la influencia del número de

Reynolds en el régimen de la pared-capas y en el régimen del flujo circulante que ocurre en la rotación rápida y la rotación lenta.

Ramírez (2001), desarrolla un modelo matemático en el que refleja de forma satisfactoria el comportamiento dinámico del subproceso de postcombustión de un horno de múltiples hogares destinado a la reducción de níquel mediante el esquema carbonato-amoniaco. Utilizando como herramienta de cálculo el "Toolbox" de Identificación de Sistemas del programa MATLAB, para el diseño de un algoritmo de control de la temperatura del hogar 4, donde influye decisivamente la estabilidad del perfil de temperatura del horno.

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. También desarrolla un dispositivo óptico basado en la luz de desviación en un campo de temperatura para examinar las pendientes de temperaturas locales en la capa límite del cilindro giratorio. Por medio de esta investigación Gschwendtner plantea que las velocidades medidas cerca de la pared del cilindro indican la influencia de una pared caliente en la capa límite del espesor y que la velocidad del fluido cercana a una pared caliente es superior debido a que la expansión tiene lugar a temperaturas más altas.

Incropera et al. (2003), aborda la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de masa y calor, donde existe una amplia conceptualización de las leyes y los principios físicos relacionados con la transferencia de calor y constituye un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas.

Mahfouz (2003), investiga el problema de la convección libre de un cilindro isotérmico puesto horizontalmente en un fluido micropolar, en el cual controla los principales parámetros que influyen, como, el número de Rayleigh y de Prandtl con el objetivo de determinar el rango de mayor exactitud con el que deben experimentar.

Wang (2004), realiza un experimento bajo diferentes condiciones de operación con el transporte de gránulo y el tiempo de residencia en un tambor horizontal rotatorio,

con el que demostró que los gránulos pueden ser transportados firmemente y que la velocidad de rotación del tambor afecta el tiempo de residencia del gránulo.

Góngora (2004), establece el modelo teórico para el proceso de enfriamiento en los cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción, así como el procedimiento para la solución del mismo, realizando una identificación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud, utilizando para ello la media de los resultados experimentales obtenidos. En su investigación demuestra que dentro de los parámetros más influyentes en la transferencia de calor del proceso se encuentran la temperatura de entrada y el flujo másico de mineral.

Panday (2005), muestra los resultados experimentales de la transferencia de calor local en un cilindro al caer la película de agua por evaporación. En el cual muestra que el coeficiente de transferencia de calor local aumenta, aumentando la velocidad del flujo de aire y propone correlaciones para coeficientes de baja transferencia de calor en ausencia de flujos sobrepuestos para la región del estancamiento, para región termalmente desarrollada y el fondo del cilindro calentado.

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 a escala piloto. 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, no determinan la eficiencia térmica del mismo y asumen el aire como agente de enfriamiento y no el agua como realmente ocurre en el proceso, estos elementos hacen que el procedimiento expuesto por ellos no tenga el grado de exactitud requerido para la evaluación sistemática de la instalación.

Rodríguez (2007), modela y simula tubos con agujeros circulares para determinar el mecanismo de rotura del tubo en el transportador de mineral laterítico reducido, usando diferentes relaciones diámetro interior y diámetro exterior con el fin de conocer la respuesta en el dominio de las tensiones. En el estudio se analizaron dos variantes, una con agujero rectangular de extremos redondeados y otra con agujero elíptico. Se observó que las tensiones aumentan linealmente en la medida que el

diámetro del agujero se hace mayor y que las tensiones tangenciales máximas ocurren en los concentradores de tensión. En las variantes analizadas la grieta que provoca la ruptura comienza por la parte interior de los agujeros para las mayores relaciones de diámetro interior y diámetro exterior, así como en aquellos lugares donde la concentración de tensiones es mayor.

Sotto (2007), realiza una investigación con el objetivo de evaluar el comportamiento e influencia de los carros raspadores de mineral en el proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios de la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara". En el estudio se preidentificó los coeficientes de transferencia por unidad de longitud utilizando para ello la media de los resultados experimentales obtenidos.

Haciendo uso del procedimiento de cálculo expuesto por Tabera y García (2006); Lamorú en el (2008) estableció el procedimiento de cálculo para la evaluación térmica de la instalación a escala piloto, 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.

Arena (2009), realiza la evaluación del proceso de enfriamiento del mineral reducido en la empresa "Cmdte. René Ramos Latour" con el objetivo de determinar el comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud, basado en el análisis térmico del proceso de enfriamiento del mineral propuesto por Ever en el (2000) y con ello contribuir a elevar la eficiencia térmica del proceso mencionado.

1.3- Proceso tecnológico de la industria

El proceso tecnológico de obtención de óxido de níquel de la empresa Cmdte. René Ramos Latour, está basado en el esquema carbonato amoniacal o proceso CARON como también se le conoce. Este tipo de tecnología tiene varias ventajas entre las que se encuentran:

- 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 aparatos conocidos (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación, etcétera).
- Sus características favorecen la creación de una producción de alto nivel de mecanización y automatización.
- El esquema amoniacal admite la elaboración de la mezcla de los minerales lateríticos y serpentiniticos, mientras que el esquema por lixiviación con el ácido sulfúrico permite solamente la elaboración de minerales lateríticos.

1.3.1- Descripción del proceso tecnológico de la planta de hornos de reducción

La planta de hornos de reducción dentro del proceso de obtención de níquel, tiene como función fundamental la de reducir el óxido de níquel a níquel metálico. Para ello cuenta con 24 hornos de múltiples hogares, dos (2) ciclones en cada horno y cuatro (4) electro filtros con el objetivo de recuperar el mineral que se escapa con los gases, 12 transportadores rotatorios (Jacoby) e igual número de enfriadores. El mineral que procede de la planta de secadero es recepcionado en los silos, cuya capacidad de almacenamiento es de 9000 t de mineral con un 4% de humedad. El llenado de los silos se realiza de forma cruzada para mantener equilibrado el peso y que la estructura no se deforme. Luego es bombeado por bombas neumáticas a presión hacia las tolvas de los hornos, cuya capacidad es 320 t. El mineral es dosificado en la planta de hornos a través de una romana de pesaje automático que pesa el tonelaje de mineral que se alimenta; garantizando una alimentación uniforme al horno donde su capacidad puede llegar hasta 22 t/h y luego mediante un transportador sin fin se alimenta el hogar cero.

El proceso de reducción tiene lugar en un horno de soleras múltiples tipo Herresboff, compuesto por 17 hogares enumerados de arriba hacia abajo, el mismo consiste en un cilindro metálico de 21.43 m de alto y 6,33 m de diámetro que esta cubierto interiormente por un material refractario.

Los hogares se encuentran separados por bóvedas de ladrillos refractarios y la comunicación entre ellos se realiza mediante aberturas existentes en las mismas de tal forma que el mineral va recorriendo todo el interior del horno en forma de zigzag. En el caso de los hogares pares tienen su descarga por las aberturas que se encuentran en la periferia y en los hogares impares por el centro, al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas que mediante la rotación del eje central facilitan el traslado de mineral de un hogar a otro.

La fuente fundamental de elementos reductores (CO y H_2 como elementos mayoritarios) es el petróleo aditivo el cual se mezcla con el mineral antes de ser suministrado al horno, de esta forma es posible obtener una reducción uniforme, con menor tiempo de retención y concentración de los gases reductores.

El proceso de reducción es eminentemente endotérmico. Por este motivo el horno posee una cámara de combustión con quemadores modernos de alta presión (de tecnología PRIOR) para la combustión incompleta del petróleo, los cuales además de ganar calor para lograr el perfil de temperatura enriquece la atmósfera reductora. Dicha cámaras están situadas de forma transversal en los hogares 8, 10, 12, 15 y 6. El horno trabaja con una presión positiva para evitar la entrada de aire que reoxidaría el mineral, lo que se logra manteniendo determinada diferencia de presión entre los hogares 0 y 16.

La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es de 14 kPa, y es facilitada por el uso de ventiladores centrífugos capaces de mantener una operación estable en dicha área, donde cada bloque cuenta con tres de ellos, dos en operación y uno de reserva.

En los primeros hogares el mineral sufre un proceso de calentamiento y deshidratación (H-0/H-4), le sigue una zona de transición (reducción parcial más disociación, (H-5/H-9), mientras que la reducción fuerte comienza en H-10. Un perfil típico del comportamiento de la temperatura.

Hogar	T Gas
H-0	200 a 450 °C

H-4	630 a 770 °C
H-6	630 a 770 °C
H-9	630 a 700 °C
H-11	660 a 720 °C
H-15	720 a 780 °C

A pesar del corto tiempo de retención del mineral en los hornos, durante la reducción del mineral tienen lugar un grupo de reacciones químicas que en su mayoría dependen de un conjunto de variables y parámetros, cuya interacción en el proceso tecnológico determinan los valores de la calidad de níquel extractable como principal indicador de calidad. Dentro de este conjunto se encuentra la temperatura, variable fundamental en los procesos piro metalúrgicos como este, en particular, la del hogar 4 que es donde se alcanza la mayor temperatura de los hogares superiores y el horno en conjunto.

1. $\text{NiO}_{(s)} + \text{CO}_{(H_2)} \rightarrow \text{Ni met} + \text{CO}_2 \text{ (H}_2\text{O)}_{(g)}$
2. $3\text{Fe}_2\text{O}_3_{(s)} + \text{CO}_{(H_2)} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2 \text{ (H}_2\text{O)}_{(g)}$
3. $\text{Fe}_3\text{O}_4_{(s)} + \text{CO}_{(H_2)} \rightarrow 3 \text{FeO} + \text{CO}_2 \text{ (H}_2\text{O)}_{(g)}$
4. $\text{FeO}_{(s)} + \text{CO}_{(H_2)} \rightarrow \text{Fe met} + \text{CO}_2 \text{ (H}_2\text{O)}_{(g)}$

Después de reducido el óxido de níquel y los óxidos superiores de hierro a Ni metálico y hierro metálico según las reacciones anteriores (1, 2, 3, 4), el mineral es descargado del horno al transportador rotatorio. Este a su vez, entrega el mineral a una temperatura entre 650 y 770 °C al enfriador, el cual tiene el objetivo de enfriar el mineral hasta una temperatura por debajo de los 250 °C. Para ello el enfriador posee carros raspadores, los cuales se encargan de remover el mineral y raspar la superficie interior del enfriador evitando así que el mineral se pegue e interfiera en el proceso de transferencia de calor. El enfriador rota sobre la piscina de agua donde esta sale de la piscina a una temperatura aproximada de 70 °C y es enviada hacia la planta eléctrica.

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

1.4- Estado actual de la planta de hornos

A partir de la segunda mitad de la década del 90, comienza un proceso de modernización y nuevas inversiones que han tenido como premisa fundamental el mejoramiento de las condiciones de trabajo y la protección del medio ambiente. Actualmente la planta de Hornos de Reducción de la empresa "Comandante René Ramos Latour" se encuentra en una etapa de modernización de sus instalaciones desde el punto de vista de su automatización y un nuevo sistema de combustión PRIOR, lo que ha permitido su continuidad productiva con el menor consumo de recursos energéticos. En su etapa primaria solo se contempla la medición y registro de algunos parámetros del proceso. Para ello se utiliza el Sistema de Supervisión y Control de Procesos EROS. Versión 5.8.1.21. El sistema de control de la planta de hornos de reducción está formado por 2 paneles de control, distribuidos uno para cada planta.

Cada panel esta compuesto por controles que le permiten al operador controlar y dirigir cada operación a través de 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 entre las que se encuentra: presión y temperatura de los hornos entre otros. A continuación se muestran los parámetros que se registran con sus correspondientes instrumentos de medición y las características técnicas de los mismos.

1. Parámetro: Flujo de mineral alimentado al enfriador.

Equipo: Báscula de pesaje continuo, tipo WESTERDAM.

Características técnicas:

Alimentación: 220 V AC

Entrada: 0 a 18 t/h

Salida: 4 a 20 mA

2. Parámetro: Temperatura del mineral a la salida del enfriador.

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:

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.

3. 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 a 393 K

4. Parámetro: Velocidad de rotación del enfriador

Equipo: Tacogenerador.

Características técnicas:

0 a 8,0 rev/min 0 a 10 V

1.5- Efecto de la temperatura de reducción

En la empresa, son diversos los trabajos investigativos dirigidos a los enfriadores de mineral de la planta de hornos sobre las elevadas temperaturas del mineral a la salida de estos. Para el funcionamiento eficiente del circuito de lixiviación es necesario extraer la mayor cantidad de calor posible que porta el mineral reducido, en los enfriadores rotatorios antes de entrar a los tanques de contacto y para conseguir esto, es necesario mantener la eficiencia térmica en su máximo valor

posible. Con el diseño existente, que no puede ser mejorado desde el punto de vista de transmisión de calor, es vital mantener tanto la superficie exterior como interior lo más limpia posible para evitar la caída notable que provoca una capa de incrustaciones, aún de escaso espesor, que influye sobre el coeficiente total de transmisión de calor. La superficie interior se puede mantener limpia con un mejor diseño y un adecuado mantenimiento del sistema de carros raspadores. Sin embargo, en la superficie exterior donde se incrusta los componentes de la dureza del agua, al precipitar esta por aumento de la temperatura, se forma una película de muy baja conductividad que crea una elevada resistencia a la transferencia de calor en el sistema. Una vez formada las incrustaciones por mal estado de los carros, se produce un aumento en la temperatura de salida del mineral.

