

TESIS EN OPCION AL TITULO DE MASTER EN CIENCIAS TECNICAS
--

**TÍTULO: MODELACION FISICO-MATEMATICA DEL PROCESO DE
ENFRIAMIENTO DE MINERAL EN CILINDROS
ROTATORIOS DE LA PLANTA HORNO DE REDUCCION
DE LA EMPRESA “COMANDANTE ERNESTO CHE
GUEVARA”**

AUTOR: Ing. EVER GÓNGORA LEYVA

**TUTORES: Dr.C. Ing. ANGEL COLUMBIÉ NAVARRO
Dr.C. Ing. ENRIQUE TORRES TAMAYO**

SUMMARY

The investigation entitled: Physical – Mathematical modeling of the cooling of minerals reduced in rotatory cylinder of the reduction ovens plant pertaining to the company “Ernesto Che Guevara” in Moa. Was realized with the objective of establishing an empirical – theoretical model for the process that would permit the evaluation of the phenomena of heat transfer that exists in the installation so as to contribute to an increase in the thermic efficiency of the mentioned process.

Revision and analysis of previous studies on the subject was made along with the evaluation of the actual condition of the cooling process to establish the base for mathematical modeling.

A theory model was established for the cooling process in the cylinders of the rotatory oven reduction plant along with the process for the solution of the mentioned. The results were validated by counterpositioning the experimental results to those obtained with the aid of the model.

This study details the economic, social and ambiental evaluation of the stated proposal, bearing fruit to four conclusions, two recommendations, the consulted bibliography and the annexes that include tables of contents and images of physical data and of the proper installation.

RESUMEN

La presente investigación titulada: Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento del mineral reducido en cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción perteneciente a la empresa “Ernesto Che Guevara” de Moa, se realizó con el objetivo de establecer un modelo empírico-teórico que permita describir el comportamiento dinámico del fenómeno de transferencia de calor existente en la instalación y con ello contribuir a elevar la eficiencia térmica del mencionado proceso.

Se realizó la revisión y el análisis de los trabajos precedentes que sobre la temática estudiada han sido publicados, valorando el estado actual de los procesos de enfriamiento, estableciendo además las bases de la modelación matemática.

Luego se estableció el modelo teórico para el proceso de enfriamiento en los cilindros rotatorios de la planta hornos de reducción, así como el procedimiento para la solución del mismo, realizándose la preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud, utilizando para ello la media de los resultados experimentales obtenidos.

En el trabajo se refleja la valoración económica, social y ambiental de la propuesta estudiada emitiéndose cinco conclusiones, tres recomendaciones, la bibliografía consultada y los anexos que incluyen tablas de contenido, hojas de cálculos realizados en MathCAD Proffesional e imágenes de las tomas de datos del proceso y de la instalación respectivamente.

INDICE

Contenido	Págs.
Introducción	1
Capítulo I Marco teórico- metodológico de la investigación	6
1.1- Introducción	6
1.2- Trabajos precedentes	6
1.3- Flujo tecnológico para la obtención del producto final	11
1.4- Proceso tecnológico de la Planta de Hornos de Reducción	14
1.5- Descripción de la instalación de estudio	17
1.6- Estado actual de la automatización del proceso de enfriamiento del ineral	19
1.7- Análisis del Proceso de enfriamiento del mineral reducido como objeto de modelación físico-matemática	21
1.8- Conclusiones del capítulo I	25
Capítulo II Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios	26
2.1- Introducción	26
2.2- Fundamentos teóricos para la modelación matemática del enfriador	26
2.3- Definición del modelo teórico para el proceso de enfriamiento	29
2.4- Conclusiones del capítulo II	43
Capítulo III Resultados experimentales e identificación preliminar del modelo físico-matemático en el proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios	44
3.1- Introducción	44
3.2- Instalación experimental	44
3.3- Diseño experimental	46
3.4- Técnica experimental	47
3.5- Procesamiento estadístico de los resultados	48
3.6- Preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor.	49
3.7- Comportamiento de la temperatura del mineral a la salida del enfriador en función de los coeficientes preidentificados.	54
3.8- Conclusiones del Capítulo III	61
Capítulo IV Valoración técnico - económica e impacto social y ambiental	62
4.1- Introducción	62
4.2- Valoración técnico-económica	63
4.3- Impacto social	66
4.4- Impacto ambiental	67
4.5- Conclusiones del capítulo IV	76
Conclusiones	78
Recomendaciones	79
Bibliografía.	80
Anexos.	

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. Actualmente se encuentra enfrascada en dos grandes procesos: el de modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos en la producción de cada tonelada de níquel, y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional. Este último como proceso integral no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica (Mesa redonda Enero 30 del 2001).

Existen dos fábricas en funcionamiento para la obtención de concentrado de Níquel más Cobalto con tecnología carbonato amoniacal: las Empresas “René Ramos Latour”, y la “Comandante Ernesto Che Guevara”, empresa estatal socialista que se ha desarrollado profundamente a partir de la década pasada, lo cual se refleja en los índices de producción logrados en ella, que sin lugar a dudas han contribuido exitosamente a la reanimación de nuestra economía, dando valiosos aportes económicos en aras del desarrollo social.

La fábrica se encuentra ubicada al norte del yacimiento de mineral en Punta Gorda, provincia de Holguín entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la Ciudad de Moa y a 2 km del pueblo de Punta Gorda. El puerto marítimo encargado de facilitar las materias primas necesarias, así como la actividad mercantil, se halla a unos 3 km al noroeste de la fábrica. En esta región se ubica una de las mayores reservas minerales de Níquel del mundo, aspecto que ha funcionado como inductor de un gran desarrollo socioeconómico local y regional.

El proceso tecnológico de la fábrica de Níquel de Punta Gorda está basado en el esquema de lixiviación carbonato – amoniacal, o proceso CARON, según el cual el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente. Esta tecnología comienza con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos de níquel de Punta Gorda, incorporándose al flujo tecnológico, por la planta de Secaderos y Molinos, a partir de este momento el material circula por las diferentes

plantas del proceso entre las que se encuentran: la planta de Hornos de Reducción, la planta de Lixiviación y Lavado, y la planta de Calcinación y Sínter, donde culmina el proceso CARON con la obtención del sínter de níquel más cobalto.

Esta tecnología puesta en práctica durante muchos años en nuestro país, ha funcionado según dicho esquema en la fábrica de Nicaro, fundada en los años de la segunda guerra mundial.

El proceso de lixiviación carbonato – amoniacal en la fábrica Ernesto Che Guevara se caracteriza por ser un proceso donde el equipamiento tecnológico utilizado se distingue por su sencillez y la utilización de equipos conocidos (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación, etc.). Favoreciendo la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniacal admite la elaboración de las mezclas de los minerales limoníticos y serpentínicos, mientras que el esquema por ejemplo de lixiviación ácida permite solamente la elaboración de la fracción limonítica.

Al mismo tiempo este proceso se realiza con un consumo de reactivos relativamente pequeño. El único que se utiliza en cantidades grandes es el amoníaco, su consumo es necesario solo para compensar las pérdidas mecánicas.

Fundamento de la investigación

Las nuevas tendencias relacionadas con el incremento de los niveles productivos y el vertiginoso desarrollo de La Unión del Níquel, demandan que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficiencia metalúrgica de los mismos.

Dentro de una industria metalúrgica existen complejos sistemas que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas, algunos de esos están ubicados en la planta de Hornos de Reducción y son los enfriadores de mineral, quienes juegan un papel esencial dentro del proceso, pues en ellos se debe enfriar el mineral desde la temperatura ($t=650-700^{\circ}C$) a la salida del horno hasta la temperatura ($t=200^{\circ}C$) que sale del enfriador para pasar al proceso de Lixiviación y Lavado.

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

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

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*:

- ✓ El insuficiente conocimiento teórico acerca del mismo.
- ✓ La baja eficiencia térmica del proceso de transferencia de calor presente en los enfriadores.
- ✓ Las limitaciones de los métodos existentes para la selección y cálculo de los parámetros racionales del proceso de enfriamiento.

A partir de las deficiencias expresadas se declara como ***situación problemática actual***:

Las elevadas temperaturas del mineral a la salida del proceso de enfriamiento (mayor de 200°C) en la planta de hornos de reducción de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara impiden el desarrollo óptimo del proceso de Lixiviación y lavado.

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

El *proceso de enfriamiento del mineral reducido* que tiene lugar en el enfriador cilíndrico rotatorio de la planta de Hornos de Reducción.

El correcto análisis de esta problemática exige una evaluación integral del enfriador de mineral dada la gran complejidad del proceso de transferencia de calor, desde el punto de vista tecnológico y académico, de esta manera se requieren encontrar

soluciones que permitan mejorar los índices de eficiencia del objeto mediante un enfoque sistémico del mismo.

En los momentos actuales están creadas las bases para abordar este problema con el mínimo posible de gastos adicionales, esta afirmación está basada en el nivel de automatización alcanzado por la planta, donde se sustituyó la instrumentación obsoleta por medios técnicos modernos, más precisos, y la existencia de microcomputadoras de última generación con parámetros técnicos adecuados para el desarrollo de la investigación lo cual permite el acceso rápido y eficiente a un gran volumen de información sobre el proceso y su posterior procesamiento confiable.

*Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis científica**:*

Es posible establecer un modelo Físico-Matemático adecuado del proceso de enfriamiento del mineral que describa el comportamiento dinámico del mismo con vistas a mejorar los parámetros de salida hasta los valores requeridos por el proceso posterior.

*En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo**:*

Establecer un modelo Físico-Matemático que describa el comportamiento dinámico del proceso de enfriamiento del mineral en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa “Ernesto Che Guevara”.

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

- 1- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el proceso de enfriamiento del mineral reducido, y el estado actual de la temática en la empresa.
- 2- Conformar el modelo Físico-Matemático del proceso en estudio.
- 3- Preidentificar los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud.
- 4- Obtener la valoración técnico-económica del proceso y las afectaciones que este provoca al medio ambiente.

