



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

DIAGNÓSTICO OPERACIONAL DE LOS ENFRIADORES DE MINERAL LATERÍTICO REDUCIDO

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico

ALEXIS DURÁN RODRÍGUEZ

Moa - 2015



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

DIAGNÓSTICO OPERACIONAL DE LOS ENFRIADORES DE MINERAL LATERÍTICO REDUCIDO

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: **ALEXIS DURÁN RODRÍGUEZ**

Tutores: Prof. Aux., Ing. Ever Góngora Leyva, Dr. C.

Moa - 2015



Declaración de autoría:

Yo: Alexis Durán Rodríguez

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con el propósito que estime conveniente.

.....
Autor. Alexis Durán Rodríguez. Tutor: Prof. Aux., Ing. Ever Góngora Leyva, Dr.C.



PENSAMIENTO

“...En cambio, el progreso verdadero tiene necesidad de una ética que coloque en el centro a la persona humana y tenga en cuenta sus exigencias más auténticas (...). La regeneración de las sociedades y del mundo requiere hombres rectos, de firmes convicciones morales y altos valores de fondo (...) que respondan a la naturaleza inmutable y trascendente del ser humano...”

S.S. Benedicto XVI. Santiago de Cuba .26 de marzo de 2012



AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento debe estar en la mano extendida de cualquier ser humano por eso agradezco a todos aquellos que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo, a nuestra Revolución por permitirme estudiar esta carrera y a mis profesores y amigos por haberse mantenido a mi lado y apoyarme en todo momento.

“Muchas Gracias”



DEDICATORIA

A Dios por darme la sabiduría para emprender esta ardua labor.

De forma especial a mis padres, hermano, novia, suegra, cuñada y familiares por su amor, confianza, y apoyo incondicional.

A mi tutor Prof. Aux., Ing. Ever Góngora Leyva, Dr. C. por transmitirme su sabiduría y experiencia para llevar a cabo la realización de este trabajo y por estar siempre dispuesto a brindarme su ayuda cuando la necesitaba.

A todos los profesores del Departamento de Mecánica, que han colaborado tanto directa como indirectamente a mi formación profesional para lograr este objetivo.



RESUMEN

En la presente investigación se diagnosticaron los enfriadores de mineral laterítico reducido de la Planta de Hornos de Reducción de la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”. Se realizó el análisis de la bibliografía y documentos que abordan la temática en cuestión. Se monitorearon las principales variables del proceso de transferencia de calor: temperatura del mineral reducido en la entrada y la salida de los cilindros enfriadores, temperatura del agua y de la superficie del cilindro en diferentes puntos a lo largo de la instalación, nivel del agua de enfriamiento en las piscinas y flujo de mineral. Se determinaron las pérdidas de energía al medio ambiente a través el balance térmico y de masa. Se empleó el Software Profesional Mathcad 15.0 para la solución de las ecuaciones. Los resultados obtenidos muestran que existen condiciones de operación que afectan la eficiencia del proceso de transferencia de calor.



ABSTRACT

In the present research ore coolers of reduced laterite the Reduction Furnaces Plant Enterprise Producer of Nickel and Cobalt "Comandent Ernesto Che Guevara" were characterized. A bibliographic review of documents that deal the issue in question was performed. The main variables of the heat transfer process was monitored; temperature of the reduced ore in the inlet and outlet of the coolers cylinders water temperature and the cylinder surface at different points along the installation, the cooling water level in pools and mineral flux. Energy losses to the environment were determined by the heat balance. Professional Software Mathcad 15.0 was employed for the solution of the equations. The results demonstrate that there operation conditions that affect the efficiency of the heat transfer process.



TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.1 Caracterización del flujo tecnológico en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”	8
1.2 Flujo tecnológico de la Unidad Básica de Producción Planta de Hornos	10
1.3 Especificidades del flujo tecnológico del enfriador del mineral laterítico reducido.....	11
1.4 Procesos de transferencia de calor en el enfriador	13
1.4.1 Transferencia de calor entre el mineral y la pared del cilindro	14
1.4.2 Transferencia de calor entre el mineral y los gases	15
1.4.3 Transferencia de calor entre gases y la pared del cilindro	15
1.4.4 Transferencia de calor de la pared del cilindro al agua	15
1.4.5 Transferencia de calor y masa del agua al aire.....	17
1.5 Análisis crítico de los estudios realizados al proceso de transferencia de calor en el enfriador.	18
Conclusiones del capítulo 1	19
2. MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1 Sistema de adquisición de datos	20
2.2 Características técnicas de los enfriadores cilíndricos de la planta Hornos de Reducción.....	25
2.3 Balance de masa y energía	26
Conclusiones del capítulo 2	34
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	35
3.1 Principales deficiencias de los enfriadores	35
3.2 Características específicas de los enfriadores	37



3.3 Comportamiento de parámetros que inciden en el proceso	40
3.4 Resultados del balance térmico y de masa	41
3.5 Valoración técnico-económica	45
3.6 Impacto social y medio ambiental	46
3.6.1 Caracterización de los impactos	47
3.6.2 Recomendaciones sobre medio ambiente, salud y seguridad	47
Conclusiones del capítulo 3	49
CONCLUSIONES GENERALES	50
RECOMENDACIONES	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXOS	64

INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel por el volumen de sus producciones desempeña un papel importante dentro de la economía nacional y la eficiencia de su equipamiento incide considerablemente en el consumo de portadores energéticos a nivel de país. La empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” utiliza la tecnología lixiviación carbonato – amoniacal (Caron). En este esquema tecnológico, el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente (Ver Figura 1).

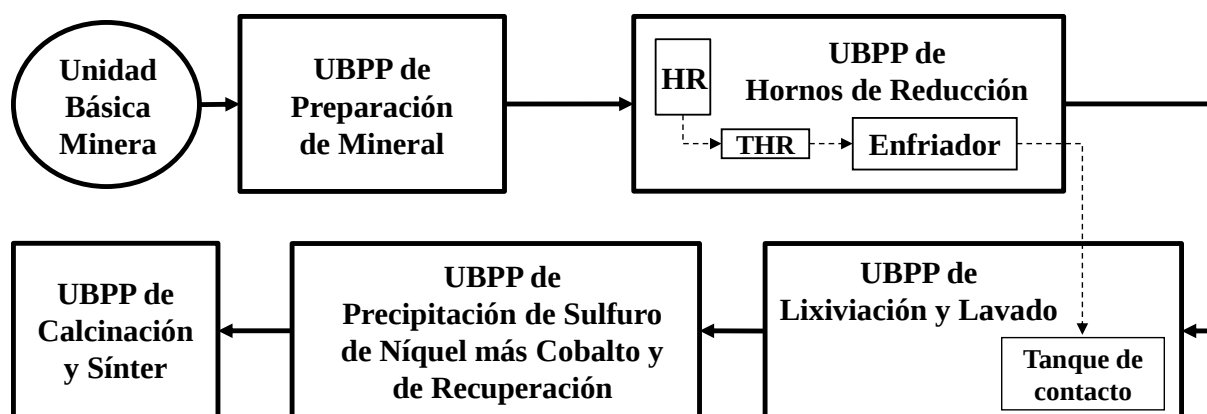


Figura 1. Esquema del proceso tecnológico de lixiviación carbonato – amoniacal (CARON). (Góngora-Leyva, 2014).

El proceso comienza en la Unidad Básica Minera con la extracción de la mena en las minas a cielo abierto en yacimientos lateríticos del territorio nororiental de Cuba, y este se incorpora al flujo tecnológico a través de la Unidad Básica de Producción Planta (UBPP) de Preparación de Mineral; a partir de donde el material circula por diferentes unidades básicas de producción entre las que se encuentran: Unidad Básica de Producción Planta de Hornos de Reducción, Unidad Básica de Producción Planta de Lixiviación y Lavado, Unidad Básica de Producción Planta de Precipitación de Sulfuro de Níquel más Cobalto y de Recuperación de Amoníaco y Unidad Básica

de Producción Planta de Calcinación y Sínter, donde culmina con la obtención del sínter de níquel.

Esta tecnología se distingue por su sencillez y el uso de equipos universalmente conocidos (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación), que favorecen una producción con alto nivel de mecanización, automatización y un consumo de reactivos relativamente pequeño, excepto el amoníaco (Anónimo, 2007). En la Unidad Básica de Producción Planta Hornos de Reducción se ejecutan los procesos de reducción y enfriamiento del mineral laterítico, este último se realiza en los enfriadores, que son equipos de transporte utilizados para el enfriamiento de sólidos granulados y que están conformados por:

- Cilindro horizontal rotatorio con tapas cónicas, utilizado en el enfriamiento del mineral después que se ha reducido en el horno y antes de su tratamiento, con el propósito de preservar sus valores metálicos.
- Piscina, donde el cilindro rota y flota. El agua es continuamente cambiada, así su temperatura se mantiene en un valor conveniente durante su explotación.
- Accionamiento electromecánico, que transmite el movimiento al cilindro.

Fundamento de la investigación

El vertiginoso desarrollo de la industria del níquel y el incremento de los niveles productivos, demandan que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficacia y la eficiencia en las plantas metalúrgicas. Donde tienen singular importancia ciertos subprocesos considerados esenciales, como son la reducción del mineral y su preparación para enviarlo al proceso de lixiviación. Este último consiste en enfriar el mineral laterítico reducido desde una temperatura de 1023,15 K a la salida del horno hasta 423,15 K para pasar a los tanques de contacto de la Unidad Básica de Producción Planta de Lixiviación y Lavado (Font and Bustamante, 1990). En el esquema de lixiviación actual, para impedir la ebullición de la solución amoniaca, el mineral reducido debe salir de los enfriadores con una temperatura cercana a los 393,15 K (Samalea, 2000).

Las deficiencias sistémicas y los problemas técnicos presentes en el funcionamiento de los enfriadores del mineral laterítico reducido en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” han provocado falta de eficacia e ineficiencia en el proceso, que condujeron a investigaciones en diferentes períodos de explotación de la tecnología Caron.

En el período comprendido entre el 1956 y 1996, los informes técnicos de las empresas abordan los siguientes temas:

- Análisis de la adición directa de agua atomizada y vapor de agua al mineral laterítico reducido en el interior del enfriador y su influencia en los mecanismos de transferencia de calor (Lado 1954, Franz 1956, Alepuz 1958, Thornton 1958, Rodríguez 1977 a, Rodríguez 1977 b, Gándara 1980)
- Análisis del uso de enfriadores de cama fluida para el enfriamiento del mineral laterítico reducido (Alepuz 1970).
- Determinación del ángulo de reposo y del movimiento del mineral laterítico reducido caliente en el interior del cilindro horizontal rotatorio (Alonso 1973, Presillas, Rodríguez et al. 1977).
- Consideraciones sobre el mecanismo de los raspadores interiores de los enfriadores, su incidencia en la transmisión de calor e introducción de mejoras en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido (Presillas, Rodríguez et al. 1977, Rodríguez 1977 c, Aguilar 1986, Medina 1995, Aguilar 1996).
- Análisis del empleo de inhibidores de incrustación en el agua para el enfriamiento del cilindro horizontal rotatorio (Rodríguez 1977 d).
- Análisis de los problemas mecánicos y tecnológicos durante la fabricación y montaje de los enfriadores (Hernández 1996).
- Análisis de la transferencia de calor entre el cilindro y el agua de la piscina (Valle, García et al. 2000 a, Valle, García et al. 2000 b).
- Construcción de un cilindro horizontal rotatorio a escala de laboratorio y obtención del ángulo de llenado, ángulo de inclinación del mineral laterítico y de los carros raspadores pendulares para diferentes velocidades de rotación y coeficientes de llenado (Jacomino-Rodríguez 2010, Gómez-Rodríguez 2012).

- Construcción de un enfriador de mineral laterítico reducido a escala piloto (Quintero-González. and Verdecia-Reyes 2008, Rodríguez-Guzmán 2010, Gutiérrez-Galbán 2011), obtención de los parámetros de explotación (García-Meriño 2009, Zalazar-Oliva 2010), instalación del sistema automático para la medición de las variables que lo caracterizan (Vargas-Ramos 2010) y evaluación del proceso (Tabera-Rodríguez. and García-Guerrero 2006, Pujol-Leyva 2007, Lamorú-Urgelles 2008, Araujo-Escalona 2009, Góngora-Leyva, Lamorú et al. 2009, Espinosa-Loforte 2012).
- Modelación, simulación e identificación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios por el método de elementos finitos (ANSYS) y con ayuda de Redes Neuronales Artificiales (MATLAB) (Londrez-Mena 2007, Spencer-Rodríguez 2009, Ortiz-Castro 2010).
- Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en las empresas “Comandante Ernesto Che Guevara” y “Comandante René Ramos Latour” (Perdomo-Mena and Matos-Casals 2007, Álvarez Álvarez 2008, Vargas -Pérez 2008, Arena-Cutiño 2009, Osorio-Góngora 2009, Pupo-Revé 2010, Rodríguez-Moreno 2011, Góngora-Leyva, Palacio-Rodríguez et al. 2012, Matos-Casals 2012, Pupo-Ramírez 2012).
- Evaluación técnico – económica e influencia de los elementos mecánicos del enfriador horizontal en el proceso de transferencia de calor y de la temperatura del mineral laterítico reducido en el índice de extractable en el tanque de contacto (Sotto-Guilarte 2007, Santana-Perceval 2009, Leyva-Durán 2010).
- Modelación Físico-Matemática del proceso de enfriamiento del mineral en cilindros horizontales rotatorios (Góngora-Leyva 2004 y Retirado-Mediaceja 2004, Cala 2005, Góngora-Leyva, Guzman et al. 2007, De Valle-Ramírez 2008).

Situación problemática

Las investigaciones relacionadas con el enfriamiento del mineral laterítico reducido se han dirigido a la evaluación y análisis de factores que influyen en el proceso de transferencia de calor de forma general, recientemente estas se realizaron en el

enfriador 5 de la Planta de Hornos de Reducción, en las que se evaluó y modeló el proceso de transferencia de calor. Sin embargo en ninguna investigación precedente se han estudiado los problemas y características particulares de cada enfriador instalado en la planta, no se ha evaluado el proceso de transferencia de calor para las condiciones técnicas y de operación actuales de cada cilindro enfriador y cómo estas influyen en la estabilidad operativa de los enfriadores y en la eficiencia de enfriamiento del proceso.

Sustentado en la experiencia adquirida desde la puesta en explotación de los enfriadores y los estudios realizados a los mismos, se considera que las principales causas puntuales que provocan el mal funcionamiento de la instalación son:

- Los parámetros y variables principales que definen el comportamiento del proceso de enfriamiento: flujo de mineral, coeficiente de llenado, temperatura y nivel del agua en la piscina; no se encuentran en los correspondientes rangos requeridos por el proceso.
- Se desconoce la velocidad y el área que ocupa el mineral dentro del cilindro en función de la cantidad y tipo de carros raspadores instalados. No existen criterios precisos sobre la eficacia de los carros raspadores en el interior del cilindro.
- Operación deficiente de la instalación por parte de los operarios de la Unidad Básica de Producción Planta Hornos de Reducción.
- Se desconoce el flujo de agua en las piscinas de los cilindros enfriadores.
- No existe una evacuación efectiva del agua a la salida de los enfriadores.

A partir de las deficiencias expresadas se define como **problema de la investigación**: La necesidad de realizar un diagnostico en los enfriadores cilíndricos rotatorios horizontales de mineral laterítico reducido de la Planta de Hornos de Reducción de la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”, para determinar los problemas particulares que afectan la eficiencia del proceso de transferencia de calor.

Teniendo en cuenta la problemática planteada y el problema de la investigación, se define como **objeto de estudio**: Los enfriadores cilíndricos rotatorios horizontales de mineral laterítico reducido de la Planta de Hornos de Reducción de la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”.

En correspondencia al problema científico declarado se define como **objetivo general del trabajo**: Diagnosticar los enfriadores cilíndricos horizontales rotatorios de mineral laterítico reducido de la Planta de Hornos de Reducción de la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” para las condiciones actuales de operación.

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

- ❖ Evaluar el comportamiento de las variables que caracterizan el proceso de intercambio de calor para cada enfriador.
- ❖ Realizar los balances de masa y energía del proceso de transferencia de calor en cada enfriador.

Identificar los problemas fundamentales de los enfriadores de mineral laterítico reducido.

Sobre la base del objetivo general se establece la siguiente **hipótesis científica**: Si se diagnostica cada enfriador de mineral laterítico reducido de la Planta de Hornos de Reducción de la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”, entonces se podrán establecer las condiciones de operación para elevar la eficiencia del proceso de transferencia de calor.

Para garantizar el cumplimiento del objetivo de la investigación se proponen las siguientes **tareas**:

1. Análisis de la bibliografía que aborda el proceso de enfriamiento del mineral reducido que permita el establecimiento del estado del arte de la temática.
2. Monitoreo y registro de las variables que intervienen en el proceso de transferencia de calor en el enfriamiento de mineral, para la obtención de la base de datos.

3. Establecimiento del procedimiento del balance térmico de la instalación para la determinación del comportamiento de las principales variables del proceso.
4. Valoración técnica y económica del proceso, así como de las afectaciones medioambientales asociadas al mismo.

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

- Documental y bibliográfico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido.
- Inductivo-deductivo para el establecimiento del procedimiento de cálculo que caracterice térmicamente al enfriador.
- La medición de los parámetros de operación para la obtención de la base de datos de cada enfriador.
- Técnicas computacionales para el cálculo y representación gráfica de las variables que caracterizan la instalación.

1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

En el proceso de obtención del níquel, la Planta Hornos de Reducción es de vital importancia, en ella se crean las condiciones (reducción de los óxidos de níquel y cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica, un elemento importante dentro de ella lo constituyen los enfriadores de mineral, de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de lixiviación. Por tal motivo el objetivo de este capítulo es establecer los principales elementos teóricos relacionados con el objeto de estudio y los aspectos fundamentales que rigen el proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios.

1.1 Caracterización del flujo tecnológico en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

El área que ocupa la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” está al norte del yacimiento de mineral de Punta Gorda, en la costa norte de la provincia de Holguín, Cuba, entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la ciudad de Moa. El proceso de extracción de níquel según el esquema de lixiviación carbonato – amoniaco del mineral laterítico reducido, se caracteriza por una extracción de: 75 a 76 % de níquel y 25 a 30 % de cobalto (Anónimo 2007 a) y comprende las siguientes actividades:

Unidad Básica Minera: Suministra la mena a la fábrica que está situada al suroeste del área industrial. La mena de la capa superior está compuesta de limonita y el cuerpo de limonita y serpentina blanda. Los componentes fundamentales de la mena son: Ni $\geq$ 1,24 %; Co $\geq$ 0,09 %; Fe $\geq$ 36,5 %; SiO₂ (10,5 a 11,5 %); MgO (4 a 6 %); S (0,2 a 0,4 %); C (2 a 2,8 %) (Anónimo 2007 a). La transportación se realiza directamente desde las excavaciones hasta el área de recepción de la fábrica mediante camiones volquetas.

Unidad Básica de Producción Planta de Preparación de Mineral: Recibe la mena, desde el punto de recepción a través de transportadores de bandas, para ser introducida a los secaderos cilíndricos rotatorios donde disminuye su humedad de 38 % hasta valores de (4,0 a 5,5 %). Luego pasa a la sección de molienda a través de transportadores de bandas, donde es desmenuzado en molinos de bolas hasta una granulometría de 0,074 mm .

Unidad Básica de Producción Planta de Hornos de Reducción: Ocurre el proceso de reducción del níquel contenido en el mineral. Está constituida por 24 hornos de soleras múltiples, los que descargan el mineral a 12 enfriadores, de donde pasa a la planta de Lixiviación y Lavado.