Esta dificultad se encuentra en los enfriadores desde su puesta en marcha en 1942; primeramente se empleaban vigas sueltas dentro del enfriador con la idea de que estas rasparan el mineral adherido a la superficie interior, estas vigas fueron sustituidas a propuesta del ingeniero Demetrio Presilla por carros raspadores con el propósito de disminuir las elevadas temperaturas a la salida del mismo. Entre los efectos de las elevadas temperaturas tenemos el aumento del contenido de magnesio en el mineral reducido en la reducción del mineral en los hornos, incrementando las pérdidas de amoníaco en el proceso de lixiviación donde tiene gran repercusión. Para obtener la mayor recuperación de Ni y Co en el proceso carbonato amoniacal, es necesario llevar el proceso al límite de la reducción máxima de Ni y Co metálicos y la mínima del hierro metálico en el proceso de calcinación reductora, demostrado por (CARON, 1950).

El magnesio (Mg) presente en los minerales procesados en la empresa "Comandante René Ramos Latour" se encuentran en forma de óxidos y silicatos, los que una vez sometidos al proceso de reducción, pasan a un estado activo. La cantidad de magnesio libre en función de la temperatura de reducción alcanza su valor más bajo de un 3% a una temperatura de reducción de 850 °C. Según estudios realizados se ha mostrado que a una temperatura aproximadamente de 775 °C, el contenido de magnesio con respecto al alimentado en el proceso de lixiviación disminuye hasta un 4%, para las características mineralógicas estudiadas

y condiciones de reducción. Esto se logra con un control de la temperatura a la salida de los enfriadores. Para minerales muestreados a la descarga de los enfriadores de mineral reducido del proceso industrial de Nicaro, se han obtenido entre un 15.9 y 17.7% de magnesio libre con respecto al alimentado.

1.6- Mejoras para el enfriamiento

Para crear las condiciones en el proceso del enfriamiento del mineral con la ayuda de cilindros rotatorios horizontales o enfriadores, es necesario tener control sobre un sinnúmero de factores que influyen en el proceso de transferencia de calor y que se citan a continuación.

1.6.1- Comprobar que no lleguen residuos de combustibles crudos al enfriador

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

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

- Alimentar el combustible de reducción óptimo. La mejor ventaja es explotar la alimentación directa en H-0.
- Mantener todos los dientes, brazos y bóvedas en buen estado para lograr la mejor combustión en la zona de reducción. Se evita formaciones de gránulos de mineral con gotas de petróleo en su interior que pasan al enfriador y se rompen en la zona caliente generando gases.
- Tomar muestras de mineral en la descarga del horno, enfriarlo rápido y analizar la posibilidad de no existencia de combustible.

1.6.2- Optimizar la función del agua de enfriamiento

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

1.6.3- Análisis de los carros o rastrillos existentes

Este aspecto es decidido para lograr un mejor resultado en la temperatura de descarga. Los resultados prácticos obtenidos sobre el uso de los rastrillos, no son idóneos porque se han mantenido las altas temperaturas a la salida de los enfriadores desde su surgimiento y los motivos que inciden son:

El poco peso de los carros, estructura abierta con muy poca área de fricción y esfuerzos mecánicos creados al tambor.

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

1.6.4- Excentricidad

Este parámetro se logra manteniendo un buen control del funcionamiento del tambor, lo que se obtiene al hacer flotar este en la piscina de agua. Un movimiento desordenado del tambor por una mala excentricidad, por exceso o falta de agua en la piscina trae consigo la formación de rajaduras en la superficie, pasando a la salida de servicio de estos.

Las modificaciones realizadas en el tambor al eliminar las bridas trajeron consigo que al apoyarse el enfriador en sus extremos, se haya endurecido el centro del cilindro trasladándose los esfuerzos céntricos hacia los extremos (cabezales y área cercana a las puertas) donde más tarde comenzaron a existir rajaduras.

1.7- Características técnicas y constructivas del cilindro rotatorio horizontal tipo Baker

Los enfriadores de mineral del tipo Baker son considerados equipos tecnológicos de gran necesidad dentro del proceso productivo fabril. Son del tipo rotatorio, cilíndricos, parcialmente sumergidos en agua contenida en una piscina donde el agua entra por un extremo y fluye a contracorriente con el mineral reducido. Debido a la rotación del equipo se produce la evaporación de una cantidad de agua en la piscina y en la película que queda expuesta a la atmósfera en la mitad más caliente del mismo fundamentalmente. Utilizados para enfriar el mineral reducido que proviene de los hornos de reducción antes de ser mezclado con el licor de contacto para iniciar el proceso de lixiviación, requieren de una atención permanente sobre un grupo de factores que son muy particulares en sus operaciones entre las que pueden citar:

➤ Recirculación del agua

La tecnología carbonato amoniacal es un proceso de tratamiento metalúrgico continuo y los equipos que intervienen en el proceso se mantienen trabajando de forma continua. En el proceso de transferencia de calor, un factor importante lo constituye el agua de enfriamiento que se suministra a la piscina. Dado que el flujo de mineral reducido procedente de los hornos circula por el interior de los enfriadores, siempre se debe tener una recirculación de agua a contracorriente desde la zona fría hacia la caliente, la que puede ser hasta muy pequeña para suplir el agua que se bota. El movimiento de ambos fluidos en estos equipos es continuo, aunque no puede ser constante, pero siempre ambos fluidos estarán en movimiento relativo a la superficie de transferencia de calor. Cuando la temperatura del agua es caliente, mayor de 80 °C, se debe recircular un volumen que permita bajar esta temperatura hasta 65 °C en 1.30 horas aproximadamente.

Cuando la temperatura es baja, entre 62 y 65 °C, se cortará la recirculación lo más que se pueda para que la temperatura suba rápido hasta 70 u 75 °C. De esta forma se logra que el enfriador se mantenga transfiriendo calor hacia el agua permanente.

Si el agua se mantiene en un punto sin variar o variando dos o tre grados, no se efectúa la transferencia de calor necesaria.

➤ Nivel de agua

Es la operación principal, de ello depende la vida del tambor en un 95%. Por su longitud extrema que no soporta apoyarse en los muñones y si le sumamos el peso total del cuerpo, los rastrillos y el mineral, son más de 150 t que es imposible sostenerla rotando de forma permanente y mantener su línea recta a todo lo largo sin apoyarse en el agua, lo que es necesario disminuir gran parte de ese peso haciendolo flotar en la piscina.

Cuando el enfriador se apoya en los extremos por falta de nivel de agua, este se dobla hacia abajo en el centro y el metal va perdiendo resistencia mecánica por los esfuerzos causados hasta que se rompe en forma de rajaduras.

El nivel de agua necesario hay que verlo personalmente en la micarta tracera comprobando que está bien cuando el muñón toca de vez en cuando la micarta de abajo (levitar) y no permanece sobre ella. Las Micartas o fusibles de los apoyos se comportan como guías del tambor durante la rotación fundamentalmente en la transmisión. Cuando se realizan operaciones de cambio de porcentaje, los enfriadores pueden cargar o descargar un exceso de mineral en momentos determinados. De acuerdo a la carga de mineral en el proceso, actualmente se utilizan anillas para el control del nivel de agua.

➤ Temperatura del mineral a la entrada

Este valor es medido por el perfil térmico de operación de los hornos en el hogar 15 como zona de enfriamiento donde tiene gran influencia para su estabilidad la presión del horno, siempre positiva, con variabilidad tendiendo a negativa para que penetre el O_2 y reaccione con los gases excedentes de la reducción y genera temperaturas superiores.

➤ Temperatura del mineral a la salida

Se garantiza dentro de sus parámetros correctos con una alimentación normal, que cumpla con los límites de diseño del enfriador al no sobrepasarse estos. Otras de

las medidas a tener en cuenta es mantener una buena eficiencia de los dispositivos raspadores o carros, una operación correcta del agua de alimentación a la piscina entre otros.

1.7.1- Características técnicas del enfriador de mineral

Las características de los enfriadores están en dependencia del tipo de enfriador, así como de sus dimensiones.

- Productividad (t/h) 19,4 a 22
- Densidad del mineral enfriado (t/m³) 3,3 a 3,5
- Coeficiente de llenado 0.08 a 0.15%
- Granulometría (%)
 - mayor de 0.15 mm= 14.3%
 - (0.15-0.074) mm=17.4%
 - (0.074-0.044) mm= 13.6%
 - menor de 0.044 mm= 54.7%
- Temperatura del mineral a la entrada (°C) 650 a 770
- Temperatura del mineral a la salida (°C) 150 a 280
- Presión operativa (kPa) 0,01 a 0,02
- Consumo de agua en la piscina (m³/h) 107
- Temperatura del agua en la entrada (°C) 35 a 43
- Consumo del agua en las Chumaceras (m³/h) 1
- Motores eléctricos

Para lograr la rotación del enfriador es necesario transmitirle movimiento con el empleo de un motor eléctrico principal y otro auxiliar para el caso de que ocurra la ruptura del primero.

Motor principal asincrónico trifásico con rotor jaula de ardilla para medio altamente corrosivo.

Potencia nominal (kW)	55
Tensión nominal de trabajo (V)	440
Frecuencia (Hz)	60
Corriente nominal de trabajo (A)	90
Frecuencia de giro (r.p.m)	1180
Factor de potencia (cos)	0.90
Eficiencia	0.90

- Dimensiones del tambor en planta nueva:

Largo (m)	27
Diámetro exterior (m)	3,048
Espesor de pared (mm)	16

- Dimensiones del tambor de planta vieja.

Largo (m)	18
Diámetro exterior (m)	2.64
Espesor de pared (mm)	12

- Brida o acoplamiento

Atornilladas por la zona exterior y soldadas por el interior de ambas partes cilíndricas, soportan todos los esfuerzos mecánicos del cilindro por exceso de masa o apoyo de los extremos. Evita que los esfuerzos de Flexión sean trasladados a otras zonas del metal del tambor. Estos esfuerzos mueren o desaparecen en deformaciones elásticas sin afectar el metal.

- Micartas o fusibles de los apoyos

No deben admitir el peso permanente del tambor y se comportan como guías del tambor durante la rotación fundamentalmente en la transmisión. Cuando existe desgaste excesivo por el intenso período de operación o mal posicionamiento del tambor, se sienten golpes continuos de ambos engranes (piñón y catalina), dando

lugar al rápido desgaste por lo que es necesario recurrir al mantenimiento del equipo. El estado normal del tambor (separado) de las Micartas, mantiene una masa total equilibrada con el nivel de agua. Otro caso es el tambor en posición anormal (apoyado) ocurre cuando hay un exceso de peso del tambor por falta de nivel de agua o exceso de masa del tambor.

➤ Sifón para el control del nivel de agua

Este no fue concebido en el proyecto original como un regulador de nivel. El objetivo del invento fue equilibrar el peso del tambor con el nivel de agua evitando el apoyo permanente del enfriador sobre los cojinetes, dependiendo de éste la vida útil del tambor.

➤ Carros raspadores

Su función en un 80% es remover el mineral aprovechando el movimiento de giro del tambor y teniendo en cuenta su peso para un mejor área de fricción, debe subir fuera de la masa de mineral manteniendo un movimiento de aproximadamente 65° como mínimo y al caer debe quitar el mineral más frío de la pared inferior y permitir que el caliente llegue hasta dicha pared para mejorar la transferencia de calor.

El 20% restante es mantener el avance hacia la descarga, cuestión esta que no se logra por estar el nivel superior de la masa de mineral por encima de la altura de los rastrillos. Lo que sucede en las tres cuartas partes del tambor.

1.7.2- Construcción del enfriador de mineral

El enfriador de mineral con descarga central se compone por un tambor cilíndrico con tapas laterales o (guijos) como también se les conoce, los cuales tienen gorriones huecos, con la ayuda de los cuales se apoya el tambor en los cojinetes radiales. La rotación del tambor, se transmite desde el motor eléctrico por medio de un acoplamiento elástico, dispuesto en el eje conductor a través de un piñón a la corona dentada colocada en el tambor. El tambor se fabrica con láminas gruesas de acero fundido, soldadas. En ambos extremos del tambor, están remachadas o soldadas bridas de acero tallado, para sujetar las tapas laterales. Las tapas laterales con los gorriones huecos, se pueden hacer con fundición o acero en dependencia de

las medidas del enfriador. Para la hermetización, la unión de los pernos y la disminución de la carga en ellos, están previstos unos salientes anulares.

El tipo constructivo del tambor debe permitir su fácil instalación y su cambio. Habitualmente, los guijos se fabrican de fundición o de aceros al manganeso y al cromo. El acero al manganeso fundido se emplea para grandes sobrecargas del enfriador de mineral. El espesor de las placas que conforman el tambor generalmente es de 12 mm para los enfriadores de planta vieja y 16 mm para los de planta nueva, dependiendo de las dimensiones de estos equipos.

La eficiencia del enfriador esta dada en la forma y material de construcción del revestimiento del tambor, quien ejerce una influencia notable en el funcionamiento de este equipo.

1.7.3- Materiales utilizados para la fabricación del enfriador

Muchos equipos están sometidos a tensiones que varían cíclicamente con el tiempo, lo que provoca deformaciones en su estructura. Por esta razón, en el país se lleva a cabo el cumplimiento de varias tareas para disminuir las inversiones y mejorar los costos de producción, que constituyen un renglón importante de la economía. La selección del material para la fabricación de muchas piezas es siempre de mucha importancia, ya que se debe de tener en cuenta la resistencia a las condiciones de trabajo a las que van a estar sometidas, así como a la explotación del equipo.

Las tapas laterales o guijos se fabrican por lo general de fundición o acero, en dependencia de las medidas del enfriador. Corrientemente son muy empleados los aceros al manganeso y aceros al cromo. Estos materiales deben distinguirse por:

1. La más pequeña posible sensibilidad a concentraciones de tensiones.
2. La capacidad de poder ser tratados térmico y químico-térmicamente para disminuir la influencia de las concentraciones de tensiones de las secciones.
3. La buena maquinabilidad.

