



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

**PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL MINERAL
LATERÍTICO REDUCIDO EN LA EMPRESA
“COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA”**

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

José Antonio Rodríguez Moreno

MOA
2011



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

**PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL MINERAL
LATERÍTICO REDUCIDO EN LA EMPRESA
“COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA”**

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

Autor: José Antonio Rodríguez Moreno

Tutores: Prof. Aux., Ing. Ever Góngora Leyva, M Sc

Ing. Diolkis Matos Casals

MOA

2011

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo José Antonio Rodríguez Moreno:

Autor de este trabajo de Diploma y los tutores M.Sc. Ever Góngora Leyva, Ing. Diolkis Matos Casals declaramos la propiedad intelectual de este servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

José Antonio Rodríguez Moreno
Autor

M.Sc. Ever Góngora Leyva
Tutor

Ing. Diolkis Matos Casals
Tutor

PENSAMIENTO

“En la tierra hacen falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y den más, que digan mejor ahora que mañana.”

Che

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Elidía y a mi hija Liset por darme su apoyo en los momentos difíciles.

A mis tutores M.Sc. Ever Góngora Leyva y Ing. Diolkis Matos Casals por la ayuda y la confianza depositada en mi para la realización de este trabajo.

Al Dr.C. Alberto Hernández Flores y su esposa, por su iniciativa y apoyo, al Dr.C. Amauris Palacios Rodríguez por su incondicionalidad y aportes en la realización de este trabajo. A todos los profesores que a lo largo de estos años de una forma u otra contribuyeron al éxito.

A Rolando y a los colegas del despacho, que ocuparon mi puesto de trabajo para que pudiera asistir a clases, a los diferentes compañeros que me ayudaron y apoyaron en la realización de los experimentos.

A los nombrados hoy y a quienes imperdonablemente no hemos recordado...

Muchas Gracias.

DEDICATORIA

Dedico la culminación de este trabajo:

A mis padres Luz y Julio por brindarme una educación basada en valores y principios.

A mi hija Liset, que le sirva de fuente de inspiración en su nueva carrera.

José

RESUMEN

En el presente trabajo se hizo una evaluación del comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, basado en el balance térmico y la modelación estadística. Se determinó el rendimiento térmico del enfriador de mineral reducido y se establecieron las tendencias de variables como: temperatura del agua y de la superficie del cilindro en diferentes puntos a lo largo de la instalación, para diferentes flujos de mineral y flujos de agua, siendo esta última la que más influye en la temperatura del mineral a la salida. El trabajo está desarrollado sobre una amplia base experimental a escala industrial y quedó demostrada la factibilidad de emplear el procedimiento propuesto en la Planta de Hornos de Reducción, de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, dando solución a una de las limitantes que han existido en los estudios precedentes.

ABSTRACT

In the present work was made an evaluation of the behavior of the main variables that intervene in the process of cooling of the reduced lateritic ore, based on the thermal balance and the statistical modeling. The thermal efficiency of the cooler of reduced ore was determined and the tendencies of variables settled down as: temperature of the water and the surface of the cylinder in different points along the installation, for different mineral flows and water flows, being this last that more influence have in the temperature from the mineral to the exit. The work is developed on a wide experimental base to industrial scale and the feasibility was demonstrated of using the procedure proposed in the Plant Furnace of Reduction, of the company "Comandante Ernesto Che Guevara", giving solution to one of the restrictive that have existed in the precedent studies.



INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1 Trabajos Precedentes	4
1.1.1 Enfriadores de mineral laterítico reducido	5
1.1.2 Cilindros horizontales rotatorios	8
1.2 Descripción del flujo tecnológico de la planta	10
1.3 Descripción de la instalación de estudio	11
Conclusiones del capítulo 1.....	12
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1 Instalación experimental	14
2.2 Balance de masa y energía.....	17
2.3 Metodología para la Modelación Estadística.....	22
2.4 Selección de las variables	27
2.5 Técnica experimental	30
Conclusiones del capítulo 2.....	30
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	31
3.1 Análisis del proceso de enfriamiento del mineral reducido.....	31
3.2 Resultados de la modelación estadística.....	34
3.3 Resultados del balance térmico.....	34
3.4 Comportamiento de parámetros que inciden en el proceso	38
3.5 Mejoras para el enfriamiento.....	40
3.6 Valoración técnico-económica	42
3.7 Impacto social y medio ambiental	43
3.7.1 Caracterización de los impactos.....	43
3.7.2 Recomendaciones sobre medio ambiente, salud y seguridad.....	44
Conclusiones del capítulo 3.....	46
CONCLUSIONES GENERALES.....	47
RECOMENDACIONES	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
ANEXOS.....	55



INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel juega un papel importante dentro de la economía nacional, es por ello que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos

Existen dos fábricas en funcionamiento para la obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología carbonato – amoniacal: una, la empresa “Comandante René Ramos Latour” y la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, esta última se ha desarrollado a partir de la década anterior, esto se ve reflejado en los índices de producción presentes en ella, que sin lugar a dudas han contribuido exitosamente a la reanimación de la economía, dando valiosos aportes económicos en aras del desarrollo social.

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

El proceso tecnológico de la fábrica de níquel de Punta Gorda está basado en el esquema de lixiviación carbonato – amoniacal, o proceso CARON, según el cual el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente. Esta tecnología comienza con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos de níquel de Punta Gorda, incorporándose al flujo tecnológico, por la planta de Secaderos y Molinos, a partir de este momento el material circula por las diferentes plantas del proceso entre las que se encuentran: la planta de Hornos de Reducción, la planta de Lixiviación y Lavado, y la planta de Calcinación y Sínter, donde culmina el proceso CARON con la obtención del sínter de níquel.

Este complejo minero metalúrgico de níquel comprende varias entidades, entre ellas la planta Hornos de Reducción, la cual debido a la modificación de sus cámaras de combustión trajo como resultado la posibilidad de aumentar la cantidad de mineral reducido, a más del doble de producción, obtenida por la planta desde su inauguración hasta el momento de la modificación anterior. Al producirse un aumento brusco en la capacidad de los hornos, se comprobó la incapacidad de los enfriadores de bajar la temperatura del mineral reducido desde 700 hasta 170 °C .

Fundamento de la investigación

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

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

La situación actual del proceso de enfriamiento en la Planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se caracteriza por las siguientes *deficiencias*:

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

*A partir de las deficiencias expresadas se declara como **problema**:*

El desconocimiento de la influencia de los diferentes parámetros y variables que intervienen en el proceso de transferencia de calor en los cilindros horizontales rotatorios de la Planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, impiden el desarrollo eficiente del proceso.

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

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

Para garantizar la solución al problema planteado se define como **objetivo del trabajo**:

Determinar el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral laterítico en la Planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Sobre la base del problema a resolver y el objetivo planteado se establece la siguiente hipótesis científica:

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

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

1. Estudio bibliográfico sobre el proceso de enfriamiento del mineral reducido, y el estado actual de la temática en la empresa.
2. Trabajo de campo para caracterizar el proceso y la selección de la bases de datos.
3. Aplicación de las herramientas estadísticas para la selección de las variables a utilizar en la evaluación del proceso.
4. Monitoreo y registro de los parámetros que intervienen en el proceso de transferencia de calor en el enfriamiento de mineral.
5. Realizar el balance térmico de la instalación y determinar el comportamiento de las principales variables del proceso.
6. Obtener la valoración técnico-económica del proceso y las afectaciones que este provoca al medio ambiente.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

La planta de Hornos de Reducción es de importancia vital dentro del proceso de obtención del Níquel, porque es donde se crean las condiciones (reducción de los óxidos de níquel y cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica. Un eslabón importante de la planta lo constituyen los enfriadores (donde ocurre el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido), de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de lixiviación y lavado. En tal sentido el objetivo del capítulo es: establecer el estado del arte del proceso de enfriamiento del mineral mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

1.1 Trabajos Precedentes

Para el desarrollo del trabajo se consultaron diferentes materiales e informes de investigaciones realizadas con anterioridad, la revisión bibliográfica se basó en la búsqueda de información relacionada con la temática del intercambio de calor en cilindros horizontales rotatorios y temas a fines, que desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado.

Desde los inicios de la industria del níquel en Cuba (1942), los enfriadores de mineral laterítico reducido han presentado dificultades en su funcionamiento, destacándose las elevadas temperaturas del mineral a su descarga, mayor de 200 °C , afectando el proceso de lixiviación (Presillas, 1977), confirmó además que en el periodo de 1943 a 1946 no garantizaban la temperatura requerida, según diseño debían enfriar el mineral desde 440 a 107 °C con una productividad de 12,5 t/h , siendo en realidad de 315,5 °C , se hicieron varias modificaciones como: instalación de vibradores, cadenas en los extremos interiores, y se le situaron vigas Z dividiendo así el enfriador en varias secciones. Ninguna de las opciones mejoró notablemente la eficiencia.

1.1.1 Enfriadores de mineral laterítico reducido

Rodríguez (1970; 1978) y Gángara (1980), aportaron información valiosa sobre los mecanismos de transferencia de calor que provocan el enfriamiento del mineral reducido cuando se introduce vapor de agua o agua atomizada en la atmósfera del enfriador. A pesar de que ya no se le introduce agua en ninguna de las formas mencionadas sus trabajos no dejan de ser de interés para la investigación.

Rosell (1986), planteó que una de las causas que inciden sobre el enfriamiento deficiente del mineral se encuentra en la cantidad de carros raspadores, y el número de aletas o levantadores. Luego Medina (1995), con el objetivo de eliminar las averías en el interior de los enfriadores de mineral, propuso reforzar los brazos de los mismos incrementando así su tiempo de vida útil. Aún no se tiene un criterio serio sobre el comportamiento de los carros en el interior de los enfriadores, pues se carece de experimentos que demuestren la incidencia del diseño y la cantidad de carros en la temperatura de salida del mineral.

Por su parte Chacón (1982), expuso que los raspadores exteriores impedían la formación de costras en el exterior del cuerpo del enfriador, favoreciendo el enfriamiento, los cuales fueron eliminados en su totalidad. En las condiciones actuales se observa la formación de costras que a su vez disminuyen la transferencia de calor hacia el agua e introducen errores en las mediciones.

Alonso (1973) y Alepuz (1977), con ayuda de instalaciones experimentales observaron las características del movimiento de mineral reducido caliente dentro de tambores rotatorios. Los resultados de la medición del ángulo formado por la superficie del mineral con la horizontal dieron que su posición oscilaba entre los 20 y 26°. Observaron que el mineral se desplazaba en el cilindro formando una masa estática y que se adhiere a cualquier material en tanto que este se encuentre más caliente que la placa. Estos son los únicos experimentos reportados sobre el comportamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales.

Tunra (1998); encargada para la investigación de las propiedades del mineral concluyó que la conductividad térmica del mineral es deficiente y se reduce con la disminución de la temperatura, de modo que solamente el mineral más próximo a la

superficie de contacto es enfriado. Sus recomendaciones están encaminadas a incrementar el área efectiva de los enfriadores o asegurar un buen mezclado de mineral en su interior para obtener 150 °C a 38 t/h de mineral laterítico reducido. Aún conociendo que la conductividad térmica del mineral varía con su composición química, los resultados mostrados pueden ser empleados en investigaciones afines. Valle (2000 a, b), hizo la evaluación del enfriador número 1 de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, donde demostró que por la piscina se transfiere el 67 % del calor total transferido y el 33 % en la zona no sumergida mediante la vaporización de una parte de la película de agua adherida a la superficie. La transferencia de calor por radiación representa por lo menos el 25 % del calor total transferido, y el calor por conducción representa un poco más de 75 % del calor total, por lo que es el mecanismo predominante. Se considera que en vez de determinar el flujo de agua en función de la temperatura y el calor específico, hubiese sido más factible utilizar un medidor de flujo ya que los valores de temperatura del agua varían en toda su longitud y a ambos lados del cilindro, y asumir un valor puntual introduce errores considerables.

Incropera et al. (2003), abordan la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de calor y masa, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituye un pilar fundamental para la comprensión de las mismas en sus más diversas formas.

Al análisis y determinación de los coeficientes de transferencia de calor que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido a escala industrial, tanto en la empresa “Comandante René Ramos Latour” como en la “Comandante Ernesto Che Guevara” se han dedicado un grupo de investigadores (Matos, 2007; Sotto, 2007; De Valle, 2008; Álvarez 2008; Arena, 2009 y Osorio, 2009). Por su parte (Leyva, 2010 y Santana, 2009) agregaron a su estudio, la evaluación de la incidencia de la temperatura del mineral a la salida del enfriador en el índice de extractable. Otro grupo de investigadores se centró en el estudio de este fenómeno pero a escala piloto (Tabera y García, 2006; Pujol, 2007; Lamorú, 2008; y

Araujo 2009). A la simulación del comportamiento térmico de estos equipos a partir del empleo del software profesional ANSYS versión 7.0, se dedicaron (Londres, 2007 y Ortiz, 2010) quienes establecieron los perfiles de temperatura para el mineral, el cilindro y el agua de la piscina. En dichos estudios se buscó la implementación de metodologías que permitieran caracterizar el proceso en estudio y a su vez establecer una interrelación entre ellos, pero en su mayoría carecen de un fundamento experimental sólido.

Resultan de gran interés los trabajos realizados por Góngora (2004, 2007 y 2009), quien estableció un modelo teórico para la evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros rotatorios, así el procedimiento para la solución del mismo y las ecuaciones que permiten la identificación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud. A pesar de que se obtuvieron resultados promisorios, sus experimentos se caracterizaron por ser pasivos, debido a las limitaciones que impone el proceso industrial.

Lamorú (2008), estableció el procedimiento de cálculo para la evaluación térmica de la instalación a escala piloto y con la data experimental obtenida, determinó la eficiencia térmica del proceso y el flujo de agua óptimo para que la instalación trabaje de forma más eficiente. A pesar de obtener resultados promisorios su aplicación en la industria está limitada por no cumplir la instalación piloto con los criterios de semejanza en cuanto al enfriador industrial.

Spencer (2009), realizó la identificación del proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios con ayuda de Redes Neuronales Artificiales, alcanzando un coeficiente de correlación del 93 % entre la temperatura de salida del mineral y las variables independientes. Se considera que se debe hacer esta identificación sobre la base de un diseño de experimentos en los cuales se destaque la interrelación entre variables, debido a que la experimentación pasiva está afectada por la incidencia de los operadores.

Con el objetivo de garantizar un diseño de experimentos sin afectar el proceso industrial se construyó un enfriador horizontal a escala piloto que cumple con los criterios de semejanza geométrica (Quintero y Verdecia, 2008). Se seleccionó el

motor eléctrico con la potencia y la velocidad de rotación requerida, para su explotación (García, 2009). Se construyó un transportador de tornillo sin fin con la finalidad de garantizar una alimentación uniforme y continua (Rodríguez, 2010). Se implementó un sistema de medición para variables termohidráulicas al enfriador de mineral reducido a escala piloto. Como SCADA empleó el EROS que permite la medición continua de las magnitudes a través de un conjunto de sensores para determinar las temperaturas y caudal enlazados a una computadora mediante un autómatas (Modicon), comprobándose el estado del sistema por varios días continuos (Vargas, 2010). Se establecieron los criterios de semejanza para el escalado del enfriador cilíndrico rotatorio. Demostrando que la velocidad de rotación para el enfriador a escala piloto debe ser 19,9 rev/min , para un tiempo de retención del mineral de 12 minutos, garantizando una productividad entre 100 y 123 kg/h y un flujo de agua de 0,308 m³/h , para una temperatura del agua en la piscina de 70 °C , para una temperatura del mineral a la entrada entre 600 y 750 °C (Zalazar, 2010). Estas investigaciones han buscado una solución a la experimentación a escala industrial pero aún no se han realizado experimentos en dicha instalación.