Unidad Básica de Producción Planta de Lixiviación y Lavado: El mineral reducido y enfriado, se mezcla con licor amoniacal en la canal de prelixiviación que lo lleva al tanque de contacto, desde donde se envía a un sistema de turboaeradores. En este proceso de reacciones es necesario enfatizar en el control de la temperatura y la densidad de la pulpa que sale del tanque de contacto y llega a los turboaeradores, ya que estas variables afectan la cantidad de magnesio que entra en la solución. A mayor temperatura de la pulpa, mayor será la cantidad de hierro disuelto inicialmente. A menor temperatura de la pulpa, mayor será la disolución de oxígeno procedente del aire introducido a los turboaeradores. La velocidad de disolución del oxígeno gobierna el proceso de las reacciones de lixiviación. Luego la pulpa pasa a los sedimentadores donde el licor producto de la lixiviación, rico en níquel y cobalto se obtiene por reboso y se separa de los sólidos, siendo bombeada una parte para recuperación de amoníaco y la otra parte para la sección de enfriamiento, donde se incorpora nuevamente al proceso por los tanques de contacto. Los sólidos sedimentados en forma de pulpa se extraen por la parte inferior del sedimentador y se dirigen hacia dos sistemas paralelos de cinco etapas de lavado (Anónimo 2007 b). El licor producto se evacua desde el sistema de lixiviación y lavado después de la primera etapa de lixiviación y en forma de la fase líquida de la pulpa de cola desde la quinta etapa de lavado hacia la Unidad Básica de Producción

Planta de Precipitación de Sulfuro de Níquel más Cobalto y de Recuperación de Amoníaco.

Unidad Básica de Producción Planta de Precipitación de Sulfuro de Níquel más Cobalto y de Recuperación de Amoníaco: El licor enriquecido en níquel y cobalto se somete a una inyección de hidrosulfuro de amonio o sulfhidrato de sodio para precipitar el cobalto en forma de sulfuro, este producto se envasa y se comercializa. El licor descobaltizado se envía a la planta de Recuperación de Amoníaco. El licor carbonato amoniacal enriquecido en níquel recibe un tratamiento con vapor en las torres de destilación, obteniéndose el carbonato básico de níquel. La pulpa de desecho de la última etapa de lavado se envía a las torres de destilación de colas donde recibe tratamiento con vapor para la recuperación del licor amoniacal contenido en esa pulpa. El producto de desecho (cola) es enviado a la presa de cola. La pulpa de carbonato de níquel se envía a la planta de Calcinación y Sínter.

Unidad Básica de Producción Planta de Calcinación y Sínter: Luego de filtrado el carbonato básico de níquel es alimentado a los hornos de calcinación para la obtención del óxido de níquel, que es utilizado en el proceso de sinterización, obteniéndose el sínter níquel que constituye el producto final de la planta y de la fábrica. Este producto es envasado en grandes bolsas y trasladado al puerto para su comercialización.

1.2 Flujo tecnológico de la Unidad Básica de Producción Planta de Hornos

El mineral almacenado en las tolvas de la sección de molienda de la Unidad Básica de Producción Planta de Preparación de Mineral es enviado a los silos de mineral de la Planta de Hornos de Reducción. El mineral es bombeado hasta las tolvas de los hornos y de estas pasa a los dosificadores de pesaje automático, (capacidad de hasta 22 t/h), encargados de garantizar una alimentación uniforme a cada horno a través del pesaje que realizan de acuerdo al tonelaje fijado. Luego el mineral se descarga al sinfín alimentador que lo transporta hacia el hogar cero del horno, donde es sometido al proceso de reducción que se logra, en un horno de hogares múltiples (17 hogares), estableciendo un perfil de temperatura y una concentración

determinada de gases reductores, para ello el horno dispone de 10 cámaras de combustión dispuestas en los hogares 6, 8, 10, 12, 14 y 15 con quemadores de petróleo de alta presión, encargados de producir los gases para el calentamiento del mineral. La presión y el flujo del aire para la combustión es garantizada por el uso de ventiladores.

Además, el horno cuenta con un eje central con 68 brazos articulados, cuatro en cada hogar, que tienen dispuestos dientes o paletas, los cuales mediante la rotación del eje central trasladan el mineral de un hogar a otro en forma de zigzag. Los hogares pares descargan por la periferia y los impares por el centro.

Para evitar las pérdidas de material en el proceso se cuenta con una batería de ciclones por cada horno donde caen por gravedad a través del hogar cero las partículas finas de mineral que arrastran los gases. Luego el mineral que se recupera en los electrofiltros es transportado hacia las tolvas de los molinos para más tarde ser bombeado hacia los silos.

1.3 Especificidades del flujo tecnológico del enfriador del mineral laterítico reducido

El mineral llega a través del transportador helicoidal rotatorio, formado de un cuerpo tubular que se enfría con agua, rota apoyado en rodillos y en su interior tiene instalado un tornillo transportador, que alimenta al enfriador a través de la tapa cónica del cilindro, donde al caer el mineral es trasladado por cada sección del mismo con la ayuda de los carros raspadores, los cuales se encargan de remover el mineral y raspar la superficie interior del enfriador evitando que el mineral se adhiera y esto dificulte el proceso de transferencia de calor con la superficie interior del cilindro, cada sección del mismo posee un separador circular en todo el diámetro del equipo que posibilita el tiempo de retención necesario para que el mineral se enfríe adecuadamente, mientras avanza desde la entrada hacia la salida del cilindro, para ser descargado en los tanques de contacto pertenecientes a la Unidad Básica de Producción Planta de Lixiviación y Lavado.

El accionamiento está compuesto por el grupo motor-reductor principal y motor-reductor auxiliar que se acoplan a través de un embrague frontal. En el cuerpo existen dos puntos de apoyo (rodillos) que se apoyan en chumaceras.

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

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

Mezclar: los carros raspadores siguen el movimiento del cilindro y alcanzan una determinada altura, caen por su propio peso y mezclan la masa caliente a través de superposición de capas, empujando la capa caliente adyacente al cuerpo y transportando la capa fría.

Enfriar: es el intercambio calórico entre el calor que aporta el mineral al cilindro y al agua de la piscina donde está sumergido el enfriador. Debe disminuir la temperatura del mineral hasta 423,15 K en la descarga.

Durante el régimen de trabajo del enfriador se suministra agua a temperatura ambiente a la piscina, a contracorriente con el mineral y su nivel se garantiza mediante anillas existentes en el tubo vertedero situado en la zona caliente de evacuación. La temperatura del agua a la salida de la piscina oscila entre 333,6 y 367,04 K en dependencia de otros parámetros como temperatura y flujo, del mineral y de agua (Góngora-Leyva, Palacio-Rodríguez et al. 2012).

Para determinar el tiempo de retención del sólido en hornos, secadores y calcinadores existen correlaciones empíricas (Perry and Green 2008, Han and Chang 2012), debido a que factores como: longitud, diámetro e inclinación del cilindro; forma y disposición de los elementos interiores (carros raspadores); velocidad de rotación del cilindro; granulometría, viscosidad y adherencia del mineral, dificultan la obtención de una relación analítica (Castaño 2003, Castaño, Rubio et al. 2009), aunque cuando el coeficiente de llenado es menor del 20 % el flujo de sólidos no ejerce influencia significativa (Pollard and Pollard 1989). Las paletas interiores distribuidas uniformemente, permiten un contacto gas-sólido favorable para cualquier

relación de longitud y diámetro, evitando el efecto de canalizaciones (Sriram and Sai 1999).

Los enfriadores del mineral no poseen ángulo de inclinación y los carros raspadores, que garantizan el desplazamiento del mineral por el interior del cilindro son únicos de su tipo, lo que impide emplear los modelos propuestos por otros autores para determinar el tiempo de retención. Resultados experimentales establecen el tiempo de retención del mineral en los enriadores de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” oscilan entre 30 y 50 min (Rodríguez 1977, Page, Bisset et al. 1998 Valle, García et al. 2000 parte 1). Un modelo eficaz para estimar este parámetro se debe sostener en estudios experimentales que relacionen variables como: flujo de sólido, el ángulo de inclinación de los carros raspadores, coeficiente de llenado y velocidad de rotación.

1.4 Procesos de transferencia de calor en el enfriador

Los procesos de transferencia de calor en el enfriador del mineral se deducen del análisis del flujo tecnológico descrito en el epígrafe 1.1. El proceso de enfriamiento tiene como objetivo disminuir la temperatura del mineral hasta 423,15 K. Para ello se utiliza el enfriador rotatorio, que es un equipo de transferencia de calor cilíndrico, dispuesto horizontalmente como una instalación de transporte. Desde el punto de vista termoenergético en este proceso están presentes los tres modos de transmisión del calor (conducción, convección y radiación), los mismos influyen de la forma siguiente:

El mineral descargado en el enfriador a alta temperatura, transfiere el calor a la superficie interior del cilindro a través de dos zonas:

La pared cubierta por el mineral, donde están presente la conducción, la convección y la radiación, con predominio de la transferencia de calor por conducción debido al contacto sólido-sólido (Valle, García et al. 2000 a, Valle, García et al. 2000 b).

La pared no cubierta por el mineral, donde el calor se transfiere por convección y radiación desde los gases productos de la combustión que acompañan al mineral hacia la pared interior del cilindro no cubierta por el mineral.

A través del espesor de la pared del enfriador el calor se transfiere por conducción, con mayor intensidad de la transferencia de calor en la parte que está en contacto el mineral con el cilindro.

Desde la superficie exterior, el enfriador intercambia calor por convección con el agua de la piscina, dando lugar al calentamiento progresivo de la misma, para el análisis de este proceso se considera que el cilindro está cubierto de agua.

Desde la superficie del agua en la piscina el calor se transfiere al medio ambiente por convección y evaporación de la película de agua, se puede considerar con bastante aproximación que la evaporación de la película de agua ocurre a temperatura constante en el sentido radial del cilindro y solo se considera en el sentido longitudinal.

1.4.1 Transferencia de calor entre el mineral y la pared del cilindro

En el proceso de transferencia de calor entre el mineral y la pared interior del cilindro es predominante la conducción.

Según el modelo de penetración (Schlünder 1982), la resistencia térmica total entre el sólido y la pared cubierta consiste en tres partes:

La resistencia térmica incompleta introducida por la transmisión de calor por convección durante el mezclado del material producto de la rotación: aquí el movimiento del sólido en el enfriador rotatorio se divide en dos zonas: (a) la capa activa donde el sólido se mueve a lo largo de una interfaz inclinada garantizando un mezclado radial intenso, donde la temperatura del sólido se considera una constante y la resistencia térmica se hace nula para valores del coeficiente de transferencia de calor por convección del sólido infinitamente grande; (b) y la zona de la capa fija en el fondo donde el sólido escasamente se mueve.

Resistencia de conducción térmica no estacionaria a través de la capa límite del sólido: La resistencia de penetración se obtiene resolviendo el problema de la conducción térmica en una dimensión inestable en que el calor se transfiere desde el sólido a través de la capa límite térmica en la capa de la película de gas (Schlünder 1982).

La resistencia de contacto térmico debido a la capa delgada de gas entre el sólido y la pared: considera la conducción térmica en la película de gas, entre una partícula y la pared y la radiación entre las partículas y la pared (Schlünder 1982).

1.4.2 Transferencia de calor entre el mineral y los gases

En un cilindro horizontal rotatorio la transferencia de calor por convección se manifiesta de dos maneras: entre el gas libre en la superficie y la cama de sólido, y entre el gas libre en la superficie y la pared. Los gases que ocupan estos equipos actúan recíprocamente con la cama y con la pared, ya que viajan a lo largo del cilindro (Mitchell, Tongta et al. 2002). Existen correlaciones que permiten estimar el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la partícula y el gas, pero ninguna de ellas es conveniente para ser aplicada a un enfriador (Ranz and Marshall 1952 a, Ranz and Marshall 1952 b, Kemp, Bahu et al. 1994, Mason and Li 1999).

1.4.3 Transferencia de calor entre gases y la pared del cilindro

Como el cilindro tiene un diámetro relativamente grande, la transferencia de calor por convección en su interior es análoga al esquema de flujo de gas sobre una placa. De manera semejante, los coeficientes de transferencia de calor son calculados en tres regiones de flujo: laminar, de transición, y turbulenta.

1.4.4 Transferencia de calor de la pared del cilindro al agua

El estudio de la convección en un cilindro horizontal con un flujo de calor de superficie constante sumergido en un fluido viscoso e incompresible determinó que el aumento en el valor del número de Prandtl contribuye a la disminución en la distribución de temperatura en la pared y a un aumento del valor del parámetro de convección mixta (Nazar, Amin et al. 2004).

En un cilindro horizontal que transmite oscilaciones rotatorias en dimensiones infinitas, la convección forzada es causada por la oscilación del cilindro, la convección natural es causada por la fuerza de flotación del flujo y el proceso de transferencia de calor es gobernado por los números de Rayleigh y Reynolds y por la

frecuencia dimensional de las oscilaciones, además existe un rango de exactitud para los números de Rayleigh y de Prandtl con el que deben experimentar el problema de la convección libre en un cilindro horizontal isotérmico (Iannetta and Moretti 1992, Wieland-Werke 1994, Antohe and Lage 1997, Olivas, Zahrai et al. 1997, Hossain, Kutubuddin et al. 1999, Mahfouz and Badr 1999, Mahfouz 2003, Abdalla, Al-Amiri et al. 2005).

Molla (2004), concluyó que la suposición de las propiedades de los fluidos constante, puede introducir errores severos en la cantidad de calor que se transfiere. El coeficiente de transferencia de calor local aumenta con el incremento de la velocidad del flujo de aire al caer la película de agua por evaporación (Panday 2005).

En un cilindro rotatorio calentado con un flujo cruzado, se dividió la región de flujo subcrítico en tres rangos en función de la relación entre la velocidad de rotación y la velocidad del flujo: entre 0 y 0,5 es caracterizado por un aumento del número de Nusselt; entre 0,5 y 2, los coeficientes de transmisión de calor son independientes de la velocidad de rotación; mayor de 2, la velocidad de la rotación del cilindro y no la velocidad del flujo cruzado, determinan el nivel de transmisión de calor (Peller, Lippig et al. 1984).

Para un cilindro calentado, sumergido en una capa fluida de sal estratificada donde las condiciones del flujo dependen del número de Rayleigh y de la proporción de flotación, se plantea que el número de Nusselt local refleja las características de transferencia de calor por convección (Tsinober, Yahalom et al. 1983, Chen and Liu 1997). Hubbell and Gebhart (1974), describen el mecanismo de transporte de todos los tipos de capas, otros autores mostraron que las características de la transferencia de calor por convección de doble difusividad está entre los modos de conducción y la convección natural (Turner 1973, Neilson and Incropera 1987, Dosch and Beer 1992).

Los resultados numéricos del flujo y campos termales para la convección libre desde un cilindro semiredondo sumergido en los fluidos inmóviles para diferentes rangos de números de Grashof, Prandtl y Nusselt demuestran que la disminución de los esfuerzos cortantes en el fluido facilita la transferencia de calor y un aumento de ellos

tiene un efecto contrario (Yu, Fan et al. 2010, Chandra and Chhabra 2012 a, Chandra and Chhabra 2012 b).

Las ecuaciones de energía, continuidad y velocidad que describen el flujo y la transferencia de calor de la ley de fuerza de los fluidos sobre un cilindro semicircular, se han resuelto numéricamente en el régimen de flujo estacionario bidimensional (Chandra and Chhabra 2011 a, Chandra and Chhabra 2011 b).

La influencia de una pared caliente en el espesor de la capa límite, indica que la velocidad del fluido cercana a la pared es superior, debido a que la expansión tiene lugar en temperaturas más altas. La rotación domina sobre el flujo cruzado y tiene un efecto significativo en la distribución de los coeficientes de transferencia de calor local (Naumenko 2001). El perfil del número de Nusselt promedio está entre los modos de conducción pura y convección natural y la variación se debe a la evolución de las capas (Peng 1998, Gschwendtner 2004).

En la instalación objeto de estudio el proceso es similar, debido a la baja velocidad del agua, haciendo que la velocidad de rotación del cilindro sea de mayor influencia en el proceso de transferencia de calor. Como se observa existen criterios a considerar para el desarrollo de esta investigación, pero no se reportan estudios a un cilindro con características similares al objeto de estudio.

1.4.5 Transferencia de calor y masa del agua al aire

Se investiga la convección natural en la capa límite laminar en un cilindro horizontal con el flujo de calor uniforme en la presencia de generación de calor y las ecuaciones de capa límite gobernantes se transforman en una forma adimensional. Los sistemas no lineales resultantes de ecuaciones diferenciales parciales se resuelven numéricamente por el método de la diferencia finita y la técnica de solución de perturbación (Molla, Paul et al. 2009).

1.5 Análisis crítico de los estudios realizados al proceso de transferencia de calor en el enfriador.

Desde el inicio de la industria del níquel en Cuba en 1942 existen deficiencias en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, donde la velocidad de transferencia de calor es determinada por las propiedades y las condiciones de la cama del mineral (Rodríguez 1977 b, Rodríguez 1977 c). Trabajos dirigidos a disminuir la temperatura del mineral, evaluaron los mecanismos de transferencia de calor cuando se introduce vapor de agua y agua atomizada en la atmósfera interior del enfriador (Lado 1954, Franz 1956, Alepuz 1958, Thornton 1958, Gándara 1980). Consideran que la convección es libre, para un mínimo flujo de gases y tiene lugar en toda la longitud del cilindro a temperaturas promedio de 454,15 y 706,15 K , para la pared y los gases respectivamente (Rodríguez 1977 a). La radiación se considera en la mitad más caliente del enfriador (a temperaturas superiores a 573,15 K) y solo se consideran como fuente de radiación el vapor de agua y el dióxido de carbono por ser pequeña la emisividad de los gases diatómicos (Rodríguez 1977 a).

Estos estudios describen los procesos de transferencia de calor presentes en el enfriamiento del mineral, pero en su desarrollo no se tuvo en cuenta la resistencia por conducción del mineral reducido a la pared del cilindro, asumen constante el valor promedio de las temperaturas a la entrada y a la salida, introduciendo errores en el cálculo de la cantidad de calor que se transfiere (Molla 2004). Además, por ser un equipo de 30 m de longitud, debieron considerar su comportamiento como de parámetros distribuidos.

Aunque los enfriadores de mineral laterítico reducido de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” cumplen con la relación longitud diámetro (Perry and Green 2008), en vez extender su longitud se debió aumentar su diámetro logrando mayor capacidad de transportación, menor altura de la cama del mineral y mayor flotación, facilitando el intercambio de calor con la pared (Font and Bustamante 1990). Estos equipos presentan un sistema de carros raspadores interiores, que se distinguen por el comportamiento del mineral con respecto a otros equipos (Presillas, Rodríguez et al. 1977). La cantidad de carros es determinante en el proceso de enfriamiento, ya

que favorecen la movilidad del mineral, y la disminución del gradiente de temperatura con respecto al agua, influyen en el tiempo de retención del mineral, garantizan el trabajo con películas finas del mineral en la capa estática y la reposición de estas por una capa caliente que no ha estado en contacto con la pared, mejorando así el coeficiente de transferencia de calor por conducción hasta la pared del cilindro (Alonso 1973, Aguilar 1986) determinaron que la cama del mineral forma un ángulo de 22 a 26° con respecto a la horizontal y observó que el mineral resbala dentro del cilindro formando una masa estática. El mineral no reducido al igual que el de menor temperatura aumentan considerablemente su densidad y se dificulta su desplazamiento hacia la descarga aumentando el coeficiente de llenado (Pedroso 1996).

Conclusiones del capítulo 1

- Existe gran cantidad de estudios realizados que brindan información para el desarrollo de este trabajo.
- Los trabajos realizados describen los procesos de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios como: secadores, hornos y calcinadores, lo que aporta valiosos elementos para realizar la presente investigación.
- Las investigaciones realizadas no evalúan suficientemente las características operacionales y técnicas del objeto de estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para lograr un mayor control de los factores y parámetros que caracterizan los enfriadores cilíndricos rotatorios horizontales de mineral laterítico reducido e influyen en el proceso de transferencia de calor, aumentar la eficiencia en la industria, así como la optimización de los recursos naturales y materiales, es necesario el conocimiento y la aplicación de expresiones matemáticas que representan los fenómenos físicos.