El material de construcción del que está compuesto el Chell es:

12GOST 5689-57

De acuerdo a otras normas se puede clasificar en:

ASTM/SAI AISI EV8; UNI X53

DIN X50; JIS SUH36.

1.8- Principales causas de averías

Dentro de las principales causas de averías en los enfriadores que provocan la salida de servicio o interrupción durante el proceso de enfriamiento se pueden citar:

- Mala hermeticidad de la empaquetadura de grafito del cabo de darga del tambor, de la cámara de salida y de las uniones por bridas.
- Parada forzada del electromotor de propulsión.
- Funcionamiento deficiente del interruptor terminal en el momento de inmersión máxima del tambor.
- Un descenso súbito del nivel de agua en el tanque de concreto armado por la tubería de evacuación en caso de falta de hermeticidad del propio tanque de concreto armado.
- Encenagamiento del fondo del tanque de concreto armado.
- Sobrecarga del tanque por agua al obstruirse la tubería de evacuación.
- Aumento del momento torsor al estar sobrecargado el tambor de enfriamiento.
- Parada inesperada del enfriador lleno de mineral caliente.

1.9- Conclusiones del capítulo

- Son varios los autores que se han dedicado al estudio del comportamiento de las diferentes variables que caracterizan el proceso a escala industrial y en la bibliografía consultada, es poca la información encontrada que hace referencia sobre dicha problemática.

Capítulo II. Materiales y Métodos

2.1- Introducción

El conocimiento del proceso de enfriamiento en cilindros rotatorios horizontales y los fenómenos físicos del sistema, es un tema de primordial importancia en el desarrollo actual de la temática y del sector industrial, que permite el conocimiento de los factores o elementos que influyen en el proceso de transferencia de calor en estos equipos. El desarrollo de un modelo matemático que represente con mayor exactitud el valor de estos factores, proporciona el control de la temperatura del mineral a la salida de los enfriadores y con ello a aumentar la eficiencia de estos equipos para hacerlos más productivos.

Por lo expuesto anteriormente, se plantea como objetivo del capítulo, establecer un modelo teórico para el proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios horizontales de la planta Hornos de Reducción de la empresa “Cmdte. René Ramos Latour” de Nicaro.

2.2- Definición del modelo teórico para el proceso de enfriamiento

A partir de los estudios desarrollados con el propósito de aclarar la forma en que el agua extrae calor del mineral reducido en los enfriadores de mineral de la Planta de Hornos de Reducción, se ha realizado este análisis teórico cuyo desarrollo se expone a continuación, el cual servirá para prevenir posibles errores que pudieran tener lugar al no tenerse claro un conocimiento de este sistema y con ello a mejorar su rendimiento.

La no existencia de expresiones matemáticas que permitan predecir el comportamiento de determinados parámetros en el proceso, establece que una adecuada selección de los métodos y de los materiales garanticen el desarrollo eficaz y veracidad de los resultados de este trabajo investigativo. De ahí que este haya sido uno de los momentos más cuidadoso, en cuanto a la realización de las mediciones, la aplicación de las metodologías para la determinación de los coeficientes globales de transferencia de calor y consumo de agua en el proceso de enfriamiento.

2.2.1- Selección del modelo

La selección del modelo debe cumplir como requisito, ser la representación más exacta del fenómeno real y que pueda ser tratado sin complejidades matemáticas innecesarias que dificulten la investigación a la hora de desarrollar las ecuaciones de transmisión de calor.

El modelo debe corresponder correctamente a lo que realmente sucede en el proceso y describirá la velocidad de transmisión de calor en el enfriador. Si el modelo difiere ampliamente de la realidad, la expresión derivada carecerá de utilidad. Para la selección del modelo, debe comprenderse que tal expresión es simplemente la representación matemática de un modelo conceptual que se selecciona a prioridad a partir de las siguientes suposiciones:

- 1.1- El calor absorbido por el agua se extrae del sistema en forma de calor sensible con el agua de salida y en forma de calor latente con el agua evaporada.
- 1.2- Se considera la velocidad del aire sobre la superficie del enfriador de 2.2 m/s.
- 1.3- Para el análisis se tomará el enfriador No.1 de planta vieja y el No.11 de planta nueva.
- 1.4- Se considera que tanto la superficie exterior como interior están presentes de incrustaciones, por lo que los coeficientes obtenidos no serán los máximos.
- 1.5- El agua de entrada se considera que procede de la planta de tratamiento de agua a 30°C y saldrá hacia Planta Eléctrica.
- 1.6- La temperatura de entrada del mineral reducido estará en un rango comprendido entre 700 y 750 °C y será descargado a 120 y 328 °C.
- 1.7- Existirá evaporación de agua en la superficie del enfriador, fundamentalmente en la mitad más caliente.
- 1.8- Se consideran constante los coeficientes de película para las tres zonas en que se divide el modelo del enfriador seleccionado.
- 1.9- El proceso de evaporación se asumirá que tiene lugar según la distribución que aparece en la figura 3.1.

Es conveniente señalar que el análisis matemático más elegante y sofisticado pero basado en un modelo que no corresponde con la realidad es simplemente un ejercicio matemático sin utilidad para el ingeniero que debe hacer predicciones de operación y diseño. Es precisamente esta operación la que se va a analizar en base a los principios de transferencia de calor en este equipo los cuales se desarrollan a continuación.

2.3- Metodología de Cálculo para el proceso de enfriamiento

La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos como fuente y receptor. El estudio de la transferencia de calor se facilita mediante una cabal comprensión de la naturaleza del calor, sin embargo, esta es una ventaja que no está fácilmente disponible. Se han descubierto muchas manifestaciones del calor, esto ha impedido que una teoría las cubra a todas, de ahí que es necesario comenzar el estudio con información básica acerca de unos cuantos fenómenos. Las fases por la que transita una sustancia simple están asociadas con su contenido de energía. Se ha establecido que donde quiera que ocurra un cambio de calor, se involucra una gran cantidad de energía en esa transición.

2.3.1- Transferencia de calor por conducción

Por otro lado, en el caso que se considere la conducción de calor en cualquier geometría y para condiciones de estado estable o inestable; es necesario desarrollar una ecuación general que sea aplicable en cualquier punto. Por esta razón, el flujo de calor por conducción a través de un sólido en el que existe un gradiente de temperatura, viene dado por la ley de Fourier de la conducción:

$$q = -k \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Donde k es la conductividad térmica del material, A , el área a través de la que se produce la conducción y dT/dx , el gradiente de temperatura en la dirección de propagación del calor.

2.3.2- Transferencia de calor por convección

Cuando la superficie de un sólido se pone en contacto con un fluido que se encuentra a diferente temperatura, el flujo de calor transferido por convección puede expresarse en función de la diferencia global de temperatura entre la superficie del sólido y el área, A , de la superficie, mediante la ley de Newton de enfriamiento:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección o coeficiente de película, y T_s y T_∞ son, respectivamente, las temperaturas de la superficie de la pared en contacto con el fluido y la temperatura del fluido en un punto alejado de la pared.

2.3.2.1- Flujo de calor transferido por convección

El proceso de intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas separados por una pared sólida, ocurre en muchas aplicaciones de la ingeniería. El implemento usado como división en el intercambio térmico se utiliza en los intercambiadores de calor. Entre las aplicaciones específicas pueden encontrarse en la calefacción del espacio y climatización, la producción de vapor y recuperación de calor en procesos químicos. En este capítulo se considera que los principios de traslado de calor a evaluar, se realizarán un intercambiador de calor.

El coeficiente de transferencia de calor por convección desde el mineral hacia las paredes del enfriador es posible determinarlo aplicando el método de la diferencia de temperatura media logarítmica por la siguiente ecuación.

$$q''_{conv} = \dot{m}_M \cdot C_{p_m} (T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_{M \text{ entrada}} = \dot{m}_{M \text{ salida}} = \dot{m}_M$$

Donde:

$\dot{m}_{M \text{ entrada}}$, $\dot{m}_{M \text{ salida}}$ - Flujo de mineral que entra y que sale del enfriador; kg/s

C_{p_m} - calor específico del mineral; J/kgK

T_1, T_2 - temperatura de entrada y salida del mineral; K

La transferencia de calor se considera un intercambio de energía en un sistema, la pérdida de calor por un cuerpo deberá ser igual al calor absorbido por otro dentro de los confines del mismo sistema. La energía exigida para enfriar el mineral, proviene de la energía que se absorbe por convección al agua en la piscina y la evaporación de la misma en la superficie.

Realizando un balance de energía se puede definir de modo general la cantidad de calor absorbida por el agua.

$$E_{ent} = E_{sal}$$

$$Q_{min} = Q_{agua} + Q_{perd}$$

$$q''_{conv} = \dot{m}_A \cdot C_{p_A} (T_{A_{salida}} - T_{A_{entrada}}) + \dot{m}_{A_{evap}} \cdot C_{p_A} (T_{Sup} - T_{A_{salida}}) + \dot{m}_{A_{evap}} \cdot h_{fgv} \quad (2.4)$$

Donde:

$\dot{m}_{A_{evap}}$ -flujo de agua que se evapora; kg/s

h_{fgv} - Calor latente de vaporización; J/kg

C_{p_A} - calor específico del agua; J/kgK

T_{Sup} - temperatura de evaporación en la superficie del enfriador; K

$\dot{m}_A$ - flujo de agua a la entrada de la piscina; kg/s

$T_{A_{salida}}, T_{A_{entrada}}$ - temperatura de salida y entrada del agua; K

La ecuación (2.4) tiene en cuenta la transferencia de calor que se transfiere por convección del agua al área de la pared del cilindro sumergida en la piscina (flujo de Couette) y por evaporación en el área de la pared del cilindro no sumergida en la piscina donde se considera que la temperatura en la pared exterior del cilindro no supera los 100 °C. Esta consideración es válida si se tiene en cuenta que las mediciones realizadas de la temperatura en la superficie no superan dicho valor.

El calor extraído en el enfriador se realiza de la siguiente proporción:

Calor sensible

$$q''_{conv} = \dot{m}_A \cdot C_{p_A} (T_{A_{salida}} - T_{A_{entrada}}) + \dot{m}_{A_{evap}} \cdot C_{p_A} (T_{Sup} - T_{A_{salida}}) \quad (2.5)$$

Calor latente

$$q''_{conv} = \dot{m}_{A_{evap}} \cdot h_{fgv} \quad (2.6)$$

2.3.3- Cantidad de agua que se evapora

A partir de un balance de energía del fenómeno de transferencia de calor, la pérdida por evaporación de agua del flujo que entra a la piscina, se determina de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{A_{evap}} = h_m \cdot A_{III} \cdot (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.7)$$

Teniendo;

h_m - coeficiente de transferencia de masa; m/s

A_{III} - Área de la zona de evaporación; m²

Para determinar el coeficiente de transferencia de masa es necesario determinar el número de Sherwood y el mismo proporciona una medida de la transferencia de masa por convección de la superficie a través de la ecuación (2.8) y su valor es igual al gradiente de concentración en la superficie.

$$Sh = 0.0296 \cdot R_e^{\frac{4}{5}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (2.8)$$

Donde:

R_e - Número de Reynolds

Sc - Número de Schmidt.

El número de Reynolds y de Schmidt se determinan a través de las siguientes ecuaciones;

$$R_{eD} = \frac{V_{aire} \cdot D_e}{\nu_{aire}} \quad (2.9)$$

$$Sc = \frac{\nu_{aire}}{D_{AB}} \quad (2.10)$$

Siendo en cada caso;

V_{aire} - Velocidad del aire; m/s

ν_{aire} - Coeficiente cinemático de viscosidad del aire; m²/s

D_{AB} - Coeficiente de difusión de masa; m²/s

D_e - Diámetro del enfriador; m

A partir de la relación de las ecuaciones (2.8), (2.9), (2.10), mediante la ecuación (2.11) se puede determinar el coeficiente de transferencia de masa.

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{D_e} \quad (2.11)$$

La densidad del vapor de agua saturado a la temperatura de la superficie y a la temperatura del ambiente es posible determinarlas por la siguiente relación;

$$\rho_{A.sat} = \frac{1}{vva_{sat}} \quad (2.12)$$

$$\rho_{A.\infty} = \frac{1}{vva_{\infty}} \quad (2.13)$$

Donde:

vva_{sat} , vva_{∞} - volumen específico del vapor de agua a la temperatura de la superficie y del ambiente; m³/kg

2.3.4- Determinación de los coeficientes Globales de transferencia de calor

Para iniciar la evaluación del coeficiente total de transferencia de calor con las superficies llena de incrustaciones, su utilizará el modelo siguiente. Como se muestra

en la figura 3.1, el cilindro del enfriador se considerará dividido en tres zonas cada una con diferentes coeficientes de transmisión.

Zona I :

Esta zona está constituida por toda la superficie del enfriador que sirve para calentar el agua total de alimentación desde la temperatura del agua a la entrada en la piscina hasta la temperatura de salida y está constituida por toda la superficie del enfriador que está en contacto con el mineral caliente.

Para calcular el área de la zona I en la que se considera la transferencia de calor sensible entre la temperatura de entrada y salida del agua se emplea la siguiente expresión.

$$A_I = \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha_1}{180^\circ} \cdot L \quad (2.14)$$

Donde:

r - radio del cilindro; m

α - ángulo del arco; grado

L - longitud del cilindro; m

El ángulo que comprende esta zona se determina por la siguiente relación.

$$\alpha_1 = 2 \cdot \beta$$

Para determinar el ángulo (β) que ocupa el mineral dentro del cilindro como se muestra en la Figura 2.1, se utiliza la siguiente ecuación.

$$\beta = 3 \sqrt{\frac{3\dot{m}_M}{2 \cdot R_i^2 \cdot \rho \cdot V_m}} \quad (2.15)$$

Donde:

V_m - Velocidad del sólido; m/s

R_i - Radio interior del cilindro; m

ρ - Densidad del mineral; kg/m³

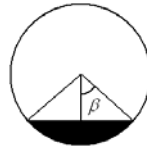


Figura 2.1 Representación del ángulo β , con respecto al diámetro vertical y al área que ocupa el mineral dentro del cilindro.