1.1.2 Cilindros horizontales rotatorios

El estudio de los procesos de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios a través de técnicas experimentales permitió establecer los valores de los números de Rayleigh, Reynolds, Nusselt y de Planck, para diferentes condiciones de trabajo e identificar los modos de intercambio de calor predominante (Iannetta, 1992; Olivas, 1997; Hossain, 1998; Naumenko, 2001 y Gschwendtner, 2004).

Mahfouz (1999), estudió la convección (forzada y natural) en un cilindro horizontal rotatorio, donde demostró que la convección forzada es causada por la oscilación del cilindro, y la convección natural por la flotación del fluido. El proceso de transferencia de calor es gobernado por el número de Rayleigh, Reynolds y la frecuencia dimensional de oscilaciones, del mismo concluye que el efecto global de oscilación es reducido por la transferencia de calor.

Al estudio de los procesos de transferencia de calor de diferentes fluidos en el interior de un cilindro giratorio se dedicaron (Peng, 1998; Dorokhov y Kileeva, 2001 y Yapici, 2003), deducen que la velocidad de rotación tiene un efecto significativo en las características hidrodinámicas y la distribución de los coeficientes de transferencia de calor locales.

Investigaciones realizadas sobre la transferencia de calor por convección en un cilindro horizontal calentado y sumergido en un fluido demuestran que las condiciones de flujo dependerán fuertemente del número de Rayleigh, de Prandtl y de la proporción de flotación (Chen, 1997; Scurtu, 2001; Mahfouz, 2003; Nazar, 2004; Molla, 2004; Shrager, 2004 y Abdalla, 2005).

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

Como se ha podido observar la bibliografía analizada en este epígrafe aporta consideraciones útiles para esta investigación, pero en ninguno de los casos se estudia un cilindro horizontal rotatorio con las características del objeto de estudio.

La consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática escogida, en su mayoría aborda elementos del proceso de transferencia de masa y calor pero no da respuestas al problema de las elevadas temperaturas del mineral a la descarga. Esto se debe a que no se han realizado experimentos que permitan establecer el orden de incidencia de las variables independientes en la temperatura del mineral a la descarga. Esto impone la necesidad de ejecutar una investigación que contribuya a la mayor eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral en las industrias del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

1.2 Descripción del flujo tecnológico de la planta

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

Una vez el mineral en las tolvas, pasa a los dosificadores de pesaje automático que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del pesaje que éstos realizan de acuerdo al tonelaje fijado, estos equipos tienen una capacidad hasta de 22 t/h .

Después que el mineral es pesado, se produce la descarga del mismo al sinfín alimentador el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero.

El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores, para ello el horno dispone de 10 cámaras de combustión dispuestas en los hogares 15, 12, 10, 8 y 6 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases para el calentamiento del mineral.

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

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

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

1.3 Descripción de la instalación de estudio

Después que el mineral sale de los hornos es transportado por el tambor rotatorio cuya función es transportar el mineral reducido de los hornos hasta el enfriador.

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

Al principio (según la marcha del mineral) y la parte del medio del cuerpo se han analizado las cámaras de cargas, la parte final del cuerpo está dentro del enfriador. La entrada de aire atmosférico en las holguras, entre el cuerpo rotatorio, dispositivos cargados y el enfriador se expulsa mediante la empaquetadura. El mineral después de pasar por el transportador rotatorio es descargado en los enfriadores rotatorios los cuales tienen las siguientes funciones:

- ✓ **Transportar:** en el interior del enfriador existe una estructura donde cuelgan los rastrillos pendulares que transportan el mineral que se va enfriando.
- ✓ **Mezclar:** el rastrillo, una vez que sigue el movimiento del tambor y alcanza una determinada altura, por su propio peso cae y mezcla la masa caliente a través de superposición de capas, empujando la capa caliente adyacente al cuerpo y transportando la capa fría.
- ✓ **Enfriar:** es el intercambio calórico entre el calor que aporta el mineral a la pared del cilindro y ésta al agua de la piscina en la cual está sumergido el enfriador. Debiendo disminuir la temperatura del mineral por debajo de 200 °C en la descarga.

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

en el interior del enfriador es de 30 minutos. La temperatura del agua a la salida de la piscina es de 70 a 85 °C .

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

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

El mineral que sale del enfriador cae a las canales, donde se le agrega una solución carbonato amoniacal, formando así una pulpa que va a los tanques de contacto, los cuales tienen una capacidad de 70 m³ .

Conclusiones del capítulo 1

- En la bibliografía consultada se observa que la problemática del enfriamiento del mineral reducido aun no se resuelve y que pocos se han dedicado a evaluar el comportamiento de las diferentes variables que caracterizan el proceso a escala industrial, sobre la base de un diseño de experimentos.
- El estado actual de la automatización del proceso de enfriamiento del mineral evidenció la no existencia de un sistema de control integral que garantice el monitoreo del mayor número de parámetros que caractericen el proceso.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El conocimiento del proceso y el desarrollo de expresiones matemáticas que representen los fenómenos físicos de los sistemas y el proyecto para la implementación de las nuevas tecnologías es un tema de primordial importancia en el desarrollo actual del sector industrial, ya que conociendo los elementos o factores que influyen en la transferencia de calor se puede tener un mayor control de la temperatura del mineral a la salida de los enfriadores y así aumentar la eficiencia de los mismos.

En este capítulo se plantea como objetivo: Establecer los procedimientos para realizar el balance térmico y de masa en el proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Para darle cumplimiento al objetivo propuesto se emplearon los siguientes **métodos de investigación**:

- **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.
- **Experimental** para determinar las variables que caracterizan el proceso presente en el objeto de estudio.
- **Técnicas computacionales** para el cálculo y representación gráfica de las variables que caracterizan la instalación.

2.1 Instalación experimental

Para la realización de los experimentos se seleccionó el enfriador de la Línea 5, Loza 2, de la Planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, el mismo consta de los siguientes equipos y accesorios: enfriador cilíndrico rotatorio, motores eléctricos, piscina de agua de enfriamiento, los que se describen detalladamente en el epígrafe 1.3. Se debe destacar que el sistema de instrumentación instalado para el control de los parámetros este enfriador, es el único que cuenta con medidor de flujo de agua a la entrada de la piscina y con un control de nivel, que permite mantener en cilindro en posición alineada con el transportador en el tramo 5, evitando las averías en esa línea.

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 y procesos auxiliares, en el Anexo 1 se muestra una imagen de las principales variables que son registradas por el CITECT en la Línea 5 (Flujo de mineral, temperatura en el hogar 15, temperatura del mineral a la salida, flujo de agua, temperatura del agua en la piscina y corriente consumida por los motores eléctricos).

En el Anexo 2 se muestra una imagen de las principales variables que son registradas por el CITECT, este caso particular dicha ventana fue creada para esta investigación, es en ella donde se observan aquellas variables que caracterizan el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido. Al cual se le añadió la medición de la temperatura del agua en la piscina en seis puntos adicionales, que no existían, tres en el lado Este y tres en el lado Oeste. En la figura 2.1. para la obtención de la temperatura en diferentes puntos de la superficie de la pared, se utilizó una termocámara, de mano, modelo FLUKE y un pirómetro digital de mano modelo RAYMXPE, donde:

- T1E, T2E, T3E; Temperatura del agua de la piscina en tres puntos del lado Este
- T1O, T2O, T3O; Temperatura del agua de la piscina en tres puntos del lado Oeste
- Tsm; Temperatura a la que sale el mineral
- Fae; Flujo de agua a la entrada

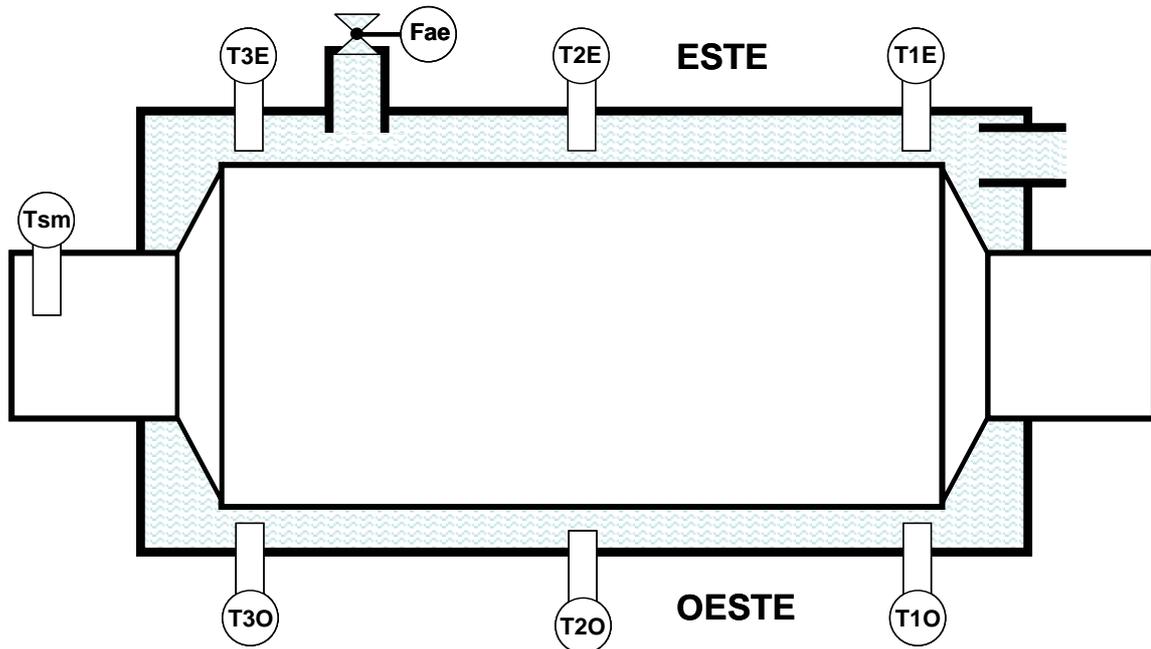


Figura 2.1. Vista superior de la posición de los instrumentos de medición en el objeto de estudio

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 enfriador.
 - EQUIPO: Báscula de pesaje continuo, tipo WESTERDAM.
 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
 - Alimentación 220 V AC
 - Entrada 0 a 18 t/h
 - Salida 4 a 20 mA
- ✓ 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 ligera, 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. 273 a 393 K
- ✓ PARÁMETRO: Flujo de agua que entra a la piscina.
 - EQUIPOS: Elemento primario de caudal tipo PITOT delta.
 - TUBE modelo 301 - AK - 10 - AD para agua.
 - Transmisor de presión diferencial para la medida de caudal, inteligente, no smart, modelo SITRANS P serie HK.
 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
 - Alcance de medida ajustable 2,5 a 25 kPa
 - Margen de medida ajustado 0 a 15 kPa
 - Precisión mejor que el 1 % incluido la histéresis y la repetibilidad.
 - Rangeabilidad 1 a 10
 - Indicador local incorporado, analógico escala 0 a 100 %
 - Conexión eléctrica conector HAN 7D
- ✓ PARÁMETRO: Velocidad de rotación del enfriador
 - EQUIPO: Tacogenerador.
 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
 - 0 a 8,0 rev/min 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.

- ✓ PARÁMETRO: Temperatura de la superficie del enfriador.
- EQUIPO: Termocámara, de mano, Modelo FLUKE.
- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
- Temperatura de servicio entre 258,15 y 528,15 K .
- Conexión a PC.
- Emisividad de la superficie ajustable.
- Capacidad para 100 imágenes.

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 PC donde se registra la información y se muestra la interrelación entre los parámetros antes mencionados.

2.2 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, 2003). 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 medioambiente.

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; kW

Q_m - Calor cedido por el mineral; kW

Q_{ma} - Pérdida de calor al medioambiente; kW

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 al que sale.

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

donde:

$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$ - 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.

Para determinar la cantidad de calor que se pierde al medioambiente se utiliza la ecuación (2.4) que depende del coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire.

$$Q_{ma} = \alpha_{agua} \cdot A_{agua} \cdot (T_{agua} - T_{aire}) \quad (2.4)$$

donde:

α_{agua} - Coeficiente de transferencia de calor por convección; W/m²·K

A_{agua} - Área ocupada por el agua; m²

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

T_{aire} - Temperatura del aire; K

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

Al aplicar la conservación de la energía a una superficie de control alrededor del líquido, se obtiene la expresión (2.5).

$$q''_{conv} + q''_{agr} = q''_{evap} \quad (2.5)$$

donde:

q''_{conv} - Flujo de calor por convección; W/m²

q''_{agr} - Flujo de calor agregado; W/m²

q''_{evap} - Flujo de calor por evaporación; W/m²

Si no se agrega calor por otros medios, la ecuación (2.5) se reduce a un balance entre la transmisión de calor por convección desde el gas y la pérdida de calor evaporativa desde el líquido representada en la ecuación (2.6).

$$q''_{conv} = q''_{evap} \quad (2.6)$$

Donde el flujo de calor por evaporación q''_{evap} puede calcularse como el producto de flujo de masa de evaporado y el calor latente de vaporización, ecuación (2.7).

$$q''_{evap} = n''_A \cdot h_{fgv} \quad (2.7)$$

donde:

n''_A - Flujo másico de agua que se evapora; kg/s·m²

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

El flujo másico de agua que se evapora se determina según la ecuación (2.8).

$$n''_A = h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.8)$$

donde:

h_m - Coeficiente de transferencia de masa; m/s

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

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

El Número de Sherwood es igual al gradiente de concentración adimensional de la superficie, y proporciona una medida de la transferencia de masa por convección de la superficie y según Incropera (2003) se obtiene a través de la ecuación (2.9). La cual es válida para $(0,6 < S_c < 3000)$.

$$Sh = 0.0296 \cdot R_e^{\frac{4}{5}} \cdot S_c^{\frac{1}{3}} \quad (2.9)$$

donde:

S_c - Número de Schmidt.

El Número de Reynolds se determina a través de la ecuación (2.10).

$$R_{eD} = \frac{v_{aire} \cdot D_e}{\nu_{aire}} \quad (2.10)$$

donde:

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

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

Para el calcular el Número de Schmidt se emplea la ecuación (2.11).

$$S_C = \frac{\nu_{aire}}{D_{AB}} \quad (2.11)$$

donde:

ν_{aire} - Viscosidad cinemática del aire; m²/s

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

Conociendo las ecuaciones (2.9), (2.10), (2.11), y a través de la ecuación (2.12) se puede determinar el Coeficiente de Transferencia de Masa.

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} \quad (2.12)$$

donde:

L - Longitud del enfriador; m

El calor transmitido por convección del agua al aire se determina a través de la ecuación (2.13).

$$q''_{conv} = \alpha_{agua} (T_{agua} - T_{aire}) \quad (2.13)$$

Si se sustituyen las ecuaciones (2.7) y (2.13) en la ecuación (2.6) y si despeja el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire α_{agua} , se obtiene la ecuación (2.14).

$$\alpha_{agua} = \frac{h_{fg} \cdot h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty})}{(\theta_{agua} - \theta_{aire})} \quad (2.14)$$

2.3 Metodología para la Modelación Estadística

Con el objetivo de establecer un modelo estadístico que permita pronosticar la temperatura del mineral laterítico reducido a la salida del enfriador cilíndrico rotatorio se propone la siguiente metodología para la Modelación Estadística y los pasos que la conforman.