Los resultados más relevantes esperados de la investigación son:

- 1- El estado del arte sobre la temática tratada.
- 2- El modelo Físico-Matemático que describa el comportamiento dinámico del proceso de enfriamiento del mineral reducido.
- 3- La valoración técnico-económica del proceso y las afectaciones provocadas al medio ambiente.

De acuerdo con la hipótesis y el objetivo propuesto, se establece como *novedad científica*:

El establecimiento del modelo empírico-teórico del proceso de enfriamiento del mineral reducido en los cilindros rotatorios de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa.

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

- ✓ Método de investigación documental y bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- ✓ Método de modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento basado en los principios físicos de la transferencia de calor.
- ✓ Método experimental para la preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud.
- ✓ Técnicas computacionales existentes para la validación del modelo.

Para el desarrollo de la investigación se toman como base los estudios que sobre el tema de modelación matemática de procesos industriales se han efectuados por Columbié (2001); Guzmán (2001); Torres (2003), así como la información recopilada de trabajos de investigación y tesis de grado realizadas en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara y René Ramos Latour.

MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

La planta de Hornos de Reducción tiene una importancia vital dentro del proceso de obtención del Níquel, por cuanto, es en esta donde se crean las condiciones (reducción de los óxidos de Níquel y Cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica. Un eslabón importante de la planta lo constituyen los enfriadores de mineral (donde ocurre el proceso de enfriamiento), de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de Lixiviación y Lavado, en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos del proceso de enfriamiento del mineral como base para realizar la modelación físico-matemática del mismo en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa.

1.2- Trabajos precedentes

Una investigación científica de acuerdo con lo planteado por Aróstegui (1978), en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por una investigación teórica y empírica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto, del planteamiento del problema, la hipótesis, los objetivos, y las tareas.

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

Respecto al primer elemento, resulta muy útil la revisión de los trabajos de Mesarovich (1996) que aborda la temática relacionada con la teoría general de los sistemas y la metodología de las investigaciones sistémicas. Hurtado (1999) y Guzmán (2001) conceptualizan con claridad los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador su empleo para sustentar

teóricamente la investigación. A pesar de que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia se mantiene vigente.

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

Aportaron considerablemente los conceptos de Incropera (2003), que abordan la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de masa y calor, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas, en este trabajo se exponen diferentes situaciones prácticas donde se vinculan los fenómenos de transferencia de calor con los equipos e instalaciones existentes en las industrias metalúrgicas, así como en otras empresas donde se encuentran la ocurrencia de fenómenos térmicos.

Por su parte Houge (1978) establece los aspectos fundamentales de la transferencia de la materia y las leyes de conservación de la energía.

Con respecto al segundo elemento se han realizado estudios con profundidad de la mecánica de movimiento del material en cilindros rotatorios, Sverdlik y Gregoreu (1979), establecieron las peculiaridades del paso del movimiento de materiales en un tambor rotatorio.

Gran interés le dedican Boateng y Barr (1996), al comportamiento de un flujo granular en el plano transversal de un cilindro rotatorio parcialmente lleno, ellos realizaron un estudio con el objetivo de comprender y probar las capacidades predictivas del comportamiento reológico de materiales en cilindros rotatorios. En este caso fueron medidas características de flujo tales como: la velocidad de las partículas, la temperatura granular y la concentración de sólido para diferentes materiales, teniendo un amplio rango de los coeficientes de restitución.

Los resultados de los experimentos proporcionan las suposiciones, restricciones y los datos necesarios para la comprensión del comportamiento de flujos granulares en cilindros rotatorios parcialmente llenos.

Kahkhar y otros colaboradores (1997) dedican la atención a la segregación radial de mezclas granulares en cilindros rotatorios y analizan la formación de costras debido a la densidad del material. El régimen de flujo considerado es en cascada o el régimen de flujo continuo donde una capa delgada de sólido fluye a lo largo de una pequeña superficie, mientras las restantes partículas rotan como un lecho compacto a lo largo del cilindro. La esencia de la formación de la costra segregada central consiste en el flujo, el mezclado y la segregación en la capa en cascada. Este trabajo incluye los resultados experimentales y su análisis, con la propuesta de un modelo constitutivo para el flujo de segregación en las capas en cascada, el cual es validado para la dinámica de las partículas y con la simulación de Monte Carlo para el flujo estacionario en un plano inclinado hacia abajo. El modelo contiene un único parámetro, la velocidad de segregación adimensional (Beta), que es tratado como un parámetro de ajuste. Se muestran los resultados experimentales para la segregación equilibrada de bolas de acero y de vidrio para diferentes fracciones y grados de llenado, existiendo una gran coincidencia entre las predicciones teóricas y los experimentos cuando el valor de la velocidad de segregación adimensional es igual a 2.

Sai y otros (1992) reportaron los datos experimentales para la respuesta transitoria de los cilindros rotatorios en término de la variación en la velocidad de descarga del sólido para un tiempo en el intervalo en las condiciones de operación; la velocidad en la alimentación del sólido, la velocidad de rotación y la inclinación del cilindro.

Perron y Bui (1994) propusieron un modelo no lineal para predecir la respuesta transitoria en los cilindros rotatorios teniendo en cuenta la velocidad total en la cama que sigue al modo despacio. Ellos validaron el modelo usando los datos reportados por Sai y otros (1992). La validación del modelo fue basado en una corrida experimental para la velocidad del sólido alimentado, velocidad de rotación e inclinación del cilindro.

En general la literatura recoge pocos intentos de estudios experimentales de los cilindros rotatorios al parecer por la dificultad de realizar mediciones en dicho agregado, particularmente en condiciones industriales. Las más relevantes de estas han involucrado a hornos tubulares rotatorios de amplia escala, pero debido a lo mencionado anteriormente carecen de una data de flujo de calor preciso y

adecuado. El descubrimiento más significativo en este sentido es la importancia del mezclado del sólido para la transferencia total de calor a la capa, obtenido por Foliot (1955), quien realizó mediciones del flujo de calor en un horno experimental de cemento de $2,75 \times 24m$ y fue uno de los primeros en enfatizar este hecho. Él estableció que el flujo de calor hacia la capa puede ser visto como un proceso en dos etapas que incluyen la transferencia de calor a una fina capa hacia el interior del mismo.

Según Guzmán (2001), la modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas de procesos, ofrece un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones derivadas de la modelación de toda una planta o parte de la producción. Los últimos avances en el campo de la simulación, en programas como el MATLAB, permiten obtener con gran exactitud estas soluciones a una gran velocidad, se pueden seleccionar para ello varios métodos numéricos. De igual forma para componer las ecuaciones de un objeto en la industria metalúrgica, los que representan complejos sistemas dinámicos, es necesario despreocuparse de una serie de factores secundarios y sí tener en cuenta los principales: de entrada, salida y perturbaciones que influyen en la dinámica del mismo; a la vez, la sencillez del modelo conformado debe contener las principales peculiaridades del proceso investigado.

A la modelación de procesos también han sido dedicados algunos trabajos recientemente, dentro de los que se encuentran Bui (1997), éste realizó un trabajo sobre modelos de procesos que incluyen el flujo de fluidos y la transferencia de calor y se extiende a todas las categorías importantes de los procesos encontrados en la industria primaria del aluminio, desde el procesamiento de la materia prima y la reducción, hasta la fundición y el reciclaje. Se incluye una amplia variedad de procesos desde los precipitadores, calcinadores, hornos rotatorios, celdas de reducción y hornos de mezclado y de fundición, hasta los hornos de reciclaje y filtración de metales; se lleva a cabo un repaso del trabajo de modelación, las aplicaciones y necesidades expresadas no solo en el análisis y diseño sino también el control del proceso, optimización y supervisión, incluyendo el entrenamiento del operador. Se da un sumario de los problemas percibidos, fundamentalmente en el campo de los parámetros de los modelos y la validación de estos, además de las indicaciones de las tendencias futuras.

Columbié (2001) estableció el modelo matemático para el control integral del proceso de calcinación del Carbonato Básico de Níquel en el horno tubular rotatorio, quedando este conformado por 9 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el comportamiento dinámico del objeto, determinó la dirección del proceso definiéndose como criterio de calidad, el mantenimiento del perfil térmico del horno, este trabajo también aporta ecuaciones importantes que por primera vez aparecen en la bibliografía para el análisis de los procesos de transferencia de calor de gran complejidad.

Fue de mucho interés el trabajo realizado por Correa (2000), en éste se realiza un balance energético a los enfriadores de mineral y muestra aspectos importantes relacionados con el fenómeno físico que tiene lugar dentro de los mismos, exponiendo además las consideraciones en las que debe estar basado el modelo físico-matemático de estos equipos, entre las que se pueden citar:

- El crecimiento de la película de agua en la superficie del tambor desde el instante t_1 en el punto de contacto hasta la última capa t_f en el punto β_2 .
- La transferencia de calor a través de la película de agua en la superficie del tambor es gobernado por el flujo de calor convectivo en estado no estacionario unidimensional.
- El contacto térmico entre la película del líquido puede no ser perfecto, propensa a la formación de burbujas de aire.
- No hay deslizamiento entre el tambor y la película del líquido durante la rotación.
- Las propiedades termofísicas de la película de agua y del tambor son asumidas independiente de la temperatura.
- La evaporación del agua ocurre a temperatura constante teniendo como promedio la temperatura del tambor y la de la película de agua y las pérdidas de calor a través de la pared de la piscina son despreciables.

Como se puede apreciar no existe suficiente información sobre el proceso de enfriamiento del mineral en los materiales consultados. En el manual de operaciones de la planta de hornos de reducción de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (1985) solo se encuentran algunos datos de la instalación utilizada actualmente.

De todo lo expresado resulta evidente que la consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática en estudio. En su mayoría aborda elementos aislados del proceso de transferencia de calor en cilindros rotatorios el cual se encuentra poco estudiado desde los puntos de vista aquí tratados. Esto impone la necesidad de realizar una investigación que contribuya a una mayor eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral reducido, lo cual representará una incursión novedosa en este campo para las industrias cubanas del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

1.3- Flujo tecnológico para la obtención del producto final

La infraestructura de la Empresa comprende el yacimiento, las instalaciones de la mina, las plantas desde la de preparación del mineral hasta el producto final, la presa de cola, la base de amoníaco, la base de carbón, la base de combustible y la planta potabilizadora de agua.