En este capítulo se plantean como objetivos:

1. Describir los elementos que garantizan la calidad de las mediciones y las características técnicas de los enfriadores de mineral reducido.
2. Establecer los procedimientos para los balances térmico y de masa, para determinar la eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral en los cilindros horizontales rotatorios de la planta Hornos de Reducción de la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”.

2.1 Sistema de adquisición de datos

Las mediciones se realizaron en los enfriadores (desde el enfriador 1 hasta el enfriador 8) que se encuentran en funcionamiento actualmente en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

La empresa cuenta con un sistema de adquisición de datos CITECT que permite visualizar, graficar y controlar los parámetros que son de interés para el proceso metalúrgico, en las figuras 2.1 y 2.2 se muestran imágenes de las principales variables que son registradas por el CITECT.

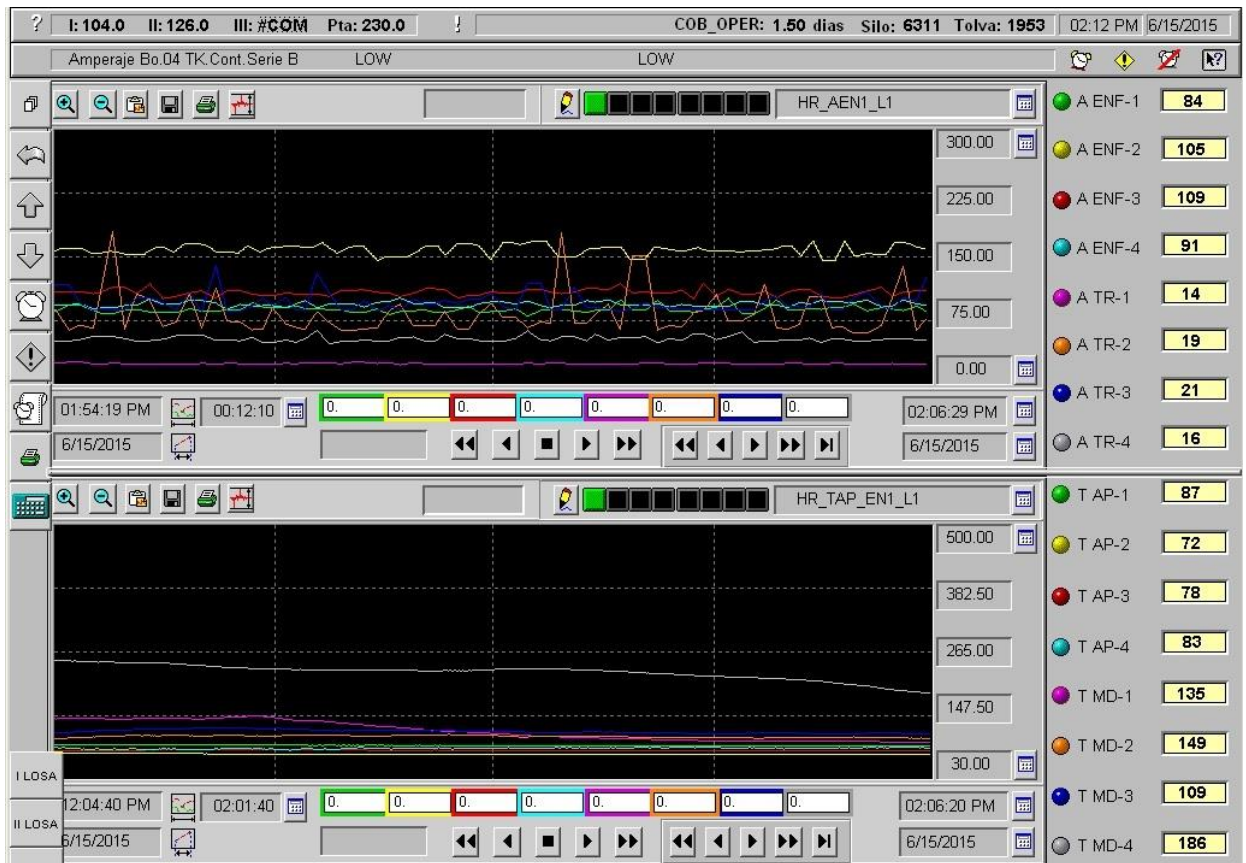


Figura 2.1. Variables principales del CTECT de los enfriadores de la primera losa.

Donde:

- ✓ A ENF-1, A ENF-2, A ENF-3, A ENF-4: corriente de los motores principales de los enfriadores 1, 2, 3 y 4; A .
- ✓ A TR-1, A TR-2, A TR-3, A TR-4: corriente de los motores de los transportadores 1, 2, 3 y 4; A .
- ✓ T AP-1, T AP-2, T AP-3, T AP-4: temperatura del agua de la piscina a la salida de los enfriadores 1, 2, 3 y 4; °C .
- ✓ T MD-1, T MD-2, T MD-3, T MD-4: temperatura del mineral reducido a la salida de los enfriadores 1, 2, 3 y 4; °C .

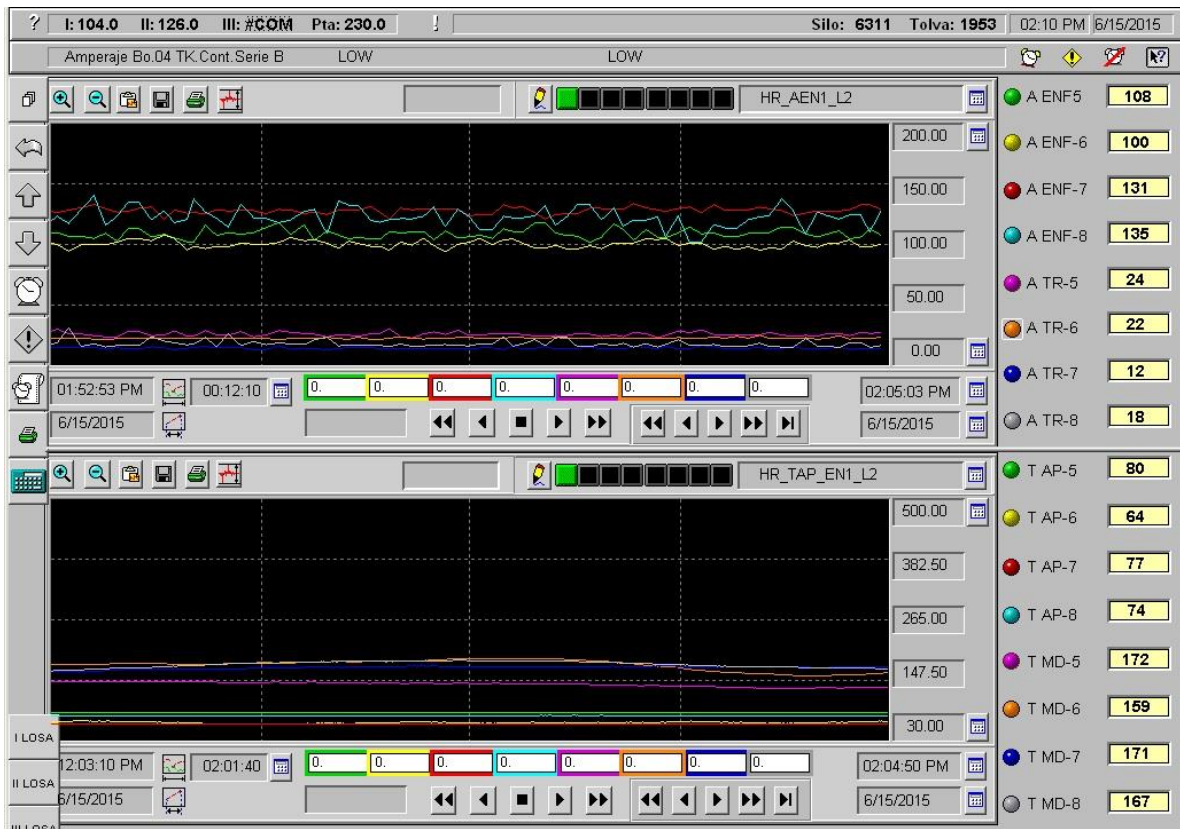


Figura 2.2. Variables principales del CITECT de los enfriadores de la segunda losa.
donde:

- ✓ A ENF-5, A ENF-6, A ENF-7, A ENF-8: corriente de los motores principales de los enfriadores 5, 6, 7 y 8; A .
- ✓ A TR-5, A TR-6, A TR-7, A TR-8: corriente de los motores de los transportadores 5, 6, 7 y 8; A .
- ✓ T AP-1, T AP-2, T AP-3, T AP-4: temperatura del agua de la piscina a la salida de los enfriadores 5, 6, 7 y 8; °C .
- ✓ T MD-1, T MD-2, T MD-3, T MD-4: temperatura del mineral reducido a la salida de los enfriadores 5, 6, 7 y 8; °C .

La figura 2.3 es una vista superior de la instalación que muestra la posición en que se realizaron las mediciones.

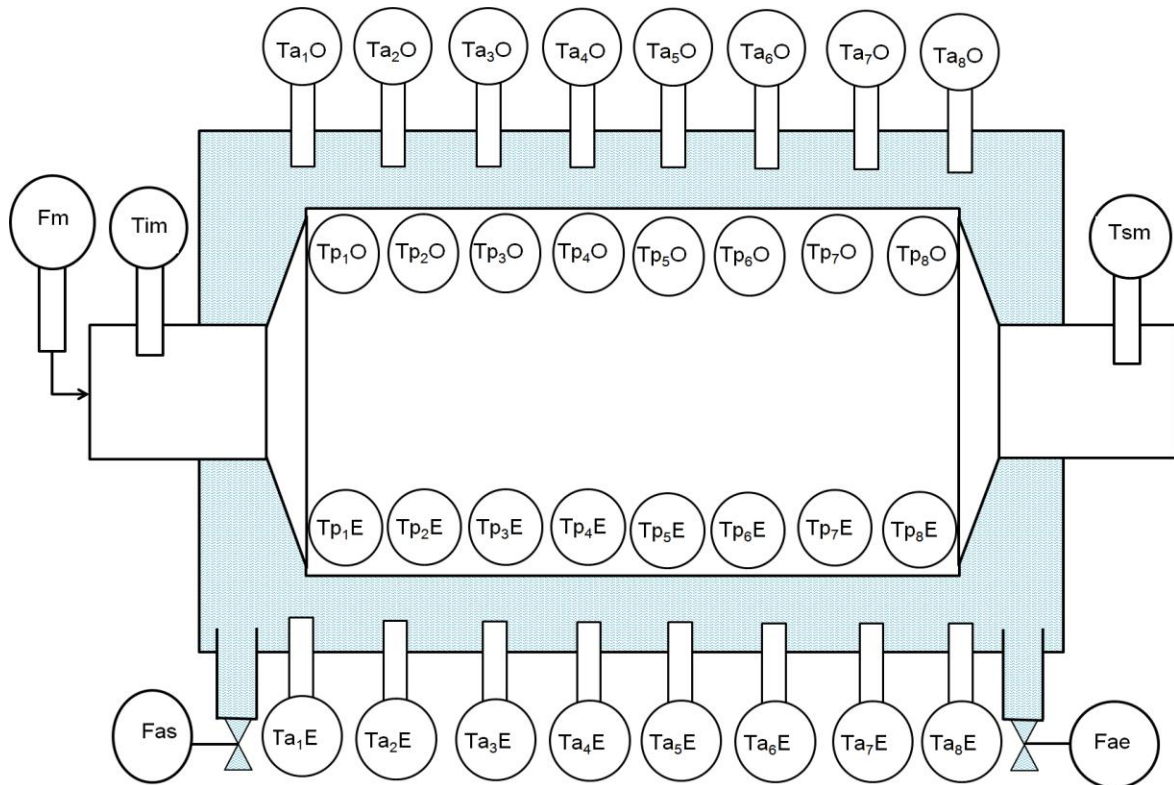


Figura 2.3. Vista superior de la posición donde se realizaron las mediciones en el objeto de estudio.

donde:

- ✓ Ta1E, Ta2E, Ta3E, Ta4E, Ta5E, Ta6E, Ta7E, Ta8E: temperatura del agua de la piscina en ocho puntos del lado este; °C .
- ✓ Ta1O, Ta2O, Ta3O, Ta4O, Ta5O, Ta6O, Ta7O, Ta8O: temperatura del agua de la piscina en ocho puntos del lado oeste; °C .
- ✓ Tp1E, Tp2E, Tp3E, Tp4E, Tp5E, Tp6E, Tp7E, Tp8E: temperatura de la pared del cilindro en ocho puntos del lado este; °C .
- ✓ Tp1O, Tp2O, Tp3O, Tp4O, Tp5O, Tp6O, Tp7O, Tp8O: temperatura de la pared del cilindro en ocho puntos del lado oeste; °C .
- ✓ Tsm: temperatura a la que sale el mineral; °C

- ✓ F_m : flujo de mineral en al enfriador; t/h
- ✓ T_m : temperatura a la que entra el mineral; °C

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

- ✓ Parámetro: Flujo de mineral alimentado al horno.
 - Equipo: báscula de pesaje continuo, tipo Westerdam.
 - Características técnicas:
 - ❖ Alimentación: 220 V AC
 - ❖ Entrada: 0 a 18 t/h
 - ❖ Salida: 4 a 20 mA
- ✓ Parámetro: Temperatura del mineral a la entrada y salida del enfriador.
 - Equipo: termopar tipo K con vaina y cabezal de conexión de roscado con convertidor de señal programable mediante la PC alojado en el cabezal.
 - Características técnicas:
 - ❖ Temperatura de servicio hasta 1523,15 K
 - ❖ Cabezal de conexión: forma A, DIN 43729; en fundición de metal ligero, con una entrada de cable.
 - ❖ Convertidor de señal programable con rango ajustado.
- ✓ Parámetro: Temperatura del agua en la piscina.
 - Equipo: termómetro de resistencia PT-100 con vaina y cabezal de conexión de roscado con convertidor de señal programable mediante PC alojado en el cabezal.
 - Características técnicas:
 - ❖ Longitud de inmersión: 250 mm
 - ❖ Convertidor de señal programable con rango ajustado de 273 a 393 K

- ✓ Parámetro: Velocidad de rotación del enfriador.
Equipo: tacogenerador.
Características técnicas:
 - ❖ Entrada: 0 a 8,0 rev/min
 - ❖ Salida: 0 a 10 V
- ✓ Parámetro: Temperatura de la superficie del cilindro.
 - Equipo: pirómetro digital, de mano. Modelo Raymxpe de fabricación alemana.
 - Características técnicas:
 - ❖ Temperatura de servicio entre 243 y 1273 K
 - ❖ Emisividad de la superficie ajustable.

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

2.2 Características técnicas de los enfriadores cilíndricos de la planta Hornos de Reducción

Los enfriadores cilíndricos horizontales rotatorios de mineral laterítico reducido de la planta Hornos de Reducción tienen las siguientes características generales:

- ❖ Productividad: 31 t/h
- ❖ Densidad del mineral reducido: 3,3 a 3,5 t/m³
- ❖ Temperatura del mineral a la entrada: 923,15 a 1023,15 K
- ❖ Temperatura del mineral a la salida: actualmente se acepta $\leq 533,15$ K
- ❖ Presión relativa: 0,01 a 0,02 kPa
- ❖ Consumo de agua en la piscina: ≤ 107 m³/h

- ❖ Longitud de la piscina: 32 m
- ❖ Profundidad de la piscina: 2 m
- ❖ Ancho de la piscina: 3,5 m
- ❖ Temperatura de agua a la entrada: 303,15 K
- ❖ Consumo de agua en las chumaceras: 1 m³/h
- ❖ Dimensiones del enfriador:
- ❖ Diámetro interior: 3,01 m
- ❖ Espesor: 0,018 m
- ❖ Longitud total: 30,09 m
- ❖ Diámetro del tubo de evacuación del agua: 0,25 m
- ❖ Peso del cuerpo sin accionamiento: 80,53 t
- ❖ Potencia del motor principal: 75 a 90 kW
- ❖ Potencia del motor auxiliar: 11 kW
- ❖ Velocidad del enfriador con el motor principal: 6,12 r.p.m
- ❖ Velocidad del enfriador con el motor auxiliar: 0,4 r.p.m
- ❖ La piscina está dividida en cuatro secciones de 8 m y cada una de ellas tiene su flujo de agua de entrada.

2.3 Balance de masa y energía

En este trabajo se evaluará a partir de un balance de masa y energía la equivalencia entre los calores que entran y salen del sistema. Una aplicación importante del calor y analogía de transferencia de masa es el enfriamiento evaporativo, que ocurre siempre que un flujo de gas fluye sobre un líquido. La evaporación debe ocurrir de la superficie líquida y la energía asociada al cambio de la fase es el calor latente del líquido. Esta ocurre cuando las moléculas líquidas cerca de la superficie experimentan colisiones que aumentan su energía, sobre eso necesitan superar la superficie obligatoria de unión (Incropera 2007). La energía exigida para obtener la evaporación debe venir de la energía interior del líquido, que entonces debe experimentar una reducción en la temperatura (efecto de enfriamiento).

Sin embargo, si se mantienen las condiciones estacionarias, la energía latente perdida por el líquido debido a la evaporación debe ser completada por el traslado de la energía del líquido.

La ecuación (2.1) describe el balance térmico del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, que plantea que todo el calor absorbido por el agua es igual al calor cedido por el mineral menos las pérdidas al medio ambiente.