Primeramente se hace un control de homogeneidad de los valores (según filas), es decir, por cada una de las filas se toman los valores dudosos, por apreciación del investigador (y^*) y se determina el valor promedio a través de la ecuación (2.15) (sin tener en cuenta el valor dudoso)

$$\bar{y}_l = \frac{y_a + y_b + \dots y_n}{n - 1} \quad (2.15)$$

donde:

\bar{y}_l : Valor promedio

y_a, y_n : Valores de respuesta

n : Número de repeticiones

Para determinar la desviación cuadrática (sin incluir el valor dudoso) se emplea la ecuación (2.16)

$$Dc = \sqrt{\frac{(\bar{y}_l - y_a)^2 + (\bar{y}_l - y_b)^2 + \dots (\bar{y}_l - y_n)^2}{n - 1}} \quad (2.16)$$

A través de la ecuación (2.17) se calcula el valor del criterio t Student.

$$t_{calc} = \frac{y^* - \bar{y}_l}{Dc} \quad (2.17)$$

Una vez calculada la t Student a través de la ecuación (2.17) t_{calc} , se determina la t Student a través de las tablas (t_{tab}) y los grados de libertad serían $f = n - 1$, para un nivel de significación de $\alpha = 0,05$.

Luego se comparan de los criterios t_{calc} y t_{tab} . Si $t_{calc} < t_{tab}$, el valor dudoso se corresponde con la población y participa en el resto de los cálculos. Si $t_{calc} > t_{tab}$, el

valor no se corresponde con la población y no participa en el resto de los cálculos (hay que eliminarlo del sistema).

El valor promedio de cada una de las filas estará en función del análisis anterior, y si durante las pruebas realizadas no existen errores, se pasa directamente a la ecuación (2.18).

La dispersión por fila y control de su homogeneidad se determina a través de la ecuación (2.18) y la suma de las dispersiones a través de la ecuación (2.19).

$$S_i^2 = \left[(\bar{y}_i - y_a)^2 + (\bar{y}_i - y_b)^2 + \dots (\bar{y}_i - y_n)^2 \right] \cdot \frac{1}{n-1} \quad (2.18)$$

$$S^2 = \sum_{i=1}^N S_i^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_N^2 \quad (2.19)$$

donde:

N : Número de experimentos.

La dójima de Cochran (G_{calc}) para cada fila se estima a través de la ecuación (2.20)

$$G_{calc} = \frac{S_i^2}{\sum S_i^2} \quad (2.20)$$

Luego se determina el valor de (G_{tab}) tabulado, para un (1) grado de libertad $f_1 = n - 1$; $f_2 = N$; $\alpha = 0,05$. Si $G_{calc} < G_{tab}$, la dispersión es homogénea de cada fila analizada con respecto a la población. De manera contraria la fila debe ser excluida, en tales casos generalmente se han producido errores en la experimentación.

La dispersión de reproducibilidad se calcula a través de la ecuación (2.21)

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (2.21)$$

El error de reproducibilidad se determina a través de la ecuación (2.22)

$$S_y = \sqrt{S_y^2} \quad (2.22)$$

El criterio t **Student** se estima según la ecuación (2.23)

$$t_{calc} = \frac{S_y}{S_y^2} \tag{2.23}$$

Luego se determina t_{tab} ; para los grados de libertad $f = N \cdot (n - 1)$; $\alpha = 0,05$ y se comprueban los criterios t_{calc} y t_{tab} . Si $t_{calc} > t_{tab}$, la diferencia entre los valores de la respuesta en diferentes puntos del plano está comprobada estadísticamente. Si se cumple lo contrario no se recomienda repetir experimento.

Para identificar los coeficientes de la ecuación de regresión se emplean las ecuaciones (2.24, 2.25, y 2.26). Los cálculos se realizan tomando los signos verticales de la matriz ampliada de experimentación, según se muestra en la tabla 2.1.

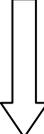
$$b_0 = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 \cdots + \bar{y}_N}{N} \tag{2.24}$$

$$b_1 = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 \cdots + \bar{y}_N}{N} \tag{2.25}$$

$$b_n = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 \cdots + \bar{y}_N}{N} \tag{2.26}$$

Tabla 2.1 Matriz ampliada de experimentación (valores verticales)

	x_0	x_1	x_2	x_{12}
1	1	1	1	1
2	1	-1	1	-1
3	1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	1



La ecuación de regresión se representa a través de la ecuación (2.27).

$$\xi = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_{12} X_1 X_2 + \cdots + b_N X_N \tag{2.27}$$

Para realizar el control estadístico del significado de los coeficientes de la ecuación de regresión (2.27), primeramente se determina el Error de la prueba a través de la ecuación (2.28).

$$S_p = \frac{S_y}{\sqrt{N \cdot n}} \tag{2.28}$$

El criterio t Student para los coeficientes de la ecuación de regresión se determinan a través de las ecuaciones (2.29, 2.30, 2.31)

$$t_{calc} = \frac{|b_0|}{S_p} \tag{2.29}$$

$$t_{calc} = \frac{|b_1|}{S_p} \tag{2.30}$$

$$t_{calc} = \frac{|b_2|}{S_p} \tag{2.31}$$

Luego se determina t_{tab} ; para los grados de libertad $f = N \cdot (n - 1)$; $\alpha = 0,05$ y se comprueban los criterios t_{calc} y t_{tab} . Si $t_{calc} > t_{tab}$, los coeficientes de la ecuación son significativos (son incluidos en la expresión). Si $t_{calc} < t_{tab}$, los coeficientes de la ecuación no son significativos (no son incluidos en la expresión).

El control de la adecuación de la ecuación de regresión se determina a través de las ecuaciones (2.32, 2.33, 2.34) y se realiza el cálculo para cada punto del plano. Este se realiza tomando los signos horizontales de la matriz de experimentación, según se muestra en la tabla 2.2.

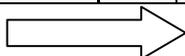
$$\hat{y}_1 = \pm b_0 \pm b_1 \pm b_2 + \dots \pm b_N \tag{2.32}$$

$$\hat{y}_2 = \pm b_0 \pm b_1 \pm b_2 + \dots \pm b_N \tag{2.33}$$

$$\hat{y}_N = \pm b_0 \pm b_1 \pm b_2 + \dots \pm b_N \tag{2.34}$$

Tabla 2.2 Matriz ampliada de experimentación (valores horizontales)

	x0	x1	x2	x12
1	1	1	1	1
2	1	-1	1	-1
3	1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	1



La dispersión de adecuación se determina a través de la ecuación (2.35).

$$S_{adec}^2 = \frac{n}{N - n - 1} [(\bar{y}_1 - \hat{y}_1)^2 + (\bar{y}_2 - \hat{y}_2)^2 + \dots + (\bar{y}_n - \hat{y}_n)^2] \quad (2.35)$$

Luego se determina el Fisher tabulado F_{tab} ; para los grados de libertad $f_1 = N - (n - 1)$; $f_2 = N \cdot (n - 1)$; $\alpha = 0,05$.

Luego se calcula el criterio de Fisher a través de la ecuación (2.36).

$$F_{calc} = \frac{S_{adec}^2}{S_y^2} \quad (2.36)$$

A través de la comprobación del criterio F_{calc} y F_{tab} . Si $F_{calc} < F_{tab}$; el modelo es adecuado al objeto investigado.

El coeficiente de correlación se determina a través de la ecuación (2.37) y para ello el cálculo se puede originar según la tabla 2.3.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y}_G)^2}} \quad (2.37)$$

$R = 0$: No hay correlación

$R = 1$: La relación es positiva

$R = -1$: La relación es negativa

$-1 < R < 1$: Existe relación con mayor o menor veracidad

Tabla 2.3. Para el cálculo del coeficiente de correlación

Prueba	\bar{y}_i	\hat{y}_i	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$	$y_G = \frac{\sum y_i}{N}$	$(\bar{y}_i - \bar{y}_G)^2$
1	\bar{y}_1				
2	\bar{y}_2				
3	\bar{y}_3				
4	\bar{y}_4				
	$\sum \bar{y}_i$		$\sum (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$		$\sum (\bar{y}_i - \bar{y}_G)^2$

2.4 Selección de las variables

Para establecer el rango de variación de las variables que garanticen la realización de los experimentos, sin afectar el proceso productivo fue necesaria la evaluación de una base de datos (población), a través de un análisis estadístico descriptivo que permitió determinar los valores medios de las principales variables que describen el proceso.

Tabla 2.4 Resumen del análisis estadístico descriptivo de la muestra para los meses de diciembre de 2010 a mayo de 2011

<i>Enero</i>	Flujo		Temperatura (°C)		
	mineral (t/h)	agua (m ³ /h)	agua	sale mineral	entra mineral
Mínimo	15,00	10,58	60,45	101,10	502,14
Media	34,00	14,48	84,50	191,10	761,82
Máximo	43,00	34,14	93,89	319,48	903,63

La tabla 2.4 muestra el comportamiento de la media, mínima y máxima de las variables que intervienen en el proceso, de las cuales la temperatura de entrada del mineral al enfriador y a la que sale el agua de la piscina no se tienen en cuenta para la creación del modelo debido a que no existe en el proceso industrial método alguno para su manipulación, además la temperatura de agua a la salida de la piscina tiene significativa dependencia del flujo de agua, esto se puede explicar a través de la ecuación del calor.

Flujo de mineral

La variación en los valores mínimos del flujo de mineral se deben a las operaciones que se realizan durante la puesta en marcha del horno, el valor que adquiere el flujo de mineral depende del perfil térmico del horno. Esto se justifica debido a que solo se alcanzan valores por debajo de la media (15 t/h) en los casos de averías, el valor medio es de 34 t/h . La capacidad máxima de un horno es 22 t/h , para una productividad por enfriador de 44 t/h , siendo el valor máximo alcanzado en el

periodo evaluado de 43 t/h , lo que justifica que los hornos deben de estar trabajando siempre a la máxima capacidad nominal.

Este parámetro se identifica como una variable de entrada al sistema debido a que la misma se puede manipular para ver su efecto en la temperatura de salida del mineral del enfriador.

Temperatura del agua en la piscina

Esta variable es un reflejo de la eficiencia del proceso de transferencia de calor ya que depende del calor entregado por el mineral y del flujo de agua que se esté suministrando a la piscina de enfriamiento.

La tabla 2.4 muestra el comportamiento de los valores mínimos, medios y máximos de la temperatura del agua en la piscina, donde se observa que los valores de la temperatura se mueven fuera del valor establecido, 70 °C según el Manual de Operaciones de la Planta de Hornos de Reducción (1985). Esto puede estar causado por mala operación del proceso, que se realiza de forma manual y muchas veces los operadores no tienen los conocimientos necesarios para la toma de decisiones, provocando de esta manera esa dispersión en la temperatura del agua en la piscina. Este parámetro se puede mantener constante a través de la manipulación del flujo de agua que entra a la piscina y es por ello que no se selecciona como una variable de entrada al sistema.

Flujo de agua que entra a la piscina

Esta variable solo es controlada en uno de los 12 enfriadores que existen en la instalación y es por ello que se seleccionó este equipo para realizar la investigación. La misma es manipulada con el objetivo de garantizar una temperatura alrededor de los 70 °C en la piscina, así como también que el cilindro se mantenga flotando y se consuma la menor cantidad de energía eléctrica. Existe un alto porcentaje de coincidencia para los valores medio del flujo de agua, el mismo oscila por los 30 a 34 m³/h , según el Manual de Operaciones de la Planta de Hornos (1985) dicho

flujo debe estar entre los 80 y 100 m³/h , lo cual puede estar condicionado al igual que en otros parámetros por la incorrecta operación del proceso.

Este parámetro se identifica como una variable de entrada al sistema debido a que la misma se puede manipular para ver su efecto en la temperatura de salida del mineral del enfriador.

Temperatura del mineral a la salida del enfriador

Aunque la temperatura del mineral a la descarga del enfriador es la variable dependiente, se debe destacar que en ella inciden una serie de parámetros que no se registran en el proceso productivo, como son, la temperatura a la que descarga el Jacoby el mineral en el enfriador, la cantidad de agua que se evapora, la temperatura y humedad del medio ambiente, velocidad del aire y flujo de mineral reducido que entra al enfriador. Todas esas variables mencionadas son recogidas en el modelo fenomenológico propuesto por Góngora (2007).

Se puede observar en la tabla 3.1 que el valor medio de la temperatura del mineral a la descarga del enfriador es de 191,10 °C y la moda de 252,15 °C , muestran un comportamiento cercano a la realidad del proceso, según su régimen de explotación actual y al igual que para el flujo de mineral los valores mínimos corresponden a situaciones de arrancadas, paradas y/o averías del proceso en los hornos o en los enfriadores cilíndricos horizontales.

Este parámetro se identifica como variable de salida o dependiente, debido a que es la que caracteriza la eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral.

A partir del análisis realizado se definen como variables de entrada o independientes:

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

Como variable de salida o dependiente:

- Temperatura del mineral a la salida del enfriador

2.5 Técnica experimental

Para la realización de los experimentos se propuso un diseño factorial completo de dos factores (flujo de mineral y flujo de agua) y dos niveles para cada uno (máximo y mínimo) con tres réplicas, para un total de 12 pruebas, quedando la matriz de experimento como se muestra en la tabla 3.2. En el anexo 3 se muestran los resultados obtenidos de la modelación estadística basada en el diseño de experimento propuesto.

Para este caso se toman valores del flujo de mineral cercanos al máximo debido a que los hornos se deben operar a su capacidad nominal y de esta forma garantizar la máxima productividad de la Planta de Hornos de Reducción y no afectar el cumplimiento del plan de producción de la empresa.

Tabla 2.5 Matriz de experimento

Flujo de mineral (t/h)	Flujo de agua (m ³ /h)	Temperatura del mineral a la salida (°C)		
		Y ₁	Y ₂	Y ₃
34	13	197,77	198,18	198,60
35	13	212,75	211,66	210,27
34	21	224,94	227,74	229,55
35	21	215,67	216,52	217,37

Durante el experimento se manipularon las variables de entrada según la tabla 2.1 y cuyos resultados se observan en la tabla 2.5.

Conclusiones del capítulo 2

1. Se caracterizó la instalación experimental y se exponen los instrumentos para la medición de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento.
2. Se estableció el procedimiento de cálculo para realizar el balance de masa y energía en el proceso de enfriamiento de mineral.
3. Se estableció la metodología para la modelación estadística de las variables que intervienen en el diseño de experimento.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se desarrolla el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, donde se requiere de un procedimiento de cálculo satisfactorio para la evaluación térmica del enfriador y de las variables de mayor incidencia en la temperatura de salida del mineral. Durante el desarrollo de la presente investigación el procedimiento fue establecido y debe ser verificado a partir de los datos experimentales obtenidos en el objeto de estudio. Es por ello que el **objetivo** del capítulo es: evaluar el enfriador de mineral laterítico reducido empleando el sistema de ecuaciones propuesto en el capítulo 2.

3.1 Análisis del proceso de enfriamiento del mineral reducido

El proceso de enfriamiento consiste en disminuir la temperatura del mineral hasta valores por debajo de 200 °C . Para ello se utiliza el enfriador cilíndrico rotatorio.

El enfriador utilizado en el proceso es un equipo de transferencia de calor, el mismo está dispuesto horizontalmente como una instalación de transporte. El mineral llega a través del transportador rotatorio al enfriador, que está seccionado en tres partes en el cual al caer el mineral es pasado por cada sección del mismo con la ayuda de los carros raspadores y paletas los cuales se encargan también de remover el mineral y raspar la superficie interior del enfriador evitando que el mineral se adhiera e interfiera en el proceso de transferencia o intercambio de calor entre el mineral y el enfriador, 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.