La velocidad del sólido según la expresión desarrollada por Diomidovskiy D.A. en el Instituto de Minas de Leningrado, referenciado por Chang (1997), se calcula mediante la ecuación (2.16).

$$V_m = 5,78 D_i \cdot \varphi \cdot n \quad (2.16)$$

Donde:

φ - Ángulo de inclinación del cilindro; °

n - Velocidad de rotación; 1/s

La longitud equivalente para esta zona será:

$$L = \frac{A_I}{\pi \cdot D} \quad (2.17)$$

Aplicando el método de la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD) en equipos de transferencia de calor, se podrá determinar el flujo de calor sensible.

$$Q_{CSI} = U_{CSI} \cdot A_I \cdot (LMTD)_I = \dot{m}_M \cdot C_{p_m} (T_1 - T_i) = \dot{m}_A \cdot C_{p_A} (T_{A_{salida}} - T_{A_{entrada}}) \quad (2.18)$$

Siendo:

U_{CSI} - coeficiente global de transferencia de calor sensible; W/m²K

$\dot{m}_M$ - flujo de mineral; kg/s

C_{p_m} - calor específico del mineral; J/kgK

T_i - temperatura de salida del flujo de calor en la zona I; K

Posteriormente, se procede a determinar la diferencia de temperatura media logarítmica para la zona I. $(LMTD)_I$, según la siguiente relación,

$$(LMTD)_I = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (2.19)$$

Por tratarse de un sistema donde ambos fluidos están ha contra flujo, se inicia el cálculo de la diferencia de temperatura de la siguiente forma:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_{Asalida} \quad (2.20)$$

$$\Delta T_2 = T_2 - T_{Aentrada} \quad (2.21)$$

Zona II :

Esta zona incluye la superficie del enfriador que sirve para calentar el agua por convección desde la temperatura de la superficie del enfriador hasta la temperatura del agua a la salida. El ángulo plano formado por esta segunda zona se determina por la siguiente expresión.

$$\alpha_{II} = \alpha_{sum} - \alpha_I \quad (2.22)$$

Siendo:

α_{sum} - Ángulo formado por la superficie sumergida del cilindro, respecto al nivel de agua en la piscina.

El flujo de calor sensible para evaporar el agua en esta zona se define de la siguiente manera;

$$Q_{CSII} = U_{CSII} \cdot A_{II} \cdot (LMTD)_{II} = \dot{m}_M \cdot Cp_m (T_{Sup} - T_i) = \dot{m}_{Aevap} \cdot Cp_A (T_{Sup} - T_{Asalida}) \quad (2.23)$$

Para la aplicación de la ecuación (2.23) es necesario determinar la diferencia de temperatura media logarítmica en la zona II . $(LMTD)_{II}$, haciendo uso de la ecuación (2.17), pero en este caso:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_{Sup} \quad (2.24)$$

$$\Delta T_2 = T_i - T_{Asalida} \quad (2.25)$$

Como en estas dos zonas la transferencia de calor es sensible; para obtener un valor total del coeficiente global de transferencia de calor entre ambas zonas, se tiene en cuenta la siguiente igualdad;

$$U_{CSI-II} = \frac{\dot{m}_A \cdot U_{CSI} + \dot{m}_{Aevap} \cdot U_{CSII}}{\dot{m}_A + \dot{m}_{Aevap}} \quad (2.26)$$

Zona III :

Esta zona incluye la superficie del enfriador que sirve para evaporar el agua a la temperatura de la superficie del enfriador expuesta al medio ambiente y está constituido por la mayor superficie del cilindro.

Para calcular el ángulo que abarca esta superficie se utilizará la expresión (2.27).

$$\alpha_{III} = 360^\circ - (\alpha_I + \alpha_{II}) \quad (2.27)$$

El flujo de calor latente en esa zona esta dado por la siguiente expresión:

$$Q_{CL,III} = U_{CL,III} \cdot A_{III} \cdot (LMTD)_{III} = \dot{m}_{Aevap} \cdot h_{fgv} \quad (2.28)$$

El valor de la diferencia de temperatura $(LMTD)_{III}$ es posible determinarlo por la siguiente relación:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_{Sup} \quad (2.29)$$

$$\Delta T_2 = T_i - T_{Sup} \quad (2.30)$$

El coeficiente total de transferencia de calor en las superficies sucias es:

$$U_{CT} = \frac{U_{CSI-II} \cdot A_{I-II} + U_{CSIII} \cdot A_{III}}{A_{I-II} + A_{III}} \quad (2.31)$$

Para determinar el calor que es posible extraer por medio del mecanismo de calor sensible, calentando el agua de enfriamiento hasta alcanzar la temperatura de salida de la misma con el mecanismo enfriador y con la temperatura de salida del mineral reducido con ambas superficies llenas de incrustaciones se tiene;

$$Q_{CST} = U_{CST} \cdot A_T \cdot (LMTD)_T = Q_{SI} + Q_{SII} \quad (2.32)$$

Para estimar el valor de la diferencia de temperatura media logarítmica se plantea:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_{A_{salida}} \quad (2.33)$$

$$\Delta T_2 = T_2 - T_{A_{entrada}} \quad (2.34)$$

El área total del enfriador donde se realiza la transferencia de calor, se define de la siguiente forma; y debe cumplir.

$$A_T = A_I + A_{II} + A_{III} = \pi \cdot D \cdot L \quad (2.35)$$

2.4- Conclusiones del capítulo

- En el presente capítulo quedó establecido el procedimiento de cálculo para el modelo teórico del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios horizontales de la Planta de Hornos de Reducción.
- En la realización del procedimiento de cálculo no se tuvieron en cuenta los modos de transferencia de calor por conducción y radiación por presentarse en proporciones muy pequeñas.

Capítulo III. Análisis de los resultados. Valoración económica, e impacto ambiental

3.1- Introducción

Una vez determinado el alcance de la investigación, establecidas las variables de entrada, de salida y las perturbaciones propias del proceso, expresadas las ecuaciones generales que rigen la transferencia de calor, fundamentada la no existencia de expresiones matemáticas que permitan predecir el comportamiento de la temperatura del mineral a la salida de los enfriadores cilíndricos rotatorios, se fundamenta el análisis de los resultados con el empleo de las ecuaciones que describen el balance de energía.

El objetivo de este capítulo es realizar la identificación de los coeficientes globales de transferencia de calor y consumos de agua en la piscina, a partir de los resultados experimentales obtenidos por la metodología propuesta en el capítulo anterior.

3.2- Identificación de las zonas de transferencia de calor

Tomando en consideración el esquema tratado por varios autores en otros trabajos precedentes como se muestra en la figura 3.1, se identifican tres zonas importantes del enfriador. Una que comprenden la superficie del enriador en contacto con ambos fluidos; otra formada por la superficie sumergida en la piscina de agua que no está en contacto con el mineral y por último, una tercera zona cubierta por una pequeña película de agua expuesta al medio ambiente.

A diferencia de lo expuesto por Retirado (2004), quien asume tomar como temperatura en la superficie mayor de 100 °C. Si bien se acerca mucho a la temperatura de la pared en algunas zonas del cilindro, no se tiene en cuenta este criterio, considerando que las mediciones realizadas a varios enfriadores arrojan valores que no exceden este resultado.

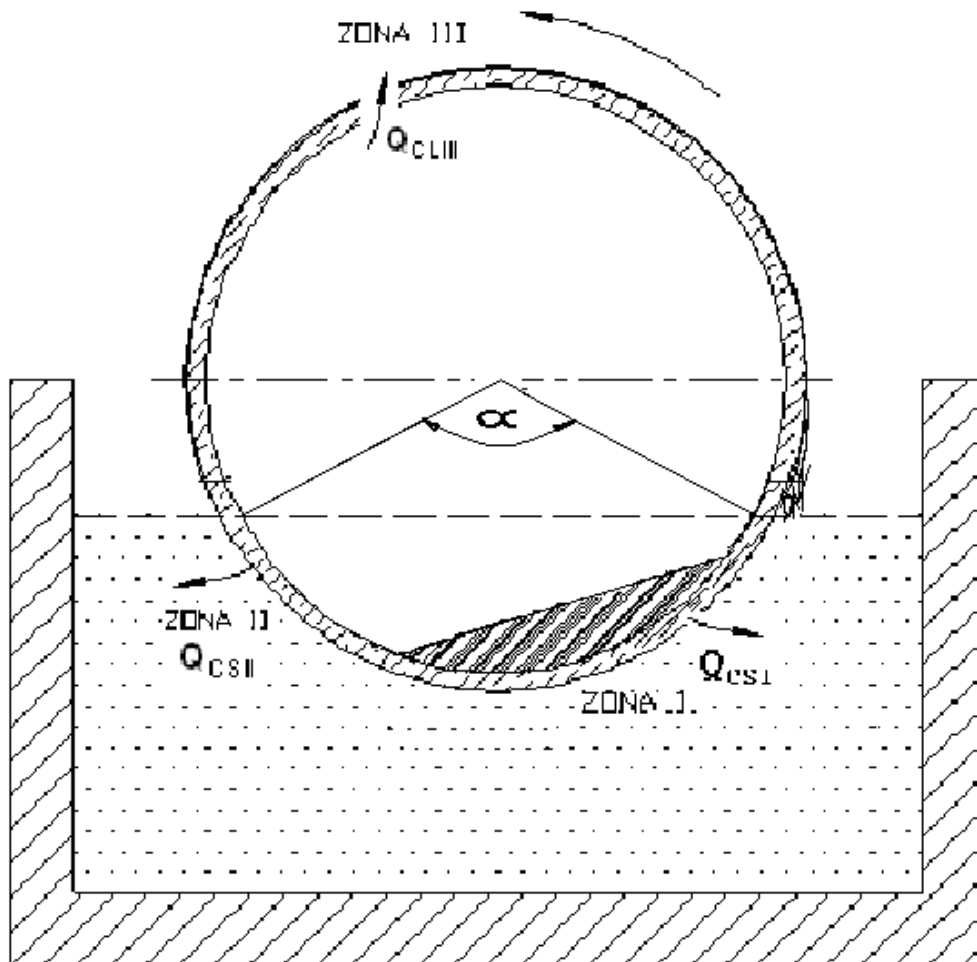


Figura 3.1 Representación del corte transversal de un enfriador.

3.3- Resultados de las mediciones

Para la identificación de los coeficientes de transferencia de calor en la instalación, se utilizaron los principales parámetros operacionales que caracterizan el proceso de enfriamiento de mineral. Los parámetros se recogieron de medición continua a través del Sistema de Supervisión y Control de Procesos EROS en la computadora del panel central de la planta y fueron almacenados en una base de datos con el empleo del Excel.

Para la medición de la temperatura en la superficie del enfriador se utilizó un pirómetro digital THERMO-HUNTER 5140 marca Optex, equipado para medir temperatura límites desde -50 hasta 1400 °C . A continuación se muestra el perfil del

comportamiento de la temperatura en la superficie del enfriador en función de la longitud.

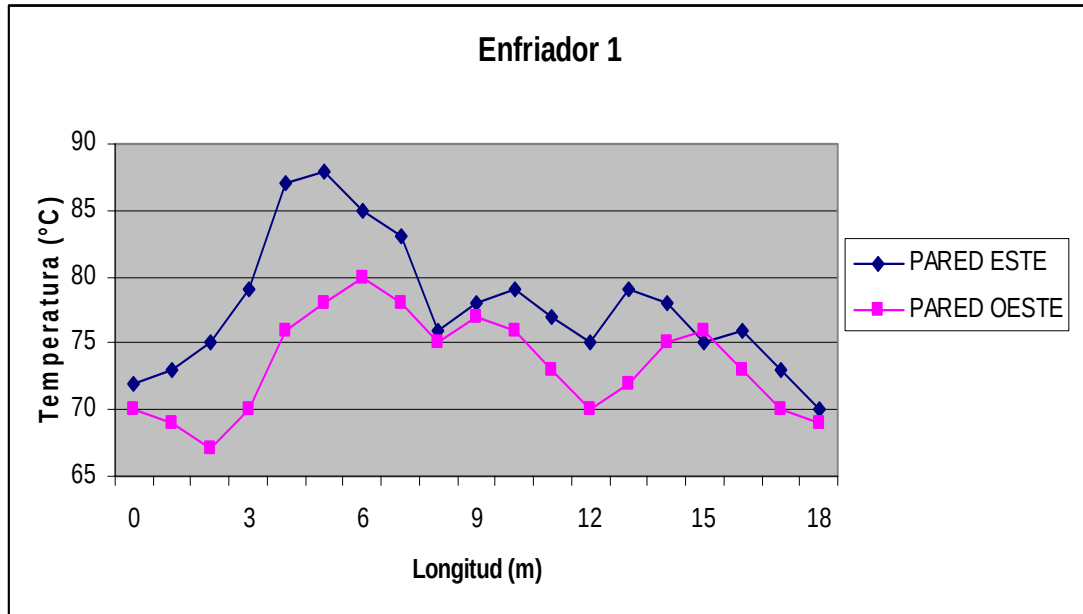


Figura 3.2 Comportamiento de la temperatura en la superficie del enfriador 1 en función de la longitud.

