



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO
DEL MINERAL LATERÍTICO REDUCIDO A ESCALA PILOTO DEL
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA**

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico

AUTOR: EDUARDO ESPINOSA LOFORTE

**TUTORES: Prof. Aux., Ing. EVER GÓNGORA LEYVA, M.Sc.
Ing. CARLOS ZALAZAR OLIVA**

Moa- 2012

“Año 54 de la Revolución”



PENSAMIENTO

... “Si no existe organización, no existe racionalidad, las ideas después del primer impulso, van perdiendo eficacia, van cayendo en la rutina, en el conformismo y acaban por ser simplemente un recuerdo”...

Ernesto Che Guevara



AGRADECIMIENTOS

Agradezco la realización de esta investigación al M.Sc. Ever Góngora Leyva, a la Msc: Marbelis Lamorú mis tutores, sin su ayuda y confianza depositada no hubiera sido posible la materialización de la misma.

Agradezco al ex director del centro de Investigaciones CEDINIQ, Dr: Alberto Hernández, por haber sido el impulsor del comienzo de la carrera, a mis compañeros de trabajo, a mis profesores, y a los compañeros de aula.

A mi esposa Idailsa Pérez Ramírez, a mis niños Eduardo Espinosa Pérez y Yalianni Elizabeth Espinosa Pérez que con todo el amor que me ha dado y por estar siempre dispuesta para ayudarme.

A mi madre Carmelina Loforte, a mi padre que aunque no esté presente por que falleció supo guiarme en la vida y darme una educación basada en valores y principios, como un padre.

A mis hermanos, Lesly Marina Espinosa, Pablo, María Elena, José, , Marilúz Marbelis, a mis sobrinos hijastro y a mi nieto, por darme fuerzas para seguir adelante y estar junto a mí en los momentos difíciles con todo su amor y dedicación.

A todos "Muchas Gracias"



DEDICATORIA

Dedico la culminación de esta investigación:

En especial a mi madre Carmelina Loforte, a la memoria de mi padre que no estas presente.

A mi esposa Idailsa Pérez Ramírez a mis hijos Yalianni Elizabeth Espinosa Pérez Eduardo Espinosa Pérez, por darme fuerzas para seguir adelante cada día.

A todos "les dedico este éxito"



RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, basado en el balance térmico. Se calibró el transportador de tornillo Sin Fin y se obtuvo la ecuación que permite determinar el flujo de mineral en función de la velocidad de rotación del motor eléctrico. Se determinó el rendimiento térmico del enfriador de mineral reducido y se establecieron las tendencias de las variables tales 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 base experimental a escala piloto y quedó demostrada la factibilidad de emplear el procedimiento propuesto en la planta de Hornos de Reducción, de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.



ABSTRACT

The present work it evaluates 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. It was gauged of the screw transporter and the equation was obtained that allows determining the mineral flow in function of the speed of rotation of the electric motor. The thermal efficiency of the cooler of the 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".



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Marco teórico de la investigación.....	4
1.1 Trabajos Precedentes	4
1.1.1 Enfriadores de mineral laterítico reducido a escala industrial.....	4
1.1.2 Enfriadores de mineral laterítico reducido a escala piloto	7
1.1.3 Cilindros horizontales rotatorios.....	9
1.2 Descripción del proceso tecnológico de la planta	10
1.2.1 Almacenaje del mineral húmedo, secado y molienda	11
1.2.2 Horno de reducción	11
1.2.3 Descripción de la instalación objeto de estudio	12
1.3 Descripción de la instalación experimental	13
1.4 Estado actual de la instrumentación en la instalación	15
1.5 Análisis del proceso de enfriamiento del mineral reducido.....	15
CAPÍTULO 2 Materiales y métodos	19
2.1. Instalación experimental.....	19
2.2. Selección de la variables que influyen en el proceso de enfriamiento.....	23
2.3. Estudio de los factores que influyen en el proceso de enfriamiento	23
2.4. Productividad del transportador de tornillo Sin Fin.....	24
2.5. Propiedades físicas y parámetros principales del mineral laterítico	27
2.5.1. Densidad del mineral laterítico.....	28
2.5.2. Determinación del contenido de humedad.....	29
2.5.3. Granulometría	31
2.6. Balance de masa y energía	32
Conclusiones del capítulo 2	37
CAPÍTULO 3 Análisis de los resultados, valoración económica e impacto ambiental.....	38
3.1. Productividad del transportador de tornillo Sin Fin.....	38
3.2. Resultados del balance térmico.....	40
3.3. Comportamiento de las variables del proceso	44
3.4. Problemas detectados en el enfriador del ISMM	46
3.4.1. Interior del cilindro	46
3.4.2. Sin fin de alimentación.....	47
3.5. Valoración económica	47
3.6. Impacto social y medio ambiental.....	49
3.6.1. Caracterización de los impactos	50
3.6.2. Calidad del aire en los puestos de trabajo	51
3.6.3. El ruido en los puestos de trabajo y su efecto sobre la salud.....	51
Conclusiones del capítulo 3	52
Conclusiones Generales	53
Recomendaciones	54
Referencias Bibliográficas	55



INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel desempeña 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: la empresa “Comandante René Ramos Latour” y la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, esta última se ha desarrollado a partir de la década de los años 90, 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.

Una de las estrategias desarrolladas por la industria niquelífera es la construcción de plantas pilotos que permiten evaluar el proceso de obtención de Níquel a escala semindustrial, permitiendo la toma de decisiones sobre las posibles modificaciones del proceso industrial con mínimos costos y riesgos.

El Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) “Capitán Alberto Fernández Montes de Oca” se encuentra ubicado al norte del yacimiento de mineral en Punta Gorda, Carretera Moa Baracoa km 5 ½, provincia Holguín, el cual cuenta con una Planta Piloto donde se realizan estudios, a una escala intermedia entre el laboratorio y el proceso industrial basado en la tecnología carbonato amoniacal o (proceso CARON) según el cual el mineral oxidado 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 ahí 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 con la obtención del sínter de níquel.

Fundamento de la investigación

Los enfriadores cilíndricos rotatorios son muy utilizados en las industrias de procesos aunque poco difundidos para el enfriamiento de mineral. Relacionado con estos

equipos de transferencia de calor se han realizado varios estudios, algunos destinados a establecer los criterios de semejanza y la fabricación de un equipo a escala piloto que cumpla con los requisitos del proceso a escala semindustrial (Quintero y Verdecia, 2008; García, 2009; Rodríguez, 2010; Vargas, 2010; Zalazar, 2010); otros a la evaluación del proceso en el enfriador de mineral a escala piloto del CEDINIQ (Tabera y García, 2006; Pujol, 2007; Lamorú, 2008; Araujo 2009, Góngora et al. 2009), el cual no cumple con los criterios de semejanzas y la cantidad de variables que se registran no permiten emitir un criterio certero acerca de su funcionamiento. Como se observa muy pocos se han centrado en evaluar el comportamiento de las variables que caracterizan el proceso a escala piloto y su incidencia en el 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 la disminución de la temperatura 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 impide el desarrollo eficiente del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido.

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

El proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios a escala piloto.



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 del mineral laterítico en el enfriador a escala piloto del ISMM.

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

Si se determina el comportamiento de las variables que intervienen en el enfriamiento del mineral laterítico reducido a escala piloto, sustentado en un diseño de experimento, entonces se podrá establecer el efecto de las variables independientes en la temperatura del mineral a la salida, el modelo estadístico que caracteriza el proceso y la eficiencia térmica del enfriador de mineral.

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

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 seleccionar la base 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 del 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

En el presente capítulo se realiza un análisis de las diferentes publicaciones expuestas en la bibliografía especializada en la temática estudiada, con el fin de disponer de los elementos básicos esenciales para el desarrollo del trabajo. Se abordan además temas relacionados con el proceso de enfriamiento del mineral, el cual es de importancia vital dentro del proceso de obtención de níquel y en particular los enfriadores de mineral, de los cuales depende en gran medida la realización racional 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 materiales e informes de investigaciones realizadas con anterioridad, la revisión bibliográfica se fundamentó 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.

1.1.1 Enfriadores de mineral laterítico reducido a escala industrial

Desde los inicios de la industria del níquel en Cuba 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), se conoce 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.

Rodríguez (1970; 1978) y Gangara (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 en el enfriamiento deficiente del mineral se encuentra en la cantidad de carros raspadores y el número de aletas o levantadores. Luego con el objetivo de eliminar las averías en el interior de los enfriadores de mineral, se propuso reforzar los brazos de los mismos incrementando así su tiempo de vida útil (Medina, 1995). Se debe destacar que 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.

En las condiciones actuales se observa la formación de costras en la superficie exterior del cilindro que a su vez disminuyen la transferencia de calor hacia el agua e introducen errores en las mediciones, 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 y no aparece documento alguno que justifique el porque se eliminaron los mismos.

Otros investigadores con ayuda de instalaciones experimentales observaron las características del movimiento de mineral reducido caliente dentro de tambores rotatorios y los resultados obtenidos demostraron que el ángulo formado por la superficie del mineral con la horizontal oscilaba entre los 20 y 26°. Además observaron que el mineral se desplaza en el cilindro formando una masa estática y que se adhiere al material en tanto que este se encuentre más caliente que la placa (Alonso, 1973; Alepuz, 1977). 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), evaluó el 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 del 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 bibliografía 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.

A la simulación del comportamiento térmico de estos equipos a partir del empleo del software profesional ANSYS versión 7.0, se dedicaron (Londrez, 2007 y Ortiz, 2010) quienes establecieron los perfiles de temperatura para el mineral, el cilindro y el agua de la piscina. En estos trabajos se buscó la implementación de metodologías que



permitieran caracterizar el proceso en análisis 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 como 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.

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.

Rodríguez (2011) y Matos (2012), evaluaron el 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. Además 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. Se debe destacar que ambos trabajos se desarrollaron sobre una amplia base experimental a escala industrial, pero el rango de experimentación no fue suficiente, para dar una solución a la problemática en cuestión.

1.1.2 Enfriadores de mineral laterítico reducido a escala piloto

Con el objetivo de encontrar similitud entre los procesos de enfriamiento de mineral laterítico reducido entre los enfriadores de la industria y de Planta Piloto del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ), investigadores centraron sus estudios de este fenómeno pero a escala piloto (Tabera, 2006; Pujol, 2007; Lamorú, 2008; y

Araujo 2009, Góngora et al. 2009). Dentro de los cuales se destaca Lamorú (2008), quien 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 el cual la instalación trabajó 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.

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, 2008). Seleccionó el motor eléctrico con la potencia y la velocidad de rotación requerida, para su explotación (García, 2009). Construyó un transportador de tornillo sin fin con la finalidad de garantizar una alimentación uniforme y continua (Rodríguez, 2010). 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). Estableció 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).

Con el objetivo de garantizar la medición de la temperatura del mineral y los gases en seis puntos en el interior del enfriador de mineral a escala piloto del ISMM, Galván (2011), construyó los dispositivos (sistema de raspadores, sistema de alimentación, elemento flexible que garantice la seguridad de los operarios, sistema de sujeción para los termopares interiores) que garanticen la explotación eficiente del enfriador a escala piloto del ISMM.