Se debe destacar que para hacer esta consideración se asume que en todo momento el cilindro parcialmente sumergido en la piscina permanece cubierto por una pequeña película de agua. Es decir el cilindro no está en contacto con el aire ambiente, lo hace a través del agua.

$$Q_{H_2O} = Q_m - Q_{ma} \quad (2.1)$$

donde:

Q_{H_2O} - calor absorbido por el agua; W

Q_m - calor cedido por el mineral; W

Q_{ma} - pérdida de calor al medio ambiente, W

El calor transferido del mineral al agua se determina por la ecuación (2.2) y depende de las propiedades y las temperaturas de entrada y salida del agua del sistema. Se debe tener en cuenta que existe una pequeña cantidad de agua que se evapora y por lo tanto el flujo de agua que entra no es igual al que sale.

$$Q_{H_2O} = \dot{m}_{sH_2O} \cdot C_{psH_2O} \cdot T_{sH_2O} - \dot{m}_{eH_2O} \cdot C_{peH_2O} \cdot T_{eH_2O} \quad (2.2)$$

donde:

$\dot{m}_{eH_2O}$, $\dot{m}_{sH_2O}$ - flujo másico del agua a la entrada y a la salida; kg/s

C_{peH_2O} , C_{psH_2O} - calor específico del agua a la entrada y a la salida; J/(kg·K)

T_{sH_2O} - temperatura de salida del agua de la piscina; K

T_{eH_2O} - temperatura de entrada del agua a la piscina; K

Para determinar el calor entregado por el mineral se utiliza la ecuación (2.3), en este caso se considera que todo el mineral que entra al enfriador es igual a la que sale.

$$Q_m = \dot{m}_m \cdot C_{pm} \cdot (T_{em} - T_{sm}) \quad (2.3)$$

donde:

$\dot{m}_m = \dot{m}_e = \dot{m}_s$ - flujo másico del mineral; kg/s

T_{em} - temperatura de entrada del mineral; K

T_{sm} - temperatura de salida del mineral; K

C_{pm} - calor específico del mineral; J/(kg·K)

Las ecuaciones (2.1, 2.2, y 2.3) dependen de las propiedades, del mineral y del agua de enfriamiento, pero para determinar la cantidad de calor transferida al medio ambiente es necesario tener en cuenta la transferencia de calor por convección del agua al aire, el calor por evaporación del agua y el calor por radiación del agua al aire. Para determinar la cantidad de calor que se pierde al medio ambiente se utiliza la ecuación (2.4).

$$Q_{ma} = Q_{conv} + Q_{ev} + Q_{rad} \quad (2.4)$$

donde:

Q_{conv} - cantidad de calor por convección del agua al aire; W

Q_{ev} - cantidad de calor por evaporación del agua al aire; W

Q_{rad} - cantidad de calor por radiación del agua al aire; W

Para determinar la cantidad de calor transmitida por convección del agua al aire, se utiliza la ecuación (2.5).

$$Q_{conv} = \alpha_{aa} \cdot A_{aa} \cdot (T_{agua} - T_{aire}) \quad (2.5)$$

donde:

α_{aa} - coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire; W/(m²·K)

A_{aa} - superficie de agua en contacto con el aire; m²

T_{agua} - temperatura del agua en la piscina; K

T_{aire} - temperatura del aire; K

El calor transmitido por evaporación del agua al aire se determina a través de la ecuación (2.6). Las ecuaciones (2.7) y (2.8) permiten determinar las pérdidas de calor por evaporación desde la superficie del agua en la piscina $q'_{evppisc}$ y desde la película de agua que cubre la pared q'_{evppar} no sumergida en el agua hacia el aire (Incropera 2007).

$$Q_{evp} = q'_{evppar} \cdot L_{ap} \cdot L_e + q'_{evppisc} \cdot A_{pisc} \cdot L_e \quad (2.6)$$

$$q'_{evppisc} = n_{Aa}'' \cdot h_{fg,a} \quad (2.7)$$

$$q'_{evppar} = n_{Ap}'' \cdot h_{fg,p} \quad (2.8)$$

donde:

$q'_{evppisc}$ - flujo de calor por evaporación del agua en la piscina; W/m²

q'_{evppar} - flujo de calor por evaporación del agua en la pared no sumergida; W/m²

n_{Aa}'' - flujo de masa por evaporación del agua en la piscina; kg/(s·m²)

n_{Ap}'' - flujo de masa por evaporación del agua en la pared no sumergida; kg/(s·m²)

$h_{fg,a}$ - calor latente de vaporización del agua a la temperatura en la piscina; J/kg

$h_{fg,p}$ - calor latente de vaporización del agua a la temperatura en la pared no sumergida; J/kg

L_{ap} - longitud del arco del cilindro no sumergido en la piscina; m

A_{pisc} - ancho de la superficie del agua de la piscina en contacto con el aire; m

L_e - longitud del enfriador; m

Los flujos de masa de agua en la piscina n'_{Aa} y en la pared n'_{Ap} se determinan según las ecuaciones (2.9) y (2.10) (Incropera 2007).

$$n'_{Aa} = h_{ma} \cdot (\rho_{Asata} - \rho_{Aaire}) \quad (2.9)$$

$$n'_{Ap} = h_{mp} \cdot (\rho_{Asatp} - \rho_{Aaire}) \quad (2.10)$$

donde:

h_{ma} - coeficiente de transferencia de masa por convección en la piscina; m/s

h_{mp} - coeficiente de transferencia de masa por convección en la pared no sumergida; m/s

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

$\rho_{A, sat. p}$ - densidad del vapor de agua saturado a la temperatura en la pared no sumergida; kg/m³

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

El coeficiente de transferencia de masa se determina a través de la ecuación (2.11).

$$h_m = Sh \cdot D_{AB} \cdot L_{aire}^{-1} \quad (2.11)$$

donde:

L_{aire} - longitud de la superficie de agua en contacto con el aire; m

Sh - número de Sherwood; adimensional

D_{AB} - coeficiente de difusión de masa del agua al aire; m²/s

El número de Sherwood es igual al gradiente de concentración adimensional de la superficie, proporciona una medida de la transferencia de masa por convección de la superficie y se determina a través de la ecuación (2.12), válida para $0,6 < Sc < 3000$ (Incropera 2007).

$$Sh = 0,0296 \cdot Re_L^{\frac{4}{5}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (2.12)$$

donde:

Re_L - número de Reynolds; adimensional

Sc - número de Schmidt; adimensional

La longitud de la superficie de agua en contacto con el aire L_{aire} (ecuación (2.13), se refiere al ancho de la piscina a_p menos la cuerda del segmento sumergido en el

agua a_a , más el arco de la superficie del cilindro no sumergido en el agua S_{pnsa} que también está cubierto por una película de agua e intercambia calor con el cilindro y con el medio, es la zona de mayor evaporación donde el agua alcanza su mayor temperatura.

$$L_{aire} = L_{ap} + S_{pnsa} \quad (2.13)$$

donde:

L_{aire} - longitud de la superficie de agua en contacto con el aire; m

S_{pnsa} - arco de la superficie del cilindro no sumergido en el agua; m

L_{ap} - ancho de la superficie del agua de la piscina en contacto con el aire; m

El ancho de la superficie de agua en la piscina L_{ap} en contacto con el aire, se estima a través de la ecuación (2.14).

$$L_{ap} = a_p - a_a \quad (2.14)$$

donde:

a_p - ancho de la piscina; m

a_a - la cuerda del segmento sumergido en el agua; m

El número de Reynolds para el aire se determina a través de la ecuación (2.15).

$$Re_L = u_{aire} \cdot L_{aire} \cdot \nu_{aire}^{-1} \quad (2.15)$$

donde :

u_{aire} - velocidad del aire; m/s

L_{aire} - longitud de la superficie de agua en contacto con el aire; m

ν_{aire} - coeficiente cinemática de viscosidad del aire; m/s²

Para determinar el número de Schmidt se emplea la ecuación (2.16).

$$S_C = \nu_{aire} \cdot D_{AB}^{-1} \quad (2.16)$$

donde:

u_{aire} - velocidad del aire; m/s

D_{AB} - coeficiente de difusión de masa del agua al aire; m²/s

El coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire α_{aire} , se obtiene según la ecuación (2.17).

$$\alpha_{aire} = \lambda_{aire} \cdot (0,43 \cdot Re_L^{0,58} \cdot Pr^{0,4}) \cdot L_{aire}^{-1} \quad (2.17)$$

donde:

Pr - número de Prandtl del aire; adimensional

Re_L - número de Reynolds del aire; adimensional

L_{aire} - longitud de la superficie de agua en contacto con el aire; m

λ_{aire} - coeficiente de conductividad térmica del aire; W/(m·K)

El calor transmitido del agua al aire por radiación se determina mediante la ecuación (2.18).

$$Q_{rad} = h_{rad} \cdot L_{aire} \cdot L_{enf} \cdot (T_{agua} - T_{aire}) \quad (2.18)$$

donde:

h_{rad} - coeficiente de transferencia de calor por radiación del agua al aire; W/(m²·K)

L_{aire} - longitud de la superficie de agua en contacto con el aire; m

L_{enf} - longitud del enfriador; m

T_{agua} - temperatura del agua; °C

T_{aire} - temperatura del aire; °C

El coeficiente de transferencia de calor por radiación h_{rad} se determina a través de la ecuación (2.19).

$$h_{rad} = \xi_{\alpha} \cdot \sigma \cdot (T_{agua} + T_{aire}) \cdot [(T_{agua})^2 + (T_{aire})^2] \quad (2.19)$$

donde:

ξ_{α} - emisividad del agua, adimensional;

σ - constante de Stefan-Boltzman; W/(m²·K⁴)

La eficiencia del enfriador se determina a través de la ecuación (2.20) y expresa la relación entre el calor entregado por el mineral y la cantidad de calor que entra con él.

$$\eta_e = \frac{Q_m}{\dot{m}_m \cdot C_{pm} \cdot T_{em}} \cdot 100 \quad (2.20)$$

donde:

η_e - eficiencia del enfriador; %

El balance de masa se realiza solo para el agua ya que se considera que el flujo de mineral que entra al enfriador es el mismo que sale. El flujo de agua que entra en la piscina es igual al flujo que sale de la piscina más el flujo que se evapora. Mediante la ecuación (2.21) se establece el balance de masa del agua.

$$\dot{m}_{ae} = \dot{m}_{as} + \dot{m}_{aeval} \quad (2.21)$$

donde:

$\dot{m}_{ae}$ - flujo másico de agua que entra a la piscina; kg/s

$\dot{m}_{as}$ - flujo másico de agua que sale de la piscina; kg/s

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

El flujo inicial de agua se determina a partir de la ecuación (2.22) y teniendo en cuenta las ecuaciones (2.1) y (2.2).

$$\dot{m}_{ae} = \frac{Q_m - Q_{ma} + \dot{m}_{aeval} \cdot C_{psH_2O} \cdot T_{sH_2O}}{C_{psH_2O} \cdot T_{sH_2O} - C_{peH_2O} \cdot T_{eH_2O}} \quad (2.22)$$

El flujo másico de agua que se evapora se calcula por la ecuación (2.23).

$$\dot{m}_{aeval} = n''_{Aa} \cdot L_{ap} \cdot L_e + n''_{Ap} \cdot S_{pnsa} \cdot L_e \quad (2.23)$$

donde:

n''_{Aa} - flujo de masa por evaporación del agua en la piscina; kg/(s·m²)

n''_{Ap} - flujo de masa por evaporación del agua en la pared no sumergida; kg/(s·m²)

L_e – longitud del enfriador; m

S_{pnsa} - arco de la superficie del cilindro no sumergido en el agua; m

L_{ap} - ancho de la superficie del agua de la piscina en contacto con el aire; m

Conclusiones del capítulo 2

- Se caracterizó el sistema de adquisición de datos de la empresa y se garantizó apto para el uso.
- Se estableció la metodología del balance térmico y de masa del proceso para cuantificar los modos de transferencia de calor, identificar el predominante sobre la base de las mediciones realizadas y la eficiencia de enfriamiento de los enfriadores de mineral reducido.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para el funcionamiento óptimo de las instalaciones de enfriamiento es necesario conocer detalladamente las particularidades de cada equipo, así como los defectos específicos que presentan y que limitan su funcionamiento.

Como objetivos de este capítulo se plantean:

1. Definir los problemas principales de los enfriadores de mineral reducido.
2. Establecer el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de enfriamiento, los resultados del balance térmico y la eficiencia del proceso de enfriamiento.
3. Valorar el impacto económico, social y ambiental del proceso de enfriamiento.

3.1 Principales deficiencias de los enfriadores

Los principales problemas generales detectados en los enfriadores de mineral reducido de la planta Hornos de Reducción se relacionan a continuación:

En todos los enfriadores excepto en el cinco, el nivel de agua en las piscinas es regulado mediante anillas que se acoplan al tubo de evacuación del agua, estas tienen una altura de unos 0,066 m y un diámetro de 0,25 m , poseen una guía para ubicarlas en el tubo. Las operaciones de control y regulación del nivel mediante anillas deben realizarse por los operadores cuando varía el flujo de mineral al enfriador. Estas anillas están ubicadas a unos 20 cm del tambor rotatorio y su altura oscila entre 41 y 85 cm desde el borde superior de la piscina, dando niveles de agua en la misma desde 1,15 a 1,59 m . La ubicación o retirada de alguna anilla es un trabajo riesgoso, puesto que el operador está expuesto a atrapamiento del equipo en movimiento, a quemaduras por agua a altas temperaturas, a caídas de distintos

niveles. Estos riesgos aumentan en los turnos de la noche al aumentar la falta de iluminación en esta área. Las anillas y las guías de estas en el tubo de evacuación están defectuosas a causa de la corrosión en las mismas, lo que dificulta tanto su buen acoplamiento como su ubicación o retirada. En la figura 3.1 se muestra la posición de las anillas en la piscina.

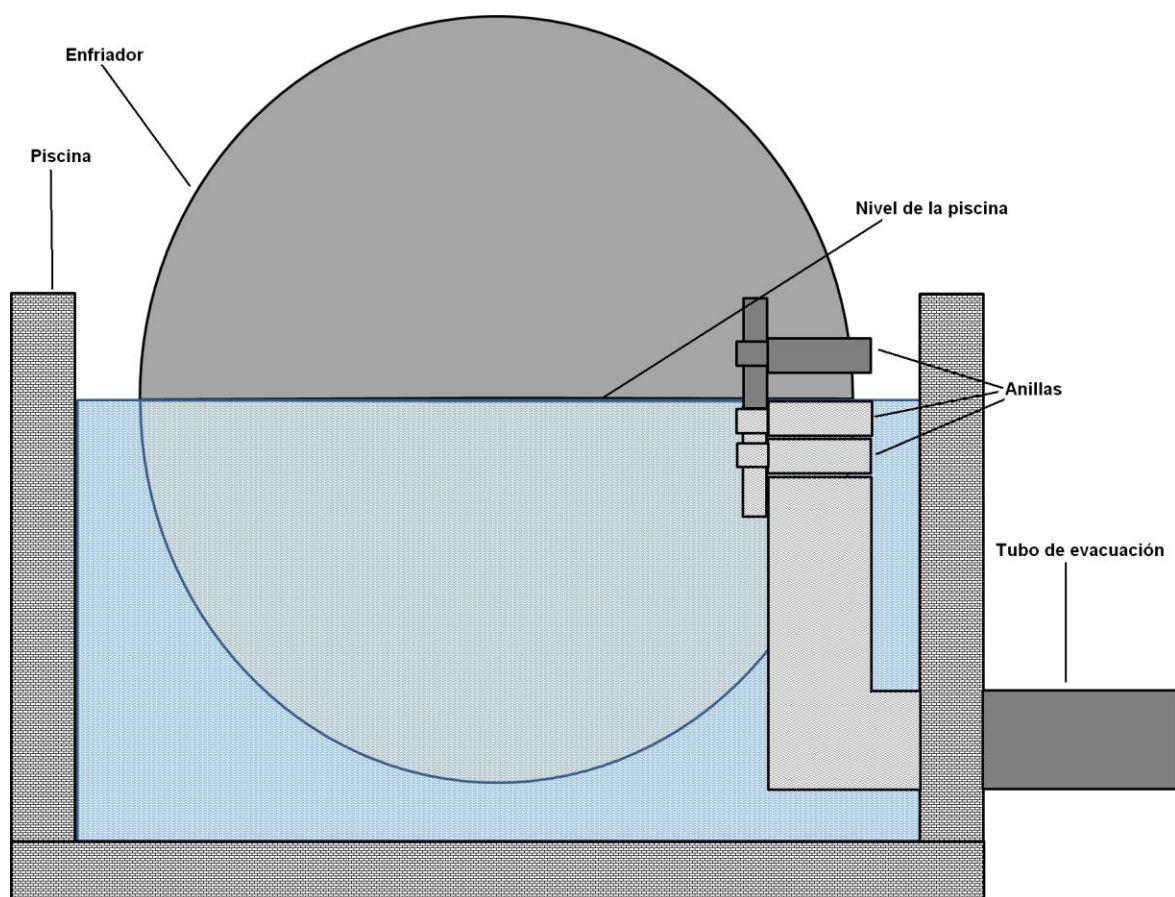


Figura 3.1. Esquema del control del nivel de agua en las piscinas por medio de anillas.

En ninguno de los enfriadores se conoce el flujo de agua que entra a la piscina. En el enfriador 5 tuvo instalado un flujómetro ultrasónico UFC 500 pero está actualmente averiado. El suministro de agua se realiza teniendo en cuenta la temperatura (de 70 a 80 °C) de la misma a la salida de la piscina; los operadores aumentan el flujo de

agua cuando la temperatura es mayor de 80 °C y lo disminuyen cuando la temperatura es menor a 70 °C . El desconocimiento del flujo de agua en los enfriadores es un problema en cuanto a la optimización de los portadores energéticos de la planta y la empresa.

Existen salideros de gases tóxicos (NH_3 y CO_2) en las canales de contacto, producto de la evaporación de los mismos desde la solución carbonato amoniacal que se pone en contacto con el mineral reducido enfriado, lo cual es perjudicial no solo desde el punto de vista medioambiental y de salud, sino también desde el punto de vista productivo, ya que aumentan las pérdidas de materiales y disminuye la eficiencia del proceso. La evaporación de los gases se debe a las altas temperaturas a las que se descarga el mineral en algunos enfriadores. Las pérdidas de gases son compensados a costa de un aumento del flujo de licor en las canales de contacto.

La presencia de temperaturas elevadas del mineral reducido a la salida de algunos enfriadores afecta el proceso de las siguientes formas:

- Frena las reacciones de lixiviación del níquel y el cobalto.
- Hace inestables los complejos carbonato amoniacales, libera amoníaco y dióxido de carbono y aumenta las pérdidas de metales en forma de hidróxidos con las colas.
- Provoca la formación de hidróxido de hierro tres, lo cual afecta la velocidad de sedimentación de la pulpa.
- Disminuye la solubilidad del oxígeno.
- Aumenta la solubilidad perjudicial del magnesio.

3.2 Características específicas de los enfriadores

Los enfriadores de mineral reducido de la planta Hornos de Reducción presentan características particulares que los describen y caracterizan. Los detalles técnicos operativos de cada enfriador son los siguientes:

Enfriador 1:

- ✓ Nivel de agua en la piscina por encima de lo recomendado, con 1,5 m .

- ✓ Se obtienen bajas temperaturas de mineral a la salida del mismo, hasta 111,29 °C .
- ✓ El flujo de mineral está por debajo de la capacidad de diseño (17 t/h por horno) con 26,109 t/h de mineral reducido, sin la sobrecarga del equipo.
- ✓ La piscina no posee salideros de agua, garantizando el aprovechamiento del agua de enfriamiento y por tanto en la eficiencia del proceso.
- ✓ El consumo de corriente del motor, de 90,84 A como promedio.
- ✓ La temperatura de la pared del enfriador oscilan entre 64,50 a 93,20 °C .
- ✓ La temperatura del agua de la piscina oscilan entre 50,80 y 81,90 °C .

Enfriador 2:

- ✓ Tecnológicamente presenta deficiencias en el enfriamiento, debido que el parámetro temperatura del mineral la salida reducido oscila entre 214,13 a 227,84 °C .
- ✓ El nivel de agua en la piscina del mismo es de 1,25 m .
- ✓ La temperatura del flujo de mineral de entrada promedia en 759,15 °C .
- ✓ La temperatura del agua oscilan entre 44,80 y 85,6 °C .
- ✓ La temperatura de la pared del enfriador oscilan entre 64,50 y 97,60 °C .
- ✓ El consumo de corriente por el motor es de 97,17 A como promedio.
- ✓ El flujo de mineral está próximo a la carga máxima diseñada de 29,941 t/h .

Enfriador 3:

- ✓ El nivel de agua en la piscina es de 1,20 m , y las temperaturas en la descarga promedian entre 130,15 y 146,43 °C , ya que tiene un mayor flujo de agua a la entrada de la piscina.
- ✓ La temperatura del agua en la piscina oscila entre 46,80 a 81,36 °C .
- ✓ La temperatura de la pared del cilindro oscila entre 60,30 y 97,70 °C .
- ✓ El motor principal consume como promedio 109,16 A .
- ✓ Opera a su capacidad de diseño con los dos hornos en operación.
- ✓ La evacuación del agua presenta deficiencia, debido al derrame continuo en el depósito al que es enviada.

Enfriador 4:

- ✓ El nivel de agua en la piscina es de 1,15 m .
- ✓ La temperatura del agua es 60,22 °C como promedio.
- ✓ La temperatura de la pared alcanzan valores hasta 82,62 °C .
- ✓ La principal deficiencia de este enfriador es su bajo nivel de agua en la piscina pues en ocasiones esto ha sido causa de averías por disparo del transportador de tornillo sinfín. Al ser bajo el nivel del agua, el enfriador desciende y al hacer contacto con el transportador este último se dispara.
- ✓ El diámetro de entrada donde penetra la última sección del transportador es más reducido que en los demás enfriadores.
- ✓ El motor principal consume de 98,25 a 106,94 A .

Enfriador 5:

- ✓ Opera con nivel de agua en la piscina de 1,55 m .
- ✓ La temperatura del agua oscila entre 50,76 a 75,56 °C .
- ✓ La temperatura de la pared oscila entre 55,96 a 84,82 °C .
- ✓ La temperatura del mineral a la salida del cilindro es de 156,54 a 157,54 °C .
- ✓ El consumo de corriente por el motor principal es de 104,29 a 113,35 A y promedia unos 109,70 A .
- ✓ Generalmente opera con una productividad de 30,744 t/h .