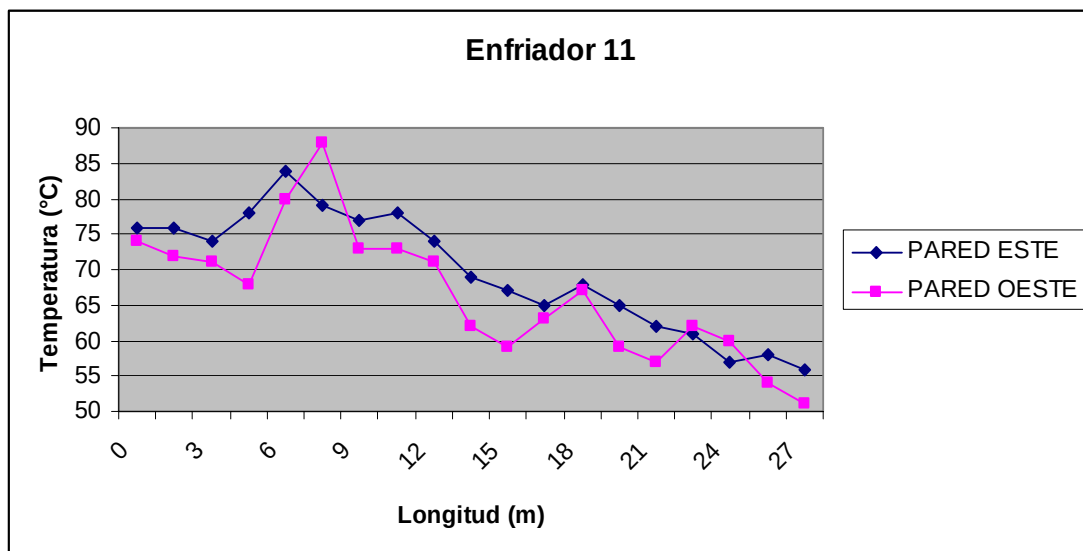


Figura 3.3 Comportamiento de la temperatura en la superficie del enfriador 11 en función de la longitud.

Según los gráficos mostrados anteriormente, se identifica dos zonas importantes de transferencia de calor. Una que comprende desde la parte inicial del proceso hasta una longitud aproximada de 12 m para el enfriador No.1 y 16 m para el enfriador No.11 donde se manifiestan un incremento en los niveles de temperatura y una segunda zona donde la temperatura va cayendo paulatinamente a medida que aumenta la longitud del enfriador hasta la salida de este.

3.4- Análisis de los resultados mediante el cálculo

En el proceso de transferencia de calor en el enfriamiento de mineral se manifiestan de diferentes modos; al caer el mineral en la superficie del cilindro le transfiere calor a la pared cubierta por convección y esta a su vez por convección al agua en la piscina; por conducción a través de la pared del cilindro y a la pared descubierta por el mineral se le transfiere calor por convección y radiación. De estas tres formas de transferencia de calor no se tendrá en cuenta para realizar los cálculos la radiación ni la conducción, ya que se presentan en proporciones muy pequeñas.

Para la realización de los cálculos en la identificación de los coeficientes globales de transferencia de calor y parámetros que caracterizan el proceso, se utilizó el software Mathcad Professional (ver anexo 1, 2, 3) obteniendo los siguientes resultados:

3.4.1- Cálculo del flujo de calor

El flujo de calor entregado por el mineral a la superficie del cilindro es posible determinarlo por la ecuación (2.3). Es importante señalar que los datos de entrada empleados para realizar los cálculos según el anexo 1, 2 y 3, fueron los resultados obtenidos para un flujo de mineral de 22 t/h para ambos enfriadores;

Enfriador No.1	Enfriador No.11
$q''_{conv} = 2260 \text{ kW}$	$q''_{conv} = 3728 \text{ kW}$

3.4.2- Cantidad de agua que se evapora

La superficie del cilindro absorbe el calor entregado por el mineral el cual lo utiliza para aumentar su temperatura y a la vez le entrega calor al agua de la piscina por convección y al medio ambiente por evaporación.

Para determinar el número de Reynolds y de Schmidt se procede a calcular por las ecuaciones (2.9) y (2.10); conociendo para ambos enfriadores los valores siguientes;

$$V_{aire} = 2.2 \text{ m/s}$$

$$\nu_{aire} = 15.89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{e.I} = 2.64 \text{ m}$$

$$D_{e.II} = 3.048 \text{ m}$$

$$D_{AB} = 0.26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

Dando como resultando:

Enfriador No.1	Enfriador No.11
$Re_D = 365500$	$Re_D = 426400$
$Sc = 0.61$	$Sc = 0.61$

Con los valores anteriormente determinados, es posible dar paso a la determinación del número de Sherwood, auxiliándose de la fórmula (2.8) se obtiene;

Enfriador No.1	Enfriador No.11
$Sh = 708.485$	$Sh = 801.472$

El coeficiente de transferencia de masa es posible determinarlo por la expresión (2.11); y su valor es,

Enfriador No.1	Enfriador No.11
$h_m = 6.978 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$h_m = 6.766 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Teniendo en cuenta el valor de la temperatura en la superficie de ambos enfriadores donde su valor máximo es de 88 °C y la del medio ambiente 43 °C se selecciona el volumen específico para estas condiciones y luego se calcula la densidad del vapor saturado por las expresiones (2.12) y (2.13) quedando como resultado:

$$\rho_{A,sat} = 0.214 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{A,\infty} = 0.056 \text{ kg/m}^3$$

El área de la sección transversal para cada una de las zonas se determina según la ecuación (2.14) y su resultado se muestra en la figura 3.4.

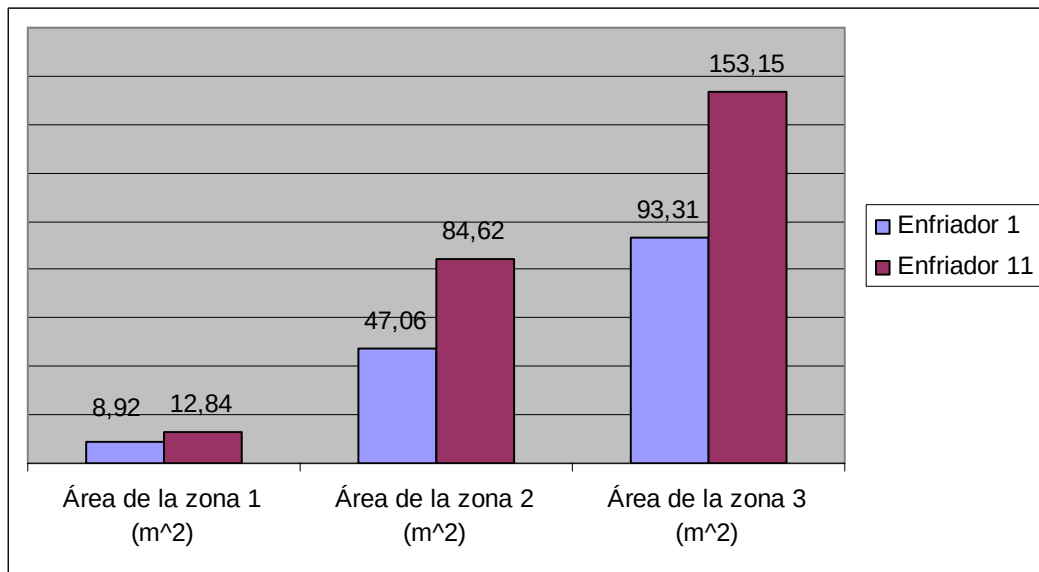


Figura 3.4 Representación de las áreas de transferencia de calor.

Teniendo en cuenta el coeficiente de transferencia de masa, el área y la densidad del vapor de agua saturado a la temperatura de la superficie y a la temperatura del aire, es posible determinar el flujo de agua que se evapora en la superficie expuesta al medio ambiente empleando la fórmula (2.7);

Enfriador No.1	Enfriador No.11
$\dot{m}_{Aevap} = 0.214 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_{Aevap} = 0.334 \text{ kg/s}$

El flujo de agua suministrado a la piscina para realizar el proceso de enfriamiento mediante la transferencia de calor por convección y compensar las pérdidas por evaporación, es posible determinarlo a través del despeje de la ecuación (2.4);

Enfriador No.1	Enfriador No.11
$\dot{m}_A = 10.417 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_A = 35.896 \text{ kg/s}$

Conociendo los resultados anteriores, se tiene que el flujo de agua entrando a la piscina es $36 \text{ m}^3/\text{h}$ para el enfriador 1 y $129.6 \text{ m}^3/\text{h}$ para el enfriador 11. De estos valores el flujo de agua que se pierde por evaporación es $0.79 \text{ m}^3/\text{h}$ y $1.20 \text{ m}^3/\text{h}$, lo que equivale el 2 y 1% del agua suministrada a los enfriadores 1 y 11 respectivamente.

3.4.3- Determinación del flujo de calor y coeficientes globales de transferencia de calor para cada zona

Considerando la figura 3.1, cuyo gráfico expone las zonas de transferencia de calor en el cilindro, se prosigue a la determinación de los coeficientes globales de transferencia de calor para cada una de estas zonas. Conociendo que en la Zona I y II la transferencia de calor se analiza como convección al agua en la que no ocurre ebullición y la Zona III como convección al medio donde se evapora gran parte del agua suministrada a la piscina. Resolviendo por las ecuaciones (2.18), (2.23) y (2.28), se obtienen los siguientes resultados.

	Flujo de calor		
	Q_{SI}	Q_{SII}	Q_{LIII}
Enfriador 1	1787 kW	14.91 kW	488.20 kW
Enfriador 11	3004 kW	53.04 kW	776.955 kW

El coeficiente global de transferencia de calor para cada zona se obtiene despejando según las fórmulas (2.18), (2.23) y (2.28) y su valor depende del flujo de calor entregado en cada zona.

	Coeficiente Global de transferencia de calor		
	U_{CSI}	U_{CSII}	Q_{LIII}
Enfriador 1	448.063 $\text{W/m}^2\text{K}$	0.681 $\text{W/m}^2\text{K}$	12.201 $\text{W/m}^2\text{K}$
Enfriador 11	786.829 $\text{W/m}^2\text{K}$	1.649 $\text{W/m}^2\text{K}$	15.728 $\text{W/m}^2\text{K}$

Con los resultados alcanzados se puede obtener un valor promedio del coeficiente global de transferencia de calor para el sistema. Haciendo uso de la expresión (2.31) y conociendo los valores ya encontrados se obtiene:

Enfriador 1	Enfriador 11
$U_{CT} = 91.765 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U_{CT} = 197.118 \text{ W/m}^2\text{K}$

En el área lateral total del enfriador donde ocurre el balance de energía para enfriar el mineral que sale de los hornos se calcula mediante la expresión (2.35),

Enfriador 1	Enfriador 11
$A_T = 149.288 \text{ m}^2$	$A_T = 250.611 \text{ m}^2$

3.5- Valoración Económica

Para realizar el análisis económico del proceso de enfriamiento, es necesario señalar que las pérdidas existentes son provocadas por el deficiente proceso de enfriamiento. Los factores que originan estas pérdidas se pueden encontrar los siguientes.

La disolución del óxido de magnesio en la lixiviación carbonato amoniacal a partir de minerales reducidos y la consecuente precipitación trae consigo diversas afectaciones en la tecnología CARON, e incide en la calidad del proceso productivo y en los costos de producción. Entre las principales dificultades se puede citar la disminución de la eficiencia de transferencia de calor en los enfriadores de licor y como consecuencia el calentamiento del sistema de lixiviación, lo cual incide sobre las extracciones de níquel y cobalto e incrementa las pérdidas de amoníaco y el consumo de agua destinada para la limpieza.

3.5.1- Pérdidas por evaporación de amoníaco

La elevada temperatura del mineral al salir del enfriador causada por el deficiente proceso de enfriamiento; provoca en la planta de Lixiviación y Lavado la evaporación de gran cantidad de amoníaco en los tanques de contacto. Se determinó que las pérdidas por evaporación de amoníaco es de (0.36 t/h), el equivalente a (9 t/día).

Teniendo en cuenta que el precio del amoníaco en el mercado mundial es (584 CUC/t), el costo de las pérdidas por evaporación de amoníaco es de 5 256 CUC; para una pérdida anual de 1 918 440 CUC siendo el impacto económico que más afecta a esta planta.

3.5.2- Pérdidas por mantenimiento

Durante todo proceso productivo existe la necesidad de incurrir a gastos que afectan tanto a la empresa como a la economía del país. Estos gastos son producidos por la compra de materiales y materia prima a la hora de efectuarse un mantenimiento o reparación de los enfriadores.

El deterioro prematuro de algunos elementos que componen el sistema de los tanques de contacto es provocado por las incrustaciones de óxido de magnesio en las paredes de los tanques de contacto y en las tuberías por donde es transportado el mineral reducido, las cuales son cambiadas dada las condiciones de proyecto de reparación cada cuatro meses aproximadamente, lo que genera pérdidas de 16787.38 CUC por concepto de materiales. Según estudios realizados por el personal de mantenimiento de la planta de lixiviación, el costo por cada tramo de tubería asciende a 12 570 CUC. Aparejado a esto, se encuentra el costo de la mano de obra con un valor aproximado de 836.9 CUC.

La sustitución de un enfriador por otro de mayor dimensión, trae como ventaja la posibilidad de aumentar el flujo de mineral reducido y se resolverá la problemática surgida de los enfriadores sobre la incapacidad de lograr llevar al mineral reducido de 700 hasta 170 °C, que es la temperatura de diseño para el mineral después de los enfriadores. Se supone que con la fabricación de enfriadores de mineral de un mismo tipo se reduciría los gastos a la hora de realizar un mantenimiento o compra de materiales. Es claro que esta muestra de gastos no permite tener una idea acerca de la efectividad de cual método de enfriamiento es mejor debido a que, durante el proceso hay gastos producidos en la planta de lixiviación, por las elevadas temperaturas a la salida de los enfriadores en planta vieja.

El descontrol del agua que se consume en las piscinas de los enfriadores de mineral hace que la planta de tratamiento de agua tenga que enviar diariamente mucho más agua que la que en realidad se necesita para el proceso.