Desde el punto de vista termoenergético en este proceso están presentes los tres modos de transmisión del calor (Conducción, Convección y Radiación) y los mismos influyen de la forma siguiente:

El mineral es descargado en el enfriador a una temperatura entre 650 y 750°C , el mismo transfiere calor a la superficie interior del tambor por conducción, convección y radiación, predominando considerablemente la transferencia de calor por conducción debido al contacto sólido-sólido, en este caso mineral-enfriador, también se transfiere calor por convección debido a la presencia de gases productos de la combustión que acompañan el mineral hasta el interior del cilindro, pero este modo de transmisión del calor puede ser despreciado porque solo se manifiesta cuando se forman burbujas o poros dentro de la masa de mineral, hecho este que no es frecuente en este proceso.

Desde la masa de mineral a la pared superior del equipo se transfiere el calor por radiación debido a la alta temperatura del mineral en el interior del enfriador. En el espesor del enfriador ($\delta = 16$ mm), o sea desde la pared interior a la superficie exterior el flujo de calor se transfiere por conducción; teniendo en cuenta para el posterior análisis que es mayor la influencia de la transferencia de calor por conducción en la parte que está en contacto el mineral con el tambor.

Una vez transferido el flujo de calor hasta la superficie exterior del enfriador, este intercambia calor con el agua de la piscina que se encuentra por encima de 30 °C , dando lugar al calentamiento progresivo de la misma hasta valores entre 60 y 95 °C , este proceso de intercambio de calor ocurre por convección y en el mismo se le comunica velocidad al fluido.

Como se puede apreciar el enfriador de mineral es un objeto complejo para la modelación con gran número de parámetros de entrada y de salida los cuales se encuentran en una compleja interdependencia.

En la figura 3.1 se muestra el esquema estructural de la interacción de los parámetros principales del proceso de enfriamiento del mineral reducido.

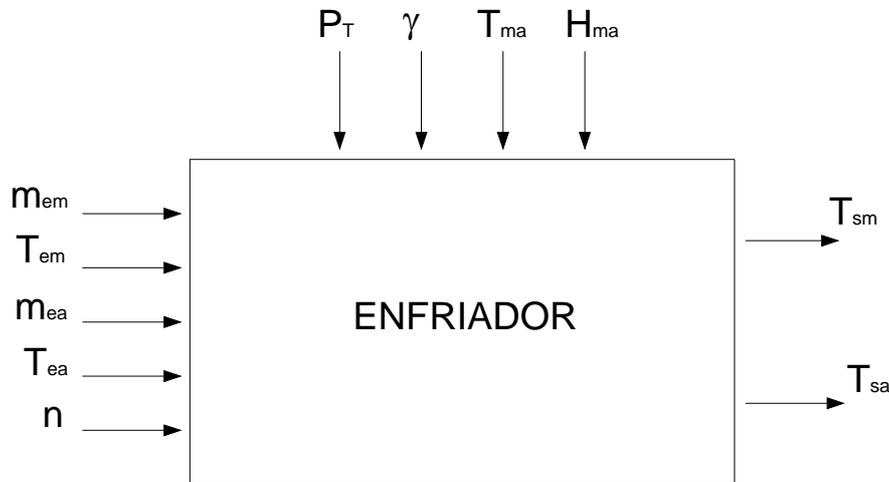


Figura 3.1 Esquema estructural del proceso de enfriamiento del mineral.

Los parámetros de entrada del proceso son:

- $m_{em} \Rightarrow$ Flujo de mineral a la entrada del enfriador.
- $T_{em} \Rightarrow$ Temperatura del mineral a la entrada del enfriador.
- $m_{ea} \Rightarrow$ Flujo de agua de entrada a la piscina.
- $T_{ea} \Rightarrow$ Temperatura del agua a la entrada de la piscina.
- $n \Rightarrow$ Número de revoluciones del tambor.

Como parámetros de salida se destacan los siguientes:

- $T_{sm} \Rightarrow$ Temperatura del mineral a la salida del enfriador.
- $T_{sa} \Rightarrow$ Temperatura del agua a la salida de la piscina.

Además de los parámetros de entrada y de salida, resulta importante destacar algunas perturbaciones propias de este proceso y que ejercen influencia sobre el mismo, ellas son:

- $P_T \Rightarrow$ Presión de trabajo en el interior del enfriador.
- $\gamma \Rightarrow$ Coeficiente de llenado del tambor.
- $T_{ma} \Rightarrow$ Temperatura del medio ambiente.
- $H_{ma} \Rightarrow$ Humedad relativa del medio ambiente.

3.2 Resultados de la modelación estadística

El método empleado para la modelación estadística del proceso, es el descrito en epígrafe 2.3, el cual permitió determinar que no existe diferencia significativa entre los valores de las filas por lo que no hay necesidad de eliminar ningún valor. Se demostró además que existe dispersión por filas y es homogénea según el criterio de Cochran y a través del criterio de Students se comprobó estadísticamente la respuesta en diferentes puntos del plano. Luego se determinaron los coeficientes de la ecuación de regresión, justificándose a través del criterio de Students que el coeficiente que caracteriza el flujo de mineral no es significativo, por lo cual se puede considerar eliminarlo de la ecuación de regresión para un coeficiente de correlación igual al 100 % . Se demostró además a través del criterio de Fisher que el modelo propuesto (ecuación 3.1) es adecuado al objeto investigado.

$$T_{sm} = 213,418 + 0,623 \cdot F_m + 8,548 \cdot F_a - 6,067 \cdot F_m \cdot F_a \quad (3.1)$$

3.3 Resultados del balance térmico

Para la realización del balance térmico del enfriador se efectuaron experimentos adicionales con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema en un rango más amplio de operación, con vista a llegar a conclusiones profunda respecto a la eficiencia del proceso de transferencia de calor que tiene lugar en el equipo.

Teniendo en cuenta los datos iniciales, las mediciones realizadas y utilizando el procedimiento de cálculo establecido en el capítulo 2, se procede a la evaluación térmica del enfriador con el empleo de los valores medios de los datos mostrados en el anexo 4 y en la tabla 3.1 se hace un resumen de los mismos.

En el anexo 5, se relacionan los resultados fundamentales obtenidos del balance de energía y masa que se realizó con ayuda del Software Mathcad Profesional 13.

Tabla 3.1 Resumen de los datos experimentales utilizados para el balance térmico.

Flujo			Temperatura a la salida (°C)		
Mineral (t/h)	Agua (m ³ /h)		Enfriador	Horno 1	Horno 2
29,40	15,00		152,29	749,35	577,60
32,40	20,00		217,71	770,14	618,03
35,40	25,00		258,80	788,85	651,27
Temperatura del agua (°C)					
Lado Este			Lado Oeste		
1	2	3	1	2	3
77,18	66,06	59,98	78,09	69,97	61,12
79,44	70,23	64,23	80,21	73,92	66,14
82,64	75,17	69,09	83,45	77,98	71,25
Temperatura de la pared (°C)					
Lado Este			Lado Oeste		
1	2	3	1	2	3
81,33	70,53	64,50	83,63	72,20	68,93
93,71	79,53	74,13	93,26	79,11	74,71
100,50	87,80	93,98	96,90	91,67	85,93

La figura 3.2, muestra el comportamiento de la cantidad de agua evaporada con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral.

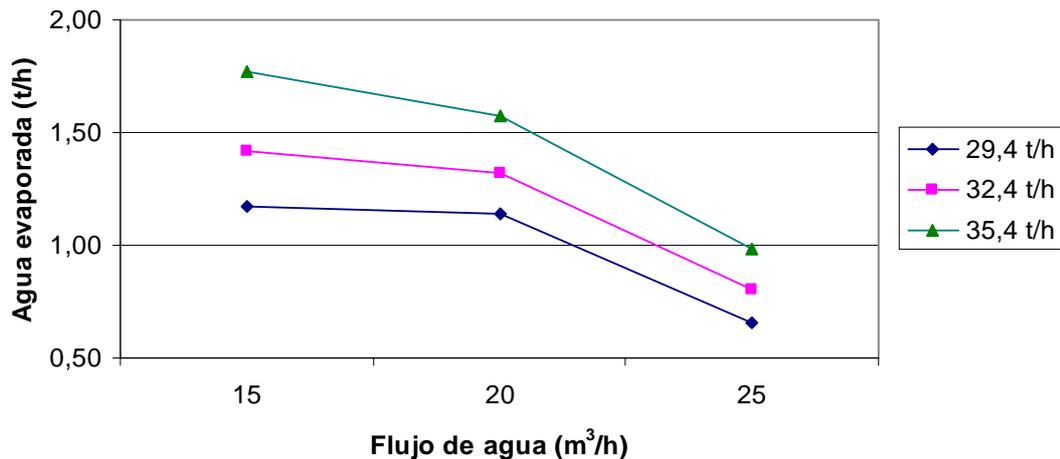


Figura 3.2 Comportamiento de la cantidad de agua evaporada con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral.

En la figura 3.2, se observa que para mayores flujos de mineral y menores flujos de agua, el proceso de evaporación al medio ambiente es mayor que para el caso contrario, oscilando los valores mínimos y máximos entre 0,66 y 1,77 t/h de agua evaporada respectivamente.

La figura 3.3 muestra un comportamiento similar al de la figura 3.2 pero en este caso con respecto a la cantidad de calor que se cede al medio ambiente, que aumenta con el incremento del flujo de mineral y la disminución del flujo de agua. Se debe destacar que el modo de transferencia de calor predominante en este proceso es la convección por evaporación, siempre que la temperatura del agua alcance valores cercanos a su temperatura de ebullición a presión atmosférica.

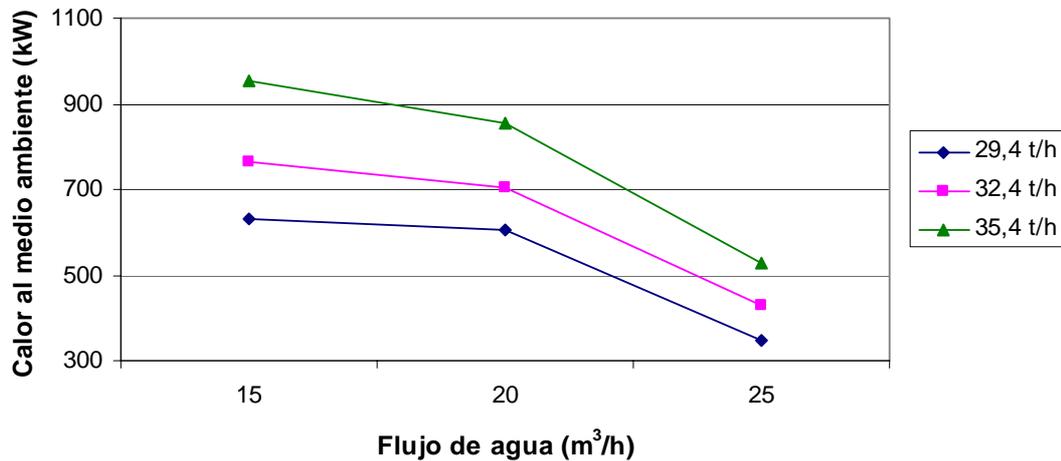


Figura 3.3 Comportamiento del calor cedido al medio ambiente con respecto al flujo de agua para diferentes flujo de mineral.

La figura 3.4 muestra el comportamiento del calor absorbido por el agua de la piscina para diferentes flujos de agua, se observa que a medida que se incrementa el flujo de agua esta absorbe mayor cantidad de calor y que para flujos de agua superiores a 20 m³/h la diferencia entre la cantidad de calor absorbida para diferentes flujos de mineral es mínima.

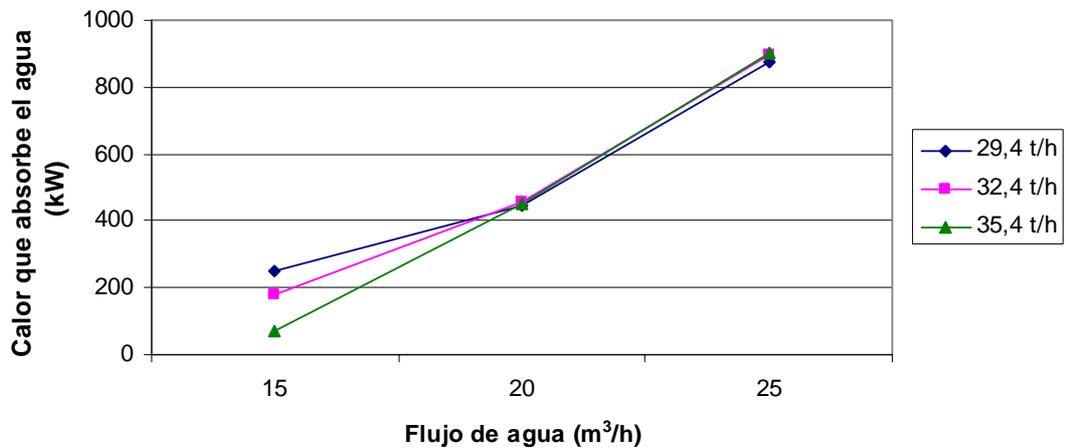


Figura 3.4 Comportamiento del calor absorbido por el agua con respecto al flujo de agua para diferentes flujo de mineral.

A través del balance térmico se comprobó que para altos flujos de mineral y pequeños flujos de agua la mayor cantidad de calor transferida al medio ambiente es por evaporación, pero cuando se opera con flujos de agua superiores a los 20 m³/h , entonces predomina la transferencia de calor por convección del agua al aire, siendo la sumatoria de ambas cantidades de calor el total transferido al medioambiente, valor que tiende a mantenerse constante.

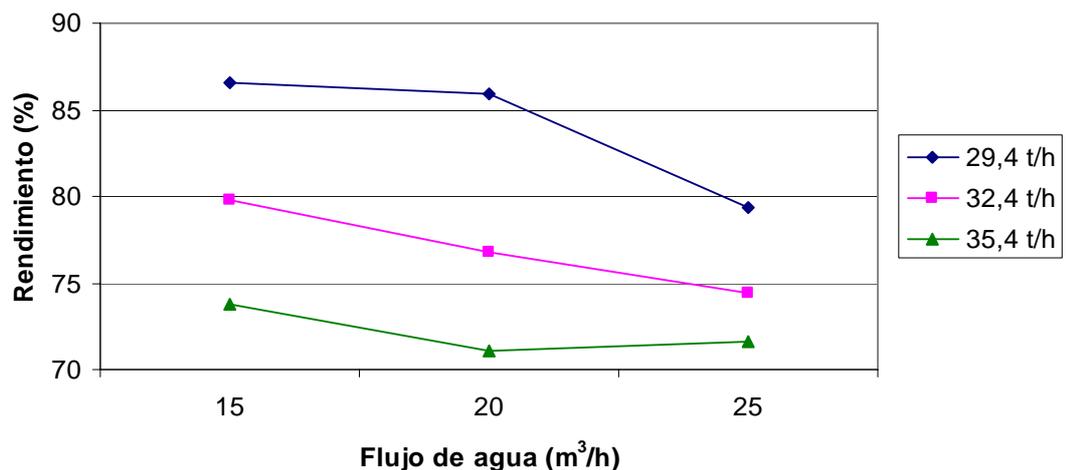


Figura 3.5 Comportamiento del rendimiento del enfriador con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral.

En la figura 3.5 se observa que el rendimiento de la instalación objeto de estudio oscila entre 71 y 86 % , alcanzándose los valores mayores para un flujo de mineral de 29,4 t/h y flujos de agua entre 15 y 20 m³/h .