Enfriador 6:

- ✓ La temperatura de descarga es de 130,52 °C como promedio.
- ✓ El consumo de corriente por el motor principal es de 116,15 A como promedio.
- ✓ No presenta salideros de agua.
- ✓ El nivel del agua en la piscina es de 1,4 m .
- ✓ La temperatura de la pared del cilindro son de hasta 89,12 °C .
- ✓ La temperatura del agua son de hasta 76,94 °C .

Enfriador 7:

- ✓ El nivel de agua en la piscina es de 1,30 m .

- ✓ Se obtiene una temperatura de descarga de mineral de hasta 180,57 °C .
- ✓ La temperatura de la pared oscila entre 60,80 a 88,62 °C .
- ✓ La temperatura del agua de la piscina oscilan entre 57,38 a 80,60 °C .
- ✓ El consumo de corriente del motor es de 106,06 A como promedio.

Enfriador 8:

- ✓ El nivel de agua en la piscina es de igual a 1,20 m .
- ✓ Se obtiene baja temperatura de descarga de mineral de unos 174,04 °C debido al bajo flujo de mineral reducido.
- ✓ La temperatura de la pared oscilan entre 68,66 a 92,56 °C .
- ✓ La temperatura del agua oscilan entre 64,12 a 82,72 °C .
- ✓ El consumo de corriente por el motor promedia en 117,21 A .
- ✓ No existen salideros de agua en la piscina del mismo. Se logra buena estabilidad en la operación del equipo.

3.3 Comportamiento de parámetros que inciden en el proceso

La figura 3.2 muestra el comportamiento de la temperatura del agua en la piscina para los 8 enfriadores estudiados, donde se alcanzan valores entre 53,40 y 83,56 °C .

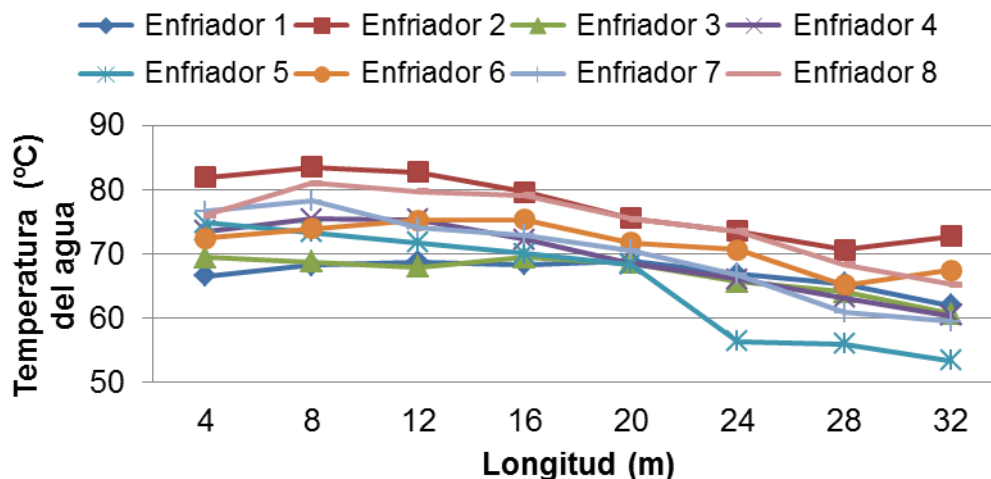


Figura 3.2. Comportamiento de la temperatura del agua de la piscina a lo largo del enfriador.

La figura 3.3 muestra el comportamiento de la temperatura en la superficie del cilindro para los 8 enfriadores estudiados, donde se alcanzan valores entre 61,63 y 90,02 °C .

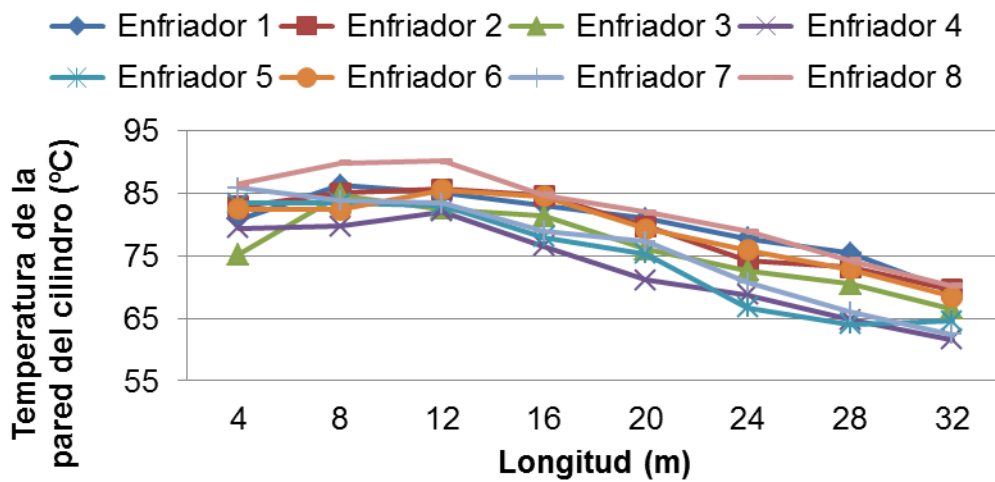


Figura 3.3. Comportamiento de la temperatura en la pared del enfriador.

Las figuras 3.2 y 3.3 demuestran que las temperaturas del agua en la piscina y de la pared del cilindro tienen un comportamiento variable, en el cual inciden parámetros como: flujo de mineral, flujo de agua, tiempo de retención del mineral, cantidad de carros raspadores y el estado técnico de los mismos, y nivel del agua en la piscina, de los cuales se analizará, en el epígrafe 3.4, la incidencia de algunos de los mencionados en la eficiencia del proceso de enfriamiento.

3.4 Resultados del balance térmico y de masa

Con el objetivo de determinar los coeficientes de transferencia de calor, las pérdidas de energía medio ambiente y la eficiencia del proceso de enfriamiento, se realizó el balance térmico y de masa, sobre la base del procedimiento de cálculo establecido

en el Capítulo 2, a partir de los datos obtenidos con ayuda del sistema de adquisición de datos que se describe en el epígrafe 2.1, y se resumen en los anexos 6, 7 y 8.

En la figura 3.4 se muestran los coeficientes de transferencia de calor del agua al aire. Donde los mayores aportes los realiza la radiación que depende del área y la temperatura de la superficie de agua en contacto con el aire.

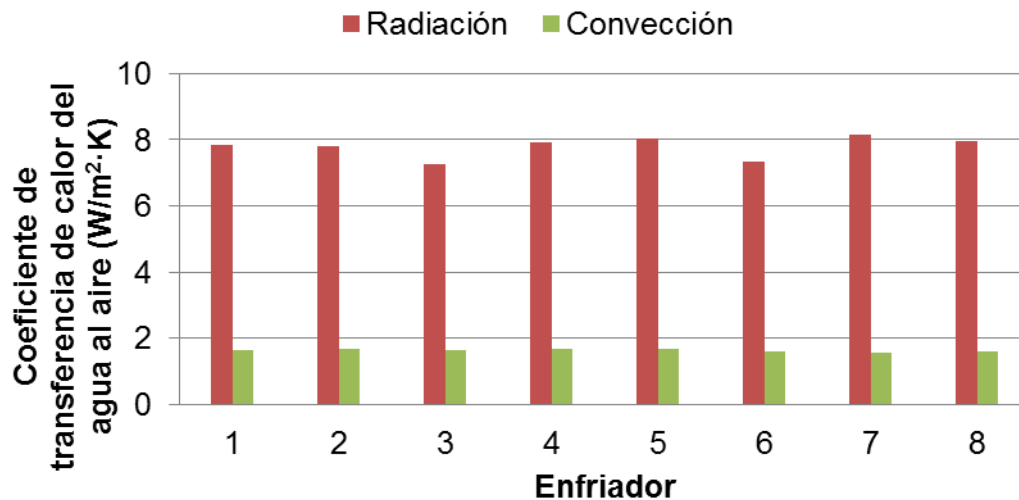


Figura 3.4. Comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor del agua al aire.

En la figura 3.5 se muestra la cantidad de calor transferido del agua al aire donde el proceso predominante es la por evaporación del agua al aire, esto explica que la mayor pérdida es por el agua que se evapora en el proceso de enfriamiento del mineral. El calor transferido del agua al aire por evaporación oscila entre 264,50 y 424,30 kW.

Se determinó que las mayores pérdidas de energía son por evaporación, con valores que oscilan entre 264,50 y 424,30 kW. Los valores de las pérdidas por convección oscilan entre 10,44 y 18,44 kW de energía y las pérdidas por radiación oscilan entre 46,10 y 96,69 kW de energía, estos resultados se pueden observar en el anexo 9.

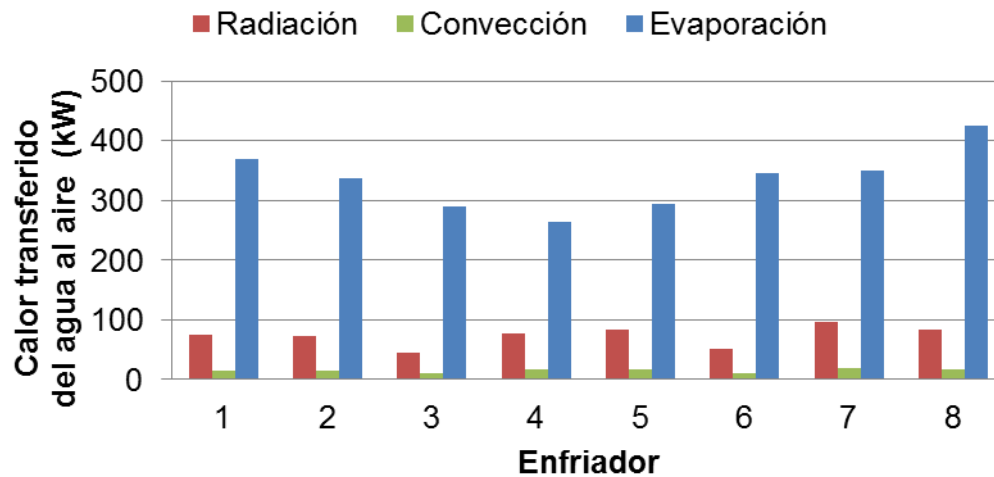


Figura 3.5. Cantidad de calor transferido del agua al aire.

La figura 3.6 muestra que en el enfriador ocho ocurren las mayores pérdidas con valores de 523,90 kW debido a las altas temperaturas de la superficie del cilindro y del agua en la piscina y al bajo nivel de agua en la piscina.

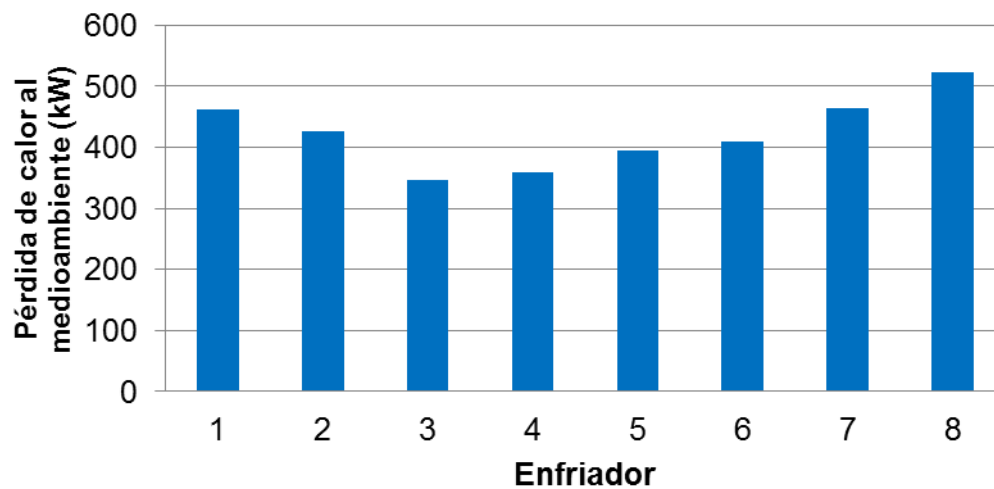


Figura 3.6. Pérdidas de calor al medio ambiente.

Las menores pérdidas son en el enfriador 3 con valores de 345,70 kW de energía debido al elevado flujo de agua de entrada y las bajas temperaturas en la superficie del cilindro y del agua de la piscina.

En la figura 3.7 se muestra la cantidad de agua que se evapora en cada enfriador oscila entre 0,11 y 0,18 kg/s , con un comportamiento similar a las pérdidas de calor al medio ambiente (figura 3.5) debido a que el proceso predominante es la evaporación. Se comprobó que para mayores flujos de agua y mayor nivel de agua en las piscinas es menor la cantidad de agua que se evapora.

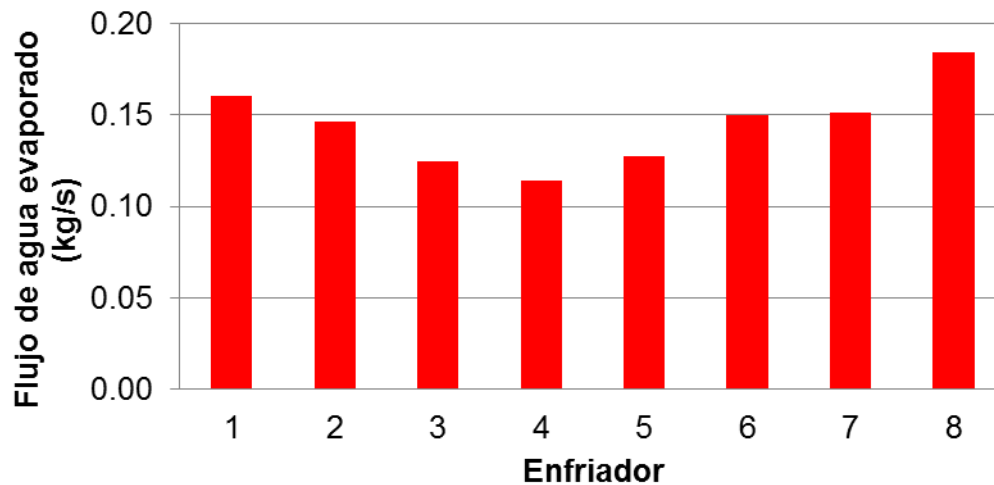


Figura 3.7. Flujo de agua evaporado.

La figura 3.8 muestra que los enfriadores con mayor eficiencia son el uno y el ocho con valores de 62,35 y 56,39 % respectivamente. Queda demostrado que para garantizar una elevada eficiencia se debe establecer una relación entre el flujo de agua y de mineral que entran al enfriador. La eficiencia y el flujo de agua en la piscina se determinaron a través el balance de masa y energía, que se realizó con ayuda del Software Profesional Madcad 15 (ver anexo 9). Donde se comprobó que el flujo de agua alcanza valores entre 30,89 y 88,56 m³/h , para flujos de mineral oscilas entre 16,80 y 30,98 t/h .

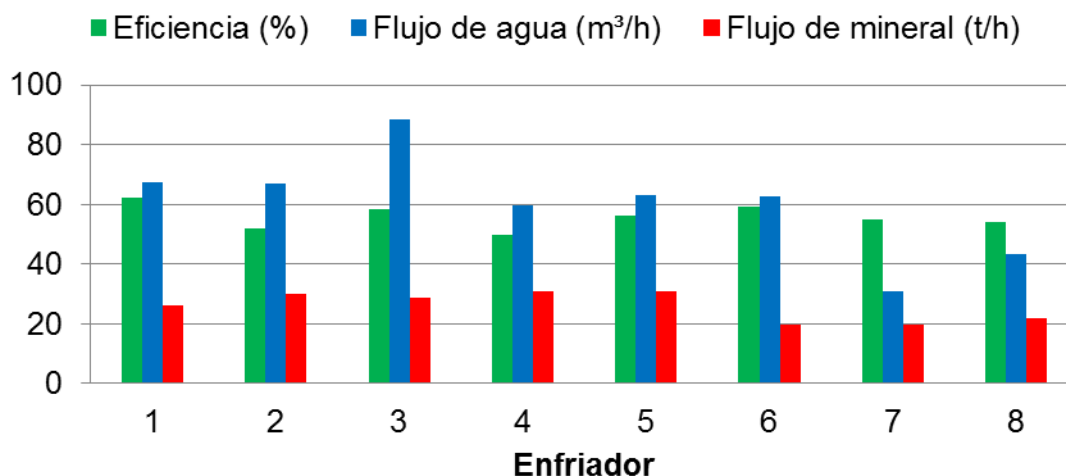


Figura 3.8. Eficiencia de enfriamiento, flujo de agua y de mineral de los enfriadores.

La figura 3.9 muestra que en siete de los enfriadores de mineral, excepto el ocho, el flujo de agua real está por debajo del valor teórico que debe tener para garantizar una temperatura del mineral a la salida del enfriador de 150 °C , en función del flujo de mineral real que entra al cilindro.

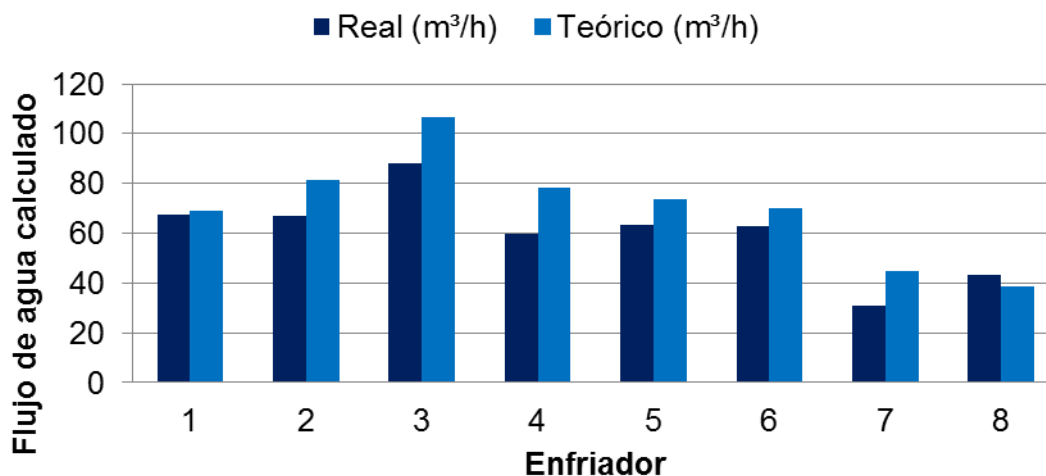


Figura 3.9. Comportamiento del flujo de agua en los enfriadores.

3.5 Valoración técnico-económica

En la tabla 3.2 se muestra el consumo planificado de materiales en el área de los enfriadores de mineral reducido.

Tabla 3.2. Consumo de materiales en los enfriadores de mineral reducido.

Materiales	Consumo	Costo unitario (CUC)	Costo anual (CUC)
Lubricante (t/d)	0,02	3 438,57	25 101,56
Agua (m ³ /d)	5 760,00	0,28	588 672,00
Energía eléctrica (MW/d)	17,28	199,24	1 256 646,53
Costo total	-	-	1 870 420,09

El flujo de agua es desconocido en la planta por no existir ningún instrumento de medición de este. El mismo se determina por balances realizados por la planta de agua de la empresa, el cual no es de gran exactitud. La instalación de un flujómetro Annubar basado en la presión diferencial, es de gran ventaja en comparación con otros tipos por su elevada precisión, bajo costo y tiempo de instalación y bajo costo por concepto de mantenimiento. Además este tipo de flujómetro elimina las líneas de *by-pass* y facilita el mantenimiento preventivo sin la necesidad de parar el proceso. Es cien veces más eficaz económicamente y veinte veces más preciso que una placa de orificio (Anónimo 2010).

Por concepto de evaporación, se consideran las pérdidas de amoníaco de unas 10 t/día . Considerando el precio actual del amoníaco de 770,15 CUC/t , la pérdida económica es como promedio de 2 811 047,50 CUC al año.

3.6 Impacto social y medio ambiental

Al realizar un estudio del comportamiento del proceso de enfriamiento del mineral reducido se analizaron los factores que de una forma u otra influyen sobre el medio ambiente, se enfatizó fundamentalmente en los más predominantes.