El proceso tecnológico está basado en la lixiviación carbonato-amoniacal (tecnología CARON), en 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, con una ley aproximadamente de 1,3 % de níquel, siendo transportado hasta el complejo industrial en camiones marca KOMATSU, BELAZ y VOLVO.

En la industria, el mineral se incorpora al flujo tecnológico por la Planta de secaderos y Molinos, donde es descargado en las tolvas de recepción, con dos sistemas paralelos, uno trabajando y el otro de reserva. Luego en las cribas estacionarias es separada la porción >450 mm como rechazo, para después pasar a la trituradora primaria y posteriormente a las zarandas que separan la fracción de 100 mm, la cual se envía mediante un sistema de transportadores de bandas al depósito de homogenización, la fracción de más de 100 mm se envía al triturador de martillo para ser reducido, todo el proceso de descarga del mineral se realiza por medio de grúas viajeras "Jaiba".

Una vez homogenizado, el mineral es enviado al proceso de secado, reduciéndose en éste la humedad hasta 4,5 % y enviándose luego a la sección de molienda, mediante transportadores de bandas; en los cuales se le agrega al mineral alrededor

de 2,9 % de petróleo tecnológico, logrando una homogenización bastante completa; ya en molienda se almacena en cuatro tolvas provistas de alimentadores de discos, con el objetivo de lograr una alimentación dosificada a los molinos. Cada tolva alimenta un molino de bolas donde se obtiene un producto de granulometría de la clase 0,074 mm en un 80 %. El mineral es extraído de los molinos mediante succión con aire producido por un ventilador de tiro con recirculación de 134000 m³/h de capacidad, pasando a un clasificador neumático, recirculando todo el material que está fuera de especificaciones hasta obtener la granulometría deseada.

El mineral seco y triturado es enviado a la Planta de Hornos de Reducción donde ocurre la reducción del óxido de níquel (ver explicación detallada en el epígrafe 1.4). Luego el mineral es enviado a los enfriadores donde cede calor y se enfría para ser mezclado con licor amoniacal de retorno en la canal de prelixiviación de la cual pasa a los tanques de contacto.

Ya en la Planta de Lixiviación y Lavado, el mineral pasa a través de tres sistemas paralelos de lixiviación de tres etapas a contracorriente, la lixiviación se lleva a cabo con licor carbonato amoniacal que contiene el 6 % de Amoníaco y 3 % de Ácido Carbónico mediante la formación de la pulpa.

En cada etapa de la lixiviación se encuentran turboaeradores y sedimentadores conectados en serie. Luego de la tercera etapa de lixiviación las colas se dividen en dos partes iguales que se dirigen hacia dos sistemas paralelos de cinco etapas de lavado, el cual se realiza con licor carbonato amoniacal fuerte y fresco que se aplica en la tercera etapa de lavado.

El licor se evacua desde el sistema de lixiviación y lavado por dos puntos en forma de licor producto después de la primera etapa de lixiviación; y en forma de la fase líquida de la pulpa de cola desde la quinta etapa de lavado. Este licor producto y la pulpa de colas se bombean a la Planta de Recuperación de Amoníaco donde se extrae el níquel en forma de carbonato básico y se recupera el amoníaco.

El licor desde la segunda etapa de lixiviación y una parte de la primera, se enfría en los intercambiadores de calor tubulares con agua y se dirigen a la planta de Hornos de Reducción para mezclarse con el mineral reducido. Los gases que se evacuan desde los resecadores, así como productos de la aspiración se dirigen al sistema de

captación de amoníaco, consistente en tres líneas paralelas de absorción (cinco en cada línea) que son regados con agua. Finalmente el licor amoniacal débil obtenido se enfría en el lavado y se aplica en la quinta etapa del mismo.

El licor producto pasa por tres etapas de aereación en la Planta de Recuperación de Amoníaco, con el fin de oxidar y precipitar el hierro, el cual es filtrado y enviado a los alambiques pasando de plato a plato donde es tratado con vapor que se introduce a contracorriente por la parte inferior.

Durante este proceso el amoníaco se elimina del licor y se precipita el Carbonato Básico de Níquel. La pulpa de carbonato es enviada a los espesadores, el rebose de los mismos es filtrado en los filtros de cartuchos y el flujo de la parte inferior en los discos de vacío. La pulpa de cola es enviada para ser destilada en los alambiques y el producto de desecho se bombea al depósito de colas.

Los gases de la destilación del licor producto y de las pulpas de colas después de haberse enfriado previamente, se envían al sistema de absorción para obtener un licor amoniacal fuerte. Este sistema está compuesto por cuatro líneas paralelas de torres de absorción unidas en serie que son regadas tanto con agua como con licor de retorno y que constituyen la primera etapa de absorción. En la segunda etapa se aplican los gases que contienen ácido carbónico para compensar las pérdidas durante el proceso.

El licor amoniacal fuerte obtenido en el sistema de absorción se emplea en el sistema de lavado y se alimenta a la tercera etapa, la pérdida de amoníaco se compensa suministrando NH_4OH del depósito al sistema de absorción. Otro componente que forma parte de la Planta de Lixiviación y Lavado es lo que se conoce en la Empresa como la Planta de Cobalto, la cual constituye un esquema corto de la misma. En ésta se obtiene Ni y Co en forma de sulfuro como resultado de la dosificación del licor producto con Hidrosulfuro de Amonio, rebajando el contenido de Co en el producto final de la Planta de Sínter. En la actualidad ha pasado a ser un producto de salida más de la Empresa con un mercado estable.

La tecnología CARON culmina con los procesos de la Planta de calcinación y Sínter donde se obtiene el producto final. El carbonato básico de níquel húmedo se somete a un proceso de calcinación, donde es transformado en óxido de níquel, el cual se

sinteriza para lograr finalmente el Sínter de Níquel de aproximadamente (86 - 91)% de níquel, listo para ser exportado y comercializado.

Para que el proceso tecnológico se pueda realizar son imprescindible otras plantas auxiliares, tal es el caso de la Base de Amoníaco la cual recepciona y almacena este producto para su uso en el proceso de lixiviación; la Base de carbón ubicada en las áreas del puerto de Moa, recepciona y beneficia el carbón que se utiliza como reductor en la sinterización del óxido de níquel; la Base de Combustible recepciona y distribuye el combustible para todas las instalaciones de la Empresa y la Planta Potabilizadora ubicada en el camino hacia el poblado de la Veguita, está encargada de la limpieza mecánica del agua que posteriormente será utilizada en la industria.

1.4- Proceso tecnológico de la Planta de Hornos de Reducción

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal. Para ello la planta cuenta con la instalación de 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores.

El mineral, después de pasar por la sección de molienda, es enviado mediante transporte neumático a los silos (225 – SI) como forma de almacenaje, los cuales tienen una capacidad de 1500 t cada uno (6 silos), lo que facilita una operación en los hornos de unas 16 horas. El llenado de los silos se hace de forma cruzada para mantener equilibrado el peso y que la estructura no se deforme. Las tuberías (1,2,4) alimentan los silos impares y las tuberías (3,5,6) alimentan los silos pares, estas tuberías están dotadas de conmutadores (tres por cada silo) de forma tal que garantice el llenado del silo, una vez que el silo está cargado con ayuda del conmutador se desvía la alimentación para el siguiente silo, a diferencia de los silos 5 y 6 que no poseen conmutadores y su llenado se realiza de forma directa. El mineral se alimenta por la parte superior y por la parte inferior se inyecta aire comprimido para mantener el mineral en suspensión. En la sección de los silos se encuentran 9 bombas tipo TA-36 (225- BO) de una capacidad de 120 t/h hora, mediante las cuales el mineral es bombeado hasta las tolvas de los hornos (225 TV) que son 12 en total, dispuestas una para cada dos hornos. Estas tolvas permiten realizar una operación de 8 horas a cada horno.

Una vez el mineral en las tolvas, este pasa a los dosificadores de pesaje automático (225 – BA – 201) que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del pesaje que este realiza de acuerdo al tonelaje fijado, estos equipos tienen una capacidad hasta de 22 t/h.

Después que el mineral es pesado, se produce la descarga del mismo al sinfín alimentador (225- TR- 202) el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero.

El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores ($\text{CO} - \text{H}_2$) para ello el horno dispone de 10 cámaras de combustión dispuestas en los hogares 15, 12, 10, 8 y 6 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases para el calentamiento del mineral, lo cual permite además de lograr el perfil de temperatura enriquecer la atmósfera reductora del horno ya que trabaja con combustión incompleta.

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

El proceso de reducción se efectúa en un horno de hogares múltiples tipo IIM 17 K-6,8 de 23,5 m de alto y 6,8 m de diámetro, con 17 hogares o soleras. Además, el horno (225- HR- 205). Cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas con la que mediante la rotación del eje central facilitan el traslado de mineral de un hogar a otro.

Este movimiento o traslado del mineral de un hogar a otro se realiza en forma de zigzag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

Los gases que salen del horno arrastran consigo partículas muy finas de mineral, las cuales se hace necesario recuperar para evitar mayores pérdidas en el proceso, para ello, el taller cuenta con un sistema de limpieza de gases formado por un grupo de 6 ciclones en cada horno, 12 electrofiltros y un electrofiltro en la sección de los

silos para la purificación del aire del transporte neumático y del aire de succión de las tolvas.

El mineral recuperado en la batería de ciclones cae por gravedad al horno a través del hogar 0. El mineral que se recupera en los electrofiltros es transportado por unos transportadores de paleta hacia una tolva, debajo de la cual se encuentran unas bombas neumáticas de 120 t/h de capacidad, las cuales envían el mineral hacia las tolvas de los molinos para más tarde ser bombeado hacia los silos formando así el ciclo de la planta de Hornos de reducción.