1.1.3 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 proceso tecnológico de la planta

El grupo canadiense Surveyer Neninger and Chenevert (SNC) desarrolló un diseño conceptual para una planta piloto que sería construida en Punta Gorda, Cuba, para las investigaciones relacionadas con el tratamiento de las Lateritas con las expectativas siguientes:

1. Determinación de condiciones óptimas para el procesamiento de nuevos yacimientos en plantas comerciales existentes y también en nuevas plantas proyectadas.
2. Pruebas y evaluaciones alternativas de diversificación con el objetivo de garantizar eficiencia, recuperación, economía y conservación de energía.
3. Obtener información para nuevos diseños y modificaciones relacionadas con el sistema de control, etapas de procesos y equipos.

El diseño de la Planta Piloto concibió cinco áreas fundamentales para las investigaciones relacionadas con el procesamiento del mineral utilizando la tecnología de lixiviación carbonato amoniacal, basada en el proceso CARON:

- Almacenaje del Mineral Húmedo, Secado y Molienda
- Reducción
- Lixiviación y Lavado
- Precipitación de cobalto
- Destilación de licor y recuperación de amoniacal

A pesar de la planta haber sido diseñada para estas cinco áreas, actualmente cuenta solo con las tres primeras.

Como resultado de las operaciones que se llevan a cabo, el mineral se transforma obteniéndose un producto de níquel y cobalto, separado del resto de los elementos que conforman el mineral. A continuación se describen las áreas de la planta piloto de acuerdo con el Manual de operaciones (1997).

1.2.1 Almacenaje del mineral húmedo, secado y molienda

Esta tecnología comienza con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos de níquel de Punta Gorda, con una ley aproximadamente de 1,3 % de níquel, el cual es tratado planificadamente para facilitar su homogenización, siendo transportado hasta una plazoleta a cielo abierto que existe en la planta.

Luego se traslada a un área techada para su alimentación al proceso. Utilizando un cargador frontal, la mezcla se deposita en la tolva CF-1 donde se produce un cribado preliminar, se separan del proceso las porciones mayores de 300 mm como rechazo o son reducidas manualmente e incorporadas al mismo. Una vez homogeneizado, el mineral es enviado al proceso de secado mediante el transportador de banda CB-1, reduciéndose en este la humedad hasta el valor apropiado y enviándose luego a la sección de molienda mediante un elevador de cangilones CE-1. El mineral seco es clasificado en la zaranda vibratoria en dos fracciones granulométricas. La más gruesa se reduce y luego se alimenta al molino y la fina va directo a él. El producto seco y fino proveniente del área de molienda se almacena en los silos mediante el elevador de cangilones CE-2, conjuntamente con el polvo recuperado en el área de secado.

1.2.2 Horno de reducción

El mineral que se encuentra almacenado en los silos, pasa seguidamente al área de reducción en la cual utilizando monóxido de carbono (CO) como agente reductor se produce la transformación en la estructura del mismo, pasando el níquel, el cobalto y parte del hierro de sus formas combinadas a la metálica según se muestra en la Figura 1.1.

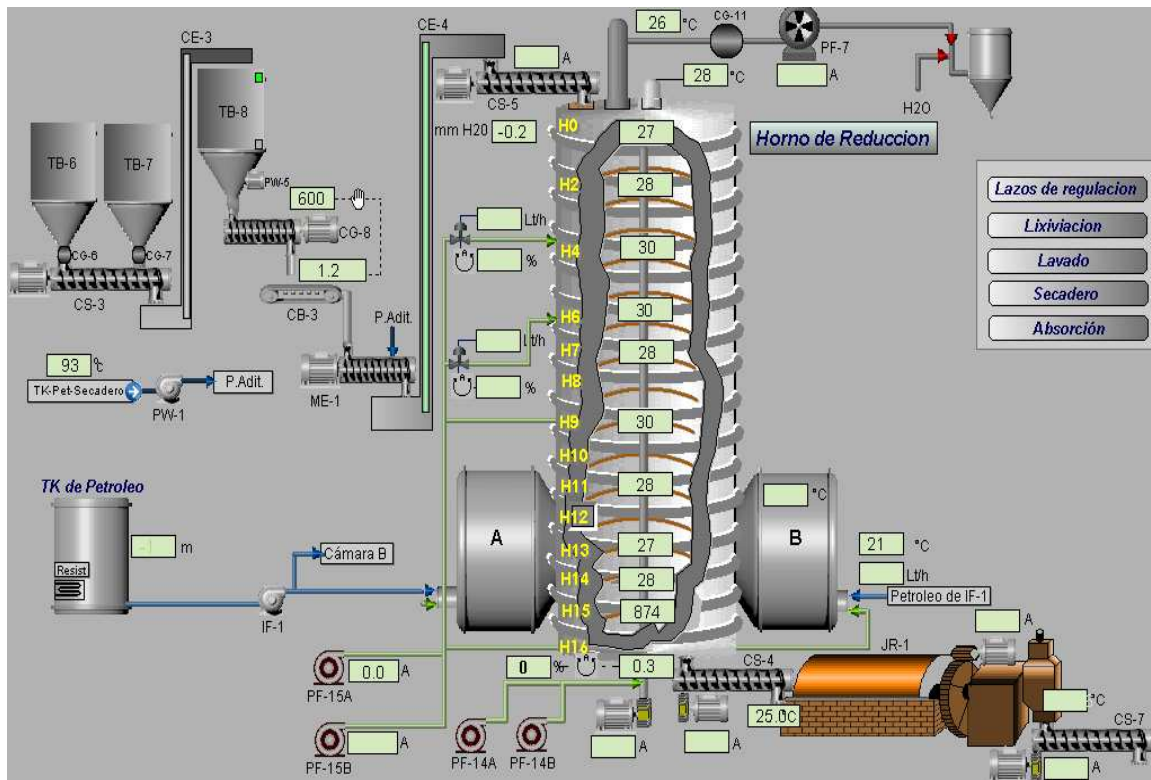


Figura 1.1. Esquema del flujo tecnológico de la Planta Hornos de Reducción del CEINNIQ.

Fuente: Manual de operaciones de la planta piloto del CEINNIQ, 1997.

1.2.3 Descripción de la instalación objeto de estudio

El mineral después de pasar por el transportador (TR yacobby) se descarga en el enfriador rotatorio horizontal del ISMM, Figura 1.2, el cual tiene como función enfriar el mineral reducido que sale del horno hasta una temperatura adecuada para luego enviarlo al proceso de Lixiviación. El enfriador consiste en un cilindro rotatorio dividido en tres secciones, donde el mineral al caer se transporta por las secciones con la ayuda de carros que se encuentran en su interior. Cada sección del enfriador posee tres carros, que posibilita el tiempo de retención necesario para que el mineral se enfríe adecuadamente. El enfriamiento se produce por el intercambio de calor que se produce al entrar el agua en la piscina, cubriendo una parte del enfriador.

1.3 Descripción de la instalación experimental

Después que el mineral sale del horno es transportado por un tornillo sin fin hasta el enfriador, su descarga se encuentra en el interior del enfriador por la parte de alimentación. La rotación del cuerpo se realiza por una transmisión motor - reductor y por cadena, el enfriador rotatorio tiene una longitud de 3 m y un diámetro de 0,3 m , está sumergido en una piscina de agua de 3,25 m de longitud por 0,40 m de ancho y una profundidad de 0,3 m , dotado de termopares en su interior para determinar las variables temperaturas del mineral: a la entrada, en el interior y a la salida del mismo. El mineral después de pasar por el transportador Sin fin es descargado en el enfriador rotatorio el cual tienen las siguientes funciones:

- ∇ Transportar: en el interior del enfriador existe una estructura llamadas estrellas donde cuelgan los rastrillos pendulares que transportan el mineral según 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 la disminución de la temperatura del mineral a través del intercambio de calor con la pared del cilindro, que a su vez lo entrega 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 al enfriador se le suministrada el agua a temperatura ambiente, en una piscina, la cual fluye a contracorriente con el mineral, controlándose el nivel de agua en la piscina a través de un flujómetro.



Figura 1.2. Imagen del conjunto transportador-enfriador empleado en el CEDINIQ.

Parámetros de trabajo del enfriador

- | | |
|--|------------------|
| - Temperatura del mineral a la entrada | 0 a 720 °C |
| - Temperatura del mineral a la salida | 90 a 120 °C |
| - Presión de trabajo Diámetro exterior | 0,01 a 0,02 kPa |
| - Espesor de pared Accionamiento | 750 mm 6 mm |
| - Flujo de mineral por diseño | 123 kg/h |
| - Longitud del cilindro | 3 m |

Parámetros de trabajo del motor eléctrico:

- | | |
|------------------------|--------------|
| - Potencia | 0,75 kW |
| - Masa | 5 kg |
| - Número de revolución | 1175 rev/min |
| - Frecuencia | 60 Hz |
| - Factor de potencia | 0,84 |

El material enfriado es un mineral con una granulometría de 200 mesh (0,074 mm) que pasa al tambor a través de un muñón de tope del enfriador y se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que es bañado por el agua de la piscina.



El mineral que sale del enfriador cae a una canal de descarga al tanque de contacto de lixiviación por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal formando una pulpa y es bombeada a la planta de lixiviación y lavado.

1.4 Estado actual de la instrumentación en la instalación

Actualmente el proceso de enfriamiento del mineral en el Centro de Investigaciones del Níquel Capitán “Alberto Fernández Montes de Oca” sólo contempla la medición y registro de varios parámetros del proceso por un autómata programable.

La instrumentación instalada en la planta permite registrar los valores de las variables del proceso de enfriamiento, las cuales son registrados por el instrumento correspondiente y su señal se envía al ordenador ubicado en la oficina de control del proceso. Mediante el uso del programa “CITECT” se registra el valor de las variables antes mencionadas.

En la instalación todos los instrumentos están normalizados y certificados por la NC 17025 de acreditación de instrumentación de laboratorio y presentan el sello “Apto para el uso”.

1.5 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 garantiza 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 se manifiestan 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-cilindro, también se transfiere calor por convección debido a la presencia de gases producto 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 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 (2 mm), o sea desde la pared interior a la superficie exterior el 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 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 aprecia 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 1.3 se muestra el esquema estructural de la interacción de los parámetros principales del proceso de enfriamiento del mineral reducido.

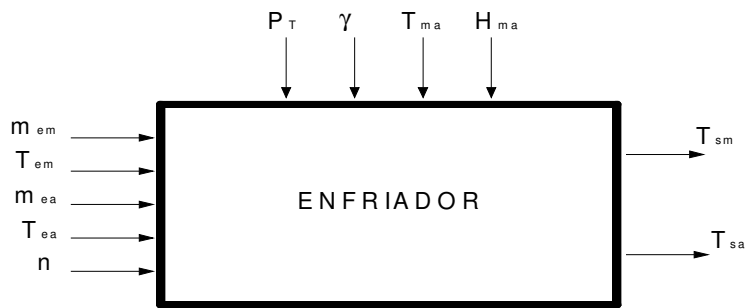


Figura 1.3 Esquema estructural del proceso de enfriamiento del mineral.