Las acciones o actividades con repercusión ambiental en la planta son:

- Derrame de mineral
- Derrame de agua
- Escape de gases contaminantes
- Emisiones continuas de polvo y ruido

3.6.1 Caracterización de los impactos

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de gran importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta del análisis desarrollado, determinando como repercuten sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el objeto. En la tabla 3.3 se muestran los impactos ambientales del proceso de enfriamiento.

Tabla 3.3. Identificación de los impactos ambientales del proceso de enfriamiento.

Acciones o actividades	Factores ambientales	Impactos ambientales
Derrame de mineral	Económico	Pérdidas por concepto económico
Derrame de agua		
Escape de gases contaminantes	Aire	Disminución de la calidad del aire
	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
	Económico	Pérdidas por concepto de evaporación del amoníaco
Emisiones de polvo	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Emisiones de ruido		Pérdidas de la sensibilidad auditiva

Para comprender cuál es la situación ambiental real que actualmente presenta la instalación, en el epígrafe 3.6.2 se relacionan algunos estándares sobre medio ambiente. De la comparación de estos valores con los existentes en la planta se puede deducir el nivel de contaminación presente en la misma.

3.6.2 Recomendaciones sobre medio ambiente, salud y seguridad

Calidad del aire en los puestos de trabajo

- ✓ Los equipos de protección respiratoria deben ser usados por los trabajadores cuando la exposición presente en el lugar de trabajo exceda las normas o los valores límites de umbral siguientes:

- Arsénico: $0,5 \text{ mg/m}^3$
 - Monóxido de Carbono: 29 mg/m^3
 - Cobre: 1 mg/m^3
 - Sílice libre: 5 mg/m^3
 - Sulfuro de Hidrógeno: 14 mg/m^3
 - Plomo: $0,15 \text{ mg/m}^3$
 - Dióxido de Nitrógeno: 6 mg/m^3
 - Polvo inerte: 10 mg/m^3
- ✓ El monitoreo periódico de los puestos de trabajo debe dirigirse a los contaminantes del aire en las diferentes tareas de los empleados y funcionamiento de la planta.
 - ✓ Los equipos de ventilación para el control de la contaminación del aire deben mantenerse en buen estado técnico.

El ruido en los puestos de trabajo y su efecto sobre la salud humana

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

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

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

Los impactos negativos sonoros producidos durante las fases operacionales o industriales son: los cambios y pérdida de la audición, interferencia de la comunicación oral, molestias y disminución de la capacidad de trabajo, entre otras. Se ha demostrado que la exposición prolongada a ciertos niveles de ruido puede provocar la pérdida total de la audición.

Esto se ha visto sobre todo en caso de personas que trabajan en ambientes ruidosos, un ejemplo de esto lo es: las personas que durante más de 20 años y a razón de 8 horas diarias, han sido sometidos a niveles de ruido superiores a 90 dB (A) tienen una probabilidad alta de perder el sentido del oído y por tanto convertirse en sordos.

El ruido también produce en el sistema neuro-vegetativo, una serie de modificaciones funcionales que son reacciones de defensa del organismo frente a una agresión externa, por ejemplo: la elevación de la presión arterial, aceleración del ritmo cardiaco y de los movimientos respiratorios, tensión muscular, descarga de hormonas en sangre, entre otras. Esto ocurre sobre todo cuando el ruido es muy intenso, de carácter impulsivo y el que escucha no está preparado para ello. Los niveles de ruido altos, están considerados como factores de riesgo ya que en la generalidad de los casos desencadenan en una enfermedad cardiovascular.

Conclusiones del capítulo 3

Se realizó el balance térmico y de masa de los enfriadores mediante los valores de las distintas variables medidas y recopiladas.

Los resultados más importantes obtenidos se presentaron gráficamente.

Se determinaron las características específicas de cada enfriador. Se presentaron las principales deficiencias de los mismos, dando la posibilidad de tomar las medidas necesarias para mejorar el funcionamiento de estos y elevar la eficiencia del proceso de transferencia de calor.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se determinó que las pérdidas de calor al medio ambiente son mayores a mayor temperatura de la superficie del cilindro, mayor flujo de mineral, a menor flujo de agua y menor nivel de agua en las piscinas.
- Se comprobó que la eficiencia de los enfriadores evaluados oscila entre 48 y 59 % y se incrementa con el aumento del flujo de agua y disminuye con el incremento del flujo de mineral.
- La caracterización de los enfriadores de mineral laterítico reducido, permitió identificar entre sus problemas fundamentales los siguientes:
 - ✓ Inexistencia de instrumentos de medición que permitan conocer el flujo de agua y el nivel del agua en la piscina con que está operando el equipo.
 - ✓ Elevada corrosión en la superficie exterior de los cilindros y en las anillas del tubo vertedero.

RECOMENDACIONES

- Evaluar la incidencia del suministro de agua por diferentes tramos de la piscina y la instalación de duchas, principalmente en la zona oeste.
- Realizar el mantenimiento a las superficies exteriores de los enfriadores y los instrumentos de medición presentes en las instalaciones.
- Proponer a la dirección de la Planta:
 - ✓ sustituir el control del nivel actual por un sistema de control automático que regule el suministro de agua y el nivel del agua en la piscina en función de la temperatura del mineral a la descarga, sobre la experiencia de la instrumentación que existía en el enfriador 5 y los trabajos realizados sobre el tema.
 - ✓ e instalar otros instrumentos de medición al sistema de almacenamiento de datos, para mejorar la precisión en el análisis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDALLA, M., et al. (2005). "Unsteady numerical simulation of double diffusive convection heat transfer in a pulsatin horizontal heating annulus." Heat Mass Transfer: 9.
2. AGUILAR, F. M. (1986). Las posibles causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral reducido dentro de los coolers. Informe Técnico. Nicaro, Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 9.
3. AGUILAR, F. M. (1996). Introducción de pequeñas mejoras de calidad en los enfriadores de mineral (Cooler). Informe Técnico. Nicaro, Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 4.
4. ALEPUZ, L. H. (1958). Evaluación de la adicción de vapor en los enfriadores de mineral. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 7.
5. ALEPUZ, L. H. (1970). Informe de evaluación preliminar del uso de enfriadores de cama fluida para el mineral reducido. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 11.
6. ALONSO, C. (1973). Determinación del ángulo de reposo del mineral reducido en los enfriadores de la planta de hornos. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 12.
7. ÁLVAREZ ÁLVAREZ, R. (2008). Evaluación del proceso transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 56.

8. ANÓNIMO (2007) a. Manual de Operaciones de la Unidad Básica de Producción Planta de Hornos de Reducción. Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".
9. ANÓNIMO (2007) b. Manual de Operaciones de la Unidad Básica de Producción Planta de Lixiviación y Lavado. Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".
10. ANÓNIMO (2010). Catálogo: Anubar; Mediciones de caudal.
11. ANTOHE, B. and J. LAGE (1997). "The Prandtl number effect on the optimum heating frequency of an enclosure filled with fluid or with a saturated porous medium." Int J Heat Mass Transfer 40: 1313-1323.
12. ARAUJO-ESCALONA, E. (2009). Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 54.
13. ARENA-CUTIÑO, A. (2009). Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comandante René Ramos Latour". Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 52.
14. CALA, S. E. (2005). Estudio del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios horizontales como objetivo de modelación matemática. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 54.
15. CASTAÑO, L. F. C. (2003). Aportaciones al modelado y control de secaderos rotatorios. Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla. Doctor.
16. CASTAÑO, L. F. C., et al. (2009). "Modelado de secaderos rotatorios en isocorriente." Revista Iberoamericana de automática e informática industrial 6(4): 32-43.
17. CHANDRA, A. and R. P. CHHABRA (2011) a. "Flow over and forced convection heat transfer in Newtonian fluids from a semi-circular

- cylinder." International Journal of Heat and Mass Transfer 54(1–3): 225-241.
- 18.CHANDRA, A. and R. P. CHHABRA (2011) b. "Momentum and heat transfer characteristics of a semi-circular cylinder immersed in power-law fluids in the steady flow regime." International Journal of Heat and Mass Transfer 54(13–14): 2734-2750.
- 19.CHANDRA, A. and R. P. CHHABRA (2012) a. "Laminar free convection from a horizontal semi-circular cylinder to power-law fluids." International Journal of Heat and Mass Transfer 55(11–12): 2934-2944.
- 20.CHANDRA, A. and R. P. CHHABRA (2012) b. "Mixed convection from a heated semi-circular cylinder to power-law fluids in the steady flow regime." International Journal of Heat and Mass Transfer 55(1–3): 214-234.
- 21.CHEN, Y. M. and C. K. LIU (1997). "Double-diffusive convection for a heated cylinder submerged in a salt-stratified fluid layer." Heat and Mass Transfer 33: 17-26.
- 22.CORTINA-PERDOMO, R. (2014). Tesis de grado en la caracterización de los enfriadores de mineral laterítico reducido. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez"
- 23.DE VALLE-RAMÍREZ, E. (2008). Programación de modelo matemático para la evaluación del proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios para el enfriamiento de mineral laterítico reducido. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 42.
- 24.DOSCH, J. and H. BEER (1992). "Numerical simulation and holographic visualization of double diffusive convection in a horizontal concentric annulus." Int. J. Heat Mass Transfer 35: 1811 - 1821.
- 25.ESPINOSA-LOFORTE, E. (2012). Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido a escala piloto. Mecánica. Moa-Cuba,

- Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 60.
26. FONT, P. G. and G. C. BUSTAMANTE (1990). Metodología del cálculo y escalado de la potencia de accionamiento para enfriadores rotatorios de mineral laterítico. Informe Técnico. Moa, Cuba, Centro de Investigaciones de las Lateritas: 19.
27. FRANZ, H. W. (1956). Introducción de agua o vapor a los coolers. Informe Técnico. Nicaro, Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 9.
28. GÁNDARA, C. (1980). Enfriamiento del mineral reducido mediante la adición directa de agua atomizada en el Enfriador Rotatorio en Nicaro. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 6.
29. GARCÍA-MERIÑO, D. A. (2009). Establecimiento de los parámetros de diseño y explotación del enfriador experimental. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 51.
30. GÓMEZ-RODRÍGUEZ, I. (2012). Determinación del ángulo de llenado del mineral laterítico en cilindros horizontales rotatorios. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 48.
31. GÓNGORA-LEYVA, E. (2004). 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". Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 80.
32. GÓNGORA-LEYVA, E., et al. (2007). "Modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales." Energética 28(2): 15-25.
33. GÓNGORA-LEYVA, E., et al. (2009). "Coeficientes de transferencia de calor en enfriadores de mineral laterítico a escala piloto." Minería y Geología 25(3): 1-18.

34. GÓNGORA-LEYVA, E., et al. (2012). "Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (Parte 1) " Minería y Geología 28(3): 50-69.
35. GÓNGORA-LEYVA, E. (2014). 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". Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".
36. GSCHWENDTNER, M. A. (2004). "Optical investigation of the heat transfer from a rotating cylinder in a cross flow." Heat and Mass Transfer 40: 561–572.
37. GUTIÉRREZ-GALBÁN, J. (2011). Tecnología de fabricación de los dispositivos del enfriador de mineral a escala piloto del ISMM. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 46.
38. HAN, S. H. and D. CHANG (2012). "Optimum residence time analysis for a walking beam type reheating furnace." International Journal of Heat and Mass Transfer 55(15–16): 4079-4087.
39. HERNÁNDEZ, P. R. (1996). Deficiencias de fabricación y montaje en los enfriadores de mineral de planta nueva. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 6.
40. HOSSAIN, M. A., et al. (1999). "Radiation - conduction interaction on mixed convection from a horizontal circular cylinder." Heat and Mass Transfer 35(3): 307-314.
41. HUBELL, R. H. and B. GEBHART (1974). "Transport processes induced by a heated horizontal cylinder submerged in quiescent salt-stratified water." Proc. Heat Transfer and fluid Mechanics Institute: 203-219.
42. IANNETTA, G. S. and G. MORETTI (1992). "Experimental analysis of thermal fields in horizontally eccentric cylindrical annuli." Experiments in Fluids 12: 385-393

43. INCROPERA, F. P., et al. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th.
44. JACOMINO-RODRÍGUEZ, D. (2010). Construcción de un cilindro horizontal rotatorio a escala de laboratorio. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 53.
45. KEMP, I. C., et al. (1994). Drying Technol. 112: 1323–1340.
46. LADO, E. (1954). Enfriamiento con agua y vapor de los minerales reducidos. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 8.
47. LAMORÚ-URGELLES, M. (2008). Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico para diferentes condiciones de trabajo. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 54.
48. LEYVA-DURÁN, Y. (2010). Influencia de la temperatura del mineral laterítico reducido en el índice de extractable en el tanque de contacto. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 51.
49. LONDREZ-MENA, J. (2007). Modelación y simulación del proceso de enfriamiento del mineral reducido en cilindros horizontales rotatorios por el método de elementos finitos (ANSYS). Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 60.
50. MAHFOUZ, F. M. (2003). "Transient free convection from a horizontal cylinder placed." Heat and Mass Transfer 39: 455-462.
51. MAHFOUZ, F. M. and H. M. Badr (1999). "Heat convection from a cylinder performing steady rotation or rotary oscillation - Part II: Rotary oscillation." Heat and Mass Transfer 34: 375-380.
52. MASON, D. J. and J. Li (1999). Conference of Pneumatic and Hydraulic Conveying System II, Davos, Switzerland.

53. MATOS-CASALS, D. (2012). Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 67.
54. MEDINA, A. (1995). Propuestas de modificación del carro raspador del enfriador de mineral de Nicaro. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 11.
55. MITCHELL, D. A., et al. (2002). "The potential for establishment of axial temperature profiles during solid-state fermentation in rotating drum bioreactors." *Biotechnol Bioeng* 80: 114–122.
56. MOLLA, M. M. (2004). "Natural convection flow from an isothermal horizontal circular cylinder with temperature dependent viscosity." *Heat Mass Transfer* 41: 594–598.
57. MOLLA, M. M., et al. (2009). "Natural convection flow from a horizontal circular cylinder with uniform heat flux in presence of heat generation." *Applied Mathematical Modelling* 33(7): 3226-3236.
58. NAUMENKO, Y. V. (2001). "Numerical calculation of the flow regimes of a fluid partially filling a horizontal rotating heat-exchange cylinder." *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 74(3): 145–150.
59. NAZAR, R., et al. (2004). "Mixed convection boundary-layer flow from a horizontal circular cylinder with a constant surface heat flux." *Heat and Mass Transfer* 40: 219–227.
60. NEILSON, D. G. and F. P. Incropera (1987). "Double diffusive flow and heat transfer for a cylindrical source submerged in a salt-stratified solution." *Int. J. Heat Mass Transfer* 30: 2559-2570.
61. OLIVAS, P., et al. (1997). "On unsteady electrochemical coating of a cylinder at moderately large Reynolds number." *Journal of Applied Electrochemistry* 27: 1369-1379.
62. ORTIZ-CASTRO, F. A. (2010). Estimación de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento por el método de

- elementos finitos (ANSYS). Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 49.
- 63.OSORIO-GÓNGORA, I. (2009). Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 51.
- 64.PAGE, N., et al. (1998). Ore cooler evaluation. Australia, University of Newcastle research associates limited: 17.
- 65.PANDAY, P. K. (2005). "Experimental analysis of the local heat transfer coefficient of falling film evaporation with and without co-current air flow velocity." Heat Mass Transfer 41: 1066–1076.
- 66.PEDROSO, J. (1996). Algunas consideraciones sobre los enfriadores de mineral. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 4.
- 67.PELLER, H., et al. (1984). "Thermofluiddynamic experiments with a heated and rotating circular cylinder in crossflow. Part 1: Subcritical heat transfer measurements." Experiments in Fluids 2: 113-120.
- 68.PENG, S. W. (1998). "Theoretical analysis of laminar film condensation in a rotating cylinder with a scraper." Originals Heat and Mass Transfer 34: 279-285
- 69.PERDOMO-MENA, J. J. and D. Matos-Casals (2007). Evaluación de la influencia del agua de enfriamiento en el proceso transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 38.
- 70.PERRY, R. H. and D. W. GREEN (2008). Perry's chemical engineers' handbook, McGraw-Hill.
- 71.POLLARD, B. L. and B. L. POLLARD (1989). "Kinetics of Radial Segregation of Different Sized Irregular Particles in Rotary Cylinders." Can. Metall. Q. 28(1): 29-40.

- 72.PRESILLAS, D., et al. (1977). Mejora en el proceso de enfriamiento del mineral reducido con el enfriamiento actual. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 10.
- 73.PUJOL-LEYVA, J. O. (2007). Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 59.
- 74.PUPO-RAMÍREZ, E. (2012). Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios. Metalurgia. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 61.
- 75.PUPO-REVÉ, Y. (2010). Evaluación del proceso de enfriamiento de mineral reducido en la empresa Comandante René Ramos Latour” de Nicaro. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 56.
- 76.QUINTERO-GONZÁLEZ., E. and A. Verdecia-Reyes (2008). Construcción de un enfriador cilíndrico rotatorio a escala de laboratorio. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 50.
- 77.RANZ, W. E. and W. R. MARSHALL (1952) a. Chem. Eng. Prog. 48(3): 141 – 146.
- 78.RANZ, W. E. and W. R. MARSHALL (1952) b. Chem. Eng. Prog. 48(4): 173 – 180.
- 79.RETIRADO-MEDIACEJA, Y. (2004). Modelación Físico-Matemática del proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción perteneciente a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 57.
- 80.RODRÍGUEZ-GUZMÁN, G. (2010). Construcción de un transportador de tornillo sin fin para la alimentación del enfriador de mineral a escala

- piloto del ISMM. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 53.
81. RODRÍGUEZ-MORENO, J. A. (2011). Proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Metalurgia. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 54.
82. RODRÍGUEZ, G. R. (1977) a. Análisis de la influencia de la adición de vapor de agua sobre el enfriamiento de mineral reducido en el proceso de Nicaro. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 10.
83. RODRÍGUEZ, G. R. (1977) b. Análisis de los mecanismos de transferencia de calor que intervienen en la operación de adicción de vapor de agua a los enfriadores de mineral reducido de la Planta de Nicaro. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 16.
84. RODRÍGUEZ, G. R. (1977) c. Consideraciones sobre el mecanismo de los raspadores interiores de los enfriadores de mineral y su influencia sobre la transmisión de calor. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 10.
85. RODRÍGUEZ, G. R. (1977) d. Costo de empleo de inhibidores de incrustación en los enfriadores de mineral. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 10.
86. SAMALEA, M. G. J. (2000). Métodos de lixiviación de lateritas que contienen níquel y cobalto. Cuba. CU 22620 A1: 17.
87. SANTANA-PERCEVAL, O. (2009). Evaluación técnico – económica del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 45.

- 88.SCHÜNDER, E. U. (1982). Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Munich, Germany.
- 89.SOTTO-GUILARTE, Y. (2007). Influencia de los elementos mecánicos del enfriador horizontal en el proceso de transferencia de calor del mineral reducido en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 43.
- 90.SPENCER-RODRÍGUEZ, Y. (2009). Identificación del proceso de enfriamiento del mineral en el proceso Caron, con ayuda de Redes Neuronales Artificiales. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 84.
- 91.SRIRAM, V. and P. S. T. SAI (1999). "Transient Response of Granular Bed Motion in Rotary Kiln." Can. J. Chem. Eng. 77(3): 597-601.
- 92.TABERA-RODRÍGUEZ, Y and García-Guerrero, R. (2006). Estudio del comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 59.
- 93.THORNTON, F. R. (1958). Correspondencia diversas sobre la adicción de vapor de agua a los enfriadores de mineral. Informe Técnico. Nicaro-Cuba, Empresa "Comandante René Ramos Latour": 17.
- 94.TSINOBER, A. B., et al. (1983). "A point source of heat in a salinity gradient." J. Fluid Mech. 135: 199 - 217.
- 95.TURNER, J. S. (1973). "Buoyancy effects in fluids." Cambridge University Press.
- 96.VALLE, M. M., et al. (2000) a. "Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Cmdte. "Ernesto Che Guevara" de Moa. Parte 1." Tecnología Química 20(1): 70-77.