Así el mineral en su descenso es sometido a un perfil ascendente de temperatura que permite un calentamiento gradual, a la vez que penetra en un perfil gaseoso que garantiza un aumento en la concentración de reductores. La atmósfera reductora es controlada mediante la relación CO_2 / CO en H-10 que debe ser de 1,2 %. Un perfil típico de temperatura es como sigue:

Hogar	T Gas	Hogar	T Gas
H0	350 °C	H9	710 °C
H4	720 °C	H11	720 °C
H6	690 °C	H13	740 °C
H7	695 °C	H15	760 °C

En estas condiciones, es posible el desarrollo de las reacciones de reducción a pesar del corto tiempo de retención del mineral en el horno (90 min).

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

Esta operación se complementa con la introducción de aire en los hogares 4 y 6 ($2000 \text{ m}^3/\text{h}$) para la postcombustión de los gases con un cierto contenido de CO y H_2 no consumidos en la reacción química, para evitar un incremento de las concentraciones de los mismos en el sistema de limpieza de gases (precipitador electrostático), al mismo tiempo se aprovecha el calor de reacción exotérmica liberado en la combustión para facilitar el perfil de temperatura ideal en el horno.

➤ $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 67\,600 \text{ kcal/kmol}$

➤ $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 57\,800 \text{ kcal/kmol}$

1.5- Descripción de la instalación de estudio

Después que el mineral sale de los hornos es transportado por el tambor rotatorio (ver anexo figura 3) cuya función es transportar el mineral reducido de los hornos hasta el enfriador.

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

El cuerpo del transportador consta de 10 secciones, en cada una se halla una llanta, un extremo del cual está fijado inmóvil y el segundo, durante el calentamiento puede desplazarse en el apoyo. La longitud de las llantas es menor que la longitud de la sección para la magnitud de la holgura de temperatura. Los desempalmes de las secciones están fijados con pernos.

En la parte del medio del cuerpo se ha colocado una corona dentada de accionamiento. Las llantas así como la corona dentada están colocadas entre las bridas de la sección del cuerpo. En los lugares de instalación de los dispositivos de carga en el cuerpo del transportador existen orificios equipados de cangilones para la carga del material en el interior de los tubos.

El dispositivo de carga es una estructura metálica de desempalme de acero e chapas termo resistente, a su parte inferior se fija además del dispositivo de carga a través del conjunto de juntas. Para las partes cilíndricas refrenadas que abarca el cuerpo del transportador, se fijan las empaquetaduras. Bajo los orificios superiores existe una rejilla con accionamiento neumático de agitación. El eje de los barrotes de la rejilla se enfría con agua. En la parte inferior del dispositivo una escorilla se abre manualmente, en caso de necesidad de descarga. El accionamiento neumático de agitación de la rejilla se conecta automáticamente 3 veces al día 220 minutos, con

una frecuencia de 20 ciclos por minutos, el tiempo se determina por la explotación. El bastidor del dispositivo de carga se coloca en el cimiento.

El accionamiento del transportador está previsto de un motor eléctrico del tipo 4A200L6T2 con alimentación de la red de corriente alterna con una frecuencia de 60 Hz y una tensión de 440V, el reductor cilíndrico de 2 escalones y el par dentado abierto. El accionamiento se coloca en el bastidor separador. El eje del motor eléctrico está unido a un eje de marcha rápida del reductor a través del acoplamiento elástico del manguito. El eje de marcha lenta está unido con el eje de engranaje subcoronario con ayuda del acoplamiento dentado, bajo las plantillas del motor eléctrico existe un grupo de juntas reguladas. El sistema de colección de agua enfriada consta de una serie de cientos de tuberías de comunicación colocados bajo las acciones. En el rebordeado de las aristas superiores, las tinajas tienen orificios para su suspensión a la estructura del techo de la planta.

Su construcción es de acero resistente a altas temperaturas. El helicoide se construye generalmente de secciones (chapas de acero estampadas de 4 a 8 mm). Las secciones se sueldan al eje y entre si, en ocasiones, el helicoide es conformado en frío y construido en forma continua, puede construirse integralmente (en una sola pieza) con el eje o en segmento tubulares montados en el eje. El eje y el helicoide se construyen por tramos (de 2 a 4 m de largo) los cuales se ensamblan para lograr la longitud deseada del conductor.

El accionamiento es motor–reductor, cadena–sprockets, posee encamisado para el agua de enfriamiento y reducir la temperatura del mineral, además de empaquetaduras en ambos cabezales de enfriamiento al eje.

El mineral después de pasar por el transportador rotatorio es descargado en el enfriador rotatorio (225 – TR- 207), el cual tiene como función enfriar el mineral reducido que sale del horno hasta una temperatura por debajo de 200 °C para luego enviarlo al proceso de Lixiviación. Ellos están diseñados para enfriar el mineral reducido que contiene Níquel y una parte de hierro oxidado con vapor en el proceso de tratamiento del mineral niquelífero por el método amoniacal en las siguientes condiciones de trabajo:

Parámetros de trabajo del enfriador	Valores Nominales
Temperatura del mineral a la entrada	650 - 700 °C
Temperatura a la salida	200 °C
Temperatura del agua en la entrada	30 °C
Presión de trabajo	0,01-0,02 KPa
Consumo de agua para enfriar el tambor.	107 m ³ /h
Consumo de agua para enfriar los cojinetes.	1 m ³ /h
Presión excesiva del agua.	300 KPa
Temperatura del agua a la salida de la piscina.	70 °C
Coeficiente de llenado del tambor con el material.	9%

El material enfriado es un mineral que contiene una granulometría de 200 mesh ($0,074mm$) que pasa al tambor a través de un muñón de tope del enfriador. Con el paso del mineral, este se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que se enfría con el agua en la piscina. Los bolsillos de transmisión tienen chapas de ajuste de metal, con ayuda de los cuales se puede regular la cantidad de mineral que se extrae del enfriador. De la cámara de salida, el mineral enfriado llega al transportador que no constituye parte del enfriador, 1/3 del diámetro del tambor enfriador está sumergido en el agua de la piscina de hormigón.

El mineral que sale del enfriador cae a una de las canales de Lixiviación (225-CD-211-212), por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal formando una pulpa que va a los tanques de contacto (225-TK-213), los cuales tienen una capacidad de 70 m³. Esta pulpa es bombeada a la planta de lixiviación y lavado mediante las bombas instaladas modelo (225-BO-214).

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

Actualmente el proceso de enfriamiento del mineral en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se encuentra desde el punto de vista de su automatización y control, en una etapa primaria, pues sólo contempla la medición y registro de varios parámetros del proceso por un autómatas programable.

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

PARAMETRO: Flujo de mineral alimentado al enfriador.

EQUIPO: Báscula de pesaje continuo, tipo WESTERDAM.

CARACTERISTICAS TECNICAS:

Alimentación	220 V AC
Entrada	0 – 18 t/h
Salida	4 – 20 mA

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

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

CARACTERISTICAS TECNICAS:

Temperatura de servicio hasta 873 K

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

Convertidor de señal programable con rango ajustado.

PARAMETRO: Temperatura del agua en la piscina.

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

CARACTERISTICAS TECNICAS:

Longitud de inmersión	250 mm
Convertidor de señal programable con rango ajustado.	273 – 393 K

PARÁMETRO: Flujo de agua que entra a la piscina.

EQUIPOS: Elemento primario de caudal tipo PITOT delta.

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

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

CARACTERISTICAS TECNICAS:

Alcance de medida ajustable	2,5 - 25 kPa
Margen de medida ajustado	0 - 15 kPa
Precisión	mejor que el 1 % incluidos la histéresis y la repetibilidad.
Rangeabilidad	1 – 10
Indicador local incorporado, analógico	escala 0 – 100 %
Conexión eléctrica	conector HAN 7D

PARÁMETRO: Velocidad de rotación del enfriador

EQUIPO: Tacogenerador.

CARACTERISTICAS TECNICAS:

0 – 8,0 rev/min 0 – 10 V

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

1.7- Análisis del Proceso de enfriamiento del mineral reducido como objeto de modelación físico-matemática

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 (ver anexo figura 4). El mineral llega a través del transportador rotatorio al enfriador, éste está seccionado en tres partes en el cual al caer el mineral es pasado por cada sección del mismo con la ayuda de los carros raspadores y paletas los cuales se encargan también de remover el mineral y raspar la superficie interior del enfriador evitando que el mineral se adhiera e interfiera en el proceso de transferencia o intercambio de calor entre el mineral y el enfriador, cada sección del mismo posee un separador circular en todo el diámetro del equipo que posibilita el tiempo de retención necesario para que el mineral se enfríe adecuadamente.

En el enfriador ocurre el estancamiento del mineral principalmente en los primeros metros del tambor, de 3 a 5 aproximadamente según cálculos de Correa (2000) y lo observado por el personal de mantenimiento de la planta al ser detenido el equipo para su reparación. Este estancamiento de mineral en la parte central de su masa se debe a la existencia de una zona muerta o vana, esta zona provoca una alta resistencia a la transferencia de calor por conducción.

Debido a los grandes volúmenes a manejar en la actualidad, es muy poco probable que los dispositivos mecánicos internos puedan mover al mineral debido a su peso, y actuarán como dispositivos estáticos o aproximadamente estáticos. Teóricamente los carros deberían mantenerse a una altura constante en la cual equilibrará su peso con las fuerzas tendientes a elevarlo, debido a que la masa de mineral no es totalmente homogénea, este en realidad debe oscilar alrededor de la posición de equilibrio. La posición del dispositivo dependerá de su peso, de la distancia al eje del enfriador, de su geometría, de la velocidad del tambor y de los volúmenes de producción.

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

El mineral es descargado en el enfriador con una temperatura entre 650 y 700 °C y el mismo transfiere calor a la superficie interior del tambor por conducción, convección y radiación, predominando considerablemente la transferencia de calor por conducción debido al contacto sólido-sólido, en este caso mineral-enfriador, también se transfiere calor por convección debido a la presencia de gases productos de la combustión que acompañan el mineral hasta el interior del cilindro, pero este modo de transmisión del calor puede ser despreciado porque solo se manifiesta cuando se forman burbujas o poros dentro de la masa de mineral, hecho este que no es frecuente en este proceso.