Los parámetros de entrada del proceso son:

- Flujo de mineral a la entrada del enfriador
- Temperatura del mineral a la entrada del enfriador
- Flujo de agua de entrada a la piscina
- Temperatura del agua a la entrada de la piscina
- Número de revoluciones del tambor

Como parámetros de salida se destacan los siguientes:

1. Temperatura del mineral a la salida del enfriador
- 2- 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:

- 1- Presión de trabajo en el interior del enfriador
- 2- Coeficiente de llenado del tambor
- 3- Temperatura del medio ambiente
- 4- Humedad relativa del medio ambiente



Conclusiones del capítulo 1

- ◆ La bibliografía consultada aborda procedimientos para la evaluación del proceso de enfriamiento, que sirven de punto de partida para esta investigación.
- ◆ Los trabajos consultados se limitaron a la experimentación pasiva y sus autores solo evaluaron el comportamiento de las variables que son registradas por el sistema de adquisición de datos de la empresa (flujo de agua, flujo de mineral, temperatura del mineral a la salida y temperatura del agua en un solo punto de la piscina).

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 plantean como objetivos:

1. Describir los elementos que garantizan la calidad de los experimentos
2. Establecer los procedimientos para el balance térmico y de masa y la obtención de la eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios a escala piloto.

2.1. Instalación experimental

Para la realización de los experimentos se utilizó la instalación a escala piloto del ISMM que consta de los siguientes equipos y accesorios: transportador Sin Fin, enfriador cilíndrico horizontal rotatorio, dos motores eléctricos, piscina de agua de enfriamiento, los que se describen detalladamente en el epígrafe 1.3. La instalación cuenta con un sistema de adquisición de datos EROS que permite visualizar, graficar y almacenar las variables que son de interés para el proceso de enfriamiento, se muestra en la figura 2.1. Se debe señalar que la variable flujo de mineral aunque no aparece registrada en este sistema se obtiene a través del SCADA propio de la planta.

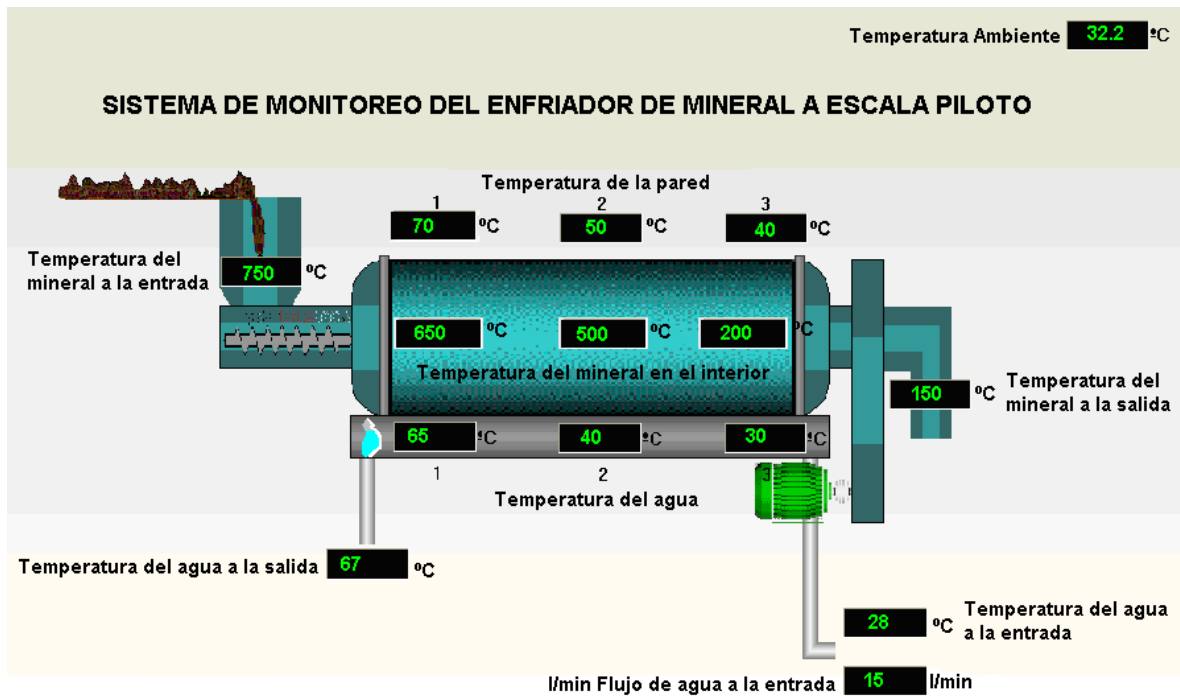


Figura 2.1. Ventana de operación de SCADA EROS.

La figura 2.2 es una vista superior de la instalación donde se muestra la posición de los instrumentos y los puntos donde se harán las mediciones.

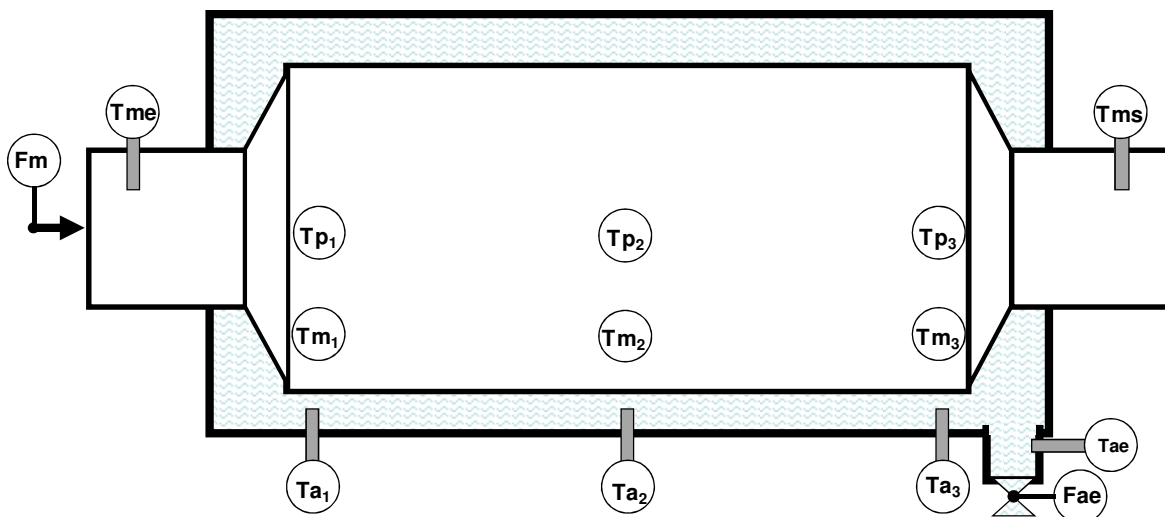


Figura 2.2. Vista superior de la posición de los instrumentos de medición en el objeto de estudio

En la figura (2.2) para la obtención de la temperatura en diferentes puntos de la superficie de la pared, se utilizó un pirómetro digital de mano modelo RAYMXPE, donde:



- F_m ; Flujo de mineral que entra al cilindro.
- T_{me} ; Temperatura del mineral a la entrada.
- T_{ms} ; Temperatura del mineral a la salida.
- T_{m_1} , T_{m_2} , T_{m_3} ; Temperatura del mineral en el interior del cilindro en tres puntos.
- F_{ae} ; Flujo de agua a la entrada de la piscina.
- T_{ae} ; Temperatura del agua a la entrada de la piscina.
- T_{a_1} , T_{a_2} , T_{a_3} ; Temperatura del agua de la piscina en tres puntos.
- T_{p_1} , T_{p_2} , T_{p_3} ; Temperatura de la pared del cilindro en tres puntos.

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

PARÁMETRO: Flujo de mineral alimentado al horno.

- o EQUIPO: Banda transportadora CB-3.
- o CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
- o Material: Goma sintética.
- o Diseño: 1,5 t/h .
- o Velocidad: 0,032 m/s .
- o Motor eléctrico: 440 V ; 1,3 A ; 1800 rev/min ; 0,7 kW .
- o Dimensiones: L x A x E, 2000 X 500 x 8 mm .
(el largo es el doble por el retorno: 4000 mm)

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

- o EQUIPO: Termopar tipo K con vaina y cabezal de conexión de roscado con convertidor de señal programable mediante la PC alojado en el cabezal.
- o CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
- o Temperatura de servicio hasta 1523,15 K .
- o Cabezal de conexión: forma A, DIN 43729; en fundición de metal ligera, con una entrada de cable.
- o Convertidor de señal programable con rango ajustado.

PARÁMETRO: Temperatura del agua en la piscina.

- o 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: Rotámetro.
- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
- 0 a 100 l/min .
- 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
- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
- Temperatura de servicio entre 243 y 1273 K
- Emisividad de la superficie ajustable.
- Fabricación alemana.
- PARÁMETRO: Masa de mineral.
- EQUIPO: Bascula semi- automática con compensación de tara.
- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
- Rango: 25 a 500 kg .
- Carga máxima: 750 kg .
- División: Escala 0,5 kg .
- Año de fabricación 1986.
- PARÁMETRO: Velocidad del motor eléctrico.
- EQUIPO: Variador de frecuencia Altivar 71
- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
- Grado de protección: IP21 hasta 75 kW en 380/480 V .
- hasta 45 kW en 220/240 V .
- Temperatura ambiental de operación: de -10 a +50 °C .
- Altitud máxima de operación: 1000 m .

- Humedad relativa: 95 % , sin condensación, ni goteo de agua.
- Alimentación: 200 V -15 % ; 240 V +10% , trifásica para ATV71H.

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

2.2. Selección de la variables que influyen en el proceso de enfriamiento

Para la selección de las variables a manipular durante los experimentos, se toman como base los estudios del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, realizados por Rodríguez (2011) y Matos (2012), quienes evaluaron el comportamiento de las variables que son registradas por el sistema de adquisición de datos de la empresa y a través del análisis estadístico describieron el comportamiento de las variables que caracterizan el proceso y afirman que las variables de mayor incidencia en la temperatura del mineral a la salida son el flujo de mineral y de agua.

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

2.3. Estudio de los factores que influyen en el proceso de enfriamiento

Las investigaciones precedentes sobre el enfriamiento del mineral laterítico reducido han estado dirigidas a estudiar los factores que influyen en el proceso de manera independiente, a la determinación de los coeficientes de transferencia de calor y a la modelación matemática del proceso, sin establecer relaciones que permitan indicar el comportamiento de estas, a través de un estudio integrador y exhaustivo sustentado por un diseño experimental.

Las investigaciones preliminares realizadas indicaron la posibilidad de establecer el rango de operación de las variables que garanticen la realización de los experimentos, sin afectar el proceso productivo.

La metodología utilizada durante la realización de los experimentos es la siguiente:

1. Se calibraron los instrumentos que se describen en el epígrafe 2.1 y que se utilizan para medir los valores de las variables que intervienen en el proceso.
2. Se comprobó la conexión de los instrumentos empleados al sistema de adquisición de datos (EROS) para el registro y monitoreo de las variables.
3. Se procedió a establecer un flujo de mineral constante, según el diseño de experimentos garantizando el perfil térmico del horno, se registró la hora y la fecha del momento en que se garantizó la estabilidad del sistema para las nuevas condiciones.
4. Se procedió a establecer el flujo de agua, registrando la hora y la fecha, se esperó hasta que la temperatura del mineral a la descarga se mantuviera estable.
5. Se procedió a realizar mediciones de la temperatura de la pared exterior del cilindro.
6. La investigación fue llevada a cabo en las instalaciones a escala piloto propuestas para tal objetivo (Figuras 2.1 a 2.2), donde se realizó el balance de masa y energía y se determinó la eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido.