3.6- Impacto ambiental

La incorporación de la problemática ambiental al desarrollo económico, al igual que la inclusión de otras metas sociales, plantea problemas importantes que deben ser tomados en cuenta en la planificación y formulación de políticas de desarrollo económico. En la medida en que los objetivos ambientales apoyen o refuercen el crecimiento económico, la planeación ambiental irá asumiendo creciente importancia. Dentro de las principales preocupaciones de la planeación ambiental se encuentra lo referente a los residuos peligrosos, principalmente los de origen industrial. Esto se debe a sus efectos adversos de contaminación del ambiente y su afectación a la salud pública.

La protección del medio ambiente y seguridad del trabajo es de vital importancia para evitar los accidentes y enfermedades profesionales. Una organización adecuada y las medidas de sanidad industrial protegen la salud de los trabajadores y elevan la productividad del trabajo. Las condiciones del trabajo y las medidas de seguridad son reglamentadas por el código de leyes laborales que obliga a la administración de la fábrica y organizaciones a garantizar el debido equipo técnico de todos los puestos de trabajo y crear en los mismos condiciones para un trabajo seguro.

Las exigencias de la higiene en el proceso de explotación de locales industriales y del equipo son reglamentadas por las normas correspondientes que prevén la temperatura, humedad y velocidad del movimiento del aire en los locales de producción; el alumbrado y cantidad de polvo en los puestos de trabajo, el nivel de ruido y de las acciones vibratorias que influyen sobre la regulación del organismo del obrero.

El desarrollo de la industria minero metalúrgica en el poblado de Nicaro, se ha convertido en una fuente de contaminación ambiental ocasionando efectos perjudiciales sobre la actividad y salud del hombre. Entre los efectos provocados por la industria, se encuentra la emisión de residuos, polvo y gases al medio circundante.

La planta de hornos de reducción es una de las instalaciones que posee los índices más elevados de contaminación de la industria. Por esta razón, a continuación se muestra los principales impactos ambientales asociados a dicha entidad.

3.6.1- Generación de polvo y gases fugitivos calientes por sistema de alimentación y descarga de los hornos

La cantidad de polvo admisible en el aire de un local de producción depende del contenido de cuarzo en el polvo. Las normas permiten la concentración de polvo: tóxico con un contenido de cuarzo menor de 2%, de 10 g/m^3 ; polvo no tóxico con un contenido de cuarzo de 1 a 10%; de 4 g/m^3 . En las áreas de la planta 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, otro de los efectos perjudiciales es provocado por salideros de mineral, en romanas, alimentadores, sinfines, etcétera. El derrame de mineral cae a los pisos inferiores y este es eliminado mediante el soplado con aire, provocando la contaminación en el área de trabajo y en el exterior de la planta.

Otro contaminante que se encuentra a la descarga de los enfriadores de mineral es el amoníaco del que son víctimas los trabajadores. El amoníaco, tanto líquido como vapor es fuertemente irritante para la piel, los ojos y las vías respiratorias. Este es muy tóxico y la exposición a altas concentraciones puede producir quemaduras, cegueras y hasta la muerte.

Las concentraciones bajas de amoníaco pueden cortar la respiración, pero sin provocar efectos nocivos. Para concentraciones medias de amoníaco, puede provocar taquicardia (agitación de la respiración y los latidos del corazón), decaimiento, irritación, congestión, hinchazón, entumecimiento de las membranas de los ojos, mucosas y garganta del cuerpo humano.

Cuando el amoníaco líquido se pone en contacto con la piel, produce quemaduras graves, muy parecidas a las quemaduras cáusticas y son provocadas al producirse congelaciones rápidas e intensas en la zona afectada. El grado de lección, varía de acuerdo a la concentración de amoníaco y del tiempo que se encuentra expuesto al

mismo. La ingestión del amoníaco líquido origina una severa acción corrosiva en la boca, la garganta y el estómago.

3.6.2- 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.

3.6.3- Arrastre de mineral crudo a las canalizaciones

El derrame y salideros de mineral por los sellos de los transportadores de planta nueva cae a la planta baja, este mineral se somete a la limpieza con agua y es trasladado por canales hacia los distintos desagües, mediante bombas la pulpa se envía hacia la canalización de la fábrica, que lo descarga a la presa de cola ubicada en el mar (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) y son expulsados a la atmósfera y al área de trabajo.

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 provoca la entrada de agua al interior del enfriador y salida de mineral del mismo.

3.6.4- Ruido, vibraciones y altas temperaturas

El ruido representa una combinación caótica de sonidos deferentes en frecuencia e intensidad. La gama de percepción sonora de una persona es de 130 decibelios, y el ruido medido por 140 decibelios no puede ser soportado por el hombre. Los ruidos que superan los 85 decibelios pueden provocar una alteración transitoria de la capacidad de trabajo y debilitamiento del oído.

En el proceso de reducción y enfriamiento de mineral, surgen vibraciones provocadas por los equipos dinámicos en operación que ejercen una acción nociva sobre el organismo de los trabajadores. Las normas de higiene establecen para las vibraciones industriales del puesto de trabajo, amplitudes límites admisibles así como las velocidades y aceleraciones de movimientos vibratorios. El surgimiento de vibraciones es prevenido por el montaje de máquinas que provocan vibraciones sobre bases especiales dotadas de aislamiento contra vibraciones y no unidas al edificio.

Otro de los impactos ambientales asociados al proceso son las elevadas temperaturas en las zonas de trabajo, lo que afecta de una u otra forma a la salud del trabajador.

3.7- Conclusiones del Capítulo

- El estado actual de la automatización en la planta de hornos de reducción se encuentra limitado a solo algunas mediciones de control aisladas, por lo que fue necesario la búsqueda de instrumentos con los que se puedan realizar mediciones sobre otros factores que inciden en el proceso de enfriamiento de mineral.
- De acuerdo al análisis económico, se pudo determinar que las mayores pérdidas económicas provocadas por las elevadas temperaturas en los enfriadores de mineral se debe a la evaporación del amoníaco en la planta de Lixiviación, al año se gastan más de 1 918 440 CUC.
- Se hace énfasis en los principales contaminantes del medio ambiente provocados en la planta de Hornos de Reducción.

Conclusiones

- De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos, se demostró que la temperatura en la pared del enfriador no sobrepasa la temperatura de saturación del agua (100 °C), de ahí que no se cumpla lo planteado por Retirado (2004).
- El flujo de calor transferido del mineral por convección es 2260 y 3728 kW para los enfriadores 1 y 11 respectivamente.
- El flujo de agua suministrado a la piscina según cálculos realizados es 129 m³/h para el enfriador 11, factor que corresponde al requerido para que el proceso sea eficiente. No siendo así en el caso del enfriador 1, donde el flujo de agua suministrado es 36 m³/h valor que no cumple con lo establecido para el proceso.
- Se determinó el comportamiento de los coeficientes globales de transferencia de calor para las tres zonas en que se divide el modelo del enfriador, predominando el de la primera zona con un valor de 448.063 W/m²K para el enfriador 1 y 786.829 W/m²K para el enfriador 11.
- Según los resultados obtenidos de las áreas de transferencia de calor, se observó que no existe mucha diferencia en los resultados por los métodos del LMTD y NTU, teniendo como valor total 149.28 m² y 250.6 m² para los enfriadores 1 y 11 respectivamente.
- Con la sustitución de un enfriador por otro de mayor dimensión, se da solución a la problemática surgida de los enfriadores sobre la incapacidad de lograr llevar el mineral reducido de 700 hasta 170 °C.



Recomendaciones

- Incrementar el área efectiva de los enfriadores para obtener la temperatura requerida del mineral a la salida para un flujo de mineral reducido de 22 t/h.
- Implementar un software que permita aumentar la eficiencia y rapidez en el cálculo de los flujos de calor transferidos en el proceso.
- Fabricar enfriadores de mineral de un mismo tipo para garantizar el uso racional de recursos.
- Realizar el mantenimiento a las superficies interiores y exteriores del enfriador con más frecuencia, lo que mejoraría la transferencia de calor en el sistema.



Bibliografía

- AGUNAOUN, A. et al. *"Transfert de chaleur dans un film tombant autour d'un cylindre horizontal"*. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 72, 1994: pp 961-965.
- ARENA, A. *Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la Empresa "Comandante René Ramos Latour"*. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2009.
- ALEPUZ, H. *Mejora en el proceso de enfriamiento de mineral reducido con el enfriamiento actual*. Nicaro: empresa "Cmdte. René Ramos Latour", 1977. 38p. Informe técnico.
- Correa, N. *Balance energético en el enfriador de mineral en la planta de Hornos de reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Ramón, Gonzáles Marrero. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2000. 43p.
- CHACON, R. *Las posibles causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral dentro de los cooler*. Nicaro: empresa "Cmdte. René Ramos Latour", 1982. 21p. Informe técnico.
- GSCHWENDTNER, M. A. *Optical investigation of the heat transfer from a rotating cylinder in a cross flow*. *Heat and Mass Transfer* 40, 2002: 561–572.
- GONGORA, E. *Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la planta hornos de reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Tesis de maestría. ISMMANJ, Moa, Cuba. 2004. 80p.
- HOSSAIN, M. A. *Radiation-conduction interaction on mixed convection from a horizontal circular cylinder*. *Heat and Mass Transfer* 35, 1998: 307-314.
- INCROPERA, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II. III.



- LAMORÚ, 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.
- MAHFOUZ, F. M. *Transient free convection from a horizontal cylinder placed in a micropolar fluid*. Heat and Mass Transfer 39, 2003: 455–462
- NAZAR, R. Mixed convection boundary-layer flow from a horizontal circular cylinder with a constant surface heat flux. *Heat and Mass Transfer* 40, 2004: 219–227.
- 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: 736-744.
- PANDAY, P. K. *Experimental analysis of the local heat transfer coefficient of falling film evaporation with and without co-current air flow velocity*. Heat Mass Transfer 41, 2005: 1066–1076.
- PENG, S. W. Theoretical analysis of laminar film condensation in a rotating cylinder with a scraper. *Heat and Mass Transfer* 34, 1998: 279-285.
- PRESILLA, D. *Mejora en el proceso de enfriamiento de mineral reducido con el enfriamiento actual*. Nicaro: empresa "Cmdte. René Ramos Latour", 1977. 12p. Informe técnico.
- RAMÍREZ, M. *Identificación experimental del subproceso de postcombustión en un horno de reducción de níquel*. Minería y Geología Vol. XVII I, No. 2, 2001: 61-66.
- RODRÍGUEZ, I. *Modelación por Elementos Finitos de la ruptura del tubo en el transportador de mineral laterítico reducido*. Minería y Geología Vol.23 No.4, 2007. 13p.
- RODRÍGUEZ, R. *Consideraciones sobre el mecanismo de los raspadores interiores de los enfriadores de mineral y su influencia sobre la transmisión de calor*. Nicaro: empresa "Cmdte. René Ramos Latour", 1977. Informe Técnico.



- RODRIGUEZ, R. *Análisis de la influencia de la adición de vapor de agua sobre el enfriamiento de mineral reducido en el proceso de Nicaro*. Nicaro: empresa "Cmdte. René Ramos Latour", 1978. 10p. Informe técnico.
- ROSELL, R. *Las posibles causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral dentro de los cooler*. Nicaro: empresa "Cmdte. René Ramos Latour", 1986. 15p. Informe técnico.
- SOTTO, Y. *Influencia de los elementos mecánicos del enfriador horizontal en el proceso de transferencia de calor del mineral reducido en la empresa "Comdte. Ernesto Che Guevara"*. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2007.
- TABERA, Y; R. García. *Estudio del comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto*. Góngora, E; Retirado, Y. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2006. 61p.
- TUNRA. *Ore Cooler Evaluation*. The University of New Castle Research Associates Limited. 1998. 18p.
- a) VALLE, M. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Cmdte "Ernesto Che Guevara" de Moa (1). *Tecnología Química*, Vol. XX, No. 1, 2000: 70-77.
- b) VALLE, M. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Cmdte "Ernesto Che Guevara" de Moa (2). *Tecnología Química*, Vol. XX, No. 2, 2000: 10-15.
- WANG, T. Granule transport and mean residence time in horizontal drum with inclined flights. *Powder Technology* 162, 2004: 50 – 58.