Desde la masa de mineral a la pared superior del equipo se transfiere el calor por radiación debido a la temperatura del mineral en el interior del enfriador. En el espesor del enfriador ($\delta = 16\text{mm}$), o sea de la pared interior a la superficie exterior el flujo de calor se transfiere por conducción; teniendo en cuenta para el posterior

análisis que es mayor la influencia de la transferencia de calor por conducción en la parte que está en contacto el mineral con el tambor (ver Figura 2.3).

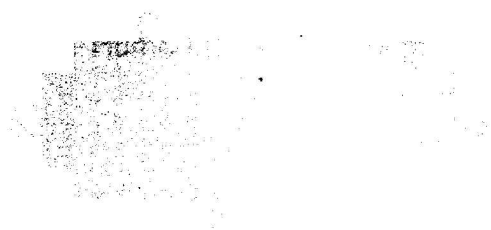
Una vez transferido el flujo de calor hasta la superficie exterior del enfriador, este intercambia calor con el agua de la piscina que se encuentra por encima de 30 °C, dando lugar al calentamiento progresivo de la misma hasta valores entre 70 y 76 °C este proceso de intercambio de calor ocurre por convección y en el mismo se le comunica velocidad al fluido lo cual provoca la convección forzada.

En la superficie no sumergida del tambor el calor se transfiere al medio ambiente por ebullición y evaporación de la película (ver anexo Figura 5) de agua y para este caso teniendo en cuenta que la variación de la temperatura en los extremos de la superficie de ebullición es de aproximadamente 1°C se puede considerar con bastante aproximación que la evaporación de la película de agua ocurre a temperatura constante en el sentido radial del cilindro y solo se considera en el sentido longitudinal.

La transferencia de calor por convección entre el enfriador y el medio ambiente es muy pequeña debido a la poca diferencia de temperaturas entre ambos, esto es resultado del efecto primario que tiene la transferencia de calor por conducción, por convección y en menor medida por ebullición. En todos los casos el flujo de calor depende de la variación de la temperatura en el sentido longitudinal del enfriador.

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

En la Figura 1.1 se muestra el esquema estructural de la interacción de los parámetros principales del proceso de enfriamiento del mineral reducido.



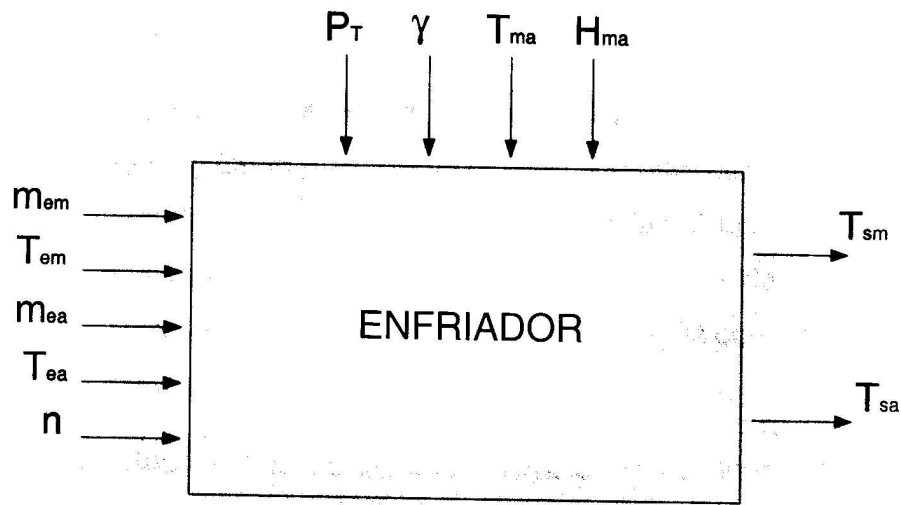


Figura 1.1 Esquema estructural del proceso de enfriamiento del mineral.

Los parámetros de entrada del proceso son:

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

Como parámetros de salida se destacan los siguientes:

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

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

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

1.8- Conclusiones del Capítulo I

- El estudio bibliográfico y de la situación actual del proceso de enfriamiento del mineral en Cuba puso de manifiesto que éste último se encuentra poco estudiado en sentido general desde el punto de vista teórico, observándose la necesidad de acometer un estudio profundo, preciso y con determinado nivel científico que conlleve a la realización de un modelo físico-matemático adecuado para el proceso.
- El estado actual de la automatización del proceso de enfriamiento del mineral evidenció la no existencia de un sistema de control integral y la etapa primaria en que este se encuentra, limitando el mismo a solo algunas mediciones de control aisladas, entre ellas: temperatura del mineral a la entrada y a la salida del enfriador respectivamente.
- El análisis del proceso como objeto de modelación físico-matemática arrojó las variables de entrada (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), de salida (temperatura del mineral a la salida del enfriador, temperatura del agua a la salida de la piscina) y las perturbaciones (presión de trabajo en el interior del enfriador, coeficiente de llenado del tambor, temperatura del medio ambiente, humedad relativa del medio ambiente).

CAPÍTULO II

MODELACIÓN FÍSICO-MATEMÁTICA DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL MINERAL EN CILINDROS ROTATORIOS

2.1- Introducción

El conocimiento del proceso, el desarrollo de modelos matemáticos 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.

Según Mason y Marjanovic (1998) el modelo no es más que una abstracción matemática del proceso real, donde la ecuación o conjunto de ecuaciones que componen el mismo es la mejor aproximación del proceso.

En este capítulo se plantea como **objetivo:**

Establecer el modelo físico-matemático adecuado para el proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

2.2- Fundamentos teóricos para la modelación matemática del enfriador.

2.2.1- Transferencia de calor por conducción

Para la modelación teórica del proceso de enfriamiento es necesario definir la ecuación de difusión del calor, esta se obtiene a partir de la primera ley de la termodinámica, luego de realizar algunas transformaciones basadas en la Figura 2.1.

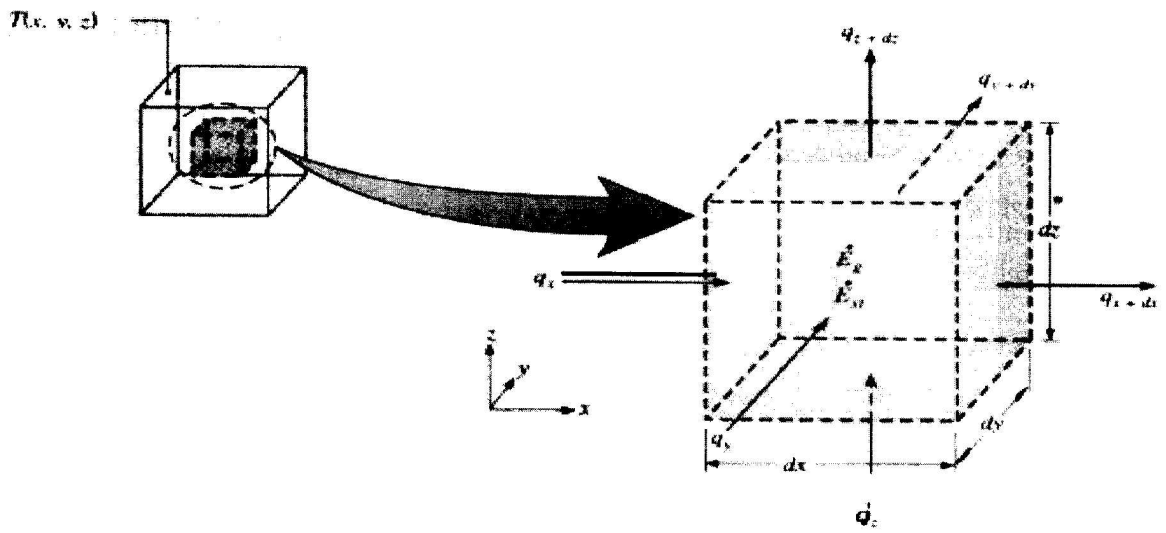


Figura 2.1 Volumen de control diferencial, dx, dy, dz , para el análisis de la conducción en coordenadas cartesianas. Fuente: Incropera, 2003.

La expresión (2.1) es la ecuación de difusión del calor a partir de la primera ley de la termodinámica para un volumen de control diferencial, dx, dy, dz , ella proporciona las herramientas básicas para el análisis de la conducción del calor. De la solución a esta ecuación se puede obtener la distribución de temperatura $T(x, y, z)$ como una función del tiempo.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.1)$$

Donde:

$\dot{q}$ - Flujo de calor generado.

$\frac{\partial T}{\partial \tau}$ - Variación de la temperatura en el tiempo.

C_p - Capacidad calorífica a presión constante; kJ/kg K

$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}$ - Es la variación en el tiempo de la energía interna del medio por unidad de volumen.

ρ - densidad; kg/m³

2.2.2- Transferencia de calor por convección

Se puede mejorar el entendimiento del efecto físico que determina el comportamiento de la capa límite y además ilustrar su relevancia para el transporte por convección, desarrollando las ecuaciones que gobiernan las condiciones de la capa límite hidrodinámica, térmica y de concentración.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

La ecuación (2.3) se le conoce como ecuación de continuidad y es una expresión general de los requerimientos de toda la conservación de las masas y debe satisfacer cada punto en la capa límite hidrodinámica. La ecuación se aplica para un fluido simple, así como para mezclas donde ocurre la difusión de las sustancias y pueden ocurrir reacciones químicas.

Capa límite térmica.

Para aplicar la ecuación de conservación de la energía a un volumen de control en la capa límite térmica es necesario primero delimitar los procesos físicos más importantes (la energía cinética y térmica).

La ecuación (2.4) representa la ley de conservación de la energía cinética y térmica después de algunas transformaciones.

$$\rho \cdot u \frac{\partial e}{\partial x} + \rho \cdot v \frac{\partial e}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - p \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \Phi + \dot{q} \quad (2.3)$$

Donde el término $p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$ representa una conversión reversible entre la energía cinética y térmica y $\mu \Phi$, la disipación viscosa definida en la ecuación (2.4).

$$\mu \Phi \equiv \mu \cdot \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (2.4)$$

El primer término del lado derecho de la ecuación (2.4) se origina a partir de las tensiones tangenciales viscosa y el término restante aparece a partir de las tensiones normales viscosas.