2.4. Productividad del transportador de tornillo Sin Fin

El transportador de tornillo sin fin consta de un canal (1) con fondo cilíndrico cerrado por encima con la tapa (3), dentro del canal se encuentra el árbol (2) de superficie espiral. El motor eléctrico (4), a través del reductor (5), transmite la rotación al árbol. El material a transportar avanza al transportador a través de uno o varios orificios de carga (6). Girando el tornillo, la carga se desliza a lo largo del canal y se descarga a través del orificio (7) en el fondo según se muestra en la figura 2.3. El árbol del tornillo se monta en los cojinetes finales y en el cojinete intermedio suspendido en las abrazaderas de acero a la tapa del canal.

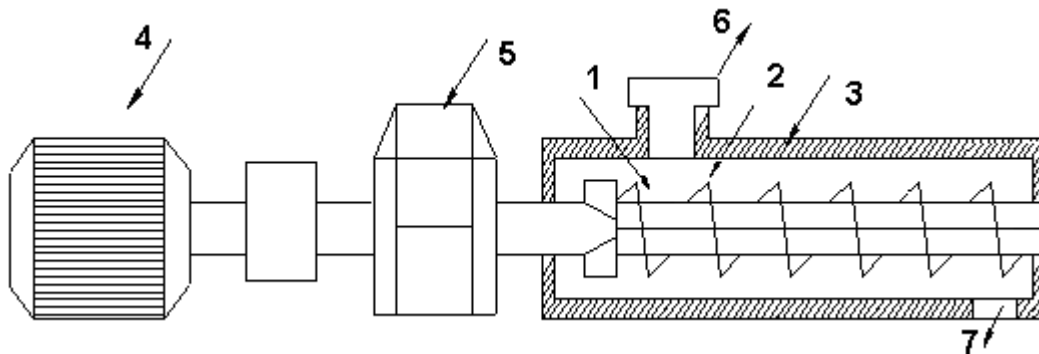


Figura 2.3. Transportadores de tornillo sin fin.

Con el objetivo de regular la cantidad de mineral laterítico reducido con que se desea alimentar al enfriador se construyó el transportador de tornillo Sin Fin, que se muestra en la figura 2.3 y su productividad se determina según la ecuación (2.1).

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot n \cdot \Psi \cdot \rho \quad (2.1)$$

donde:

Q - Productividad del transportador de tornillo sin fin; t/h

Ψ - Coeficiente de llenado del canal

ρ - Peso volumétrico del material a transportar; t/m³

D - Diámetro del tornillo; m

n - Frecuencia de rotación del tornillo; s⁻¹

S - Paso del tornillo (distancia entre las espiras próximas); m

La frecuencia de rotación del tronillo se calcula según la fórmula empírica (2.2):

$$n = \frac{A}{60\sqrt{D}} \quad (2.2)$$

donde:

A : Coeficiente que se escoge de la tabla 2.1.

Tabla. 2.1. Valores de los coeficientes A, Ψ , ω .

Material		A	Ψ	ω
Ligeros:	No abrasivo	65	0,4	1,2
	Poco abrasivo	50	0,32	1,6
Pesados:	Poco abrasivo	45	0,25	2,5
	Abrasivo	30	0,125	4,0

El valor del coeficiente de llenado del canal Ψ depende del material a desplazar y se escoge según la tabla 2.1.

Para tener mejor control de la cantidad de mineral laterítico que es capaz de entregar al enfriador el transportador de tornillo Sin Fin, se procede a la calibración del mismo a través de un diseño de experimento que permitirá obtener la productividad en función de la velocidad de rotación del motor.

Técnica experimental

Para determinar la productividad del transportador de tornillo Sin Fin, sustentado en un experimento, es necesario tomar como punto de partida los resultados obtenidos por Zalazar (2010), quien planteó que para que la instalación experimental cumpliera con los criterios de semejanza debe trabajar con un flujo de mineral de 123 kg/h y un flujo de agua de 5 l/min . Por tal motivo se estableció que la productividad que debe garantizar el transportador de tornillo Sin Fin sea de 123 kg/h .

Partiendo del hecho que el eje del motor eléctrico garantiza una velocidad de rotación de 1800 rev/min se fijó que solo se harían los experimentos a un 50 % de su velocidad máxima, es decir 900 rev/min , lo cual se lograría variando la frecuencia del motor eléctrico con ayuda de un variador de frecuencia ALTIVAR 71 quedando establecido el diseño experimental según la tabla 2.2.

Tabla. 2.2. Matriz de experimentos para determinar la productividad del transportador de tornillo Sin Fin en función de su velocidad de rotación.

Frecuencia (Hz)	Velocidad de rotación			Flujo de mineral (kg/min)				
	(%)	Motor (rev/min)	Reductor (rev/min)	1	2	3	4	5
1,5	15	45	7,5					
3	20	90	15					
4,5	25	135	22,5					
6	30	180	30					
12	35	360	60					
18	40	540	90					
24	45	720	120					
30	50	900	150					

1. Luego se procede a alimentar la tolva con mineral laterítico y se espera que el mineral comience a salir por la descarga del transportador de tornillo Sin Fin.
2. Entonces se toman muestras de mineral, cada un minuto, durante cinco minutos, para diferentes velocidades de rotación del Sin Fin, teniendo presente que la relación de transmisión entre el reductor y el transportador es igual a 1.
3. Por último se llevan las muestras a una Bascula semi- automática con compensación de tara donde se determina la masa de mineral de cada una de las cinco muestras.

2.5. Propiedades físicas y parámetros principales del mineral laterítico

Un paso importante en el diseño de los sistemas de transporte de sólidos granulados es determinar las propiedades físicas del mineral. Dentro de las propiedades más importantes para evaluar el comportamiento del mineral laterítico, tomando en cuenta su importancia en dichos sistemas se destacan:

- Densidad
- Contenido de humedad
- Composición granulometría

2.5.1. Densidad del mineral laterítico

La densidad es una propiedad que influye en la velocidad de transporte de las partículas, por lo que al estudiar el comportamiento de los sistemas de transporte del mineral laterítico, es necesario investigar la densidad de este material. Para esto existen varios métodos, dentro de ellos los más utilizados según la literatura son el método de Ergun y el Picnométrico, para los experimentos realizados se utilizó el método del picnómetro por existir todas las condiciones para su realización en el laboratorio del CEDINIQ.

Materiales y reactivos a utilizar para la ejecución de los experimentos

- Picnómetros
- Balanza analítica
- Agua destilada
- Mortero
- Tamiz
- Estufa
- Micro pipeta
- Embudo de crisol

Técnica experimental empleada

1. Al picnómetro se le agrega agua destilada hasta la marca que el posee, la temperatura del agua debe ser de 18 a 22 °C . Se pesa el picnómetro en balanzas de precisión con una exactitud hasta 0,01 g . Se obtiene el peso del picnómetro con agua (g_1).
2. La muestra, que se encuentra en un estado seco, se tritura en un mortero de porcelana y se cierce a través de una zaranda de agujeros con diámetro de 0,2 mm , las partículas de diámetro superior a 0,2 mm que quedan se vuelven a triturar.
3. De la roca cernida y cuidadosamente mezclada se toman unos 15 g y se colocan en una probeta de vidrio. Después, esta muestra se coloca en un termostato a temperatura entre 100 y 110 °C hasta que su peso sea constante, se enfría y se traslada al picnómetro pesado de antemano. El picnómetro con la roca se pesa en balanzas de precisión con la exactitud de 0,01 g. Del peso del picnómetro con

- la roca se resta el peso del picnómetro (g_1) y se obtiene el peso de la muestra (g).
4. Para eliminar el aire de la muestra, al picnómetro se le agrega agua destilada en un 30 a un 50 % de su volumen y se pone a hervir durante 30 min, si en la muestra se han observado granos gruesos y durante una hora si los granos son finos.
 5. Después de la ebullición, se enfría el picnómetro en un baño con agua destilada, se mide a la temperatura del agua, la cual debe ser igual que en el primer paso de 18 a 22 °C . El nivel del agua en el picnómetro se establece de un modo rígido por el límite superior del menisco, para lo cual se utiliza una micropipeta con la que se añaden o sustraen gotas de agua según se necesite. Después, el picnómetro se pesa cuidadosamente en balanzas de precisión con exactitud de hasta 0,01g y se obtiene el peso del picnómetro con agua y la muestra, o sea (g_2).

Fundamentado en los datos anteriores, se determina el peso específico por la ecuación (2.3).

$$\gamma_e = \frac{g}{g_1 + g - g_2} \quad (2.3)$$

donde:

γ_e - Peso específico; g/cm³

g - Masa de la muestra seca; g

g_1 - Masa del picnómetro con agua; g

g_2 - Masa del picnómetro con agua y la muestra; g

Los valores de la densidad del mineral determinada experimentalmente oscila entre 2,72786 y 2,7659 g/cm³, el promedio de las diez mediciones realizadas es de 2,72786 g/cm³.

2.5.2. Determinación del contenido de humedad

La humedad influye significativamente en la velocidad de transporte del mineral laterítico debido a que se puede producir la aglomeración de las partículas durante el

proceso de transporte, por ello para el estudio de este material es necesario determinar los valores de la humedad. Para el análisis fueron tomadas muestras en diferentes días de trabajo en las tolvas de producto final del molino, después de una correcta homogenización de estas muestras se realizaron los ensayos aplicando la metodología siguiente.

Materiales y reactivos empleados para la ejecución de los experimentos

- Mineral laterítico tomado en las tolvas de producto final de los molinos.
- Balanza analítica de precisión hasta la cuarta cifra decimal.
- Desecadora
- Estufa
- Pesa filtros con sus tapas
- Taras
- Beaker
- Pipeta
- Espátula

Técnica experimental

1. Se toman cinco muestras en crisoles con 10 g de mineral cada una y se introducen en la estufa durante 4 horas a una temperatura de 120 °C.
2. Una vez consumido el tiempo fijado se extraen los crisoles y se introducen en una desecadora, hasta que alcancen la temperatura ambiente.
3. Posteriormente se colocan las muestras sobre una balanza analítica y se toman los pesos a la temperatura ambiente, por diferencia de peso se determina la humedad correspondiente.

Para el análisis fueron tomadas 10 muestras en las tolvas de producto final de los molinos.

Para el cálculo de la humedad se utilizó la ecuación (2.4).

$$W = \frac{G_n - G_s}{G_s} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

donde:

G_n - Masa de la muestra con humedad natural; g

G_s - Masa de la muestra seca; g

W - Humedad del mineral; %

Los valores de humedad del mineral determinada experimentalmente oscila entre 4,35 y 4,65 %, el promedio de las diez mediciones realizadas es de 4,49 % .

2.5.3. Granulometría

El cribado es un procedimiento de separación de los minerales áridos por clases de grosor mediante el tamizado de los mismos, o de clasificación de minerales en las superficies de las cribas. Los granos de mineral cuyo tamaño es superior a los orificios de la criba después de la separación quedan en la misma, mientras que los granos de menor tamaño caen por los orificios.

El proceso de tamizado consiste en hacer pasar la muestra del material a granel a través de un juego de tamices, de manera que se determinen porciones de dicho material según el tamaño de las partículas o pedazos del mismo. Una vez separadas estas porciones, se procede a pesarla y determinar el por ciento en peso de cada porción en relación con el peso total de la muestra, obteniendo de esta forma la granulometría del material analizado.