3.4 Comportamiento de parámetros que inciden en el proceso

La figura 3.6 muestra los resultados de los datos experimentales, observando que a medida que se incrementa el flujo de mineral aumenta la temperatura del mineral a la descarga del enfriador, con el aumento consecuente del flujo de agua. Este incremento de la temperatura del mineral a la descarga con el incremento del flujo de agua, puede ser originado por diferentes causas, considerando que la principal se debe a que no existe una distribución eficiente del agua en la instalación, ya que se realiza a contracorriente por el lado Este de la piscina y en ese mismo lado se encuentra la salida del agua, además la piscina cuenta con estructuras de hormigón en su interior que impiden una eficiente distribución del agua.

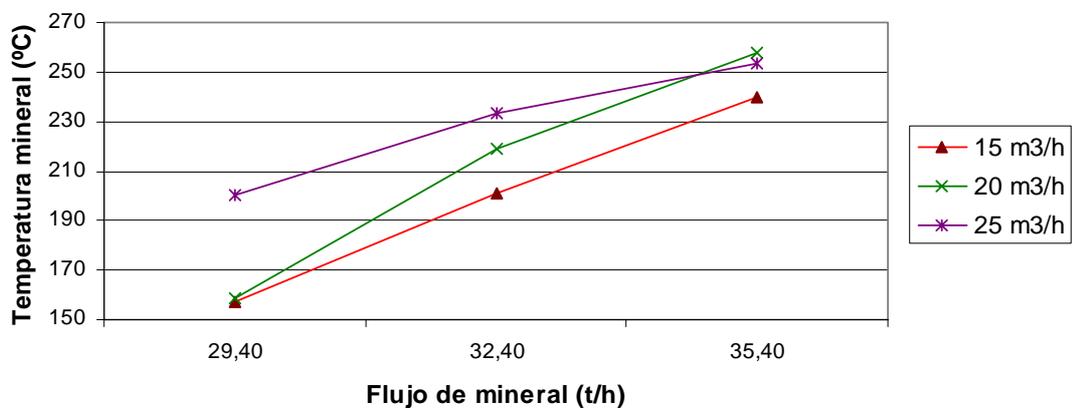


Figura 3.6 Comportamiento de la temperatura del mineral con respecto al flujo de mineral para diferentes flujos de agua.

Una de las limitantes que ha existido en las investigaciones referenciadas en el capítulo 1, es la ausencia de mediciones de la temperatura del agua y de la pared del cilindro en diferentes puntos en toda la longitud del objeto de estudio. Siendo una de las mayores fortalezas de este trabajo, el haber logrado medir y registrar los parámetros antes mencionados y ha servido para que los operadores de la planta

perciban con mayor facilidad cuando la instalación está trabajando fuera de parámetros como el nivel del agua en la piscina, por registrarse valores muy inferiores a los establecidos.

La figura 3.7 muestra el comportamiento de la temperatura del agua en la piscina para un flujo de agua de 15 m³/h y diferentes flujos de mineral, donde ha medida que aumenta el flujo de mineral la temperatura del agua alcanza los valores más altos en el punto uno del lado Oeste. Se debe destacar que para flujos de agua de 20 y 25 m³/h se obtienen comportamientos similares, con una ligera disminución de la temperatura en los puntos dos y tres, no así en el punto uno.

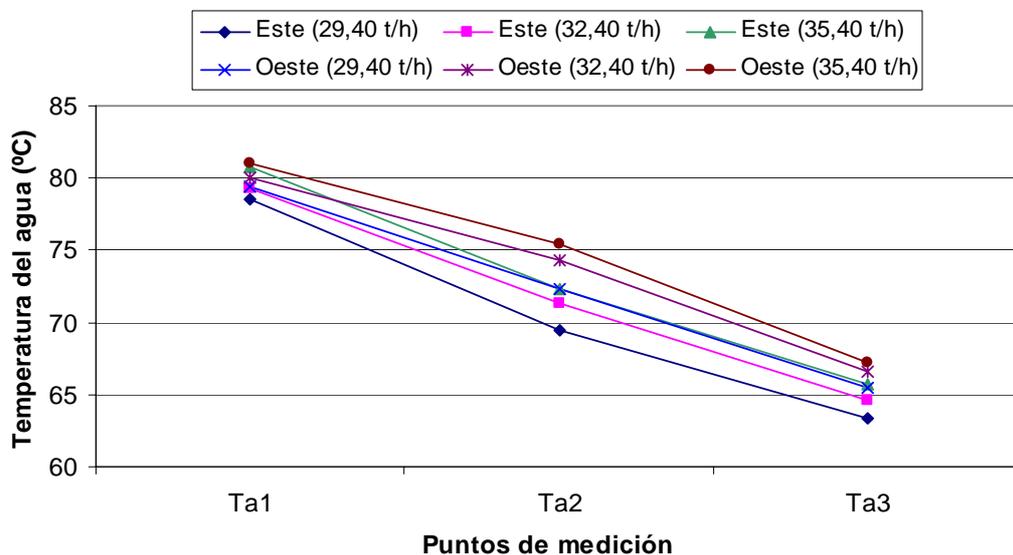


Figura 3.7 Comportamiento de la temperatura del agua en la piscina para un flujo de agua de 15 m³/h .

La figura 3.8 muestra el comportamiento de la temperatura de la superficie del cilindro para un flujo de agua de 15 m³/h y diferentes flujos de mineral, donde que ha medida que aumenta el flujo de mineral se incrementa la temperatura de la pared del cilindro alcanzando los valores más altos en el punto uno del lado Oeste. Se debe destacar que para flujos de agua de 20 y 25 m³/h se obtienen comportamientos similares y se observa además una caída brusca de temperatura desde el punto uno al dos, siendo menos acentuada hacia el punto tres.

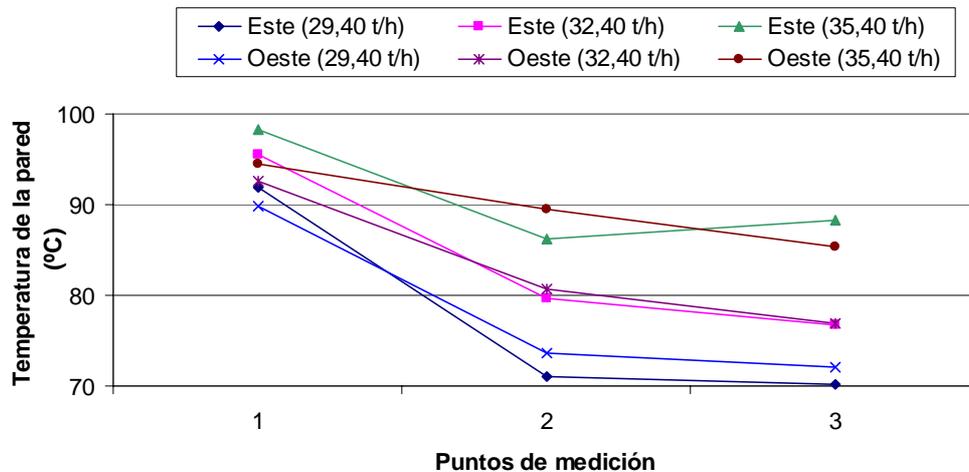


Figura 3.8 Comportamiento de la temperatura de la pared del cilindro para un flujo de agua de 15 m³/h .

3.5 Mejoras para el enfriamiento

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

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

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

- Mantener todos los dientes, brazos y bóvedas en buen estado para lograr la mejor combustión en la zona de reducción. Se evita formaciones de gránulos de mineral con gotas de petróleo en su interior que pasan al enfriador y se rompen en la zona caliente generando gases.
- Tomar muestras de mineral en la descarga del horno, enfriarlo rápido y analizar la posibilidad contener combustible.

2. Optimizar la función del agua de enfriamiento.

- Realizar la prueba pendiente del control de nivel mecánico y la alimentación automática del agua con control de temperatura.

3. Análisis de los carros o rastrillos existentes.

Este aspecto es definitorio para lograr un mejor resultado en la temperatura de descarga. Profundizando en los resultados prácticos obtenidos es definitivo pensar que los rastrillos no son idóneos porque se han mantenido altas temperaturas desde su surgimiento.

Los carros deben tener la mayor área de apoyo posible a la pared del cilindro y teniendo en cuenta su peso de acuerdo a la masa mineral a enfriar, se completará en cada giro un recorrido superior a los 65° hacia delante y algo menor hacia atrás. He aquí el trabajo de deslizar el mineral frío de la pared inferior para que caiga el caliente hacia la pared.

4. Excentricidad.

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

3.6 Valoración técnico-económica

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

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

Por otra parte las elevadas temperaturas del mineral que salen del enfriador debido al deficiente proceso de enfriamiento repercuten negativamente en la Planta de Lixiviación, incidiendo en la evaporación del amoniaco, en trabajos investigativos realizados se demuestra que existe una pérdida aproximada de 10 t/día . Considerando que el precio actual del amoniaco es 584 CUC/t , el daño económico para un año de trabajo continuo es 2 131 600 CUC .

El deterioro prematuro de algunos elementos y accesorios que componen el sistema de los tanques de contacto provocan las pérdidas por mantenimiento, este problema está dado porque el magnesio a altas temperaturas se hace soluble en la pulpa; se incrusta en las paredes de los tanques de contacto y en todo el sistema interno del mismo, lo que provoca que muchas piezas sean renovadas cada cuatro meses aproximadamente, generando pérdidas de 16 787,38 CUC al año por concepto de materiales según estudios realizados por el personal de mantenimiento de la planta. Aparejado a esto, se encuentra el costo de la mano de obra que asciende a un valor de 836,9 CUC por año.

En los enfriadores el promedio mensual del consumo de agua es de 271 066 m³ con un precio de 0,28 CUC el m³, para un promedio anual es de 3 252 790 m³ lo que significa un costo de 910 781 CUC por año.

3.7 Impacto social y medio ambiental

El presente trabajo tiene gran importancia para las empresas con tecnología carbonato amoniacal, porque de ser aplicado con éxito se obtendrían los parámetros más influyentes en la temperatura del mineral a la salida del enfriador y con ello es posible estabilizar este parámetro, lo que permite elevar la eficiencia y la producción de níquel y cobalto, factor decisivo para el desarrollo del país por ser la producción niquelífera el principal renglón de exportación en la actualidad. La incorporación de los resultados permite humanizar la labor de los operadores que están expuestos a las emisiones gaseosas de amoníaco, letal para la vida en altas concentraciones.

Además de lo antes expuesto, el trabajo aporta un procedimiento de cálculo que permite ser utilizado por los estudiantes y otras personas interesadas en la temática para realizar el análisis térmico del proceso sin necesidad de exponer al investigador en contacto con sustancias altamente tóxicas y sus correspondientes emisiones gaseosas

Al realizar un estudio del comportamiento ambiental del proceso de enfriamiento del mineral reducido en la planta piloto se analizan los factores que de una forma u otra influyen, haciendo énfasis 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

3.7.1 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 3.4 se muestran los impactos ambientales del proceso de enfriamiento.

Tabla 3. 4. 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 amoniaco
Emisiones de polvo	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Emisiones de ruido continuo		Pérdidas de la sensibilidad auditiva

Para comprender cual es la situación ambiental real que actualmente presenta la instalación, en el epígrafe 3.7.2 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.

3.7.2 Recomendaciones sobre medio ambiente, salud y seguridad

Calidad del aire en los puestos de trabajo

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

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

El ruido en los puestos de trabajo 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.

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

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

El ruido también produce en el sistema neuro-vegetativo, una serie de modificaciones funcionales que son reacciones de defensa del organismo frente a una agresión externa, por ejemplo: la elevación de la presión arterial, aceleración del ritmo cardíaco 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

- ✓ Mediante las mediciones realizadas en el objeto de estudio se realizó el balance térmico y de masa del enfriador.
- ✓ Se presentaron gráficamente los resultados más importantes obtenidos del modelo teórico para el proceso de enfriamiento.
- ✓ Se hace énfasis en los principales contaminantes del medio ambiente y que afectan la salud humana en la planta de Hornos de Reducción y en los enfriadores de mineral específicamente.

CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ Se demostró a través de la modelación estadística que las variables flujo de mineral, flujo de agua y la combinación de las dos tienen incidencia significativa en la temperatura de salida del mineral, para un coeficiente de correlación del 100 % .
- ✓ Se demostró que para mayores flujos de mineral y menores flujos de agua el modo de transferencia de calor predominante es la convección por evaporación y la cantidad de agua evaporada oscila entre 0,66 y 1,77 t/h .
- ✓ Se demostró que para flujos de agua superiores a 20 m³/h la diferencia entre la cantidad de calor absorbida para diferentes flujos de mineral es mínima.
- ✓ Se comprobó que el rendimiento de la instalación objeto de estudio oscila entre 71 y 86 % , alcanzándose los valores mayores para un flujo de mineral de 29,4 t/h y flujos de agua entre 15 y 20 m³/h .
- ✓ Se comprobó que al aumentar el flujo de mineral asciende la temperatura del agua y de la pared del cilindro alcanzando los valores más altos en el punto uno del lado Oeste.



RECOMENDACIONES

- ✓ Continuar con el estudio de la temática en cuestión para lograr una mayor identificación del proceso.
- ✓ Garantizar la conexión de otros instrumentos de medición al sistema de almacenamiento de datos, para mejorar la precisión en el análisis.
- ✓ Poner a consideración de la dirección de la planta sustituir los muros de contención del interior de la piscina por otras estructuras que faciliten la circulación del agua.
- ✓ 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 del enfriador y los instrumentos de medición presente en la instalación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDALLA, M. 2005. Unsteady numerical simulation of double diffusive convection heat transfer in a pulsating horizontal heating annulus. *Heat Mass Transfer*, 9p.
2. ALONSO, C. 1973. Características del movimiento del mineral reducido caliente dentro de los enfriadores de mineral. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 27p. Informe técnico.
3. ALEPUZ, H. 1977. Mejora en el proceso de enfriamiento de mineral reducido con el enfriamiento actual. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 38p. Informe técnico.
4. ÁLVAREZ A.R. 2008. Evaluación del proceso transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindro horizontales rotatorios el la "Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma" Moa.
5. ARAUJO E. 2009. Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento de mineral laterítico a escala piloto. Trabajo de diploma. Moa.
6. ARENA, A. 2009. Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la Empresa "Comandante René Ramos Latour". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
7. CHACON, R. 1982. Las posibles causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral dentro de los cooler. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 21p. Informe técnico.
8. CHEN, M. 1997. Double-diffusive convection for a heated cylinder submerged in a salt stratified fluid layer. *Heat Mass Transfer* 33, pp. 17-26.
9. DE VALLE, R.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. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.

10. DOROKHOV, A. R. 2001. Heat exchange with horizontal cylinders in a centrifugal-bubbling bed. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 74, No. 3, pp. 800-805.
11. GANGARA, C. 1980. Enfriamiento del mineral reducido mediante la adición directa de agua atomizada en el enfriador rotatorio de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 32p. Informe técnico.
12. GARCÍA M.D.A. 2009. Establecimiento de los parámetros de diseño y explotación del mineral experimental. Trabajo de diploma Moa.
13. GONGORA, 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". Tesis de maestría. ISMMANJ, Moa, Cuba. 80p.
14. GONGORA, E. 2007. Modelo Matemático Multivariable para un Proceso de Enfriamiento Industrial de Sólidos en Cilindros Rotatorios Horizontales. *Minería y Geología*, 7p.
15. GÓNGORA, L, E. 2009. Coeficientes de transferencia de calor en enfriadores de mineral laterítico a escala piloto. *Minería y Geología* v.25 n.3.
16. GSCHWENDTNER, M. A. 2004. Optical investigation of the heat transfer from a rotating cylinder in a cross flow. *Heat and Mass Transfer* 40, pp. 561–572.
17. HOSSAIN, M. A. 1998. Radiation-conduction interaction on mixed convection from a horizontal circular cylinder. *Heat and Mass Transfer* 35, pp. 307-314.
18. IANNETTA, S. 1992. Experimental analysis of thermal fields in horizontally eccentric cylindrical annuli. *Experiments in Fluids* 12, pp. 385-393.
19. INCROPERA, F. 2003. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, Tomo I, II. III.
20. LAMORU, M. Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico para diferentes condiciones de trabajo. Góngora, E, Columbié, A. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2008.