Del estudio de los dos tópicos anteriores (2.2.1 y 2.2.2) se deduce la importancia que tiene para la obtención del modelo teórico el conocimiento de las ecuaciones generales de los procesos de transferencia de calor, en el primer caso se establece la ecuación de difusión del calor analizada en tres dimensiones (x, y, z), la cual durante la conformación del modelo se reducirá su análisis a una sola dirección. Respecto al segundo epígrafe las ecuaciones se establecerán a partir de los números adimensionales (Reynolds, Nusselt, Rayleigh, Prandtl, Grashof, etc.). Las ecuaciones referidas a la conservación de la masa no son expresadas debido a que en el proceso en estudio no existe transferencia de masa considerable. Todas las simplificaciones realizadas a las ecuaciones generales de la transferencia de calor (que son explicadas someramente en este párrafo) se emplearán de manera detallada durante la definición del modelo teórico en el epígrafe que a continuación se muestra.

2.3- Definición del modelo teórico para el proceso de enfriamiento

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

Tomando como punto de partida el principio fundamental de conservación de la energía, el cual plantea que: *la energía ni se crea, ni se destruye; solo se transforma*, se puede obtener la expresión matemática que servirá como ecuación de balance (2.5).

$$-\rho \cdot C \cdot A \, dx \frac{\delta \theta(x,t)}{\delta t} = -C \cdot \dot{m} [\theta(x,t) - \theta(x+dx,t)] + K_p dx [\theta(x,t) - \theta_p(x,t)] \quad (2.5)$$

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{salida} = \dot{m}$$

donde:

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

θ , θ_p - Temperatura del mineral y de la pared; K

C - Calor específico del mineral; kJ/kg K

ρ - Densidad del mineral; kg/m³

A - Sección transversal del sólido; m²

K_1 - Coeficiente superficial de transferencia de calor del sólido a la pared por unidad de longitud; W/m K

En la expresión (2.5) el miembro izquierdo caracteriza la velocidad de variación de la temperatura en el tiempo $\theta(t)$ del elemento de material dx ; el primer miembro de la derecha relaciona el calor que entra con el flujo de material al elemento dx y el calor que sale con el material; el tercero y cuarto términos son el calor entregado por el material a los gases y a la pared del cilindro respectivamente según la ley de Newton.

El área de la sección transversal del sólido según la expresión (2.6), desarrollada por Columbié N. A. [9].

$$A = \frac{2}{3} R_i^2 \cdot \beta^3 \quad (2.6)$$

donde:

R_i - Radio interior del cilindro; m

Para ello es necesario determinar el ángulo (β), mostrado en la Figura 2.2, según la ecuación (2.7).

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{3\dot{m}}{2 \cdot R_i^2 \cdot \rho \cdot V_m}} \quad (2.7)$$

donde:

V_m - Velocidad del sólido; m/s.

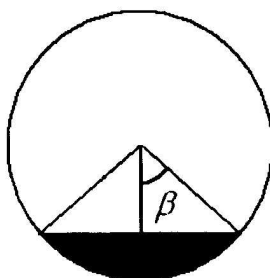


Figura 2.2 Representación del ángulo β , con respecto al diámetro vertical y al área que ocupa el mineral dentro del cilindro.

La velocidad del sólido según expresión desarrollada por Diomidovskiy D.A. en el Instituto de Minas de Leningrado, se calcula mediante la ecuación (2.8).

$$V_m = 5,78 D_i \cdot \varphi \cdot n \quad (2.8)$$

donde:

φ - Ángulo de inclinación del cilindro

n - Velocidad de rotación; 1/s

Para la determinación del coeficiente K_1 es necesario tener en cuenta las formas de transferencia de calor presente en el enfriador de mineral.

El calor del sólido a la pared se transmite por las tres vías, conducción, convección y radiación del sólido a la pared cubierta y del sólido a la pared descubierta por radiación. Para el primer caso el coeficiente de transferencia de calor puede definirse por la ecuación (2.9)

$$\alpha_{pcs} = k \sqrt{C \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot n} + \sigma \cdot \frac{\xi_s \cdot \xi_p}{\frac{1}{\xi_s} + \frac{1}{\xi_p} - 1} \cdot \frac{(\theta^4 - \theta_p^4)}{(\theta - \theta_p)} \quad (2.9)$$

donde:

α_{pcs} - Coeficiente de transferencia de calor del sólido a la pared cubierta por el mineral; W/m² K

σ - Constante de Stefan-Boltzman; ($5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K)

k - Coeficiente de no-uniformidad de la temperatura del mineral

λ - Conductividad térmica del mineral; W/m² K

n - Velocidad de rotación del enfriador; s⁻¹

γ - Masa (a granel) del mineral; kg/m³

ξ_p - Emisividad de la pared

ξ_s - Emisividad del sólido

Para el segundo caso el coeficiente de transferencia de calor puede definirse por la ecuación (2.10)

$$\alpha_{pds} = \sigma \cdot 10^{-8} \cdot \xi_s \cdot \xi_p \cdot \frac{[\theta^4 - \theta_p^4]}{\theta - \theta_p} \quad (2.10)$$

donde:

α_{pds} - Coeficiente de transferencia de calor del sólido a la pared no cubierta por el mineral; W/m² K

Para calcular el coeficiente superficial de transferencia de calor del sólido a la pared por unidad de longitud del cilindro se emplea la ecuación (2.11) y las ecuaciones (2.12, 2.13) para las respectivas áreas de transferencia de calor según Columbié N.A. [9].

$$K_l = \alpha_{pcs} \cdot A_{pcs} + \alpha_{pds} \cdot A_{pds} \quad (2.11)$$

$$A_{pcs} = \frac{2\pi D_i \cdot \beta}{360^\circ} \quad (2.12)$$

$$A_{pds} = \pi \cdot D_i \cdot \left(1 - \frac{2\beta}{360^\circ}\right) \quad (2.13)$$

A_{pcs} - Área de la pared cubierta por el sólido; m².

A_{pds} Área de la pared descubierta por el sólido; m².

Luego la expresión (2.5) toma la forma de la ecuación (2.14).

$$\rho \cdot C \cdot A \cdot \frac{\delta\theta(x,t)}{\delta t} + C \cdot \dot{m} \cdot \left(\frac{\delta\theta(x,t)}{\partial x}\right) = K_1\theta(x,t) - K_1\theta_p(x,t) \quad (2.14)$$

Del balance térmico para la pared, según la ecuación diferencial de la conducción se obtiene la expresión (2.15).

$$C_p M_p dx \frac{\partial\theta_p}{\partial t} + C_p M_p \cdot a \cdot \frac{\partial^2\theta_p}{\partial x^2} = -K_1(\theta - \theta_p)dx - K_2(\theta_p - \theta_{agua})dx \quad (2.15)$$

donde:

C_p - Calor específico de la pared; kJ/kg K

M_p - Masa de la pared; kg/m

θ_{ma} - Temperatura del medio; K

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

a - Coeficiente de temperatura; m²/s

K_2 - Coeficiente de transferencia de calor a través de la pared del horno por unidad de longitud al agua de la piscina; W/m K

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor K_2 , se tienen en cuenta los modos de transferencia de calor por conducción y convección, resolviéndose a través de la ecuación (2.16).

$$K_2 = \frac{1}{\frac{\ln \frac{R_i}{R_e}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{carca}} + \frac{1}{\Pi_{pca} \pi \cdot \alpha_{c.agua} \cdot D_e} + \frac{1}{\Pi_{pca} \pi \cdot \alpha_{sat.} \cdot D_e}} \quad (2.16)$$

Con el objetivo de determinar el área del enfriador que está sumergido en el agua, se desarrolló la ecuación (2.17).

$$\Pi_{pca} = \frac{\left(2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{H_{agua}}{R_2} \right) \right)}{180^\circ} \quad (2.17)$$

donde:

H_{agua} - Altura del agua de la piscina con respecto al enfriador; m

Para la solución de la ecuación (2.16) se debe calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección al agua $\alpha_{c.agua}$, y para ello lo primero que se debe calcular es el número de Reynolds. En este caso considerando que el enfriador se mueve a baja velocidad y que es éste quien le transmite el movimiento al fluido, se asume que la velocidad del fluido es aproximadamente igual a la del enfriador lo cual está en correspondencia con la conclusión más importante referida a la velocidad para la *convección en flujo de cohete*. Incropera, 2003.

El número de Reynolds (R_{eD}) se obtiene por la expresión (2.18):

$$R_{eD} = \frac{v_{agua} \cdot D_e}{\nu_{agua}} = \frac{\rho_{agua} \cdot v_{agua} \cdot D_e}{\mu_{agua}} \quad (2.18)$$

donde:

ρ_{agua} - Densidad del fluido; kg/m³

v_{agua} - Velocidad del fluido; m/s

D_e - Diámetro exterior del enfriador; m

μ_{agua} - Coeficiente dinámico de viscosidad; N s/m²

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

El valor de la velocidad del fluido se calcula por la ecuación (2.19).

$$v = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot R_2 \quad (2.19)$$

Luego de sustituir la ecuación (2.19) en la (2.18) se calcula el número de Reynolds en función del número de revoluciones (n) a través de la ecuación (2.20).

$$Re_D = \frac{\pi \cdot n \cdot D^2}{60 \cdot \nu} = \frac{\pi \cdot n \cdot \rho \cdot D^2}{60 \cdot \mu} \quad (2.20)$$

Esta expresión del Reynolds se combina con la correspondiente al número de Nusselt a través de la ecuación (2.21).

$$N_{uD} = \frac{\alpha_{c.agua} \cdot D_e}{\lambda_{agua}} = C \cdot (Re_D)^m \cdot (Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (2.21)$$

donde:

$\alpha_{c.agua}$ - Coeficiente de transferencia de calor por convección de la pared sumergida en la piscina al agua; W/m² K

N_{uD} - Número de Nusselt

λ_{agua} - Conductividad térmica del fluido; W/m K

C y m - Constantes para flujo por el exterior de cilindros; (adimensionales)

Pr - Número de Prandtl

Las constantes C y m correspondientes a la ecuación (2.21) se buscan en la Tabla 2.1 en correspondencia con el valor del número de Reynolds calculado utilizando la expresión (2.20).