Cálculo de la cantidad de mineral para el cribado

La cantidad de mineral que se necesita para el cribado se determina por la expresión (2.5).

$$Q_{min} = 0.02 \cdot d^2 + 0.5 \cdot d \quad (2.5)$$

donde:

d - diámetro máximo de las partículas; mm

Q_{min} - cantidad mínima de mineral en cada muestra; kg

Tomando en consideración que la granulometría del mineral transportado neumáticamente es inferior a 0,09 mm , es que se fija este valor para determinar la cantidad de mineral necesario en cada muestra y para la elección del juego de tamices.

$$Q_{min} = 0,02 \cdot (0,09)^2 + 0,5 \cdot 0,09$$

$$Q_{min} = 0,045162kg$$

Selección del juego de tamices.

Para seleccionar el juego de tamices se utiliza la escala incompleta de Taylor con módulo $\sqrt{2}$ donde:

1. 0,09 (Diámetro de los orificios, mm)
2. 0,0636 mm
3. 0,045 mm

Debido a que no se pudo encontrar esta serie de forma exacta se seleccionaron los tamices más próximos a cada uno de los valores anteriores de forma que no se altera la esencia del experimento.

Juego de tamices seleccionado.

1. 0,090 (Diámetro de los orificios, mm)
2. 0,071 mm
3. 0,063 mm

El cribado se puede utilizar tanto por vía seca como por vía húmeda en este caso se utilizó la vía húmeda buscando mayor precisión en los resultados obtenidos.

Para el análisis granulométrico se tomaron muestras de mineral en las tolvas de producto final de los molinos durante cuatro horas en un intervalo de una hora entre cada una de las muestras en el período de 7:00 a 11:00 AM durante el mes de marzo, posteriormente se homogeneizaron las mismas y con ellas se realizaron los diferentes experimentos.

2.6. Balance de masa y energía

Un balance de masa y energía muestra la equivalencia entre los calores que entran y salen de un 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, proceso que se pone de manifiesto en el intercambio de calor entre el agua de enfriamiento y el aire circundante. 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 (2.6) 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.

$$Q_{H_2O} = Q_m - Q_{ma} \quad (2.6)$$

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 (2.7) 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.

$$Q_{H_2O} = \dot{m}_{sH_2O} \cdot C_{psH_2O} \cdot T_{sH_2O} - \dot{m}_{eH_2O} \cdot C_{peH_2O} \cdot T_{eH_2O} \quad (2.7)$$

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 (2.8), en este caso se considera que todo el mineral que entra al enfriador es igual al que sale.

$$Q_m = \dot{m}_m \cdot C_{pm} \cdot (T_{em} - T_{sm}) \quad (2.8)$$

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 (2.6, 2.7, y 2.8) dependen de las propiedades, del mineral y del agua de enfriamiento, 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 (2.9) que depende del coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire.

$$Q_{ma} = \alpha_{agua} \cdot A_{agua} \cdot (T_{agua} - T_{aire}) \quad (2.9)$$

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 (2.10).

$$q''_{conv} + q''_{agr} = q''_{evap} \quad (2.10)$$

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 (2.10) 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 (2.11).

$$q''_{conv} = q''_{evap} \quad (2.11)$$

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 (2.12).

$$q''_{evap} = n''_A \cdot h_{fgv} \quad (2.12)$$

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 (2.13).

$$n''_A = h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.13)$$

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 (2.14). La cual es válida para $(0,6 < S_c < 3000)$.

$$Sh = 0.0296 \cdot R_e^{\frac{4}{5}} \cdot S_c^{\frac{1}{3}} \quad (2.14)$$

donde:

S_c - Número de Schmidt.

El Número de Reynolds se determina a través de la ecuación (2.15).

$$R_{eD} = \frac{V_{aire} \cdot D_e}{\nu_{aire}} \quad (2.15)$$

donde:

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

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

Para calcular el Número de Schmidt se emplea la ecuación (2.16).

$$S_c = \frac{\nu_{aire}}{D_{AB}} \quad (2.16)$$

donde:

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

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

Conociendo las ecuaciones (2.4), (2.15), (2.16), y a través de la ecuación (2.17) se puede determinar el Coeficiente de Transferencia de Masa.

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} \quad (2.17)$$

donde:

L - Longitud del enfriador; m

El calor transmitido por convección del agua al aire se determina a través de la ecuación (2.18).

$$q''_{conv} = \alpha_{agua} (T_{agua} - T_{aire}) \quad (2.18)$$

Si se sustituyen las ecuaciones (2.2) y (2.18) en la ecuación (2.11) y si despeja el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire α_{agua} , se obtiene la ecuación (2.19).

$$\alpha_{agua} = \frac{h_{fg} \cdot h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty})}{(T_{agua} - T_{aire})} \quad (2.19)$$

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

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

Donde:

η_e - Eficiencia del enfriador; %

El sistema de ecuaciones establecido en este epígrafe constituye el procedimiento de cálculo para el balance térmico del objeto de estudio. El análisis particular para las condiciones objetivas de la experimentación se describe y resuelve en el Anexo 1 del trabajo.

Conclusiones del capítulo 2

- Se caracterizó la instalación experimental y se calibraron los instrumentos de medición que garantizan una mejor evaluación del comportamiento de las variables del proceso y su incidencia en la temperatura del mineral a la descarga.
- Se estableció el balance térmico del proceso para cuantificar los modos de transferencia de calor, identificar el predominante sobre la base de los experimentos realizados y la eficiencia térmica de la instalación.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

Para la realización de esta investigación fue necesario establecer los principales parámetros que caracterizan el objeto de estudio, en el caso específico de las instalaciones industriales no siempre es posible variar un parámetro para determinar su influencia en otras variables. Por tal motivo el objetivo del presente capítulo es: establecer el comportamiento de los parámetros que caracterizan el proceso de enfriamiento de mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios a escala piloto.

3.1. Productividad del transportador de tornillo Sin Fin

El primer paso de esta investigación está dirigida a determinar la productividad del transportador de tornillo Sin Fin, tanto a través de la ecuación (2.1), que define la productividad para estos equipos, como a través de los experimentos realizados en la propia instalación. Para ello es necesario conocer algunas dimensiones del transportador y propiedades del mineral laterítico:

- Paso del Sin Fin; mm 72
- Diámetro exterior en desarrollo; mm 80,9
- Coeficiente de llenado del canal 0,125
- Peso volumétrico del mineral; kg/m³ 800 a 3300
- Velocidad de rotación del tornillo; min⁻¹ Ver tabla 2,2

En el anexo 1 se muestra una hoja de cálculo realizada por el Software Profesional Mathcad 13, donde se determinó la productividad del transportador de tornillo Sin Fin para diferentes velocidades de rotación y para los casos en que la densidad aparente del mineral sea de 800 o de 3300 kg/m³.

Demostrándose a través de la figura 3.1 que la productividad del transportador obtenida experimentalmente, se encuentra en el intervalo de valores de la

productividad determinada a través de la ecuación (2.1) para los valores mínimo y máximo de la densidad aparente del mineral.

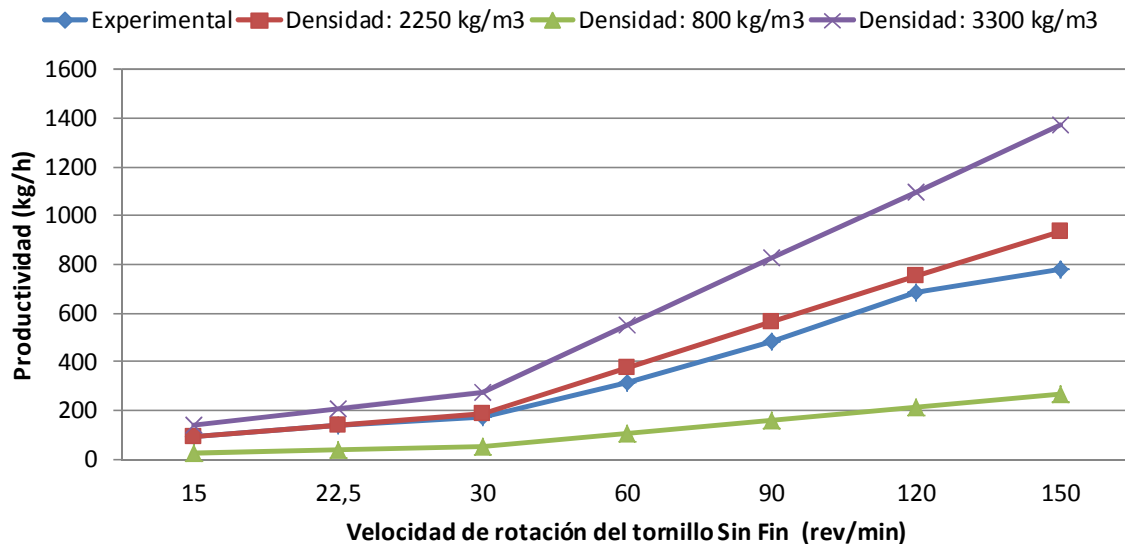


Figura 3.1 Productividad del transportador de tornillo sin fin en relación a la velocidad de rotación y la densidad aparente del mineral.

Los resultados de la figura 3.1 demuestran que debido a que la productividad determinada experimentalmente tiene un comportamiento similar a los resultados teóricos y que la variable que más incide en la diferencias arrojadas es la densidad aparente del mineral, entonces se procedió a obtener una ecuación que permita determinar la productividad de dicho equipo en función de su velocidad de rotación.

Para llevar a cabo esta tarea se utilizaron los resultados del experimento realizado y con ayuda del Software Microsoft Excel 2010, se realizó un análisis de regresión donde se obtuvo la ecuación (3.1) para un coeficiente de correlación múltiple (R) de 0,99.

$$Fm = 16,0908687068115 + 5,23295162882527 \cdot n \quad (3.1)$$

donde:

Fm - Productividad; kg/h

n - Velocidad de rotación; rev/min

Luego se estableció a través de la ecuación (3.1) que la frecuencia de rotación que debe tener el tornillo Sin Fin debe ser igual a 21 rev/min , para que garantice una productividad de 126 kg/h , con un coeficiente de llenado de 0,125. La figura 3.2 muestra el comportamiento de la productividad experimental y la obtenida a través del modelo de regresión.