21. LEYVA, D.Y. 2010. Influencia de la temperatura del mineral laterítico reducido en el índice de extractable en el tanque de contacto. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
22. LONDREZ MENA, J. 2007. Modelación y simulación del proceso de enfriamiento del mineral reducido en cilindros horizontales rotatorios por el método de elementos finitos. M.Sc. Ever Góngora Leyva (tutor). Tesis en opción al título de Ing. Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 86 h.
23. MAHFOUZ, F. M. 1999. Heat convection from a cylinder performing steady rotation or rotary oscillation. *Heat and Mass Transfer* 34, pp. 375-380.
24. MAHFOUZ, F. M. 2003. Transient free convection from a horizontal cylinder placed in a micropolar fluid. *Heat and Mass Transfer* 39, pp. 455–462.
25. Manual de Operaciones de la planta Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, 1985. 219p.
26. MATOS C.D. 2007. Evaluación de la influencia del agua de enfriamiento en el proceso de transferencia de calor del mineral laterítico reducido cilindros horizontales en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Moa.
27. MEDINA, A. 1995. Propuestas de modificación del carro raspador del enfriador de mineral de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 11p. Informe técnico.
28. MOLLA, M. 2004. Natural convection flow from an isothermal horizontal circular cylinder with temperature dependent viscosity. *Heat Mass Transfer* 41, pp. 594–598.
29. 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*, Vol. 74, No. 3, pp. 736-744.
30. NAZAR, R. 2004. Mixed convection boundary-layer flow from a horizontal circular cylinder with a constant surface heat flux. *Heat and Mass Transfer* 40, pp. 219–227.

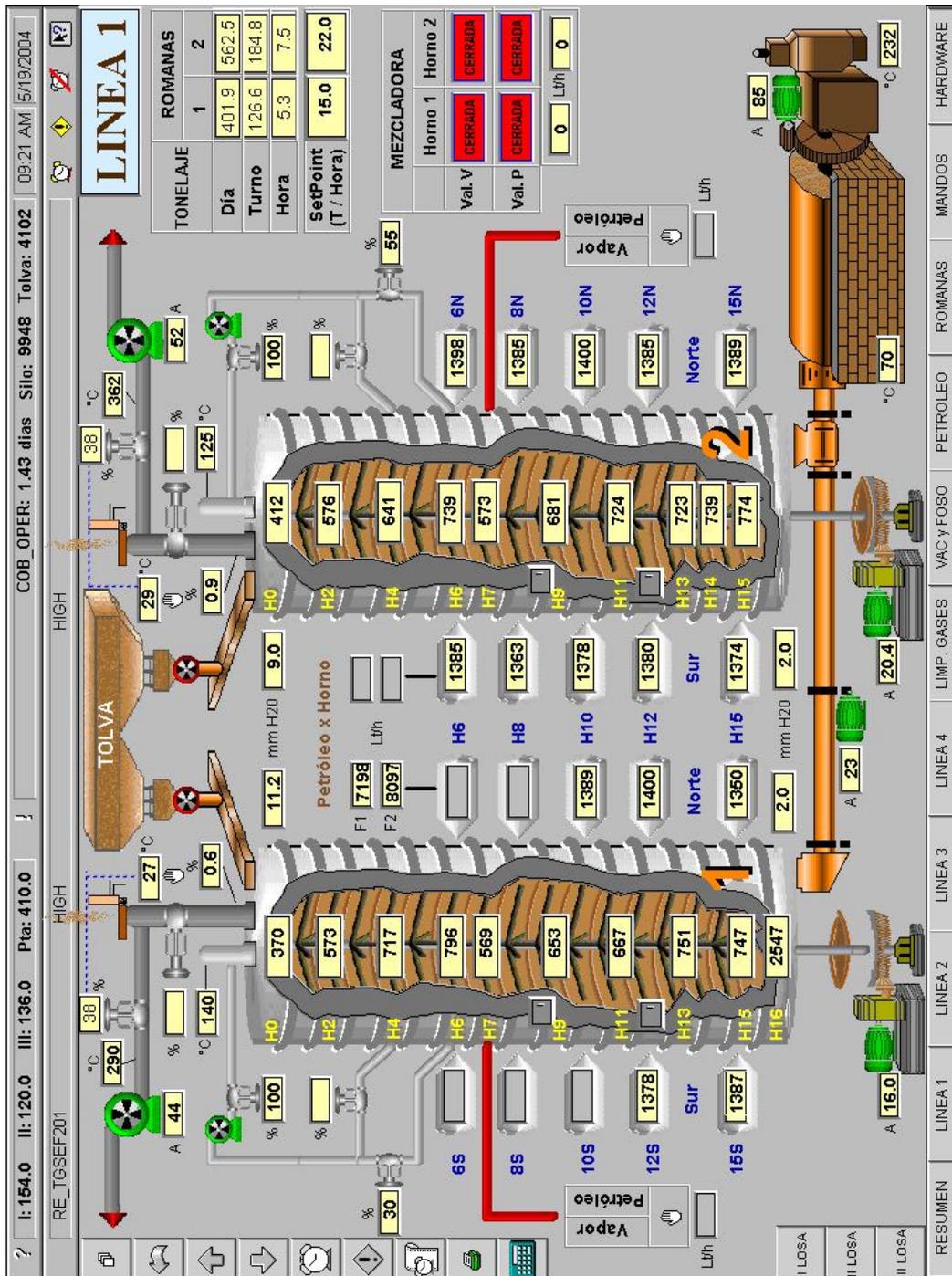
31. OLIVAS, P. 1997. On unsteady electrochemical coating of a cylinder at moderately large Reynolds number. *Journal of Applied Electrochemistry* 27, pp. 1369-1379.
32. ORTIZ, C.F.A. 2010. Estimación de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento por el método de elementos finitos. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
33. OSORIO G. 2009. Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comdte Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma" Moa ISMM.
34. 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, pp. 1066–1076.
35. PENG, S. W. 1998. Theoretical analysis of laminar film condensation in a rotating cylinder with a scraper. *Heat and Mass Transfer* 34, pp. 279-285.
36. PRESILLA, D. 1977. Mejora en el proceso de enfriamiento de mineral reducido con el enfriamiento actual. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 12p. Informe técnico.
37. PUJOL, L.J.O. 2007. Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
38. QIUNTERO, G.E. 2008. Construcción de un enfriador cilíndrico rotatorio a escala de laboratorio. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
39. RODRIGUEZ, R. 1978. Análisis de la influencia de la adición de vapor de agua sobre el enfriamiento de mineral reducido en el proceso de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 10p. Informe técnico.
40. RODRIGUEZ, R. 1970. Investigación de la modelación matemática del horno de calcinación. Vol. No.2. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 24p. Informe técnico.

41. RODRÍGUEZ, G.G. 2010. Construcción de un transportador de tornillo sin fin para la alimentación del enfriador de mineral a escala piloto del ISMM. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
42. ROSELL, R. 1986. Las posibles causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral dentro de los cooler. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 15p. Informe técnico.
43. SANTANA, P.O. 2009. Evaluación técnico – económica del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
44. SCURTU, N. D. 2001. Free convection between two horizontal concentric cylinders filled with a porous medium a perturbed solution. *Acta Mechanica* 151, pp. 115- 125.
45. SHRAGER, G. R. 2004. Modeling of the Viscous Flow with a Free Surface inside a Rotating Horizontal Cylinder. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, Vol. 39, No. 3, pp. 283–289.
46. SOTTO, Y. 2007. Influencia de los elementos mecánicos del enfriador horizontal en el proceso de transferencia de calor del mineral reducido en la empresa "Comdte. Ernesto Che Guevara". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
47. SPENCER, R.Y. 2009. Identificación del proceso de enfriamiento del mineral en el proceso CARON, con ayuda de Redes Neuronales Artificiales Góngora, E. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa.
48. TUNRA. 1998. Ore Cooler Evaluation. The University of New Castle Research Associates Limited. 18p.
49. TABERA, Y; R. 2006. Estudio del comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto. Góngora, E; Retirado, Y. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 61p.



50. VALLE, M. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa (1). *Tecnología Química* Vol. XX, No. 1, 2000, pp. 70-77.
51. VALLE, M. 2000. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa (2). *Tecnología Química* Vol. XX, No. 2, pp. 10-15.
52. VARGAS, R.P.L. 2010. Sistema Automático de Medición para variables en un Enfriador de mineral a Escala Piloto. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
53. YAPICI, H. 2004. Transient temperature and thermally induced stress distributions in a partly-circumferentially heated cylindrical workpiece. *Heat Mass Transfer* 41, pp. 104–111.
54. ZALAZAR, O.C. 2010. Obtención de los parámetros de funcionamiento del enfriador rotatorio a escala piloto del ISMM.

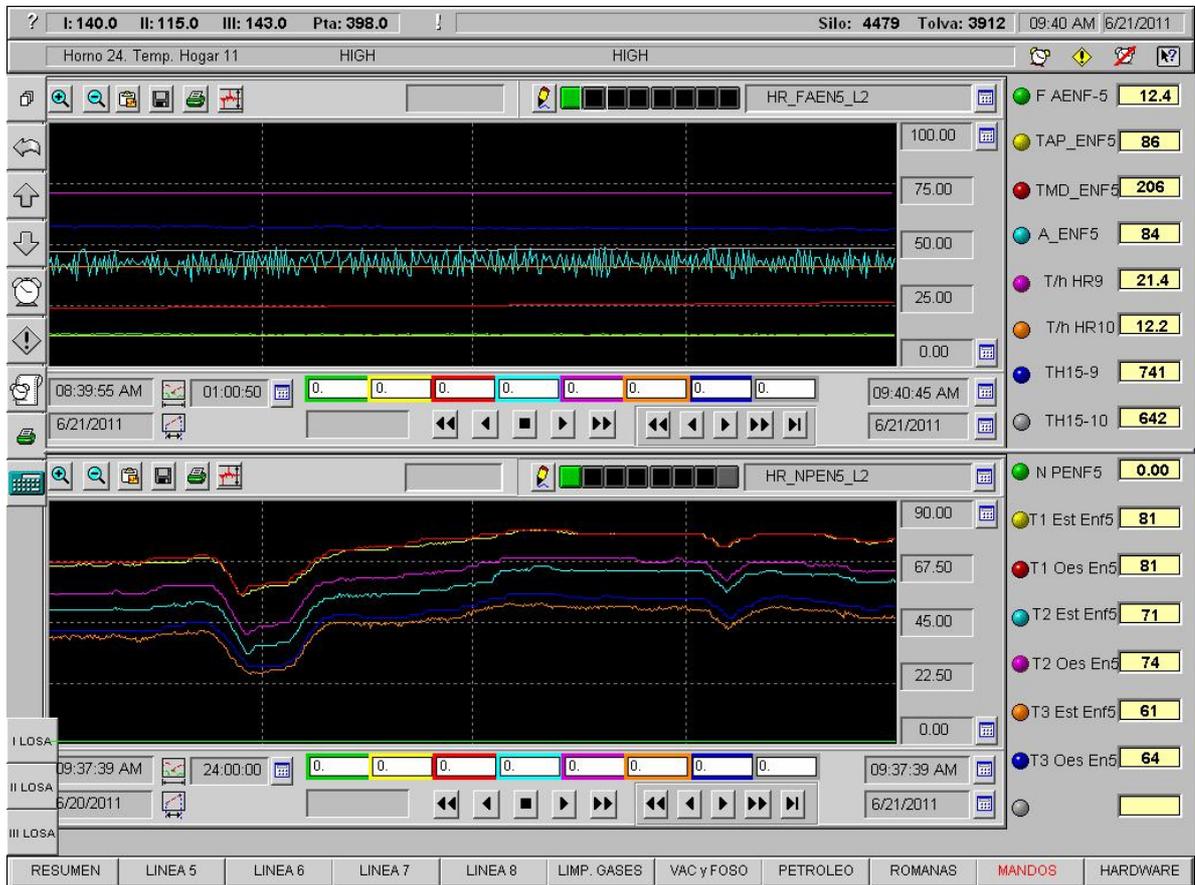
Anexo 1 Ilustración del CITECT para la Línea 1 de la Losa 2



Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

Autor: José A Rodríguez Moreno

Anexo 2 Ilustración del CITECT para monitorear el comportamiento de los parámetros del objeto de estudio.



- **TAP_ENF5:** Temperatura del agua en la piscina; °C
- **TDM_ENF5:** Temperatura del mineral a la descarga del enfriador; °C
- **A_ENF5:** Corriente del motor; A
- **T/h HR9:** Flujo de mineral que entra al horno 9; t/h
- **T/h HR10:** Flujo de mineral que entra al horno 10; t/h
- **TH15-9:** Temperatura en el hogar 15 del horno 9; °C
- **TH15-10:** Temperatura en el hogar 15 del horno 10; °C
- **N PENF5:** Nivel del enfriador; mm
- **T1 Est Enf5:** Temperatura del agua en el punto 1 del lado este de la piscina; °C
- **T1 Oes En5:** Temperatura del agua en el punto 1 del lado oeste de la piscina; °C



Anexo 3 Modelación estadística del proceso de enfriamiento

Factorial completo con 2 variables y 3 niveles

Número de niveles

Número de factores

Número de experimentos

Número de réplicas

$$P_{\text{nivel}} := 2$$

$$K_{\text{factor}} := 2$$

$$N_e := P_{\text{nivel}}^{K_{\text{factor}}}$$

$$n_r := 3$$

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

$$N_e = 4$$

F_m :=

	0
0	34
1	35
2	34
3	35

F_a :=

	0
0	13
1	13
2	21
3	21

y_a :=

	0
0	197.766
1	212.75
2	224.94
3	215.674

y_b :=

	0
0	198.18
1	211.663
2	227.744
3	216.522

y_c :=

	0
0	198.595
1	210.269
2	229.548
3	217.369

Media aritmética

$$Y_{m_x} := \frac{y_{a_x} + y_{b_x} + y_{c_x}}{n_r}$$

$$Y_{m_x} =$$

198.18
211.56
227.41
216.522

$$Y_{am_0} := \frac{y_{b_0} + y_{c_0}}{n_r - 1}$$

$$Y_{am_1} := \frac{y_{c_1} + y_{b_1}}{n_r - 1}$$

$$Y_{cm_2} := \frac{y_{c_2} + y_{b_2}}{n_r - 1}$$

$$Y_{cm_3} := \frac{y_{a_3} + y_{b_3}}{n_r - 1}$$

$$Y_{am_0} = 198.388$$

$$Y_{am_1} = 210.966$$

$$Y_{cm_2} = 228.646$$

$$Y_{cm_3} = 216.098$$

$$D_{cb_0} := \sqrt{\frac{(Y_{am_0} - y_{b_0})^2 + (Y_{am_0} - y_{c_0})^2}{n_r - 1}}$$

$$D_{ac_1} := \sqrt{\frac{(Y_{am_1} - y_{c_1})^2 + (Y_{am_1} - y_{b_1})^2}{n_r - 1}}$$

$$D_{cb_0} = 0.207$$

$$D_{ac_1} = 0.697$$

$$t_{\text{cala}_0} := \frac{|y_{b_0} - Y_{am_0}|}{D_{cb_0}} \quad t_{\text{cala}_0} = 1$$

$$t_{\text{calc}_1} := \frac{|y_{a_1} - Y_{am_1}|}{D_{ac_1}} \quad t_{\text{calc}_1} = 2.558$$

$$D_{ca_2} := \sqrt{\frac{(Y_{cm_2} - y_{a_2})^2 + (Y_{cm_2} - y_{c_2})^2}{n_r - 1}}$$

$$D_{cc_3} := \sqrt{\frac{(Y_{cm_3} - y_{c_3})^2 + (Y_{cm_3} - y_{b_3})^2}{n_r - 1}}$$

$$D_{ca_2} = 2.697$$

$$D_{cc_3} = 0.948$$

$$t_{\text{cala}_2} := \frac{|y_{c_2} - Y_{cm_2}|}{D_{ca_2}} \quad t_{\text{cala}_2} = 0.334$$

$$t_{\text{calc}_3} := \frac{|y_{a_3} - Y_{cm_3}|}{D_{cc_3}} \quad t_{\text{calc}_3} = 0.447$$

t tab. = 2.92

Dispersión por fila y control de homogeneidad

$$Scuad_{n_x} := \left[(Y_{m_x} - y_{a_x})^2 + (Y_{m_x} - y_{b_x})^2 + (Y_{m_x} - y_{c_x})^2 \right] \cdot \frac{1}{n_r - 1}$$

$$Scuad_{n_x} =$$

0.172
1.547
5.392
0.719

$$\sum_{x=0}^3 Scuad_{n_x} = 7.829$$

$$G_{\text{cal}_x} := \frac{Scuad_{n_x}}{\sum_{x=0}^3 Scuad_{n_x}} \quad G_{\text{cal}_x} =$$

0.022
0.198
0.689
0.092

G tab = 7679

Si G calc < G tab , la dispersión SI es homogénea.