97. VALLE, M. M., et al. (2000) b. "Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Cmdte. "Ernesto Che Guevara" de Moa. Parte 2." Tecnología Química 20(2): 10-15.
98. VARGAS-RAMOS, P. L. (2010). Sistema automático de medición para variables en un enfriador de mineral a escala piloto. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 82.
99. VARGAS -PÉREZ, A. (2008). Evaluación del proceso de transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la empresa "Comandante René Ramos Latour". Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 42.
100. WANG, W., et al. (2010). "Heat-transfer model of the rotary ash cooler used in circulating fluidized-bed boilers." Energy & Fuels 24: 2570 – 2575.
101. WIELAND-WERKE, A. (1994). "Transfert de chaleur dans un film tombant autour d'un cylindre horizontal." The Canadian Journal of Chemical Engineering 72: 961-965.
102. YU, Z.-T., et al. (2010). "Prandtl number dependence of laminar natural convection heat transfer in a horizontal cylindrical enclosure with an inner coaxial triangular cylinder." International Journal of Heat and Mass Transfer 53(7–8): 1333-1340.
103. ZALAZAR-OLIVA, C. (2010). Obtención de los parámetros de funcionamiento del enfriador rotatorio a escala piloto del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Mecánica. Moa-Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez": 53.

ANEXOS

Anexo 1: Principales variables de los enfriadores tomadas del CITECT.

ENFRIADOR	F _{MIN HOR} t/h	Factor de reducción	F _{MIN ENF} t/h	T _{in MINERAL} °C	T _{fin MINERAL} °C	A _{MOTOR}	T _{in H₂O}	T _{fin H₂O}
1	36,20	0,8340	30,28	740,15	111,29	85,12	26,60	81,20
	31,98		30,19	738,71	107,65	88,34	26,40	81,90
	34,00		30,36	753,50	106,51	92,95	26,50	79,30
	17,00		30,36	730,50	106,88	9656	26,60	78,10
	37,35		30,28	729,56	105,75	93,15	27,00	82,10
2	38,74	0,8340	29,02	745,90	214,13	96,35	27,20	79,80
	37,89		28,52	754,13	227,84	99,41	27,40	80,20
	35,69		28,86	759,15	220,91	98,81	27,70	80,10
	32,78		28,86	753,20	221,30	94,85	27,40	80,90
	34,40		28,77	751,48	220,59	99,53	27,50	80,43
3	36,70	0,8659	31,52	717,15	146,43	121,74	25,40	66,10
	17,69		31,52	725,55	135,73	109,95	25,60	63,30
	32,49		31,52	706,48	135,82	109,49	25,60	63,60
	31,79		31,52	699,21	134,16	110,89	25,70	63,20
	36,60		31,52	701,48	130,15	95,82	25,70	63,60
4	37,49	0,8659	15,07	727,13	217,41	104,58	26,20	84,40
	37,54		15,07	710,47	220,25	102,46	26,60	83,20
	33,09		15,07	715,26	222,47	98,25	26,80	83,00
	34,58		15,24	698,35	221,27	99,87	26,40	82,50
	36,20		15,07	705,95	220,15	106,94	26,40	83,10
5	36,50	0,8441	30,81	706,51	157,15	113,24	26,10	85,40
	36,39		30,47	718,45	156,64	108,05	26,30	85,20
	37,32		30,64	713,59	157,13	104,29	26,30	85,60
	35,50		30,81	701,14	157,45	108,47	26,40	85,90
	36,40		30,73	707,58	156,54	113,35	26,40	85,10
6	18,30	0,8441	15,45	717,15	134,85	110,15	26,60	68,40
	30,39		15,36	730,32	133,59	107,28	26,70	67,60
	17,78		15,28	710,62	130,29	101,15	26,70	66,90
	31,22		15,36	718,94	124,48	105,64	26,60	65,50
	18,40		15,36	720,29	129,56	100,08	26,60	64,10
7	28,40	0,8158	14,85	706,31	179,48	106,15	25,80	89,30
	19,30		14,68	720,82	179,44	105,23	25,80	89,10
	18,40		14,85	730,34	179,82	103,12	26,10	8990
	19,50		14,85	740,64	180,57	107,61	26,10	89,60
	17,30		14,77	735,18	174,33	107,85	26,60	89,40
8	31,68	0,8158	15,01	696,21	172,54	112,71	26,60	83,30
	32,78		14,77	711,49	173,48	111,52	26,80	83,20
	19,56		14,85	700,64	174,20	127,52	26,80	83,60
	31,45		14,68	692,91	174,13	114,31	26,70	84,10
	18,56		14,93	701,57	174,,89	120,64	26,70	83,90

Anexo 2: Temperatura del agua de los enfriadores por el lado este y nivel de las piscinas.

ENFRIADOR	Nivel piscina, m	TEMPERATURA DEL AGUA DE LA PISCINA, °C							
		LADO ESTE							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,50	74,10	80,20	78,90	77,50	75,50	73,30	72,50	73,50
		57,30	53,90	57,20	51,00	52,00	51,00	52,90	50,40
		54,10	56,90	62,00	61,70	72,10	74,00	75,55	69,30
		70,80	69,20	66,70	71,50	71,40	63,90	63,80	67,00
		61,30	65,40	67,80	71,30	70,20	73,40	75,40	77,30
2	1,25	75,90	80,80	79,40	76,60	73,20	68,10	65,60	63,70
		58,80	65,80	48,30	46,5	59,10	53,00	64,30	62,90
		68,00	59,60	48,80	46,80	48,10	57,60	63,60	44,80
		69,50	54,90	63,00	71,30	68,90	64,50	67,10	67,80
		80,40	84,30	82,40	80,10	77,40	73,20	69,90	67,70
3	1,20	79,40	77,50	74,30	73,60	74,00	71,30	66,70	61,80
		59,10	59,90	61,30	63,90	64,40	69,10	64,10	59,90
		75,60	74,50	72,30	69,70	69,60	64,40	62,50	57,50
		57,10	55,90	62,20	60,10	68,20	64,90	63,80	62,90
		78,40	77,70	75,40	72,30	69,90	65,10	64,30	63,90
4	1,15	71,10	72,80	74,90	73,10	68,80	66,40	64,10	61,20
		72,30	74,50	73,10	72,10	66,90	64,20	62,50	61,00
		79,60	81,50	82,30	76,50	71,30	69,70	67,80	64,50
		78,40	80,80	80,00	77,50	73,50	70,10	68,40	65,90
		79,20	80,20	81,00	78,60	73,70	69,90	68,70	66,90
5	1,55	73,40	72,20	69,90	66,30	64,10	53,70	50,90	51,00
		75,40	73,10	70,10	67,80	66,30	54,60	53,10	50,60
		75,50	73,40	70,90	68,20	66,90	56,70	55,20	50,90
		76,70	74,10	71,00	69,90	67,50	56,40	55,30	51,20
		76,80	74,40	70,90	69,80	66,70	55,90	54,90	50,10
6	1,40	71,90	73,10	75,80	74,20	70,40	68,60	62,40	60,90
		71,40	77,10	79,20	76,60	72,30	70,70	64,10	62,30
		74,40	71,40	70,80	72,50	75,50	73,10	65,60	66,80
		61,80	66,90	64,40	72,70	72,30	74,80	70,50	61,10
		73,60	76,40	78,10	77,30	73,30	70,20	65,30	63,90
7	1,30	77,30	80,50	76,50	71,40	68,50	64,10	57,90	56,90
		78,40	81,20	77,80	73,30	69,40	66,50	59,50	58,80
		78,80	81,00	77,90	74,00	70,30	66,40	60,10	58,90
		78,10	80,60	77,40	71,90	69,00	64,50	58,80	55,30
		76,90	79,70	76,60	71,30	69,90	65,30	58,90	57,80
8	1,20	72,20	78,10	82,10	81,90	75,20	73,20	66,70	65,90
		79,20	84,30	81,10	79,80	76,60	73,90	70,10	68,80
		78,90	84,40	82,30	80,40	75,60	72,30	68,80	66,30
		77,40	83,50	81,30	80,10	76,60	73,40	69,90	67,40
		78,20	83,30	82,10	81,50	77,10	72,60	68,40	64,30

Anexo 3: Temperatura del agua de los enfriadores por el lado oeste

ENFRIADOR	TEMPERATURA DEL AGUA DE LA PISCINA, °C							
	LADO OESTE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	74,30	81,00	78,70	78,10	75,60	73,40	70,10	64,10
	57,10	55,10	57,70	51,30	52,10	51,50	52,90	50,80
	73,30	69,30	73,90	72,50	73,90	72,50	61,90	62,20
	70,60	69,80	66,60	71,70	71,40	64,90	63,90	66,70
	73,40	81,90	78,90	77,70	74,50	71,10	65,60	61,10
2	76,60	84,30	79,10	74,50	72,20	69,80	64,80	63,60
	65,10	61,70	60,90	57,20	56,10	62,30	60,20	59,30
	79,20	84,00	82,20	81,30	79,10	73,10	70,20	68,90
	80,20	85,60	83,60	80,90	79,50	76,30	72,40	69,30
	80,10	84,30	83,10	81,40	79,80	75,60	72,10	69,90
3	81,30	79,90	78,10	75,30	74,60	71,40	67,40	65,30
	46,80	52,20	68,00	59,00	55,20	49,80	59,60	48,00
	70,90	71,40	72,30	73,80	70,80	67,80	65,10	66,00
	66,50	60,20	55,30	68,10	68,60	64,40	62,50	60,90
	79,90	78,60	76,00	73,10	70,50	65,60	64,30	61,10
4	72,60	74,40	76,10	74,20	69,50	68,70	61,10	56,20
	72,50	75,50	75,10	72,90	66,50	64,80	60,00	55,10
	67,60	67,30	67,50	62,30	61,20	60,70	59,30	58,40
	62,40	64,60	61,70	58,00	59,10	56,40	54,30	53,80
	80,50	83,20	82,10	77,50	74,30	70,20	66,40	61,30
5	75,80	74,20	70,40	68,80	66,40	55,10	52,30	53,10
	77,40	75,50	72,30	68,90	67,80	55,40	55,10	51,20
	69,10	71,20	77,70	74,80	74,00	53,80	57,60	64,60
	72,30	71,40	73,30	74,90	76,40	66,70	68,60	61,50
	76,70	74,00	71,40	71,90	67,70	56,00	57,40	52,10
6	75,80	77,20	75,80	73,70	70,10	67,90	62,10	61,60
	74,50	77,30	79,30	77,80	70,30	70,90	63,70	62,90
	72,10	74,30	74,50	72,10	67,90	69,40	70,80	69,40
	74,20	67,70	73,20	74,70	75,70	71,30	61,70	69,30
	75,50	78,80	81,90	79,00	73,90	70,30	66,00	67,40
7	78,20	81,30	77,00	73,10	68,50	65,30	56,80	55,30
	78,10	82,10	77,90	74,50	68,30	66,60	60,50	58,40
	68,60	62,60	57,40	68,60	73,10	69,90	68,20	67,10
	77,30	72,60	64,90	76,30	78,40	70,70	65,90	66,40
	75,40	81,50	78,10	75,30	70,50	68,40	62,20	61,40
8	77,30	81,10	82,40	79,70	76,30	74,00	68,10	67,20
	79,50	84,70	80,10	79,70	76,20	74,90	70,50	69,30
	69,20	79,60	79,60	70,70	74,40	73,90	71,10	58,20
	73,10	68,20	66,90	76,40	70,60	72,20	63,20	61,90
	77,90	83,30	79,80	81,20	76,30	75,00	70,60	66,50

Anexo 4: Temperaturas de las paredes de los enfriadores por el lado este

ENFRIADOR	TEMPERATURA DE LA PARED DEL CILINDRO, °C							
	LADO ESTE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	84,10	90,30	88,90	85,30	80,50	77,10	73,20	66,40
	82,30	88,90	87,60	84,50	79,70	75,40	74,10	65,50
	83,50	89,50	88,10	84,60	79,90	77,00	73,00	66,70
	85,60	93,20	90,50	88,30	79,50	78,80	75,60	69,30
	84,50	90,20	89,90	86,40	81,20	77,60	74,50	67,10
2	77,10	92,80	89,80	81,10	77,10	70,30	68,80	65,50
	77,80	79,40	85,90	86,20	82,60	71,10	75,30	64,50
	64,70	73,90	74,50	75,30	77,20	75,10	70,90	65,70
	79,60	72,90	72,70	88,60	87,70	68,80	73,70	72,40
	90,60	94,60	93,80	90,70	82,80	78,40	75,40	72,50
3	73,40	97,70	92,50	87,20	80,00	76,10	75,30	66,40
	74,50	78,10	85,30	74,60	70,20	66,30	63,10	60,30
	65,20	66,30	71,10	82,30	74,80	67,40	66,20	65,60
	71,30	70,20	73,30	71,40	67,20	68,30	61,10	62,90
	83,10	96,70	93,50	90,30	82,90	79,90	74,50	71,60
4	67,10	82,70	73,10	69,20	63,60	59,30	59,10	57,10
	74,30	72,60	69,10	82,90	79,90	79,00	73,40	71,50
	83,40	66,60	81,30	68,70	64,90	62,30	59,60	59,50
	88,50	88,80	90,70	88,80	83,30	79,40	72,80	63,50
	89,40	90,50	92,40	89,20	79,10	75,10	70,80	64,90
5	82,40	86,60	85,10	80,20	77,80	74,10	68,40	61,50
	85,60	83,40	81,50	78,40	71,70	59,80	58,60	55,40
	86,70	83,50	83,70	79,20	74,80	64,20	64,20	56,80
	77,90	86,10	81,40	74,40	71,40	58,60	58,50	53,00
	86,80	84,50	80,90	77,60	71,70	59,70	58,40	53,10
6	88,60	92,50	85,60	81,50	76,70	71,10	69,20	64,20
	78,90	96,10	97,30	94,60	85,30	85,50	75,30	73,80
	83,40	66,50	70,10	81,60	73,70	76,00	70,60	66,70
	77,50	64,80	68,50	69,20	74,30	73,70	73,00	68,10
	83,40	84,50	88,10	87,50	80,90	76,80	73,30	66,60
7	81,40	84,10	81,60	79,50	74,40	66,90	62,20	59,10
	88,40	91,30	83,10	78,60	74,40	66,40	63,00	61,80
	88,60	89,10	85,20	80,10	77,90	70,10	68,10	61,60
	88,20	88,60	84,50	80,60	78,80	71,30	66,40	58,90
	87,10	90,00	85,30	78,80	75,30	68,50	64,40	62,60
8	80,50	84,30	86,30	80,60	76,50	74,30	68,90	67,70
	89,30	92,30	91,80	90,20	86,40	83,20	77,70	72,40
	89,10	94,70	93,70	88,10	81,00	77,50	74,30	71,10
	86,40	97,90	96,50	93,70	90,30	93,80	87,40	77,90
	88,40	93,60	93,50	90,50	82,50	77,80	73,90	69,10

Anexo 5: Temperaturas de las paredes de los enfriadores por el lado oeste

ENFRIADOR	TEMPERATURA DE LA PARED DEL CILINDRO, °C							
	LADO OESTE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	86,30	92,80	89,10	86,30	81,10	77,50	74,70	67,80
	72,60	81,80	70,20	72,90	88,70	80,20	71,00	80,30
	72,60	73,00	76,10	78,50	74,50	77,40	71,60	64,50
	69,30	70,20	79,20	75,80	81,60	77,70	69,60	77,20
	87,20	93,20	90,60	87,90	82,30	78,50	76,50	69,00
2	78,50	93,50	90,50	82,40	78,20	71,20	70,40	66,90
	93,40	87,30	86,50	86,60	81,60	73,90	75,20	73,30
	82,90	78,40	76,30	87,30	82,80	70,50	69,40	67,10
	90,30	78,90	91,40	73,10	62,80	83,70	74,70	74,30
	93,30	97,60	94,50	92,20	83,90	79,30	77,40	74,40
3	74,90	91,70	86,20	81,60	80,10	78,60	73,50	67,70
	74,50	74,40	76,30	80,40	74,60	69,50	67,40	65,50
	74,20	75,60	76,10	80,10	74,20	71,60	70,50	66,80
	73,00	79,20	74,30	72,00	70,60	66,70	75,00	63,60
	87,00	97,10	95,40	93,00	85,20	82,00	77,70	74,70
4	64,70	79,60	66,70	63,50	60,90	61,20	58,70	57,80
	83,60	78,40	76,60	74,10	71,80	70,30	61,40	58,60
	78,20	79,70	83,10	73,30	66,10	66,30	61,70	62,50
	72,30	65,90	92,50	63,40	59,50	57,40	56,90	53,50
	91,90	92,30	94,20	91,60	81,30	77,10	73,50	67,40
5	83,90	88,70	86,90	81,50	79,90	76,30	70,80	63,40
	83,00	80,10	74,90	72,50	68,80	61,50	58,00	55,90
	78,80	78,10	85,00	77,20	80,50	77,30	72,00	67,70
	77,50	74,00	88,00	77,80	82,40	73,40	70,40	62,80
	90,40	88,40	82,50	80,00	73,70	61,50	61,30	55,90
6	84,70	89,60	79,90	72,30	71,30	64,50	62,50	61,50
	80,20	98,00	94,50	93,20	87,20	87,50	77,50	75,50
	82,60	79,60	90,10	87,40	75,90	72,50	72,80	70,00
	79,40	64,20	87,60	89,00	85,80	76,60	78,60	72,80
	85,80	87,20	88,50	88,70	81,70	77,40	75,00	68,20
7	83,30	85,60	82,30	79,10	75,90	70,00	63,80	59,90
	84,30	78,60	81,90	71,70	68,80	63,50	56,10	58,90
	78,70	71,80	83,30	87,10	88,60	78,80	80,10	72,10
	90,20	74,90	85,10	81,90	83,50	79,10	73,40	66,00
	87,80	83,20	80,90	75,50	74,60	72,20	61,80	63,10
8	81,10	85,90	88,50	81,70	79,80	76,60	70,90	69,10
	91,00	93,60	92,30	88,30	87,70	83,60	79,10	73,00
	82,80	85,80	85,60	73,50	79,20	70,30	67,20	66,00
	90,30	79,40	85,70	75,40	76,80	72,40	70,20	66,20
	85,20	89,70	86,30	84,00	79,00	78,90	72,70	69,00

Anexo 6: Valores medios de las principales variables de los enfriadores tomadas del CITECT

ENFRIADOR	F _{MIN ENF} t/h	T _{in MINERAL} °C	T _{fin MINERAL} °C	T _{in H₂O} °C	T _{fin H₂O} °C	A _{MOTOR}
Enfriador 1	26,10	738,48	108,01	26,62	80,52	91,12
Enfriador 2	29,94	752,77	220,95	27,44	79,80	97,68
Enfriador 3	26,89	709,97	136,45	25,60	64,16	109,16
Enfriador 4	30,98	711,43	220,51	26,48	82,84	102,04
Enfriador 5	30,74	709,45	157,18	26,30	85,84	109,70
Enfriador 6	15,36	719,46	130,52	26,64	66,50	105,12
Enfriador 7	14,80	726,66	178,52	26,08	89,06	106,06
Enfriador 8	14,85	700,56	174,04	26,72	83,62	117,21

Anexo 7: Valores medios de las temperaturas del agua de las piscinas

ENFRIADOR	TEMPERATURA DEL AGUA DE LA PISCINA, °C							
	LADO ESTE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Enfriador 1	63,50	65,12	66,38	66,60	68,22	67,12	68,03	63,00
Enfriador 2	87,68	87,14	87,84	84,32	77,86	75,72	73,42	79,46
Enfriador 3	69,92	69,10	69,10	69,18	69,22	67,56	64,28	61,20
Enfriador 4	76,12	77,96	78,26	75,56	70,84	68,06	66,30	63,90
Enfriador 5	75,56	73,44	70,56	68,40	66,30	55,46	53,88	50,76
Enfriador 6	70,62	72,98	73,66	75,26	71,76	71,48	65,58	68,90
Enfriador 7	77,90	80,60	77,24	72,38	69,42	65,36	59,04	57,38
Enfriador 8	77,18	82,72	81,78	80,74	76,22	73,08	68,78	66,54
ENFRIADOR	TEMPERATURA DEL AGUA DE LA PISCINA, °C							
	LADO OESTE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Enfriador 1	69,74	71,42	71,16	70,26	69,5	66,68	62,88	60,98
Enfriador 2	76,24	79,98	77,78	75,06	73,34	71,42	67,94	66,20
Enfriador 3	69,08	68,46	66,94	69,86	67,94	63,80	63,98	60,26
Enfriador 4	71,12	73,00	72,50	68,98	66,12	64,16	60,22	56,96
Enfriador 5	74,26	73,26	73,02	71,86	70,46	57,40	58,20	56,05
Enfriador 6	74,42	75,06	76,94	75,46	71,78	69,96	64,86	66,12
Enfriador 7	75,52	76,02	71,01	73,56	71,76	68,18	62,72	61,72
Enfriador 8	75,04	79,38	77,76	77,54	74,76	74,00	68,07	64,12

Anexo 8: Valores medios de las temperaturas de las paredes de los enfriadores

ENFRIADOR	TEMPERATURA DE LA PARED DEL CILINDRO, °C							
	LADO ESTE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Enfriador 1	84,00	90,42	89,00	85,82	80,16	77,18	74,08	67,00
Enfriador 2	77,69	82,72	83,34	84,38	81,48	72,74	72,82	68,12
Enfriador 3	73,50	85,80	83,14	81,16	75,02	71,60	68,04	65,36
Enfriador 4	80,54	80,14	81,32	79,76	74,16	71,02	67,14	63,30
Enfriador 5	83,88	84,82	82,52	77,96	73,48	63,28	61,62	55,96
Enfriador 6	82,36	80,88	81,92	82,88	78,18	76,62	72,28	67,88
Enfriador 7	86,74	88,62	83,94	79,52	76,16	68,64	64,82	60,80
Enfriador 8	86,74	92,56	92,36	88,62	83,34	81,32	76,44	71,64
ENFRIADOR	TEMPERATURA DE LA PARED DEL CILINDRO, °C							
	LADO OESTE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Enfriador 1	77,60	82,02	81,04	80,28	81,64	78,26	76,68	71,76
Enfriador 2	87,86	87,14	87,84	84,82	77,86	75,68	73,42	71,02
Enfriador 3	76,72	83,60	81,66	81,42	76,94	73,68	72,82	67,66
Enfriador 4	78,14	79,18	82,62	73,18	67,92	66,46	62,44	59,96
Enfriador 5	82,72	81,86	83,46	77,80	77,06	70,00	66,42	73,07
Enfriador 6	82,54	83,72	89,12	86,12	80,38	75,07	73,28	69,06
Enfriador 7	84,86	78,82	82,70	78,06	78,28	72,72	67,04	64,00
Enfriador 8	86,08	86,88	87,68	80,78	80,50	76,36	72,02	68,66

Anexo 9: Evaluación de los enfriadores de mineral.