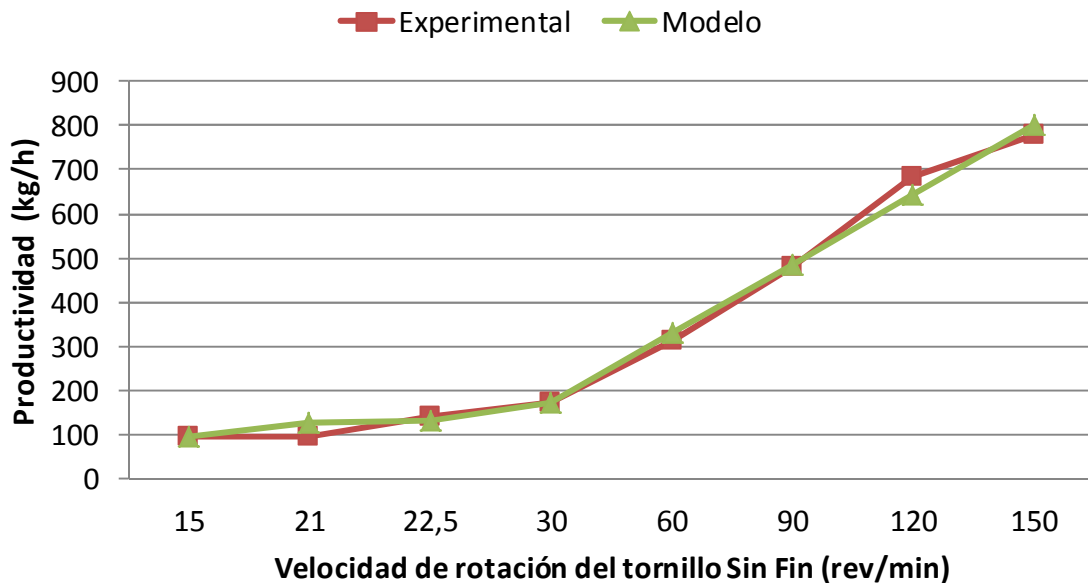


Figura 3.2 Productividad del transportador de tornillos Sin Fin experimental y según el modelo

3.2. Resultados del balance térmico

Con el objetivo de establecer cual es el modo de transferencia de calor predominante, que garantice el mejor comportamiento del proceso de enfriamiento para diferentes flujos de mineral y con la finalidad de llegar a conclusiones profundas respecto a la eficiencia del equipo, se realiza el balance térmico y de masa al objeto de estudio, sobre la base del procedimiento de cálculo establecido en el capítulo 2.

En el Anexo 2, se relacionan los resultados fundamentales obtenidos del balance de energía y masa que se realizó con ayuda del Software Profesional Mathcad 13.

La tabla 3.1 muestra los valores mínimos, medios y máximos resultado de los experimentos realizados a escala piloto, para diferentes flujos de mineral y un flujo de agua de 10 l/min . Se debe resaltar que para el agua y la pared se muestran los

valores promedios de las temperaturas medidas en tres puntos en toda la longitud de la instalación, según se muestra en la figura 2.2.

Tabla 3.1. Valores mínimos, medios y máximos, resultado de los experimentos.

Flujo de Mineral (kg/h)	TEMPERATURA (°C)			
	Mineral		Promedio	
	Entrada	Salida	Agua	Pared
131,56	685,76	93,49	29	36
296,21	696,71	210,89	30	45
380,47	701,70	327,86	31	56

La figura 3.3, muestra el comportamiento de la cantidad de agua evaporada con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral. Se observa que para mayores flujos de mineral, el proceso de evaporación al medio ambiente es mayor, oscilando los valores mínimos y máximos entre 1,08 y 6,11 kg/h de agua evaporada respectivamente.

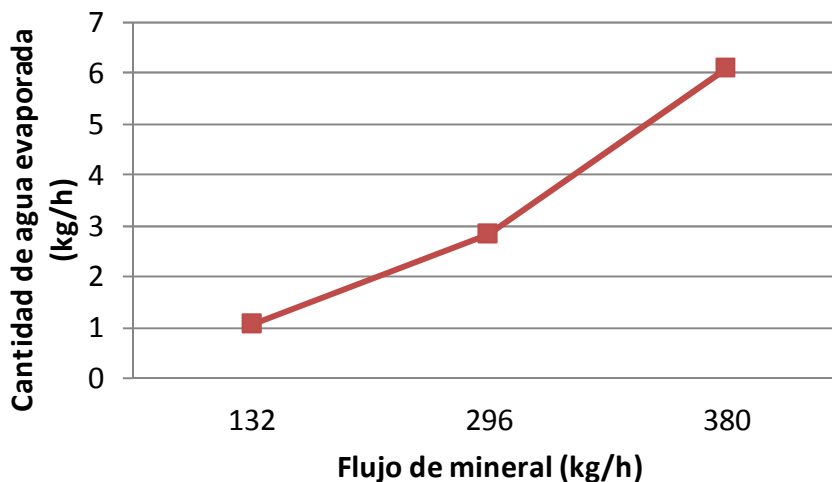


Figura 3.3 Comportamiento de la cantidad de agua evaporada para diferentes flujos de mineral.

La figura 3.4 muestra el comportamiento de la cantidad de calor que se cede al medio ambiente y del calor absorbido por el agua de la piscina, donde ambos aumentan con el incremento del flujo de mineral. Se debe destacar que el modo de transferencia de calor predominante en este proceso es la convección y que para que la convección por evaporación sea representativa, es necesario que la temperatura del agua alcance valores cercanos a su temperatura de ebullición (100 °C) a presión atmosférica. Al incrementarse la temperatura del agua aumenta la cantidad de agua evaporada y por lo tanto disminuye la cantidad de agua existente en la piscina y con ello la cantidad de calor absorbido con el agua, siguiendo la tendencia de dicha curva.

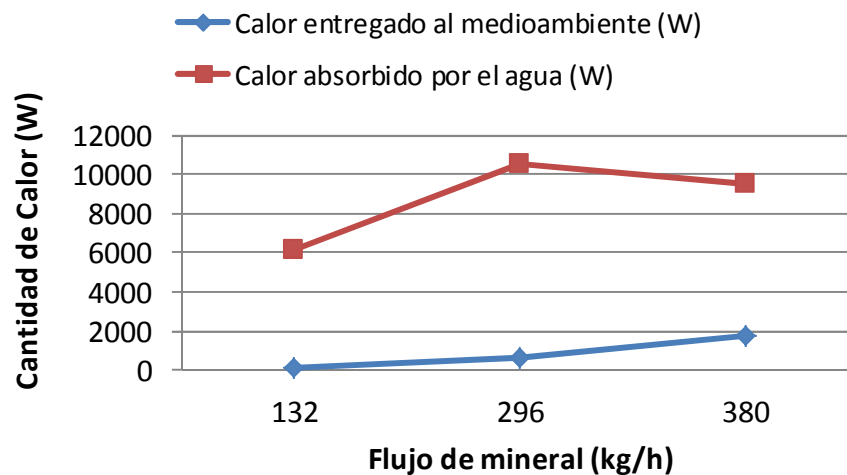


Figura 3.4 Comportamiento del calor cedido al medio ambiente y del calor absorbido por el agua para diferentes flujo de mineral.

A través del balance térmico se comprobó que para mayores flujos de mineral la cantidad de calor transferida al medio ambiente por evaporación, tiende a incrementarse. Pero en este caso 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. Como se demuestra en la figura 3.4 la mayor parte del calor entregada por el mineral es absorbida por el agua y lo utiliza para elevar su temperatura, que no supera valores de 34 °C, provocando que la evaporación no sea representativa.

En la figura 3.5 se observa que el rendimiento de la instalación objeto de estudio oscila entre 38,3 y 61,8 % , alcanzándose los valores mayores para un flujo de mineral de 132 kg/h . Este comportamiento confirma que un incremento del flujo de mineral debe estar acompañado de un aumento del flujo de agua, además de que el equipo fue diseñado para trabajar con un flujo de mineral de 123 kg/h aproximadamente (Zalazar, 2010).

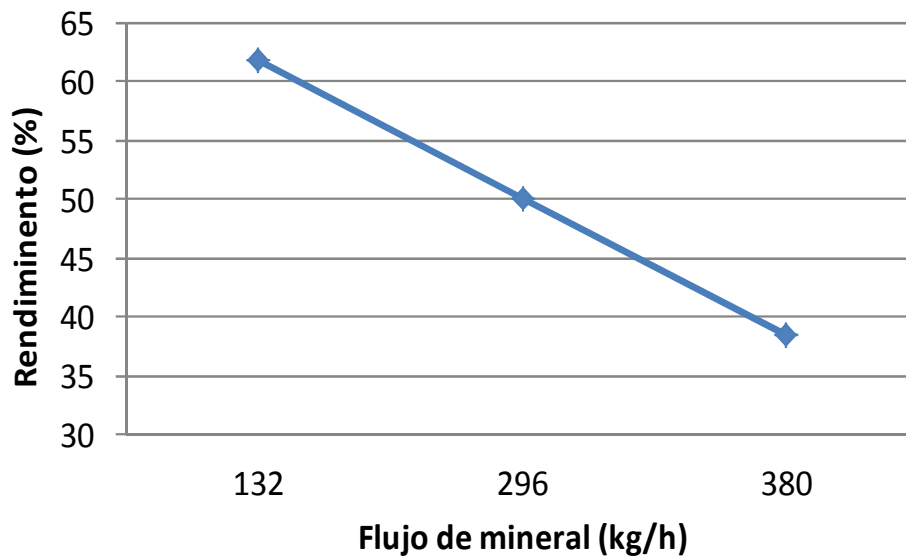


Figura 3.5 Comportamiento del rendimiento del enfriador para diferentes flujos de mineral.

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. El incremento de la temperatura del mineral a la descarga es originado principalmente, por que al aumentar el flujo de mineral se incrementa el área de transferencia de calor entre el mineral y la pared del cilindro, y con ello el espesor de la capa de mineral, lo cual provoca que el mineral que está en contacto con la pared se enfríe y actúe como un aislante térmico debido a la baja conductividad térmica del mineral (Tunra, 1998).

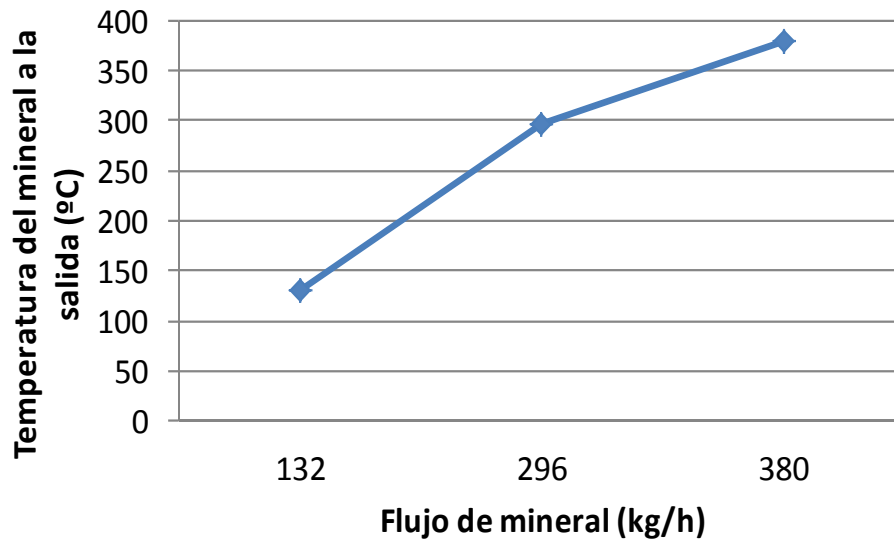


Figura 3.6 Comportamiento de la temperatura del mineral con respecto al flujo de mineral.

3.3. Comportamiento de las variables del proceso

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. La tabla 3.2 muestra un resumen de los resultados de los experimentos realizados en el enfriador a escala piloto.

Tabla 3.2. Valores mínimos, medios y máximos, resultado de los experimentos.

Flujo Mineral (kg/h)	TEMPERATURA (°C)										
	Mineral					Agua			Pared		
	Entrada	1	2	3	Salida	1	2	3	1	2	3
131,56	685,76	303,45	273,57	223,95	93,49	30,00	28,50	28,00	41,00	36,33	32,00
296,21	696,71	388,43	352,81	302,84	210,89	31,67	29,17	29,00	51,44	49,33	35,56
380,47	701,70	455,18	442,69	394,09	327,86	34,00	30,00	30,00	61,67	66,33	39,33

La figura 3.7 muestra el comportamiento de la temperatura del mineral en el interior del cilindro y de la temperatura en la superficie para diferentes flujos de mineral,

donde se observa que a medida que aumenta el flujo de mineral ambas temperaturas alcanzan sus valores más altos, siempre decreciendo en el sentido en que se mueve el mineral. Se debe destacar que la diferencia de temperatura entre el mineral y la pared exterior del cilindro está entre 192 y 394 °C , alcanzando el mayor valor para un flujo de mineral de 380 kg/h .