Si G calc > G tab , la dispersión NO es homogénea.

Dispersión reproducibilidad Error reproducibilidad T Student calculada

$$Scuad_y := \frac{1}{Ne} \cdot \sum_{x=0}^3 Scuad_{n_x}$$

$$Scuad_y = 1.957$$

$$S_y := \sqrt{Scuad_y}$$

$$S_y = 1.399$$

$$tca_{0_2} := \frac{Ym_2 - Ym_0}{S_y \cdot \sqrt{\frac{1}{n_r} + \frac{1}{n_r}}}$$

$$tca_{0_2} = 25.588$$

$$t \text{ tab.} = 1.94$$

$$a0_x :=$$

1
1
1
1

$$\sum_{x=0}^3 a0_x = 4$$

$$a1_x :=$$

-1
1
-1
1

$$\sum_{x=0}^3 a1_x = 0$$

$$a2_x :=$$

-1
-1
1
1

$$\sum_{x=0}^3 a2_x = 0$$

$$a12_x :=$$

1
-1
-1
1

$$\sum_{x=0}^3 a12_x = 0$$

Si t calc > t tab. puntos del plano está comprobada estadísticamente.

Error de la prueba

$$S_p := \frac{S_y}{\sqrt{Ne \cdot n_r}}$$

$$S_p = 0.404$$

Coefficientes ecuación de regresión

$$b_0 := \frac{\sum_{x=0}^3 (a0_x \cdot Ym_x)}{Ne}$$

$$b_0 = 213.418$$

$$b_1 := \frac{\sum_{x=0}^3 (a1_x \cdot Ym_x)}{Ne}$$

$$b_1 = 0.623$$

$$b_2 := \frac{\sum_{x=0}^3 (a2_x \cdot Ym_x)}{Ne}$$

$$b_2 = 8.548$$

$$b_{12} := \frac{\sum_{x=0}^3 (a12_x \cdot Ym_x)}{Ne}$$

$$b_{12} = -6.067$$

Comprobación de los coeficientes

$$t_{cal0} := \frac{|b_0|}{S_p}$$

$$t_{cal0} = 528.431$$

$$t_{cal1} := \frac{|b_1|}{S_p}$$

$$t_{cal1} = 1.542$$

$$t_{cal2} := \frac{|b_2|}{S_p}$$

$$t_{cal2} = 21.165$$

$$t_{cal12} := \frac{|b_{12}|}{S_p}$$

$$t_{cal12} = 15.023$$

$$t \text{ tab.} = 1.86$$

Si tcalc > ttab, los coeficientes de la ecuación son significativos.

Si $t_{calc} < t_{tab}$, los coeficientes de la ecuación no son significativos.

$$Y_{nn_x} := a0_x \cdot b_0 + a1_x \cdot b_1 + a2_x \cdot b_2 + a12_x \cdot b_{12}$$

$$Y_{nn_x} =$$

198.18
211.56
227.41
216.522

$$Y_{m_x} =$$

198.18
211.56
227.41
216.522

$$\sum_{x=0}^3 Y_{m_x} = 853.673$$

$$Y_G := \frac{\sum_{x=0}^3 Y_{m_x}}{Ne} \quad Y_G = 213.418$$

Dispersión adecuación

$$Scuad_{adec} := \frac{n_r \cdot \left[\sum_{x=0}^3 (Y_{m_x} - Y_{nn_x})^2 \right]}{Ne - (n_r - 1)}$$

$$Scuad_{adec} = 0$$

Prueba de Fisher

$$F_{cal} := \frac{Scuad_{adec}}{Scuad_y}$$

$$F_{cal} = 0 \quad \mathbf{F_{tab} = 19.4}$$

Si $F_{cal} < F_{tab}$; el modelo es adecuado al objeto investigado

Coefficiente de correlación lineal

$$R_{corr.} := \sqrt{1 - \frac{\left[\sum_{x=0}^3 (Y_{m_x} - Y_{nn_x})^2 \right]^2}{\left[\sum_{x=0}^3 (Y_{nn_x} - Y_G)^2 \right]^2}}$$

$$R_{corr.} = 1$$

Anexo 4 Base datos experimental para balance de energía y masa

Flujo		Temperatura a la salida (°C)		
Mineral (t/h)	Agua (m ³ /h)	Enfriador	Horno 1	Horno 2
35,4	15	231,13	767,25	587,13
35,4	15	249,02	765,53	577,60
35,4	20	258,46	763,55	587,77
35,4	20	257,54	766,95	578,49
35,4	25	245,98	768,93	581,78
35,4	25	248,13	761,01	580,38
32,4	15	221,25	763,20	639,62
32,4	15	189,92	770,14	646,14
32,4	20	238,46	763,61	632,82
32,4	20	240,92	764,28	637,00
32,4	25	258,80	749,35	606,83
32,4	25	247,53	762,85	623,03
29,4	15	161,38	779,40	651,27
29,4	15	152,29	788,85	648,73
29,4	20	153,74	787,48	651,22
29,4	20	163,61	780,83	643,48
29,4	25	194,55	776,72	631,69
29,4	25	206,10	782,59	619,58

Flujo		Temperatura del agua (°C)					
Mineral (t/h)	Agua (m ³ /h)	Lado Este			Lado Oeste		
		1	2	3	1	2	3
35,4	15	77,98	71,64	64,64	78,92	74,88	66,27
35,4	15	79,06	72,89	66,75	79,84	76,00	68,17
35,4	20	81,08	74,93	68,59	81,49	77,73	70,38
35,4	20	82,16	75,17	69,09	82,39	77,98	71,25
35,4	25	82,64	72,90	67,70	83,45	76,79	69,77
35,4	25	80,52	70,26	65,54	81,44	74,94	67,49
32,4	15	77,99	68,60	62,91	78,96	71,56	65,00
32,4	15	79,30	70,30	63,86	80,34	73,18	66,06
32,4	20	77,85	66,06	62,20	78,83	70,05	64,07
32,4	20	77,18	66,53	61,52	78,09	69,97	63,71
32,4	25	78,50	68,53	64,02	79,54	72,66	66,15
32,4	25	77,71	67,05	63,18	78,60	71,47	65,50
29,4	15	80,57	71,92	64,64	81,00	74,75	66,98
29,4	15	80,99	72,35	64,68	81,00	75,21	66,92
29,4	20	79,67	69,36	62,09	80,49	73,60	64,01
29,4	20	78,03	66,36	59,98	78,94	71,87	61,12
29,4	25	78,46	68,22	60,81	79,26	72,68	62,44
29,4	25	80,16	71,03	64,01	81,29	75,29	65,32

Flujo		Temperatura de la pared (°C)					
Mineral (t/h)	Agua (m ³ /h)	Lado Este			Lado Oeste		
		1	2	3	1	2	3
35,4	15	84,3	84,6	91,7	92,6	91,7	84,7
35,4	15	99,5	87,8	84,8	96,3	87,5	85,9
35,4	20	96,7	86,5	77,4	96,9	87,3	81,1
35,4	20	91,9	86,7	75,7	96,7	81,4	81,9
35,4	25	81,3	81,2	94,0	95,6	81,0	77,7
35,4	25	99,3	78,1	71,1	96,8	80,4	74,5
32,4	15	100,5	71,3	72,3	89,8	74,4	71,6
32,4	15	96,0	70,8	71,5	89,7	72,8	72,4
32,4	20	92,8	72,0	70,4	94,9	74,6	72,8
32,4	20	91,1	70,5	68,5	94,2	74,3	71,7
32,4	25	94,4	71,1	71,2	92,5	72,8	71,7
32,4	25	92,7	70,6	69,9	94,3	72,2	73,6
29,4	15	96,5	82,1	69,9	92,4	80,6	75,2
29,4	15	96,0	81,6	70,3	94,8	77,3	71,7
29,4	20	95,1	84,6	64,9	94,6	77,8	70,0
29,4	20	95,1	84,3	64,5	94,3	76,8	69,2
29,4	25	92,9	85,0	73,3	83,6	80,6	68,9
29,4	25	90,9	83,0	72,9	88,5	80,5	70,2

	Flujo		Temperatura a la salida (°C)		
	Mineral (t/h)	Agua (m ³ /h)	Enfriador	Horno 1	Horno 2
Media	32,40	20,00	217,71	770,14	618,03
Error típico	0,59	0,99	9,15	2,44	6,71
Mediana	32,40	20,00	234,80	767,10	627,36
Desviación estándar	2,52	4,20	38,81	10,37	28,46
Varianza de la muestra	6,35	17,65	1506,28	107,51	810,04
Curtosis	-1,59	-1,59	-1,16	-0,25	-1,64
Coefficiente de asimetría	0,00	0,00	-0,66	0,27	-0,36
Rango	6,00	10,00	106,51	39,50	73,67
Mínimo	29,40	15,00	152,29	749,35	577,60
Máximo	35,40	25,00	258,80	788,85	651,27
Nivel de confianza(95,0%)	1,25	2,09	19,30	5,16	14,15



	Temperatura del agua (°C)					
	Lado Este			Lado Oeste		
	1	2	3	1	2	3
Media	79,44	70,23	64,23	80,21	73,92	66,14
Error típico	0,38	0,67	0,61	0,34	0,57	0,63
Mediana	79,18	70,28	64,02	80,09	74,17	66,10
Desviación estándar	1,62	2,84	2,57	1,46	2,42	2,66
Varianza de la muestra	2,62	8,08	6,60	2,13	5,87	7,09
Curtosis	-0,78	-0,95	-0,40	-0,31	-0,85	-0,12
Coefficiente de asimetría	0,52	0,14	0,38	0,56	0,00	0,20
Rango	5,46	9,12	9,11	5,36	8,01	10,13
Mínimo	77,18	66,06	59,98	78,09	69,97	61,12
Máximo	82,64	75,17	69,09	83,45	77,98	71,25
Nivel de confianza(95,0%)	0,81	1,41	1,28	0,73	1,21	1,32

	Temperatura del agua (°C)					
	Lado Este			Lado Oeste		
	1	2	3	1	2	3
Media	93,71	79,53	74,13	93,26	79,11	74,71
Error típico	1,15	1,55	1,93	0,82	1,30	1,25
Mediana	94,72	81,83	71,33	94,32	79,08	72,63
Desviación estándar	4,87	6,56	8,17	3,47	5,50	5,31
Varianza de la muestra	23,73	43,07	66,78	12,03	30,24	28,25
Curtosis	1,71	-1,61	1,69	2,19	0,16	-0,10
Coefficiente de asimetría	-1,16	-0,43	1,49	-1,42	0,79	1,04
Rango	19,18	17,27	29,48	13,27	19,47	17,00
Mínimo	81,33	70,53	64,50	83,63	72,20	68,93
Máximo	100,50	87,80	93,98	96,90	91,67	85,93
Nivel de confianza(95,0%)	2,42	3,26	4,06	1,72	2,73	2,64



Anexo 5 Evaluación de los enfriadores de mineral para un flujo de agua de 15 m³/h

$x := 0, 1 \dots 2$

Masa aparente del mineral dentro del tambor

0.9978 Coeficiente que considera el extractable en la Planta de Secaderos y Hornos

0.88 Coeficiente que considera las pérdidas durante la calcinación y reducción del mineral

$$f_{\text{corr}} := 0.88 \cdot 0.9978$$

Flujo másico de mineral

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

29.4 · tonne · hr ⁻¹
32.4 · tonne · hr ⁻¹
35.4 · tonne · hr ⁻¹

$$M_{\text{Red}_x} := M_{\text{mineral}_x} \cdot f_{\text{corr}}$$

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

25.815	tonne hr
28.449	
31.083	

Datos del enfriador

D := 3.040m Diámetro interior

De := 3.08 · m Diámetro exterior

Le := 30m Longitud

Volumen específico del agua

Densidad del agua

$$v_{\text{esp}_x} :=$$

1.024 · 10 ⁻³ · m ³ · kg ⁻¹
1.025 · 10 ⁻³ · m ³ · kg ⁻¹
1.027 · 10 ⁻³ · m ³ · kg ⁻¹

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

976.563	kg m ³
975.61	
973.71	

Temperatura

de la pared

del agua en la piscina

$$\theta_{p_x} :=$$

352.50K
356.98K
362.45K

$$\theta_{\text{agua}_x} :=$$

345.60 · K
347.33 · K
349.38 · K

Temperatura

entrada del mineral

$$\theta_e := 973.15\text{K}$$

salida del mineral

$$\theta_{s_x} :=$$

429.98 · K
473.98 · K
513.23K

del aire

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

saturación del aire

$$\theta_{\text{sat}_{\text{aire}}} := 297.15 \cdot \text{K}$$

entrada del agua

$$\theta_{e_{\text{agua}}} := 305.15 \cdot \text{K}$$

saturación del agua

$$\theta_{\text{sat}_{\text{agua}}} := 373.15 \cdot \text{K}$$

Determinación del coeficiente de transferencia de calor del agua al aire

Velocidad del aire

$$V_{\text{aire}} := 2.2 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

Coefficiente cinemático de viscosidad del aire

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

Coefficiente de difusión de masa

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

Número de:

Reynolds

$$Re_{\text{aire}} := \frac{V_{\text{aire}} \cdot D_e}{\nu_{\text{aire}}}$$

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

Schmidt

$$Sc := \frac{\nu_{\text{aire}}}{DAB}$$

$$Sc = 0.611$$

Sherwood

$$Sh := 0.0296 Re_{\text{aire}}^{0.5} \cdot Sc^{0.33}$$

$$Sh = 801.472$$

Volumen específico del vapor de agua a 32°C

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

Densidad del vapor a 32°C

$$\rho_{va} := \frac{1}{v_{va}}$$

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

Coefficiente de transferencia de masa

$$hm := \frac{Sh \cdot DAB}{D_e}$$

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

Las propiedades del vapor de agua saturado se determinan a la temperatura de la pared