Tabla 2.1 Constantes de la ecuación (2.22) para flujo por el exterior de cilindros

R_{eD}	C	m
0,4 - 4	0,989	0,33
4-40	0,911	0,385
40 - 4000	0,683	0,466
4000 - 40 000	0,193	0,618
40 000 – 400 000	0,027	0,805

Fuente: Incropera, 2003.

Posteriormente se despeja ($\alpha_{c.agua}$) de la ecuación (2.21), el mismo queda expresado de la manera siguiente en la ecuación (2.22).

$$\alpha_{c.agua} = \frac{\lambda_{agua} \cdot \left(C \cdot R_{eD}^m \cdot P_r^{\frac{1}{3}} \right)}{D_e} \quad (2.22)$$

El $\alpha_{c.agua}$ obtenido se sustituye en la ecuación (2.16) para calcular el coeficiente de transferencia de calor a través de la pared del cilindro por unidad de longitud al agua de la piscina.

Como se planteó anteriormente se necesita conocer el área de la superficie no sumergida en el agua, con este objetivo se desarrolló la ecuación (2.23).

$$\Pi_{pda} = \frac{\left(360^\circ - 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{H_{agua}}{R_2} \right) \right)}{180^\circ} \quad (2.23)$$

En esta zona el proceso de transferencia de calor ocurre desde la superficie exterior del tambor, hacia la película de agua que se encuentra en la superficie exterior no sumergida en la piscina, para ello el flujo de calor se transfiere por ebullición de la película de agua, ver Figura 2.3 y Figura 5 (Anexos). Es necesario destacar que se tuvo en cuenta la cantidad de calor transferida al aire y para ello se despreció la película de agua que se forma en la superficie, determinándose el coeficiente de transferencia de calor desde la superficie del enfriador al aire.

Según Incropera (2003), en este caso se pueden encontrar cuatro zonas fundamentales de acuerdo con la curva de ebullición del agua (Nukiyama, 1966), ellas son:

- Zona de ebullición por convección libre.
- Zona de ebullición nucleada.
- Zona de transición.
- Zona de ebullición pelicular.

En la Figura 2.3 se muestran las zonas antes mencionadas.

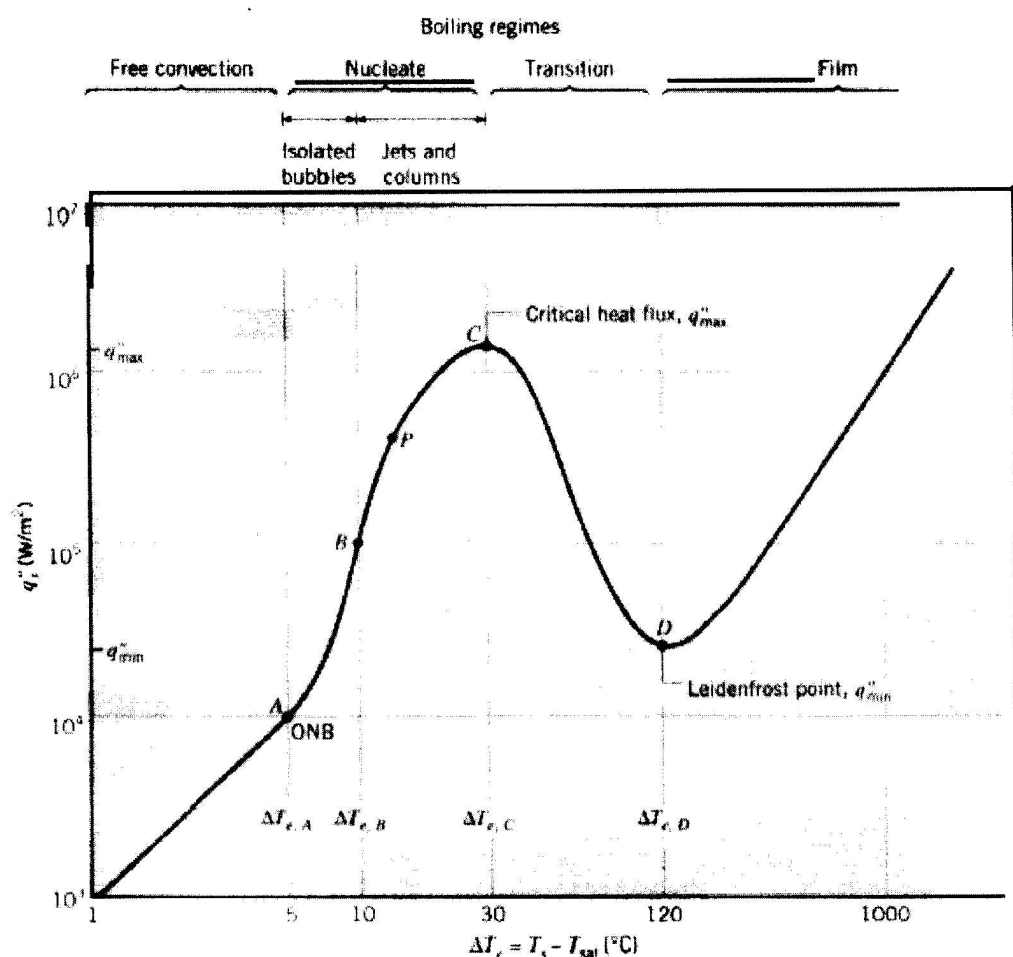


Figura 2.3 Curva típica de ebullición para el agua a 1 atm: flujo de calor por unidad de superficie (q_s'') en función de la variación de temperatura ($\Delta T_e = T_s - T_{sat}$). Fuente: Incropera, 2003.

Para los enfriadores de mineral de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” el flujo de calor por ebullición de la película de agua se produce en la zona de ebullición nucleada porque la diferencia entre la temperatura de la superficie exterior de los mismos y la temperatura de saturación del agua a la presión de trabajo está entre los valores 5 y $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, expresado de otra manera ($5 \leq \Delta T_e \leq 30$), específicamente $\Delta T_e \approx 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para realizar el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección de la superficie del enfriador que no está sumergida en la piscina se tuvo en cuenta la transferencia de calor por ebullición y por convección al aire.

Primero se da paso a la determinación del coeficiente de convección por ebullición $\alpha_{sat.}$ de la pared a la película de agua que cubre a la zona no sumergida en la piscina, procediendo como sigue:

Se calcula el flujo de calor por unidad de área ($q_{s''}$), utilizando la ecuación (2.24) obtenida por Rohsenow (1952).

$$q_{s''} = \mu_f \cdot h_{fg} \cdot \left[\frac{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}{\sigma_s} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{C_{p,L} \cdot \Delta T_e}{C_{s,f} \cdot h_{fg} \cdot P_{r,L}^n} \right)^3 \tag{2.24}$$

- Donde:
- μ_f - Viscosidad; N s/m²
 - h_{fg} - Calor latente de vaporización; kJ/kg
 - g - Constante de la gravedad; m/s²
 - ρ_l y ρ_v - Densidad del líquido y el vapor respectivamente; kg/m³
 - σ_s - Tensión superficial; N/m
 - $C_{p,L}$ - Calor específico del líquido; kJ/kg K
 - ΔT_e - Diferencia de temperatura entre la superficie exterior y la temperatura de saturación a la presión de trabajo; K

$C_{s,f}$ y n - Constantes adimensionales que están preestablecidas de acuerdo con la combinación (superficie-fluido) existente, los posibles valores a tomar por estas se seleccionan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valores de $C_{s,f}$ y n para varias combinaciones Superficie-Fluido.

FLUID-SURFACE COMBINATION	$C_{s,f}$	n
Stainless steel		
Chemically etched	0.0130	1.0
Mechanically polished	0.0130	1.0
Ground and polished	0.0060	1.0

Fuente: Incropera, 2003.

Nota: Todos los parámetros expresados en la ecuación (2.24) se buscan en la Tabla A6 del Incropera.

Después de establecer la expresión para el cálculo del flujo de calor por unidad de área y conociendo además que esta variable puede ser relacionada en función de la ecuación (2.25).

$$q_{s''} = \alpha_{sat.} \cdot [\theta_{superf} - \theta_{sat}] = \alpha_{sat.} \cdot \Delta T_e \quad (2.25)$$

donde:

$\alpha_{sat.}$ - Coeficiente de transferencia de calor por convección de la pared no sumergida en la piscina al agua; W/m² K

θ_{Sat} - Temperatura de saturación del agua a la presión de trabajo; K

Se despeja el coeficiente de transferencia de calor por convección $\alpha_{sat.}$

$$\alpha_{sat.} = \frac{q_{s''}}{\Delta T_e} = \frac{\mu_f \cdot h_{fg} \cdot \left[\frac{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{C_{p,L} \cdot \Delta T_e}{C_{s,f} \cdot h_{fg} \cdot P_{r,L}^n} \right)^3}{\Delta T_e} \quad (2.26)$$

Resolviendo la ecuación (2.15) se obtiene la ecuación (2.27).

$$C_p M_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} + C_p M_p a \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial x^2} + K_3 \theta_p = K_1 \theta + K_2 \theta_{agua} \quad (2.27)$$

donde:

$$K_3 = K_1 + K_2 \quad (2.28)$$

Del balance térmico para el agua, según la ecuación diferencial de la conducción resulta.

$$\rho_{agua} \cdot C_{agua} A_{agua} dx \frac{\partial \theta_{agua}(x,t)}{\partial t} = C_{agua} \dot{m}_{agua} \theta_{agua}(x,t) - C_{agua} \dot{m}_{agua} \theta_{agua}(x+dx,t) + K_2(\theta_p - \theta_{agua})dx - K_4(\theta_{agua} - \theta_{aire})dx \quad (2.29)$$

donde:

ρ_{agua} - Densidad del agua; kg/m³

C_{agua} - Calor específico del agua; kJ/kg K

A_{agua} - Área ocupada por agua; m²

$\dot{m}_{agua}$ - Flujo de agua; kg/s

θ_{agua} , θ_{aire} - Temperatura del agua y del aire; K

K_4 - Coeficiente superficial de transferencia de calor del agua al medio por unidad de longitud; W/m 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.