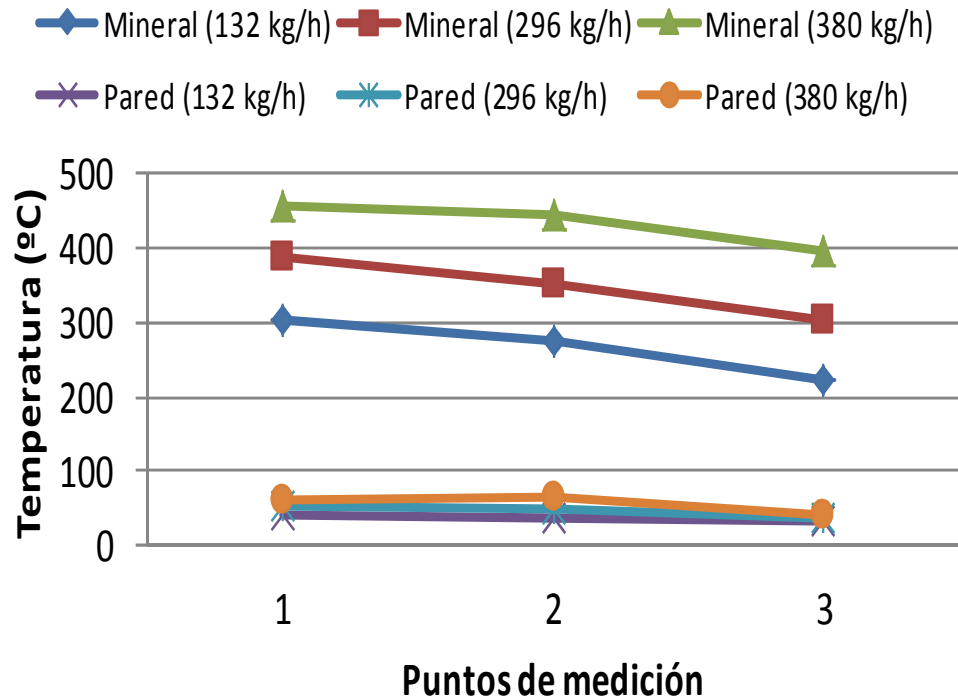


Figura 3.7 Comportamiento de la temperatura del mineral y de la pared del cilindro. La figura 3.8 muestra el comportamiento de la temperatura de la superficie del cilindro y del agua en la piscina para diferentes flujos de mineral, donde ha medida que aumenta el flujo de mineral se incrementa la temperatura de la pared, pero la variación de la temperatura del agua es solo de 6 °C . Se comprobó además que existen marcadas diferencias en la temperatura de la pared para diferentes flujos de mineral, lográndose la mayor temperatura en la pared para 380 kg/h , no siendo así para la temperatura del agua en la piscina, que se mantiene casi inalterable.

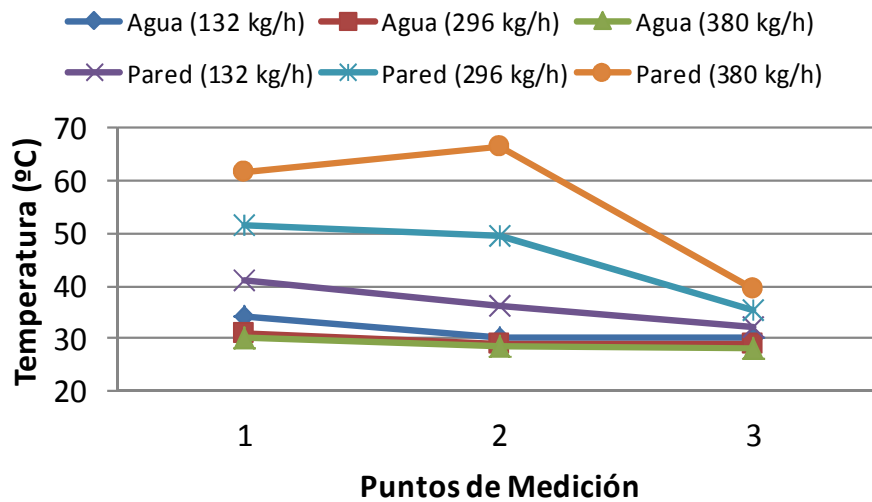


Figura 3.8 Comportamiento de la temperatura de la pared del cilindro y del agua en la piscina.

3.4. Problemas detectados en el enfriador del ISMM

Durante la realización de los experimentos, la instalación a escala piloto del ISMM presentó algunas deficiencias, las cuales se relacionarán en este epígrafe y que servirán de punto de partida para otras investigaciones relacionadas con el enfriamiento del mineral laterítico reducido.

3.4.1. Interior del cilindro

Deficiencias

Se encontraron deformaciones y roturas en los termopares, producto a la incorrecta fijación (soldadura) de los mismos.

Los cables de compensación encargados de transmitir la señal de los termopares desde el interior del cilindro hasta los convertidores en el exterior del cilindro se calcinaron.

Los carros levantadores no garantizaron la remoción y el traslado del mineral para flujos de mineral mayores de 380 kg/h .

Recomendaciones

- Fabricar los termopares de un diámetro mayor y en este caso con un Wells

- Evaluar sustitución de los cables actuales por cables de mayor resistencia a las altas temperaturas.
- Determinar el peso de los carros en función de la masa de mineral en el interior de los carros que garantice el movimiento y la traslación del cilindro.

3.4.2. Transportador de tipo tornillo Sin fin de alimentación

Deficiencias

Los cojinetes de rodamiento y deslizamiento que sirven de apoyo al tornillo Sin Fin se deformaron, por estar el primero muy cerca a la alimentación y el segundo dentro del enfriador.

Los puntos de apoyos del tornillo Sin Fin se encuentran, uno dentro del enfriador y el otro muy cerca a la alimentación, por lo que las elevadas temperaturas deforman a los rodamientos.

La fijación de la rueda dentada que transmite el movimiento al eje del transportador de tornillo Sin Fin no es la correcta, ya que fue a presión y ajustado con un perno.

Recomendaciones

- Realizar la correcta selección de los cojinetes que deben soportar el movimiento del tornillo Sin Fin y las elevadas temperaturas a que están sometidos.
- Trasladar los cojinetes de apoyo del tornillo Sin Fin hacia el exterior del transportador, de manera que queden alejados de la zona de altas temperatura, siempre que se garantice el correcto funcionamiento del mismo.
- La fijación de la rueda dentada que transmite el movimiento al eje del transportador debe ser a través de una cuña y un chavetero.

3.5. Valoración económica

Toda investigación debe llevar aparejado una evaluación económica que garantice que los recursos materiales, financieros y humanos, sean aprovechados con eficiencia, seguridad y con el menor impacto al medioambiente, y garanticen el uso racional de los recursos energéticos. Para obtener buenos resultados en la

experimentación es necesario añadir determinados instrumentos de medición que permitan controlar las variables de más importancia en el proceso.

En este epígrafe se hace una comparación de los costos de instrumentación y el consumo de energía entre el enfriador de mineral de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” y el modelo a escala piloto del ISMM.

Tabla 3.3 Costo de instrumentación para el enfriador de mineral industrial y piloto

Instrumentación	Precio (CUC)	Cantidad; U		Total. (CUC)	
		Industria	Piloto	Industria	Piloto
Termorresistencia Pt 100	196,80	27	10	5313,6	1968
Termopar tipo K	196,80	1	1	196,8	196,8
Transmisor de presión relativa	813,60	4	2	3254,4	1627,2
Transmisor de presión diferencial	813,60	8	4	6508,8	3254,4
Cable de red de cobre UTP	0,42	20	3	8,4	1,26
Conectores plásticos	0,58	2	2	1,16	1,16
Adaptador opcional con batería	217,20	1	1	217,2	217,2
CPU TSX Momentum M1	690	1	1	690	690
Módulo de entradas analógicas	720	1	1	720	720
Módulo de salida analógica	720	1	1	720	720
Módulos adaptadores de comunicación	312	1	1	312	312
Fuente de alimentación	300	1	1	300	300
Total				18 242,36	10 008,02

En la tabla 3.3 se analizan la cantidad de elementos y el costo de la instrumentación que se necesita para los enfriadores de mineral industrial y piloto, en la cual se determinó que el costo total para la instrumentación de un enfriador de mineral a escala industrial es de 18 242,36 CUC y para el modelo a escala piloto es de 10 008,02 CUC, la diferencia en el costo de instrumentación de los enfriadores de mineral a escala piloto e industrial es de 8234,34 CUC.

Tabla 3.4 Consumo energético.

Elementos	Precio (CUC/kWh)	Consumo		Importe (1 hora)	
		Industrial	Piloto	Industrial	Piloto
Motor eléctrico principal	0,45	90	1,5	40,5	0,97
Motor eléctrico auxiliar	0,45	11	-	4,95	-

En la tabla 3.4 aparecen los elementos que consumen energía tanto para la instalación industrial como piloto, en la cual se muestra que el consumo de energía por hora para el industrial es de 90 kWh lo que representa un total de 979 CUC por día y el consumo del modelo a escala piloto es de 1,5 kWh que representa un gasto de 559,2 CUC por día.

Además se debe destacar que, el costo de la instrumentación y consumo de energía de la instalación a escala piloto representa un mayor impacto económico ya que permite la evaluación del proceso de enfriamiento de mineral, sin poner en riesgo la producción en la industria.

3.6. 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

3.6.1. Caracterización de los impactos

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de gran importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta del análisis desarrollado, determinando como repercuten sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el objeto. En la tabla 3.5 se muestran los impactos ambientales del proceso de enfriamiento.

Tabla 3. 5. 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 3.6.2 se relacionan algunos estándares sobre medio ambiente. De la comparación de estos valores con los existentes en la planta se puede deducir el nivel de contaminación presente en la misma.

3.6.2. 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/m³ Sulfuro de Hidrógeno: 14 mg/m³
 - Monóxido de Carbono: 29 mg/m³ Plomo: 0,15 mg/m³
 - Cobre: 1 mg/m³ Dióxido de Nitrógeno: 6 mg/m³
 - Sílice libre: 5 mg/m³ Polvo inerte: 10 mg/m³

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

- _ 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 cardiaco y de los movimientos respiratorios, tensión muscular, descarga de hormonas en sangre, entre otras. Esto ocurre sobre todo cuando el ruido es muy intenso, de carácter impulsivo y el que escucha no está preparado para ello. Los niveles de ruido altos, están considerados como factores de riesgo ya que en la generalidad de los casos desencadenan en una enfermedad cardiovascular.

Conclusiones del capítulo 3

Se demostró que el flujo de mineral que entra al transportador de tornillo Sin Fin está entre los flujos de mineral determinados para el rango de densidad aparente del mineral entre 800 y 3300 kg/m³.

Las principales deficiencias encontradas durante la explotación de la instalación se manifestaron en el interior del cilindro y en el transportador de tornillo Sin Fin.