Calor latente de vaporización

$$h_{fg_x} :=$$

$2310.51 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2298.85 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2284.64 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$

Volumen específico

$$v_{vas_x} :=$$

$3.514 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$2.968 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$2.433 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Densidad del vapor

$$\rho_{vas_x} := \frac{1}{v_{vas_x}}$$

$\rho_{vas_x} =$
$\frac{0.285}{\text{m}^3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$\frac{0.337}{\text{m}^3}$
$\frac{0.411}{\text{m}^3}$

Calor específico del agua

a la entrada

$$C_{p\text{eagua}_x} :=$$

$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

a la salida

$$C_{p\text{sagua}_x} :=$$

$4191.5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4192.9 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4194.5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Volumen específico del agua a 32 °C

$$v_{a_{ma}} := 1.005 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Flujo volumétrico de agua

$$V_{\text{agua}} := 15 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Flujo másico de agua

$$M_{\text{agua}} := \frac{1}{v_{a_{ma}}} \cdot V_{\text{agua}}$$

$$M_{\text{agua}} = 1.493 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Longitud sumergida en el agua

$$hs := 1 \cdot m$$

Lógitud de la sección ocupada por el agua entre el enfriador y la pared de la piscina en contacto con el aire

$$L_{secc} := 0.6 \cdot m$$

Área ocupada por el agua

$$A_{agua} := \left[D \cdot \left[\pi - \text{asin} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{De}{2} \right)^2 - \left(\frac{De}{2} - hs \right)^2}}{De} \right] \right] + L_{secc} \right] \cdot Le$$

$$A_{agua} = 193.93 \text{ m}^2$$

Cantidad de agua vaporizada

$$Na_x := hm \cdot A_{agua} \cdot (\rho_{vas_x} - \rho_{va})$$

$$Na_x =$$

1.175·103	kg
1.422·103	hr
1.772·103	

Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire

$$\alpha_{agua_x} := \frac{hfgv_x \cdot [hm \cdot (\rho_{vas_x} - \rho_{va})]}{\theta_{agua_x} - \theta_{sat_{aire}}}$$

$$\alpha_{agua_x} =$$

80.253	watt
93.321	m ² ·K
111.03	

Calor específico del mineral

$$C_{pm} := 0.967 \cdot 10^3 \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$

Pérdida de calor al medioambiente

$$Q_{ma_x} := \alpha_{agua_x} \cdot A_{agua} \cdot (\theta_{agua_x} - \theta_{aire})$$

$$Q_{ma_x} =$$

6.295·105	W
7.634·105	
9.524·105	

Calor cedido por el mineral

$$Q_{m_x} := M_{Red_x} \cdot C_{pm} \cdot (\theta_e - \theta_{s_x})$$

$$Q_{m_x} =$$

3.766·106	W
3.815·106	
3.84·106	

Calor absorbido por el agua

$$Q_{agua_x} := \left[(M_{agua} - Na_x) \cdot C_{p_{s_{agua_x}}} \cdot \theta_{agua_x} \right] - (M_{agua} \cdot C_{p_{e_{agua_x}}} \cdot \theta_{e_{agua}})$$

$$Q_{agua_x} =$$

2.473·105	W
1.768·105	
6.866·104	

Eficiencia del enfriador

$$E_{f_x} := \frac{\theta_e - \theta_{s_x}}{\theta_e - \theta_{agua_x}}$$

$$E_{f_x} =$$

86.554	%
79.763	
73.732	



Anexo 5 Evaluación de los enfriadores de mineral para un flujo de agua de 20 m³/h

$x := 0, 1 \dots 2$

Masa aparente del mineral dentro del tambor

0.9978 Coeficiente que considera el extractable en la Planta de Secaderos y Hornos

0.88 Coeficiente que considera las pérdidas durante la calcinación y reducción del mineral

$$f_{\text{corr}} := 0.88 \cdot 0.9978$$

Flujo másico de mineral

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

29.4 · tonne · hr ⁻¹
32.4 · tonne · hr ⁻¹
35.4 · tonne · hr ⁻¹

$$M_{\text{Red}_x} := M_{\text{mineral}_x} \cdot f_{\text{corr}}$$

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

25.815	tonne hr
28.449	
31.083	

Datos del enfriador

D := 3.040m Diámetro interior

De := 3.08 · m Diámetro exterior

Le := 30m Longitud

Volumen específico del agua

Densidad del agua

$$v_{\text{esp}_x} :=$$

1.0229 · 10 ⁻³ · m ³ · kg ⁻¹
1.0251 · 10 ⁻³ · m ³ · kg ⁻¹
1.0277 · 10 ⁻³ · m ³ · kg ⁻¹

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

977.613	kg m ³
975.515	
973.047	

Temperatura

de la pared

del agua en la piscina

$$\theta_{p_x} :=$$

352.17K
356.07K
360.39K

$$\theta_{\text{agua}_x} :=$$

343.14 · K
346.79 · K
351.15 · K

Temperatura

entrada del mineral

$$\theta_e := 973.15K$$

salida del mineral

$$\theta_{s_x} :=$$

431.83 · K
491.94 · K
531.15K

del aire

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

saturación del aire

$$\theta_{\text{sat}_{\text{aire}}} := 297.15 \cdot K$$

entrada del agua

$$\theta_{e_{\text{agua}}} := 305.15 \cdot K$$

saturación del agua

$$\theta_{\text{sat}_{\text{agua}}} := 373.15 \cdot K$$

Determinación del coeficiente de transferencia de calor del agua al aire

Velocidad del aire

$$V_{\text{aire}} := 2.2 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

Coefficiente cinemático de viscosidad del aire

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

Coefficiente de difusión de masa

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

Número de:

Reynolds

$$Re_{\text{aire}} := \frac{V_{\text{aire}} \cdot D_e}{\nu_{\text{aire}}}$$

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

Schmidt

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

$$Sc = 0.611$$

Sherwood

$$Sh := 0.0296 Re_{\text{aire}}^{0.5} \cdot Sc^{0.33}$$

$$Sh = 801.472$$

Volumen específico del vapor de agua a 32°C

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

Densidad del vapor a 32°C

$$\rho_{va} := \frac{1}{v_{va}}$$

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

Coefficiente de transferencia de masa

$$hm := \frac{Sh \cdot D_{AB}}{D_e}$$

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

Las propiedades del vapor de agua saturado se determinan a la temperatura de la pared

Calor latente de vaporización

$$h_{fg_x} :=$$

$2311.37 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2301.21 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2289.97 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$

Volumen específico

$$v_{vas_x} :=$$

$3.61 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$3.18 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$2.71 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Densidad del vapor

$$\rho_{vas_x} := \frac{1}{v_{vas_x}}$$

$$\rho_{vas_x} =$$

$0.277 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$0.314 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$0.369 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Calor específico del agua

a la entrada a la salida

$$C_{p\text{eagua}_x} :=$$

$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$$C_{p\text{sagua}_x} :=$$

$4190.3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4193.0 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4196.2 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Volumen específico del agua a 32 °C

$$v_{a_{ma}} := 1.005 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Flujo volumétrico de agua

$$V_{\text{agua}} := 20 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Flujo másico de agua

$$M_{\text{agua}} := \frac{1}{v_{a_{ma}}} \cdot V_{\text{agua}}$$

$$M_{\text{agua}} = 1.99 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Longitud sumergida en el agua

$$hs := 1 \cdot m$$

Lógitud de la sección ocupada por el agua entre el enfriador y la pared de la piscina en contacto con el aire

$$L_{secc} := 0.6 \cdot m$$

Área ocupada por el agua

$$A_{agua} := \left[D \cdot \left[\pi - \text{asin} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{De}{2} \right)^2 - \left(\frac{De}{2} - hs \right)^2}}{De} \right] \right] + L_{secc} \right] \cdot Le$$

$$A_{agua} = 193.93 \text{ m}^2$$

Cantidad de agua vaporizada

$$Na_x := hm \cdot A_{agua} \cdot (\rho_{vas_x} - \rho_{va})$$

$$Na_x =$$

1.139·103
1.316·103
1.574·103

$$\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$
Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire

$$\alpha_{agua_x} := \frac{hfgv_x \cdot [hm \cdot (\rho_{vas_x} - \rho_{va})]}{\theta_{agua_x} - \theta_{sat_{aire}}}$$

$$\alpha_{agua_x} =$$

82.004
87.388
95.588

$$\frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$
Calor específico del mineral

$$C_{pm} := 0.967 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Pérdida de calor al medioambiente

$$Q_{ma_x} := \alpha_{agua_x} \cdot A_{agua} \cdot (\theta_{agua_x} - \theta_{aire})$$

$$Q_{ma_x} =$$

6.042·105
7.057·105
8.527·105

$$\text{W}$$
Calor cedido por el mineral

$$Q_{m_x} := M_{Red_x} \cdot C_{pm} \cdot (\theta_e - \theta_{s_x})$$

$$Q_{m_x} =$$

3.754·106
3.677·106
3.69·106

$$\text{W}$$
Calor absorbido por el agua

$$Q_{agua_x} := \left[(M_{agua} - Na_x) \cdot C_{p_{sagua_x}} \cdot \theta_{agua_x} \right] - (M_{agua} \cdot C_{p_{eagua_x}} \cdot \theta_{e_{agua}})$$

$$Q_{agua_x} =$$

4.458·105
4.589·105
4.536·105

$$\text{W}$$
Eficiencia del enfriador

$$E_{f_x} := \frac{\theta_e - \theta_{s_x}}{\theta_e - \theta_{agua_x}}$$

$$E_{f_x} =$$

85.922
76.826
71.061

$$\%$$



Anexo 5 Evaluación de los enfriadores de mineral para un flujo de agua de 25 m³/h

x := 0, 1 .. 2

Masa aparente del mineral dentro del tambor

0.9978 Coeficiente que considera el extractable en la Planta de Secaderos y Hornos

0.88 Coeficiente que considera las pérdidas durante la calcinación y reducción del mineral

$$f_{\text{corr}} := 0.88 \cdot 0.9978$$

Flujo másico de mineral

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

29.4 · tonne · hr ⁻¹
32.4 · tonne · hr ⁻¹
35.4 · tonne · hr ⁻¹

$$M_{\text{Red}_x} := M_{\text{mineral}_x} \cdot f_{\text{corr}}$$

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

25.815	tonne hr
28.449	
31.083	

Datos del enfriador

D := 3.040m Diámetro interior

De := 3.08 · m Diámetro exterior

Le := 30m Longitud

Volumen específico del agua

Densidad del agua

$$v_{\text{esp}_x} :=$$

1.0231 · 10 ⁻³ · m ³ · kg ⁻¹
1.0247 · 10 ⁻³ · m ³ · kg ⁻¹
1.0264 · 10 ⁻³ · m ³ · kg ⁻¹

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

977.422	kg m ³
975.895	
974.279	

Temperatura

de la pared

del agua en la piscina

$$\theta_{p_x} :=$$

350.06K
354.70K
358.59K

$$\theta_{\text{agua}_x} :=$$

343.47 · K
346.20 · K
348.92 · K

Temperatura

entrada del mineral

$$\theta_e := 973.15K$$

salida del mineral

$$\theta_{s_x} :=$$

473.48 · K
506.67 · K
526.32K

del aire

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

saturación del aire

$$\theta_{\text{sat_aire}} := 297.15 \cdot K$$

entrada del agua

$$\theta_{e_agua} := 305.15 \cdot K$$

saturación del agua

$$\theta_{\text{sat_agua}} := 373.15 \cdot K$$

Determinación del coeficiente de transferencia de calor del agua al aire

Velocidad del aire

$$V_{\text{aire}} := 2.2 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

Coefficiente cinemático de viscosidad del aire

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

Coefficiente de difusión de masa

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

Número de:

Reynolds

$$Re_{\text{aire}} := \frac{V_{\text{aire}} \cdot D_e}{\nu_{\text{aire}}}$$

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

Schmidt

$$Sc := \frac{\nu_{\text{aire}}}{DAB}$$

$$Sc = 0.611$$

Sherwood

$$Sh := 0.0296 Re_{\text{aire}}^{0.4} \cdot Sc^{0.33}$$

$$Sh = 801.472$$

Volumen específico del vapor de agua a 32°C

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

Densidad del vapor a 32°C

$$\rho_{va} := \frac{1}{v_{va}}$$

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

Coefficiente de transferencia de masa

$$hm := \frac{Sh \cdot DAB}{D_e}$$

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

Las propiedades del vapor de agua saturado se determinan a la temperatura de la pared

Calor latente de vaporización

$$h_{fg_x} :=$$

$2316.85 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2304.78 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2294.67 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$

Volumen específico

$$v_{vas_x} :=$$

$5.73 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$4.85 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$4.11 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Densidad del vapor

$$\rho_{vas_x} := \frac{1}{v_{vas_x}}$$

$$\rho_{vas_x} =$$

$0.175 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$0.206 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$0.243 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Calor específico del agua

a la entrada

$$C_{p\text{eagua}_x} :=$$

$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

a la salida

$$C_{p\text{sagua}_x} :=$$

$4190.4 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4192.3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4194.2 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Volumen específico del agua a 32 °C

$$v_{a\text{ma}} := 1.005 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Flujo volumétrico de agua

$$V_{\text{agua}} := 25 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Flujo másico de agua

$$M_{\text{agua}} := \frac{1}{v_{a\text{ma}}} \cdot V_{\text{agua}}$$

$$M_{\text{agua}} = 2.488 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Longitud sumergida en el agua

$$hs := 1 \cdot m$$

Lógitud de la sección ocupada por el agua entre el enfriador y la pared de la piscina en contacto con el aire

$$L_{secc} := 0.6 \cdot m$$

Área ocupada por el agua

$$A_{agua} := \left[D \cdot \left[\pi - \text{asin} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{De}{2} \right)^2 - \left(\frac{De}{2} - hs \right)^2}}{De} \right] \right] + L_{secc} \right] \cdot Le$$

$$A_{agua} = 193.93 \text{ m}^2$$

Cantidad de agua vaporizada

$$Na_x := hm \cdot A_{agua} \cdot (\rho_{vas_x} - \rho_{va})$$

$$Na_x =$$

655.037	kg
804.607	hr
979.958	

Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire

$$\alpha_{agua_x} := \frac{hfgv_x \cdot [hm \cdot (\rho_{vas_x} - \rho_{va})]}{\theta_{agua_x} - \theta_{sat_{aire}}}$$

$$\alpha_{agua_x} =$$

46.93	watt
54.153	m ² ·K
62.216	

Calor específico del mineral

$$C_{pm} := 0.967 \cdot 10^3 \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$

Calor cedido por el mineral

$$Q_{m_x} := M_{Red_x} \cdot C_{pm} \cdot (\theta_e - \theta_{s_x})$$

$$Q_{m_x} =$$

3.465·106	W
3.565·106	
3.731·106	

Pérdida de calor al medioambiente

$$Q_{ma_x} := \alpha_{agua_x} \cdot A_{agua} \cdot (\theta_{agua_x} - \theta_{aire})$$

$$Q_{ma_x} =$$

3.488·105	W
4.311·105	
5.281·105	

Eficiencia del enfriador

$$E_{f_x} := \frac{\theta_e - \theta_{s_x}}{\theta_e - \theta_{agua_x}}$$

$$E_{f_x} =$$

79.353	%
74.405	
71.581	

Calor absorbido por el agua

$$Q_{agua_x} := \left[(M_{agua} - Na_x) \cdot C_{p_{s_{agua_x}}} \cdot \theta_{agua_x} \right] - (M_{agua} \cdot C_{p_{e_{agua_x}}} \cdot \theta_{e_{agua}})$$

$$Q_{agua_x} =$$

8.738·105	W
8.949·105	
9.043·105	