Anexo 1

Balance de masa y energía del enfriador 1

$m_m := 6.1 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	Flujo de mineral
$C_{p_m} := 970 \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Calor específico del mineral
$T_{em} := 983 \cdot \text{K}$	Temperatura de entrada del mineral
$T_{sm} := 601 \cdot \text{K}$	Temperatura de salida del mineral
$v_{aire} := 2.2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Velocidad del aire
$D_e := 2.64 \cdot \text{m}$	Diametro exterior del enfriador
$\nu_{aire} := 15.89 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Coeficiente cinemático de viscosidad
$D_{AB_{aire}} := 0.26 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Coeficiente binario de difusión a una atmósfera
$L_I := 18 \cdot \text{m}$	Longitud del enfriador
$\nu_{agua} := 17.82 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Volumen específico del vapor de agua a (42°C)
$\nu_{asat.} := 2.645 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Volumen específico del vapor de agua saturado a (88°C)
$h_{fgv} := 2329 \cdot 10^3 \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	Calor latente de vaporización
$C_{p_a} := 4184 \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Calor específico del agua
$T_{sup} := 361 \cdot \text{K}$	Temperatura en la superficie
$T_{ae} := 303 \cdot \text{K}$	Temperatura de entrada del agua
$T_{as} := 344 \cdot \text{K}$	Temperatura de salida del agua
$\rho_{min} := 500 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$	Densidad del mineral
$\eta := 0.104 \cdot \frac{1}{\text{s}}$	Número de revoluciones del enfriador
$\alpha_{sum} := 135 \text{deg}$	Ángulo formado por la superficie sumergida del cilindro respecto al nivel de agua en la piscina

$$v_{\min} := 5.78 \cdot De \cdot \eta$$

Velocidad del mineral

$$\beta := \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m_m}{2 \cdot \left(\frac{De}{2}\right)^2 \cdot \rho_{\min} \cdot v_{\min}}}$$

Ángulo que ocupa el mineral con respecto al diámetro vertical y al área dentro del cilindro

$$\beta = 10.757 \text{ deg}$$

$$\alpha_I := \beta \cdot 2$$

Ángulo de la Zona I

$$\alpha_I = 21.515 \text{ deg}$$

$$\alpha_{II} := \alpha_{\text{sum}} - \alpha_I$$

Ángulo de la Zona II

$$\alpha_{II} = 113.485 \text{ deg}$$

$$\alpha_{\text{evap}} := 360 \cdot \text{deg} - (\alpha_I + \alpha_{II})$$

Ángulo de la Zona III (evaporación)

$$\alpha_{\text{evap}} = 225 \text{ deg}$$

Calor entregado por el mineral

$$Q_m := m_m \cdot C_{p_m} \cdot (T_{em} - T_{sm})$$

Número de Reynolds

$$Re_{\text{aire}} := \frac{v_{\text{aire}} \cdot De}{v_{\text{aire}}}$$

$$Q_m = 2.26 \times 10^3 \text{ kW}$$

$$Re_{\text{aire}} = 3.655 \times 10^5$$

Número de Schmidt

$$Sc_{\text{aire}} := \frac{v_{\text{aire}}}{D_{A\text{Baire}}}$$

Número de Sherwood

$$Sh_{\text{aire}} := 0.0296 \cdot Re_{\text{aire}}^{\frac{4}{5}} \cdot Sc_{\text{aire}}^{\frac{1}{3}}$$

$$Sc_{\text{aire}} = 0.611$$

$$Sh_{\text{aire}} = 708.485$$

Coeficiente de transferencia de masa

Densidad del vapor de agua

$$h_m := \frac{Sh_{\text{aire}} \cdot D_{A\text{Baire}}}{De}$$

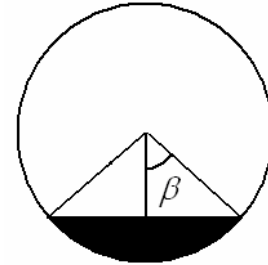
$$\rho_{\text{vagua}} := \frac{1}{v_{\text{agua}}}$$

$$h_m = 6.978 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\rho_{\text{vagua}} = 0.056 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Superficie de evaporación

Densidad del vapor de agua saturada



$$A_{\text{evap}} := \frac{\pi \cdot \frac{De}{2} \cdot \alpha_{\text{evap}} \cdot L_I}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$A_{\text{evap}} = 93.305 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{asat.}} := \frac{1}{v_{\text{asat.}}}$$

$$\rho_{\text{asat.}} = 0.378 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cantidad de agua que se evapora

$$m_{\text{aevap.}} := h_m \cdot A_{\text{evap}} \cdot (\rho_{\text{asat.}} - \rho_{\text{vagua}})$$

$$m_{\text{aevap.}} = 0.21 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Densidad del agua

$$\rho_a := 1000 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$$

Flujo de agua

$$m_{\text{aT}} := \frac{Q_m - m_{\text{aevap.}} \cdot h_{\text{fgv}} + m_{\text{aevap.}} \cdot C_{\text{Pa}} \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\text{as}})}{C_{\text{Pa}} \cdot (T_{\text{as}} - T_{\text{ae}})}$$

$$m_{\text{aT}} = 10.417 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_a := \frac{m_m \cdot C_{\text{Pm}} \cdot (T_{\text{em}} - T_{\text{sm}})}{C_{\text{Pa}} \cdot (T_{\text{as}} - T_{\text{ae}})}$$

$$m_a = 13.176 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Flujo volumétrico de agua

$$F_a := \frac{m_{\text{aT}}}{\rho_a}$$

$$F_a = 0.01 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Flujo de calor sensible Zona I

Calor absorbido por el agua

$$Q_{\text{absI}} := m_{\text{aT}} \cdot C_{\text{Pa}} \cdot (T_{\text{as}} - T_{\text{ae}})$$

$$Q_{\text{absI}} = 1.787 \times 10^6 \text{ W}$$

Temperatura de salida del mineral de la Zona I

$$T_i := T_{\text{em}} - \frac{Q_{\text{absI}}}{m_m \cdot C_{\text{Pm}}}$$

$$T_i = 680.983 \text{ K}$$

Área de la Zona I

$$A_I := \frac{\pi \cdot \frac{De}{2} \cdot \alpha_I \cdot L_I}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$A_I = 8.922 \text{ m}^2$$

Diferencia de temperatura media logarítmica

$$\text{LMTD} := \frac{(T_{\text{em}} - T_{\text{as}}) - (T_{\text{sm}} - T_{\text{ae}})}{\ln \left(\frac{T_{\text{em}} - T_{\text{as}}}{T_{\text{sm}} - T_{\text{ae}}} \right)}$$

$$\text{LMTD} = 447.031 \text{ K}$$

Longitud equivalente

$$L_{\text{eq.}} := \frac{A_I}{\pi \cdot De}$$

Coeficiente global de transferencia de calor

$$U_{\text{CSI}} := \frac{Q_{\text{absI}}}{A_I \cdot \text{LMTD}}$$

$$L_{eq.} = 1.076 \text{ m}$$

$$U_{CSI} = 448.063 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Flujo de calor sensible Zona II (Calor absorbido por el agua)

$$Q_{absII} := m_{aevap} \cdot C_{Pa} \cdot (T_{sup} - T_{as}) \quad Q_{absII} = 1.491 \times 10^4 \text{ W}$$

Área de la Zona II

$$A_{II} := \frac{\pi \cdot \frac{De}{2} \cdot \alpha_{II} \cdot L_I}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$A_{II} = 47.061 \text{ m}^2$$

Diferencia de temperatura media logarítmica

$$LMTD_{II} := \frac{(T_{em} - T_{sup}) - (T_i - T_{as})}{\ln \left(\frac{T_{em} - T_{sup}}{T_i - T_{as}} \right)}$$

$$LMTD_{II} = 465.025 \text{ K}$$

Longitud equivalente

$$L_{eq.II} := \frac{A_{II}}{\pi \cdot De}$$

$$L_{eq.II} = 5.674 \text{ m}$$

Coeficiente global de transferencia de calor

$$U_{CSII} := \frac{Q_{absII}}{A_{II} \cdot LMTD_{II}}$$

$$U_{CSII} = 0.681 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Flujo de calor latente Zona III

$$Q_{absIII} := m_{aevap} \cdot h_{fgv} \quad Q_{absIII} = 4.882 \times 10^5 \text{ W}$$

Área de la Zona III

$$A_{III} := \frac{\pi \cdot \frac{De}{2} \cdot \alpha_{evap} \cdot L_I}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$A_{III} = 93.305 \text{ m}^2$$

Diferencia de temperatura media logarítmica

$$LMTD_{III} := \frac{(T_{em} - T_{sup}) - (T_i - T_{as})}{\ln \left(\frac{T_{em} - T_{sup}}{T_i - T_{sup}} \right)}$$

$$LMTD_{III} = 428.809 \text{ K}$$

Longitud equivalente

$$L_{eq.III} := \frac{A_{III}}{\pi \cdot De}$$

$$L_{eq.III} = 11.25 \text{ m}$$

Coeficiente global de transferencia de calor

$$U_{CLIII} := \frac{Q_{absIII}}{A_{III} \cdot LMTD_{III}}$$

$$U_{CLIII} = 12.201 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Coeficiente global de transferencia de calor promedio entre la zona I y II

$$U_{\text{CSI.II}} := \frac{m_{\text{aT}} \cdot U_{\text{CSI}} + m_{\text{aT}} \cdot U_{\text{CSII}}}{2 \cdot m_{\text{aT}}}$$

$$U_{\text{CSI.II}} = 224.372 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Área total de transferencia de calor

Área promedio entre la zona I y II

$$A_{\text{T}} := \pi \cdot D_{\text{e}} \cdot L_{\text{I}}$$

$$A_{\text{TP}} := A_{\text{II}} + A_{\text{I}} + A_{\text{III}}$$

$$A_{\text{I.II}} := A_{\text{II}} + A_{\text{I}}$$

$$A_{\text{T}} = 149.288 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{TP}} = 149.288 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{I.II}} = 55.983 \text{ m}^2$$

Coeficiente global de transferencia de calor sensible total

$$U_{\text{T}} := \frac{A_{\text{I.II}} \cdot U_{\text{CSI.II}} + A_{\text{III}} \cdot U_{\text{CLIII}}}{A_{\text{TP}}}$$

$$U_{\text{T}} = 91.765 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Anexo 2

Balance de masa y energía del enfriador 11

$m_m := 6.1 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	Flujo de mineral
$C_{p_m} := 970 \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Calor específico del mineral
$T_{em} := 1023 \cdot \text{K}$	Temperatura de entrada del mineral
$T_{sm} := 393 \cdot \text{K}$	Temperatura de salida del mineral
$v_{aire} := 2.2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Velocidad del aire
$D_e := 3.08 \cdot \text{m}$	Diametro exterior del enfriador
$\nu_{aire} := 15.89 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Coeficiente cinemático de viscosidad
$D_{AB_{aire}} := 0.26 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Coeficiente binario de difusión a una atmósfera
$L_I := 25.9 \cdot \text{m}$	Longitud del enfriador
$\nu_{agua} := 17.82 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Volumen específico del agua a (42°C)
$\nu_{asat.} := 2.645 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Volumen específico del vapor de agua saturado a (88°C)
$h_{fgv} := 2329 \cdot 10^3 \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	Calor latente de vaporización
$C_{p_a} := 4184 \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Calor específico del agua
$T_{sup} := 361 \cdot \text{K}$	Temperatura en la superficie
$T_{ae} := 303 \cdot \text{K}$	Temperatura de entrada del agua
$T_{as} := 323 \cdot \text{K}$	Temperatura de salida del agua
$\rho_{min} := 500 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$	Densidad del mineral
$\eta := 0.104 \cdot \frac{1}{\text{s}}$	Número de revoluciones del enfriador
$\alpha_{sum} := 140 \text{deg}$	Ángulo formado por la superficie sumergida del cilindro respecto al nivel de agua en la piscina

$$v_{\min} := 5.78 \cdot De \cdot \eta$$

Velocidad del mineral

$$\beta := \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m_m}{2 \cdot \left(\frac{De}{2}\right)^2 \cdot \rho_{\min} \cdot v_{\min}}}$$

Ángulo que ocupa el mineral con respecto al diámetro vertical y al área dentro del cilindro

$$\beta = 9.221 \text{ deg}$$

$$\alpha_I := \beta \cdot 2$$

Ángulo de la Zona I

$$\alpha_I = 18.441 \text{ deg}$$

$$\alpha_{II} := \alpha_{\text{sum}} - \alpha_I$$

Ángulo de la Zona II

$$\alpha_{II} = 121.559 \text{ deg}$$

$$\alpha_{\text{evap}} := 360 \cdot \text{deg} - (\alpha_I + \alpha_{II})$$

Ángulo de la Zona III (evaporación)

$$\alpha_{\text{evap}} = 220 \text{ deg}$$

Calor entregado por el mineral

$$Q_m := m_m \cdot C_{p_m} \cdot (T_{\text{em}} - T_{\text{sm}})$$

Número de Reynolds

$$Re_{\text{aire}} := \frac{v_{\text{aire}} \cdot De}{\nu_{\text{aire}}}$$

$$Q_m = 3.728 \times 10^3 \text{ kW}$$

$$Re_{\text{aire}} = 4.264 \times 10^5$$

Número de Schmidt

$$Sc_{\text{aire}} := \frac{\nu_{\text{aire}}}{D_{A\text{Baire}}}$$

Número de Sherwood

$$Sh_{\text{aire}} := 0.0296 \cdot Re_{\text{aire}}^{\frac{4}{5}} \cdot Sc_{\text{aire}}^{\frac{1}{3}}$$

$$Sc_{\text{aire}} = 0.611$$

$$Sh_{\text{aire}} = 801.472$$

Coefficiente de transferencia de masa

$$h_m := \frac{Sh_{\text{aire}} \cdot D_{A\text{Baire}}}{De}$$

Densidad del agua

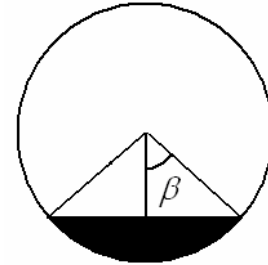
$$\rho_{\text{vagua}} := \frac{1}{\nu_{\text{agua}}}$$

$$h_m = 6.766 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\rho_{\text{vagua}} = 0.056 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Superficie de evaporación

Densidad del vapor de agua



$$A_{\text{evap}} := \frac{\pi \cdot \frac{De}{2} \cdot \alpha_{\text{evap}} \cdot L_I}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$A_{\text{evap}} = 153.151 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{asat.}} := \frac{1}{v_{\text{asat.}}}$$

$$\rho_{\text{asat.}} = 0.378 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cantidad de agua que se evapora

$$m_{\text{aevap.}} := h_m \cdot A_{\text{evap}} \cdot (\rho_{\text{asat.}} - \rho_{\text{vagua}})$$

$$m_{\text{aevap.}} = 0.334 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Densidad del agua

$$\rho_a := 1000 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$$

Flujo de agua

$$m_{\text{aT}} := \frac{Q_m - m_{\text{aevap.}} \cdot h_{\text{fgv}} + m_{\text{aevap.}} \cdot C_{\text{Pa}} \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\text{as}})}{C_{\text{Pa}} \cdot (T_{\text{as}} - T_{\text{ae}})}$$

$$m_{\text{aT}} = 35.896 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Flujo volumétrico de agua

$$F_a := \frac{m_{\text{aT}}}{\rho_a}$$

$$F_a = 0.036 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$m_a := \frac{m_m \cdot C_{\text{Pm}} \cdot (T_{\text{em}} - T_{\text{sm}})}{C_{\text{Pa}} \cdot (T_{\text{as}} - T_{\text{ae}})}$$

$$m_a = 44.547 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Flujo de calor sensible Zona I