CONCLUSIONES GENERALES

Mediante el análisis estadístico de regresión que relaciona la variable velocidad de rotación del tornillo Sin Fin con el flujo de mineral, se obtuvo que el coeficiente de correlación igual a 0,99.

Se determinó que el rendimiento de la instalación objeto de estudio oscila entre 38,3 y 61,8 %, alcanzando el mayor valor para un flujo de mineral de 132 kg/h . Además se comprobó que al aumentar el flujo de mineral desde 131,56 a 380,47 kg/h asciende la temperatura del mineral a la descarga de 93,49 a 327,86 °C .

En el estudio económico- medio ambiental se determinó que el costo total para la instrumentación de un enfriador de mineral a escala industrial es de 18 242,36 CUC y para el modelo a escala piloto es de 10 008,02 CUC, arrojando una diferencia en el costo de instrumentación de los enfriadores de mineral a escala piloto e industrial es de 8234,34 CUC .

Las principales afectaciones al medioambiente provocadas por la instalación están relacionadas con las elevadas temperaturas, la calidad del aire y el ruido.



RECOMENDACIONES

Continuar con el estudio de la temática en cuestión para garantizar una mejor identificación del proceso.

Garantizar la conexión de otros instrumentos de medición al sistema de almacenamiento de datos, para mejorar la precisión en el análisis.

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 empresa "Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma. Moa.
5. ARAUJO E. 2009. Evaluación del proceso de transferencia de color 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. CHACÓN, 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. GÓNGORA, 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. GÓNGORA, 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. LAMORÚ, M. Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico para diferentes condiciones de trabajo. Góngora, E, Columbié, A. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2008.
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, M. 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 Piloto del CEDINIQ, 1997.
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. MATOS, C. D. 2012. Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en Cilindros horizontales rotatorios. Tesis de Maestría. Pág. 68.
28. MEDINA, A. 1995. Propuestas de modificación del carro raspador del enfriador de mineral de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 11p. Informe técnico.
29. MOLLA, M. 2004. Natural convection flow from an isothermal horizontal circular cylinder with temperature dependent viscosity. *Heat Mass Transfer* 41, pp. 594–598.
30. 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.
31. 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.
32. OLIVAS, P. 1997. On unsteady electrochemical coating of a cylinder at moderately large Reynolds number. *Journal of Applied Electrochemistry* 27, pp. 1369-1379.



33. 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.
34. OSORIO, G. 2009. Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comdte Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma" Moa ISMM.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. QUINTERO, G.E. 2008. Construcción de un enfriador cilíndrico rotatorio a escala de laboratorio. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
40. 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.
41. RODRÍGUEZ, M. J. A. 2011. Proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Trabajo de Diploma. Departamento de Metalurgia. Pág. 55
42. RODRÍGUEZ, 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.
43. RODRÍGUEZ, R. 1970. Investigación de la modelación matemática del horno de calcinación. Vol. No.2. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 24p. Informe técnico.



44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. SOTTO, Y. 2007. Influencia de los elementos mecánicos del enfriador horizontal en el proceso de transferencia de calor del mineral reducido en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
49. 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.
50. TUNRA. 1998. Ore Cooler Evaluation. The University of New Castle Research Associates Limited. 18p.
51. 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.
52. VALLE, M. 2000a. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa (1). Tecnología Química Vol. XX, No. 1, pp. 70-77.
53. VALLE, M. 2000b. 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.



- 54.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.
- 55.YAPICI, H. 2004. Transient temperature and thermally induced stress distributions in a partly-circumferentially heated cylindrical workpiece. Heat Mass Transfer 41, pp. 104–111.
- 56.ZALAZAR, O.C. 2010. Obtención de los parámetros de funcionamiento del enfriador rotatorio a escala piloto del ISMM.



Anexo 1 Cálculo de la productividad del Transportador Sin Fin

$x := 0, 1 \dots 6$

Coeficiente de llenado del canal: $\Psi := 0.125$

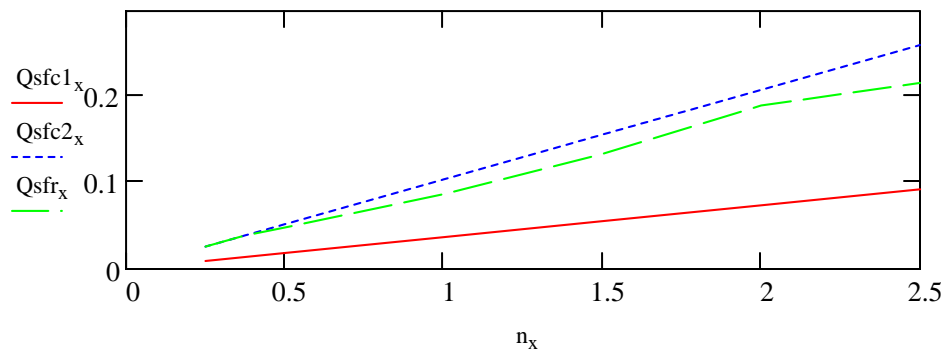
Diámetro del tornillo: $D := 80.9 \cdot \text{mm}$

Paso del tornillo: $P := 72 \cdot \text{mm}$

Peso volumétrico del material a transportar: $\rho_1 := 800 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\rho_2 := 2250 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Frecuencia de rotación del tornillo Productividad del transportador de tornillo sin fin

$n_x :=$	Experimental $Q_{sfr_x} :=$	Calculada: ρ_1 $Q_{sfc1_x} := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot P \cdot n_x \cdot \Psi \cdot \rho_1$	Calculada: ρ_2 $Q_{sfc2_x} := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot P \cdot n_x \cdot \Psi \cdot \rho_2$																																
$15 \cdot \text{min}^{-1}$	$93.6 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$																																		
$22.5 \cdot \text{min}^{-1}$	$140.4 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$																																		
$30 \cdot \text{min}^{-1}$	$172.8 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$																																		
$60 \cdot \text{min}^{-1}$	$313.2 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$																																		
$90 \cdot \text{min}^{-1}$	$481.2 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$																																		
$120 \cdot \text{min}^{-1}$	$684 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$																																		
$150 \cdot \text{min}^{-1}$	$778.5 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$																																		
		<table border="1"> <tr><td></td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>33.309</td></tr> <tr><td>1</td><td>49.964</td></tr> <tr><td>2</td><td>66.618</td></tr> <tr><td>3</td><td>133.236</td></tr> <tr><td>4</td><td>199.854</td></tr> <tr><td>5</td><td>266.472</td></tr> <tr><td>6</td><td>333.09</td></tr> </table>		0	0	33.309	1	49.964	2	66.618	3	133.236	4	199.854	5	266.472	6	333.09	<table border="1"> <tr><td></td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>93.682</td></tr> <tr><td>1</td><td>140.522</td></tr> <tr><td>2</td><td>187.363</td></tr> <tr><td>3</td><td>374.727</td></tr> <tr><td>4</td><td>562.09</td></tr> <tr><td>5</td><td>749.453</td></tr> <tr><td>6</td><td>936.816</td></tr> </table>		0	0	93.682	1	140.522	2	187.363	3	374.727	4	562.09	5	749.453	6	936.816
	0																																		
0	33.309																																		
1	49.964																																		
2	66.618																																		
3	133.236																																		
4	199.854																																		
5	266.472																																		
6	333.09																																		
	0																																		
0	93.682																																		
1	140.522																																		
2	187.363																																		
3	374.727																																		
4	562.09																																		
5	749.453																																		
6	936.816																																		





Anexo 2 Evaluación del enfriador de mineral

$x := 0, 1 \dots 2$

Datos del enfriador

$D := 0.3040\text{m}$ Diámetro interior

$D_e := 0.308\cdot\text{m}$ Diámetro exterior

$L_e := 3\text{m}$ Longitud

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

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

$131.56 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$
$296.21 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$
$380.47 \cdot \text{kg} \cdot \text{hr}^{-1}$

Flujo de mineral reducido

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

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

115.518
260.091
334.077

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

Calor específico del mineral

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

TEMPERATURAS DE:

- la pared

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

309.15K
318.15K
329.15K

- el agua en la piscina

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

302.15·K
303.15·K
304.15·K

- entrada del mineral

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

958.91·K
969.86·K
974.85K

- salida del mineral

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

366.64·K
484.04·K
601.01K

- **entrada del agua** $\theta_{\text{e}_{\text{agua}}} := 301.15 \cdot \text{K}$

- **saturación del agua** $\theta_{\text{sat}_{\text{agua}}} := 373.15 \cdot \text{K}$

- **del aire** $\theta_{\text{aire}} := 301.15 \cdot \text{K}$

- **saturación del aire** $\theta_{\text{sat}_{\text{aire}}} := 297.15 \cdot \text{K}$

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

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

Número de:

Reynolds

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

$$Re_{\text{aire}} = 4.264 \times 10^4$$

Schmidt

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

$$Sc = 0.611$$

Sherwood

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

$$Sh = 127.025$$

Volumen específico del vapor de agua a 28°C

$$v_{va} := 36.9703 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Densidad del vapor a 28°C

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

$$\rho_{va} = 0.027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Coefficiente de transferencia de masa

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

$$h_m = 0.011 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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

Calor latente de vaporización

$$h_{fg,x} :=$$

$2416.04 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2394.44 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2368.04 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$

Volumen específico

$$v_{va,s} :=$$

$24.09 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$15.4 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$9.2 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Densidad del vapor

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

$$\rho_{va,s} =$$

$0.042 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$0.065 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$0.109 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Calor específico del agua

a la entrada

$$C_{p_{\text{agua}_x}} :=$$

$41788 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$41788 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$41788 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

a la salida

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

$41782 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$41784 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$41786 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Volumen específico del agua a 32 °C

$$v_{a,ma} := 1.0035 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Flujo volumétrico de agua

$$V_{\text{agua}} := 15 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Flujo másico de agua

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

$$M_{\text{agua}} = 14.948 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

Sección ocupada por el agua entre el enfriador y la pared de la piscina $L_{secc} := 0.06 \cdot m$

Longitud del diámetro del cilindro sumergida en el agua $hs := 0.1 \cdot m$

Área ocupada por el agua

$$A_{agua} := D \cdot \left[\pi - \text{asin} \left[\frac{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{De}{2}\right)^2 - \left(\frac{De}{2} - hs\right)^2}}{De} \right] \right] + L_{secc} \cdot Le \quad A_{agua} = 1.939 \text{ m}^2$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire

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

74.934
162.124
296.17

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

Pérdida de calor al medioambiente

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

$$Q_{ma_x} =$$

145.32
628.813
1.723·10 ³

 W

Cantidad de agua vaporizada

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

$$Na_x =$$

1.083
2.836
6.112

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

Calor absorbido por el agua

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

$$Q_{agua_x} =$$

6.162·10 ³
1.054·10 ⁴
9.502·10 ³

 W

Calor cedido por el mineral

$$Q_{m_x} := M_{Red_x} \cdot Cpm \cdot (\theta_{e_x} - \theta_{s_x})$$

$$Q_{m_x} =$$

1.838·10 ⁴
3.394·10 ⁴
3.355·10 ⁴

 W

Eficiencia del enfriador

$$Ee_{f_x} := \frac{(\theta_{e_x} - \theta_{s_x}) \cdot 100}{\theta_{e_x}}$$

$$Ee_{f_x} =$$

61.765
50.092
38.348