$x:=0,1..7$

Flujo másico de mineral

$M_{n_x} :=$

31.306 ton/hr
35.900 ton/hr
31.054 ton/hr
35.780 ton/hr
36.422 ton/hr
23.218 ton/hr
20.596 ton/hr
26.806 ton/hr

Factor de corrección

$f_{corr_x} :=$

0.8340
0.8340
0.8659
0.8659
0.8441
0.8441
0.8158
0.8158

Flujo másico de mineral reducido

$M_{Red_x} := M_{n_x} \cdot f_{corr_x}$

$M_{Red_x} =$

26.109
29.941
26.89
30.982
30.744
19.598
16.802
21.868

**Datos del enfriador**

$A_{pisc}=3.5n$	Ancho de la piscina	$D_i:=3.041$	Diámetro interior
$L_{pisc}=32n$	Longitud de la piscina	$D_e:=3.08$	Diámetro exterior
$H_{pisc}=2n$	Altura de la piscina	$L_e:=30n$	Longitud

Temperatura del mineral:

a la entrada

a la salida

$\theta_{e_x}:=$

$\theta_{s_x}:=$

1011.48
1026.47
983.47
984.93
982.95
992.96
1000.46
974.06

381.01
494.45
409.95
494.01
430.68
404.02
452.02
447.54

Temperatura del agua en la piscina:

a la entrada

a la salida

$\theta_{e_{ag}}:=$

$\theta_{s_{ag}}:=$

300.12
300.94
299.10
299.98
299.80
300.14
299.58
300.22

354.02
353.30
337.66
356.34
359.34
340.00
362.56
357.12

Temperatura de la pared

$\theta_{p_x}:=$

353.30
351.78
349.63
346.45
348.24
352.39
349.68
355.49

Temperatura saturación del agua

$\theta_{st_{ag}}:=373.5K$

Temperatura del aire

$\theta_a:=305.1K$

Calor específico del mineral

$C_{pm}=0.96 \frac{J}{kgK}$

Determinación del coeficiente de transferencia de calor del agua al aire**Velocidad del aire**

$V_a=1.2 \frac{m}{sec}$

Coeficiente cinemático de viscosidad del aire

$\nu_a:=22.5 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{sec}$

Coeficiente de difusión de masa

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

Conductividad térmica del aire

$\lambda_{aire}=0.02 W m^{-1} K^{-1}$

Números de:**Reynolds****Schmidt****Sherwood****Prandtl**

$Re_{aire}=\frac{V_a D_i}{\nu_a}$

$Sc:=\frac{\nu_a}{D_{AB}}$

$Sh:=0.02 Re_{aire}^{\frac{4}{5}} Sc^{\frac{1}{3}}$

$Pr_{aire}=0.71$

$Re_{aire}=1.64 \cdot 10^5$

$Sc=0.86$

$Sh=419.56$



Coefficiente de transferencia de masa del agua al aire

$$hm = \frac{ShDA}{De}$$

$$hm = 3.542 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}$$

Densidad del agua que cubre el cilindro a la temperatura de la pared

$$\rho_{ag_x} := 1170.48 \frac{kg}{m^3} - 0.5655 \frac{kg}{K \cdot m^3} \cdot \theta_p$$

$$\rho_{ag_x} =$$

970.689	$\frac{kg}{m^3}$
971.548	$\frac{kg}{m^3}$
972.764	
974.563	
973.55	
971.203	
972.736	
969.45	

Densidad del agua en la piscina a la temperatura en la piscina

$$\rho_{ag_x} := 1170.48 \frac{kg}{m^3} - 0.5655 \frac{kg}{K \cdot m^3} \cdot \theta_p$$

$$\rho_{ag_x} =$$

970.689	$\frac{kg}{m^3}$
971.548	$\frac{kg}{m^3}$
972.764	
974.563	
973.55	
971.203	
972.736	
969.45	

Densidad del vapor de agua a la temperatura de la pared, del agua en la piscina y del aire

$$d_1 := 2.637 \quad d_3 := 0.000040 \quad d_5 := 3.352 \cdot 10^{-1} \quad d_2 := 0.0146 \quad d_4 := 5.761 \cdot 10^{-2}$$

$$\rho_{vasa} := \left[-189.953 d_1 \frac{\theta_{ag_x}}{K} - d_2 \left(\frac{\theta_{ag_x}}{K} \right)^2 + d_3 \left(\frac{\theta_{ag_x}}{K} \right)^3 - d_4 \left(\frac{\theta_{ag_x}}{K} \right)^4 + d_5 \left(\frac{\theta_{ag_x}}{K} \right)^5 \right] \cdot \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{vasp_x} := \left[-189.953 d_1 \frac{\theta_{p_x}}{K} - d_2 \left(\frac{\theta_{p_x}}{K} \right)^2 + d_3 \left(\frac{\theta_{p_x}}{K} \right)^3 - d_4 \left(\frac{\theta_{p_x}}{K} \right)^4 + d_5 \left(\frac{\theta_{p_x}}{K} \right)^5 \right] \cdot \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{vasp_x} =$$

0.272	$\frac{kg}{m^3}$
0.254	$\frac{kg}{m^3}$
0.231	
0.199	
0.217	
0.261	
0.231	
0.299	

$$\rho_{vasa} =$$

0.281	$\frac{kg}{m^3}$
0.272	$\frac{kg}{m^3}$
0.131	
0.31	
0.352	
0.147	
0.401	
0.32	

$$\rho_{vas} := \left[-189.953 d_1 \frac{\theta_a}{K} - d_2 \left(\frac{\theta_a}{K} \right)^2 + d_3 \left(\frac{\theta_a}{K} \right)^3 - d_4 \left(\frac{\theta_a}{K} \right)^4 + d_5 \left(\frac{\theta_a}{K} \right)^5 \right] \cdot \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{vas} = 0.042 \frac{kg}{m^3}$$



Calor latente de vaporización la temperatura de la pared y del agua de la piscina

$$hfgvp_x := \left(3176.83 \frac{\text{J}}{\text{kg}} - 2.46017 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot \theta_{p_x} \right) \cdot 100$$

$$hfgva_x := \left(3176.83 \frac{\text{J}}{\text{kg}} - 2.46017 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot \theta_{ag_x} \right) \cdot 100$$

$$hfgvp_x =$$

$$hfgva_x =$$

$2.308 \cdot 10^6$
$2.311 \cdot 10^6$
$2.317 \cdot 10^6$
$2.325 \cdot 10^6$
$2.32 \cdot 10^6$
$2.31 \cdot 10^6$
$2.317 \cdot 10^6$
$2.302 \cdot 10^6$

$\cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$

$2.306 \cdot 10^6$
$2.308 \cdot 10^6$
$2.346 \cdot 10^6$
$2.3 \cdot 10^6$
$2.293 \cdot 10^6$
$2.34 \cdot 10^6$
$2.285 \cdot 10^6$
$2.298 \cdot 10^6$

$\cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$

Calor específico del agua

a la entrada

a la salida

$$Cp_{eag} := 4179 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$Cp_{sag} := 4195 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

Volumen de material del cilindro

Volumen del enfriador

Masa de los carros

Densidad del acero

$$V_{ch} = \pi \cdot L_c \left[\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right]$$

$$V_{enf} = \pi \cdot \left(\frac{D_e}{2} \right)^2 \cdot L$$

$$M_{ca} := 3.87 \text{ ton}$$

$$\rho_{mate} = 7832 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_{ch} = 5.766 \text{ m}^3$$

$$V_{enf} = 223.518 \text{ m}^3$$

Densidad aparente del mineral

Tiempo de retención del mineral

Masa del material del cilindro

$$\rho_m := 800 \text{ kgm}^{-3}$$

$$TR = 50 \text{ mi}$$

$$M_{ci} := \rho_{mate} \cdot V_{cl}$$

$$M_{ci} = 4.51710^4 \text{ kg}$$

**Masa aparente del mineral dentro del tambor**

$$M_{ax} := M_{Red} \cdot Tl$$

Peso del enfriador**Volumen sumergido****Área sumergida**

$$Penf_x := M_{ci} + M_{ca} + M_{m_x}$$

$$V_{S_x} := Penf_x (\rho_{aga_x})^{-1}$$

$$A_{S_x} := V_{S_x} \cdot Le^{-1}$$

$$M_{m_x} =$$

$$Penf_x =$$

$$V_{S_x} =$$

$$A_{S_x} =$$

.176·10 ⁴ kg
.495·10 ⁴
.241·10 ⁴
.582·10 ⁴
.562·10 ⁴
.633·10 ⁴
1.4·10 ⁴
.822·10 ⁴

7.08·10 ⁴ kg
7.4·10 ⁴
.145·10 ⁴
.486·10 ⁴
.466·10 ⁴
.538·10 ⁴
.305·10 ⁴
.727·10 ⁴

72.94 m ³
76.162
73.453
76.817
76.693
67.315
64.814
69.388

2.431 m ²
2.539
2.448
2.561
2.556
2.244
2.16
2.313

Altura del agua de la piscina con respecto al enfriador**Sumergido****No sumergido****Densidad del enfriador****Calor cedido por el mineral**

$$H_{psa_x} := De \frac{penf_x}{\rho_{aga_x}}$$

$$H_{pnsa_x} := De - H_{ps_x}$$

$$\rho_{enf_x} := \frac{Penf_x}{V_{en}}$$

$$Q_{m_x} := M_{Red} \cdot C_p \cdot (T_{ex} - \theta_{s_x})$$

$$H_{psa_x} =$$

1.005 m
1.049
1.012
1.059
1.057
0.928
0.893
0.956

$$H_{pnsa_x} =$$

2.075 m
2.031
2.068
2.021
2.023
2.152
2.187
2.124

$$\rho_{enf_x} =$$

316.764 kg/m ³
331.048
319.673
334.93
334.043
292.489
282.065
300.952

$$Q_{m_x} =$$

.425·10 ⁶ W
.277·10 ⁶
.142·10 ⁶
.085·10 ⁶
.561·10 ⁶
3.1·10 ⁶
.474·10 ⁶
.093·10 ⁶

$$Sp_{sa_x} := De \cos \left(1 - 2 \frac{penf_x}{\rho_{aga_x}} \right)$$

$$Sp_{nsa_x} := De \left(\pi - \arccos \left(1 - 2 \frac{penf_x}{\rho_{aga_x}} \right) \right)$$

$$\theta_{s_x} := \frac{2Sp_{s_x}}{De}$$



Arco de la superficie sumergida
en el agua

$$Sp_{sa} =$$

3.745
3.84
3.761
3.859
3.855
3.578
3.503
3.64

Arco de la superficie no sumergida
en el agua

$$Sp_{nsa} =$$

5.931
5.836
5.916
5.817
5.821
6.098
6.173
6.036

Ángulo de llenado de la
piscina (entre 2,2 y 3,12
rad)

$$\theta_x =$$

2.432
2.493
2.442
2.506
2.503
2.324
2.275
2.364

Flujo de masa evaporativo; $kg/(s.m^2)$

$$Na_x := hm(\rho_{vasa} - \rho_{vas}) \quad Na_p := hm(\rho_{vasp} - \rho_{vas}) \quad q_{evp.A} = Na_x \cdot hfgv_i \quad q_{evp.p} = Na_p \cdot hfgv_i$$

$$Na_x =$$

$8.464 \cdot 10^4$
$8.157 \cdot 10^4$
$3.173 \cdot 10^4$
$9.508 \cdot 10^4$
$1.098 \cdot 10^3$
$3.729 \cdot 10^4$
$1.272 \cdot 10^3$
$9.878 \cdot 10^4$

$$Na_p =$$

$8.157 \cdot 10^4$
$7.531 \cdot 10^4$
$6.703 \cdot 10^4$
$5.592 \cdot 10^4$
$6.201 \cdot 10^4$
$7.778 \cdot 10^4$
$6.721 \cdot 10^4$
$9.117 \cdot 10^4$

$$q_{evp.A} =$$

$1.952 \cdot 10^3$
$1.882 \cdot 10^3$
744.327
$2.187 \cdot 10^3$
$2.518 \cdot 10^3$
872.766
$2.907 \cdot 10^3$
$2.27 \cdot 10^3$

$$q_{evp.p} =$$

$1.882 \cdot 10^3$
$1.741 \cdot 10^3$
$1.553 \cdot 10^3$
$1.3 \cdot 10^3$
$1.439 \cdot 10^3$
$1.797 \cdot 10^3$
$1.557 \cdot 10^3$
$2.099 \cdot 10^3$

$$l_{ca_x} := 2 \cdot \frac{De}{2} \cdot \sin\left(\frac{\theta_x}{2}\right)$$

$$l_{ca_x} =$$

2.888
2.92
2.893
2.926
2.924
2.826
2.795
2.85

$$A_{A_x} := A_{pise} \cdot l_{ca_x}$$

$$A_{A_x} =$$

0.612
0.58
0.607
0.574
0.576
0.674
0.705
0.65

$$L_{aire_x} := A_{A_x} + Sp_{ns_x}$$

$$L_{aire_x} =$$

6.542
6.417
6.522
6.392
6.397
6.772
6.878
6.686

Emisividad del agua

$$\xi_a := 0.9$$

Constante de Stefan-Boltzman

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



Cantidad de calor transferida al aire por evaporación del agua

$$Q_{evp_x} := q_{evp} \cdot A_{A_x} \cdot L_e + q_{evp} \cdot p_{Sp} \cdot n_{sa} \cdot L_e$$

$$Q_{evp_x} =$$

3.707·10 ⁵	·W
3.376·10 ⁵	
2.891·10 ⁵	
2.645·10 ⁵	
2.947·10 ⁵	
3.463·10 ⁵	
3.498·10 ⁵	
4.243·10 ⁵	

Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire

$$\alpha_{aire_x} := \lambda_{aire} (L_{aire_x})^{-1} \cdot (0.4 \cdot Re_{aire}^{0.58} \cdot Pr_{aire}^{0.4})$$

$$\alpha_{aire_x} =$$

1.636	· $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
1.668	
1.641	
1.675	
1.674	
1.581	
1.556	
1.601	

Coefficiente de transferencia de calor por radiación del agua al aire

$$h_{ra_x} := \epsilon_a \cdot \sigma \cdot (\theta_{ag_x} + \theta_a) \cdot \left[(\theta_{ag_x})^2 + \theta_a^2 \right]$$

$$h_{ra_x} =$$

7.838	· $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
7.811	
7.247	
7.925	
8.038	
7.329	
8.162	
7.954	

Cantidad de calor transferida por radiación del agua al aire

$$Q_{rad_x} := h_{ra_x} \cdot L_{aire_x} \cdot L_e \cdot (\theta_{ag_x} - \theta_a)$$

$$Q_{rad_x} =$$

7.518·10 ⁴	W
7.24·10 ⁴	
4.61·10 ⁴	
7.779·10 ⁴	
8.359·10 ⁴	
5.189·10 ⁴	
9.669·10 ⁴	
8.291·10 ⁴	



Cantidad de calor transferida por convección del agua al aire

$$Q_{\text{cony}_x} := \alpha_{\text{aire}_x} L_{\text{aire}_x} L_e (\theta_{\text{ag}_x} - \theta_a)$$

$$Q_{\text{cony}_x} =$$

$1.57 \cdot 10^4$
$.546 \cdot 10^4$
$.044 \cdot 10^4$
$.644 \cdot 10^4$
$1.74 \cdot 10^4$
$.119 \cdot 10^4$
$.844 \cdot 10^4$
$.669 \cdot 10^4$

W

Pérdida de calor al medioambiente

$$Q_{\text{ma}_x} := Q_{\text{cony}_x} + Q_{\text{evp}_x} + Q_{\text{rad}}$$

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

$4.616 \cdot 10^5$
$4.254 \cdot 10^5$
$3.457 \cdot 10^5$
$3.588 \cdot 10^5$
$3.957 \cdot 10^5$
$4.094 \cdot 10^5$
$4.65 \cdot 10^5$
$5.239 \cdot 10^5$

W

Flujo de agua evaporado

$$m_{\text{aevap}_x} := N_{\text{A}_x} (A_{\text{A}_x} L_e) + N_{\text{P}_x} (S_{\text{pnsa}} L_e)$$

$$m_{\text{aevap}_x} =$$

78.363
25.868
49.019
10.325
58.087
39.394
44.986
63.603

 $\cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$

Eficiencia del enfriador

$$E_{\text{f}_x} := \frac{(\theta_{\text{e}_x} - \theta_{\text{s}_x}) \cdot 10}{\theta_{\text{e}_x}}$$

$$E_{\text{f}_x} =$$

62.35
51.821
58.316
49.843
56.185
59.312
54.805
54.054

Flujo de agua que entra a la piscina

$$M_{\text{ag}_x} := \frac{(Q_{\text{m}_x} - Q_{\text{ma}_x}) + m_{\text{aevap}_x} (C_{\text{p sag}} \theta_{\text{ag}_x})}{(C_{\text{p sag}} \theta_{\text{ag}_x} - C_{\text{p e ag}} \theta_{\text{e ag}_x})}$$

$$M_{\text{ag}_x} =$$

18.198
18.124
23.858
16.155
17.115
16.886
8.324
11.684

 $\cdot \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$