Calor absorbido por el agua

$$Q_{\text{absI}} := m_{\text{aT}} \cdot C_{\text{Pa}} \cdot (T_{\text{as}} - T_{\text{ae}})$$

$$Q_{\text{absI}} = 3.004 \times 10^6 \text{ W}$$

Temperatura de salida del mineral de la Zona I

$$T_i := T_{\text{em}} - \frac{Q_{\text{absI}}}{m_m \cdot C_{\text{Pm}}}$$

$$T_i = 515.345 \text{ K}$$

Área de la Zona I

$$A_I := \frac{\pi \cdot \frac{De}{2} \cdot \alpha_I \cdot L_I}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$A_I = 12.838 \text{ m}^2$$

Diferencia de temperatura media logarítmica

$$\text{LMTD} := \frac{(T_{\text{em}} - T_{\text{as}}) - (T_{\text{sm}} - T_{\text{ae}})}{\ln \left(\frac{T_{\text{em}} - T_{\text{as}}}{T_{\text{sm}} - T_{\text{ae}}} \right)}$$

$$\text{LMTD} = 297.377 \text{ K}$$

Longitud equivalente

$$L_{\text{eq.}} := \frac{A_I}{\pi \cdot De}$$

Coeficiente global de transferencia de calor

$$U_{\text{CSI}} := \frac{Q_{\text{absI}}}{A_I \cdot \text{LMTD}}$$

$$L_{eq.} = 1.327 \text{ m}$$

$$U_{CSI} = 786.829 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Flujo de calor sensible Zona II (Calor absorbido por el agua)

$$Q_{absII} := m_{aevap} \cdot C_{pa} \cdot (T_{sup} - T_{as}) \quad Q_{absII} = 53.04 \text{ kW}$$

Área de la Zona II

$$A_{II} := \frac{\pi \cdot \frac{De}{2} \cdot \alpha_{II} \cdot L_I}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$A_{II} = 84.622 \text{ m}^2$$

Longitud equivalente

$$L_{eq.II} := \frac{A_{II}}{\pi \cdot De}$$

$$L_{eq.II} = 8.745 \text{ m}$$

Diferencia de temperatura media logarítmica

$$LMTD_{II} := \frac{(T_{em} - T_{sup}) - (T_i - T_{as})}{\ln \left(\frac{T_{em} - T_{sup}}{T_i - T_{as}} \right)}$$

$$LMTD_{II} = 379.988 \text{ K}$$

Coefficiente global de transferencia de calor

$$U_{CSII} := \frac{Q_{absII}}{A_{II} \cdot LMTD_{II}}$$

$$U_{CSII} = 1.649 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Flujo de calor latente Zona III

$$Q_{absIII} := m_{aevap} \cdot h_{fgv} \quad Q_{absIII} = 776.955 \text{ kW}$$

Área de la Zona III

$$A_{III} := \frac{\pi \cdot \frac{De}{2} \cdot \alpha_{evap} \cdot L_I}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$A_{III} = 153.151 \text{ m}^2$$

Longitud equivalente

$$L_{eq.III} := \frac{A_{III}}{\pi \cdot De}$$

$$L_{eq.III} = 15.828 \text{ m}$$

Diferencia de temperatura media logarítmica

$$LMTD_{III} := \frac{(T_{em} - T_{sup}) - (T_i - T_{as})}{\ln \left(\frac{T_{em} - T_{sup}}{T_i - T_{sup}} \right)}$$

$$LMTD_{III} = 322.549 \text{ K}$$

Coefficiente global de transferencia de calor

$$U_{CLIII} := \frac{Q_{absIII}}{A_{III} \cdot LMTD_{III}}$$

$$U_{CLIII} = 15.728 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Coeficiente global de transferencia de calor promedio entre la zona I y II

$$U_{\text{CSI.II}} := \frac{m_{\text{aT}} \cdot U_{\text{CSI}} + m_{\text{aT}} \cdot U_{\text{CSII}}}{2 \cdot m_{\text{aT}}}$$

$$U_{\text{CSI.II}} = 394.239 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Área total de transferencia de calor

$$A_{\text{T}} := \pi \cdot D_{\text{e}} \cdot L_{\text{I}} \quad A_{\text{TP}} := A_{\text{II}} + A_{\text{I}} + A_{\text{III}}$$

$$A_{\text{T}} = 250.611 \text{ m}^2 \quad A_{\text{TP}} = 250.611 \text{ m}^2$$

Área promedio entre la zona I y II

$$A_{\text{I.II}} := A_{\text{II}} + A_{\text{I}}$$

$$A_{\text{I.II}} = 97.46 \text{ m}^2$$

Coeficiente global de transferencia de calor total

$$U_{\text{T}} := \frac{A_{\text{I.II}} \cdot U_{\text{CSI.II}} + A_{\text{III}} \cdot U_{\text{CLIII}}}{A_{\text{TP}}}$$

$$U_{\text{T}} = 162.927 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Anexo 3

Cálculo del área de transferencia de calor por los métodos de NTU y LMTD.

$x := 0, 1 \dots 1$

Temperatura de entrada del fluido caliente.

$$Th_{ix} := \begin{matrix} 983.2 \cdot K \\ 1023.2 \cdot K \end{matrix} \quad Th_x = \begin{pmatrix} 710.05 \\ 750.05 \end{pmatrix} ^\circ C$$

Temperatura de salida del fluido caliente.

$$Th_{ox} := \begin{matrix} 601.2 \cdot K \\ 393.2 \cdot K \end{matrix} \quad Th_x = \begin{pmatrix} 328.05 \\ 120.05 \end{pmatrix} ^\circ C$$

Temperatura de entrada del fluido frío.

$$Tc_{ix} := \begin{matrix} 303.15 \cdot K \\ 303.15 \cdot K \end{matrix} \quad Tc_x = \begin{pmatrix} 30 \\ 30 \end{pmatrix} ^\circ C$$

Temperatura de salida del fluido frío.

$$Tc_{ox} := \begin{matrix} 344.2 \cdot K \\ 323.2 \cdot K \end{matrix} \quad Tc_x = \begin{pmatrix} 71.05 \\ 50.05 \end{pmatrix} ^\circ C$$

Calor específico del mineral:

$$Cpv := 189.4 \cdot kcal \cdot (m^3 \cdot K)^{-1} \quad \text{volumetrico,}$$

$$Cpm := 0.967 \cdot 10^3 \cdot J \cdot (kg \cdot K)^{-1} \quad \text{másico,}$$

Flujo másico de mineral

$$mh_x := \begin{matrix} 22 \cdot \text{tonne} \cdot \text{hr}^{-1} \\ 22 \cdot \text{tonne} \cdot \text{hr}^{-1} \end{matrix}$$

Temperatura media del agua

$$Tm_x := \frac{Tc_{ox} + Tc_{ix}}{2}$$

$$Tm_x = \begin{matrix} 323.675 \\ 313.175 \end{matrix} K$$

Calor aportado por el mineral:

$$q_{h_x} := mh_x \cdot Cpm \cdot (Th_x - Tc_x)$$

$$q_{h_x} = \begin{matrix} 2.257 \cdot 10^6 \\ 3.723 \cdot 10^6 \end{matrix} W$$

Calor específico del agua: Volumen específico del agua:

$$Cpc_x := \begin{matrix} 4187 \cdot J \cdot (kg \cdot K)^{-1} \\ 4187 \cdot J \cdot (kg \cdot K)^{-1} \end{matrix}$$

$$va_x := \begin{matrix} 1.013 \cdot 10^{-3} \cdot m^3 \cdot kg^{-1} \\ 1.007 \cdot 10^{-3} \cdot m^3 \cdot kg^{-1} \end{matrix}$$

$$\rho a_x := \frac{1}{va_x}$$

$$\rho a_x = \begin{matrix} 987.167 \\ 993.049 \end{matrix} \frac{kg}{m^3}$$

$$q_{c_x} := q_{h_x}$$

Gasto másico del agua

$$mc_x := \frac{q_{h_x}}{Cpc_x \cdot (Tc_{ox} - Tc_{ix})}$$

$$mc_x = \begin{matrix} 4.728 \cdot 104 \\ 1.597 \cdot 105 \end{matrix} \frac{kg}{hr}$$

Flujo volumétrico de agua

$$Fa_x := \frac{mc_x}{\rho a_x}$$

$$Fa_x = \begin{matrix} 47.897 \\ 160.769 \end{matrix} \frac{m^3}{hr}$$

Como el flujo másico del fluido frío no es conocido, se puede determinar, a través de un balance térmico

$$U_{h_x} :=$$

Coefficiente global de transferencia de calor para ambos fluidos sin mezclar.

$$\begin{array}{c} 33 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K} \\ 49 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K} \end{array}$$

$$U_{c_x} =$$

$$\begin{array}{c} 33.823 \\ 49.946 \end{array} \frac{W}{K \cdot m^2}$$

El área de superficie requerida puede ser obtenida desde el conocimiento del NTU, el cual puede ser obtenido desde el conocimiento de la relación de la capacidad de calor y la efectividad.

Para determinar el coeficiente mínimo de capacidad de calor.

Coefficiente de capacidad de calor del fluido frío.

$$C_{c_x} := m_{c_x} \cdot C_{p_{c_x}}$$

$$C_{c_x} =$$

$$\begin{array}{c} 5.499 \cdot 10^4 \\ 1.857 \cdot 10^5 \end{array} \frac{W}{K}$$

Coefficiente de capacidad de calor del fluido caliente.

$$C_{h_x} := C_{c_x} \cdot \frac{T_{co_x} - T_{ci_x}}{T_{hi_x} - T_{ho_x}}$$

$$C_{h_x} =$$

$$\begin{array}{c} 5.909 \cdot 10^3 \\ 5.909 \cdot 10^3 \end{array} \frac{W}{K}$$

Calor entregado por el fluido caliente.

$$C_{ph_x} := \frac{q_{h_x}}{m_{h_x} \cdot (T_{hi_x} - T_{ho_x})}$$

$$C_{ph_x} =$$

$$\begin{array}{c} 967 \\ 967 \end{array} \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$q_{max_x} := C_{h_x} \cdot (T_{hi_x} - T_{ci_x})$$

$$q_{max_x} =$$

$$\begin{array}{c} 4.019 \cdot 10^6 \\ 4.255 \cdot 10^6 \end{array} W$$

Resumiendo

$$C_{h_x} =$$

$$\begin{array}{c} 5.909 \cdot 10^3 \\ 5.909 \cdot 10^3 \end{array} \frac{W}{K}$$

$$C_{c_x} =$$

$$\begin{array}{c} 5.499 \cdot 10^4 \\ 1.857 \cdot 10^5 \end{array} \frac{W}{K}$$

Es ahora lógico definir la efectividad, como la relación entre el flujo de transferencia de calor para un intercambiador de calor y la máxima transferencia de calor posible.

Efectividad

$$\varepsilon_{ef_x} := \frac{q_{c_x}}{q_{max_x}}$$

$$\varepsilon_{ef_x} =$$

$$\begin{array}{c} 0.562 \\ 0.875 \end{array}$$

Relación

$$\frac{C_{h_x}}{C_{c_x}} =$$

$$\begin{array}{c} 0.107 \\ 0.032 \end{array}$$

Con los valores de la efectividad y la relación anterior, se busca en la figura 11.18 el NTU.

$$NTU_x := \frac{1}{\frac{Ch_x}{Cc_x} - 1} \cdot \ln \left(\frac{\varepsilon_{ef_x} - 1}{\varepsilon_{ef_x} \cdot \frac{Ch_x}{Cc_x} - 1} \right) \quad NTU_x =$$

0.854
2.118

Conocido el NTU se procede a calcular el área de transferencia de calor.

$$AhNTU_x := NTU_x \cdot \frac{Ch_x}{U_{h_x}} \quad AhNTU_x =$$

153.012
255.448

 m²

Ahora es necesario determinar el área de transferencia de calor por el método LMTD

Ahora se procede a determinar la diferencia de temperatura media logarítmica

$$\Delta T_{lm_x} := \frac{(Th_{i_x} - Tco_x) - (Tho_x - Tci_x)}{\ln \left(\frac{Th_{i_x} - Tco_x}{Tho_x - Tci_x} \right)}$$

$$\Delta T_{lm_x} =$$

447.064	K
297.433	

Para concluir se determina el área de TC por éste método.

$$AhLMTD_x := \frac{q_{c_x}}{U_{h_x} \cdot \Delta T_{lm_x}}$$

$$AhLMTD_x =$$

153.012	m ²
255.448	

Comparando las áreas por los dos métodos

$$AhLMTD_x =$$

153.012	m ²
255.448	

$$AhNTU_x =$$

153.012	m ²
255.448	

Se selecciona el de mayor área.

Longitud del enfriador Diametro exterior del enfriador

$$L_{l_x} :=$$

18.0·m
25.9·m

$$De_x :=$$

2.64·m
3.08·m

$$A_{T_x} := \pi \cdot De_x \cdot L_{l_x}$$

$$A_{T_x} =$$

149.288	m ²
250.611	

$$U_{c_x} := \frac{q_{h_x}}{A_{T_x} \cdot \Delta T_{lm_x}}$$

$$U_{c_x} =$$

33.823	W
49.946	K·m ²