Aplicando la ley de conservación de energía a un control de superficie sobre el líquido, se obtiene la expresión (2.30).

$$q''_{conv} + q''_{add} = q''_{evap} \quad (2.30)$$

Si no hay ninguna suma de calor por otros medios, la ecuación (2.30) se reduce a un equilibrio entre la transmisión de calor por convección del gas y el calor perdido por evaporación desde el líquido representada en la ecuación (2.31).

$$q''_{conv} = q''_{evap} \quad (2.31)$$

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 (2.32).

$$q''_{evap} = n''_A \cdot h_{fgv} \quad (2.32)$$

donde:

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

El flujo de agua que se evapora se determina según la ecuación (2.33).

$$n''_A = h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.33)$$

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 se obtiene a través de la ecuación (2.34)

$$Sh = 0.0296 \cdot R_e^{\frac{4}{3}} \cdot S_c^{\frac{1}{3}} \quad (2.34)$$

donde:

S_c - Número de Schmidt.

El número de Reynolds se determina a través de la ecuación (2.35).

$$R_{eD} = \frac{v_{aire} \cdot D_e}{\nu_{aire}} \quad (2.35)$$

donde:

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

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

Para el calcular el número de Schmidt se emplea la ecuación (2.36).

$$S_c = \frac{\nu_{aire}}{D_{AB}} \quad (2.36)$$

donde:

ν_{aire} - Viscosidad cinemática; m²/s

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

Conociendo las ecuaciones (2.34), (2.35), (2.35), y a través de la ecuación (2.37) se puede determinar el coeficiente de transferencia de masa.

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} \quad (2.37)$$

El calor transmitido por convección del agua al aire se determina a través de la ecuación (2.38).

$$q''_{evap} = \alpha_{agua} (\theta_{agua} - \theta_{aire}) \quad (2.38)$$

donde:

α_{agua} - Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio;
W/m²K

Sustituyendo las ecuaciones (2.32) y (2.38) en la ecuación (2.31) y despejando el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire α_{agua} , se obtiene la ecuación (2.39).

$$\alpha_{agua} = \frac{h_{fg} \cdot h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty})}{(\theta_{agua} - \theta_{aire})} \quad (2.39)$$

Entonces el coeficiente de transferencia de calor a través del agua por unidad de longitud al medio se determina por la ecuación (2.40).

$$K_4 = \alpha_{agua} \cdot A_{agua} \quad (2.40)$$

De la ecuación (2.29) se obtiene la ecuación (2.41):

$$\rho_{agua} \cdot C_{agua} \cdot A_{agua} \frac{\partial \theta_{agua}(x,t)}{\partial t} + C_{agua} \cdot \dot{m}_{agua}(x,t) \frac{\partial \theta_{agua}(x,t)}{\partial x} + K_5 \theta_{agua}(x,t) = K_2 \theta_p(x,t) + K_4 \theta_{aire}(x,t) \quad (2.41)$$

donde:

$$K_5 = K_2 + K_4 \quad (2.42)$$

2.4- Conclusiones

En el presente Capítulo quedó establecido el modelo matemático del proceso de enfriamiento de mineral reducido en los cilindros horizontales rotatorios de la Planta de Hornos de Reducción, el modelo cuenta de tres ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. También aparecen unas series de ecuaciones de enlace que permiten determinar los coeficientes superficiales de transferencia de calor por unidad de longitud.

CAPÍTULO III

RESULTADOS EXPERIMENTALES E IDENTIFICACIÓN PRELIMINAR DEL MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO EN EL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL MINERAL EN CILINDROS ROTATORIOS

3.1- Introducción

La modelación teórica desarrollada en el capítulo precedente exige la ejecución de experimentos para lograr la adecuación del modelo elaborado al objeto industrial. La experimentación con este último permitirá obtener los parámetros característicos del modelo teórico: la temperatura del mineral a la salida del enfriador, para lo cual todos los experimentos fueron realizados con el objeto activo, o sea en el enfriador cilíndrico rotatorio en producción.

La realización de experimentos en el objeto en producción impone dificultades inevitables a los mismos, pues es necesario, en la mayoría de las ocasiones, introducir perturbaciones que afecten en poca medida la estabilidad de las operaciones desde el punto de vista de la obtención del producto final dentro de las especificaciones comerciales establecidas, no obstante, la presencia en el enfriador de medios técnicos adecuados permitió llevar a cabo el seguimiento de los principales parámetros influyentes en el proceso de enfriamiento. En todos los casos los parámetros de medición continua y las acciones sobre el proceso introducidas fueron recogidas a través de un PLC y llevadas hasta una computadora que se encuentra en la oficina de los tecnólogos de la planta para controlar el proceso, ver Figura 2 (Anexos).

El **objetivo** del capítulo es: Realizar la preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor que serán utilizados en la identificación posterior del modelo dinámico presentado en el Capítulo II, mediante los resultados experimentales obtenidos en el enfriador cilíndrico rotatorio.

3.2- Instalación experimental

La instalación experimental en este caso es el propio tambor utilizado para el enfriamiento del mineral en la planta de hornos de reducción y la misma consta de los siguientes equipos y accesorios:

- 1- Enfriador cilíndrico
- 2- Piscina almacenadora de agua
- 3- Motores eléctricos
- 4- Instrumentación y control de los parámetros

Enfriador cilíndrico

Utilizado como intercambiador de calor tiene la función de enfriar el mineral a través de los procesos de transferencia de calor, a la vez que ejerce como un transportador del propio mineral hasta la canal ubicada en el tanque de contacto para la posterior lixiviación y lavado. El equipo es fundamental en la instalación, tiene 30 m de longitud, está construido de acero A285A (ASTM), 15 GOST y su capacidad es de 30 ton/h.

Piscina almacenadora de agua

El enfriador se encuentra parcialmente sumergido en la piscina de agua y construida de hormigón. El fluido es renovado a razón de $107 \text{ m}^3/\text{h}$ y su temperatura oscila entre los 30 y 76 °C para la entrada y salida respectivamente, tiene como objetivo facilitar el proceso de intercambio de calor entre el enfriador y el medio exterior, aspecto este que aumenta la eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral debido a la presencia del fluido antes mencionado.

Motores eléctricos

Para transmitirle movimiento al enfriador se emplean dos motores eléctricos con características técnicas diferentes, ellos son:

Motor eléctrico principal tipo 315 M8, de corriente alterna, voltaje 440 V, potencia 75 kW, empleado para el trabajo estable del enfriador, presenta una amplia gama de números de revoluciones lo que posibilita el régimen de trabajo continuo al que está sometido.

Motor eléctrico auxiliar tipo M180L08 de corriente alterna, voltaje 440 V, potencia 11kW, empleado para situaciones de emergencia (rotura del motor eléctrico principal, paradas imprevistas, etc.), se emplea también cuando se quiere variar el régimen de operación de la instalación, no presenta una amplia gama de número de revoluciones de ahí su limitación a algunas aplicaciones específicas.

Instrumentación y control de los parámetros

Los instrumentos para la medición y el control de los parámetros durante el trabajo de la instalación son expuestos en el epígrafe (1.6) de la forma siguiente: parámetro que se controla, equipo que realiza el control, así como las características técnicas del mismo.

Es bueno destacar que a pesar del estado primario (ya analizado en el epígrafe 1.6) en que se encuentra el proceso respecto a su automatización y control, desde el punto de vista operatorio, en el se obtienen las mediciones de los parámetros fundamentales que influyen en el proceso lo que garantiza la realización adecuada de los experimentos con el mínimo de error en los mismos.

3.3- Diseño experimental

Selección de las variables

De acuerdo con el análisis del proceso de enfriamiento como objeto de modelación físico-matemática y el modelo teórico desarrollado, la temperatura del mineral a la salida del enfriador depende fundamentalmente de los siguientes parámetros:

- Flujo másico de mineral a la entrada del enfriador
- Temperatura del mineral a la entrada del enfriador
- Temperatura del medio ambiente
- Temperatura de saturación del agua a la presión de trabajo
- Número de revoluciones del tambor

Flujo másico de mineral

Debido a que el flujo másico es el parámetro que más influye en la temperatura de salida del mineral (según la experiencia de los obreros de la planta de hornos de reducción) y considerando que varía constantemente (aunque en valores pequeños durante el trabajo estable del horno de reducción) los tres experimentos se realizarán según los niveles que se establecen a continuación: para el experimento uno (9,44 kg/s; 10,22 kg/s; 10,78 kg/s), para el experimento dos (9,89 kg/s; 11,06 kg/s; 12,11 kg/s), y para el experimento tres (10,56 kg/s; 10,83 kg/s; 11,39 kg/s).

Temperatura del agua en la piscina

Para esta variable a pesar de que su valor está expresado por la dependencia que tiene con los demás parámetros antes mencionados, los experimentos se realizarán para un único valor de la misma y estará dado por su valor promedio $T_{f(agua)} = 74,44^{\circ}C = 347,59K$ que se obtiene a partir de las mediciones experimentales realizadas en la piscina, las cuales reflejan los valores en que esta oscila, ellos son: 70 y 79°C.

Temperatura del medio ambiente

Este parámetro oscila muy poco para nuestra zona geográfica, permaneciendo generalmente entre los valores 25 y 35 °C, por tanto se fija un solo nivel que estará dado por el valor promedio entre estos dos valores, este valor es $T_{ma} = 32^{\circ}C \approx 305,15K$.

Temperatura de saturación del agua a la presión de trabajo

Debido a que el enfriador trabaja en condiciones de presión atmosférica el valor de la temperatura de saturación del agua se busca a esa presión y se establece un único nivel, el mismo es: $T_{sat.} = 100^{\circ}C \approx 373,15K$.

Número de revoluciones del tambor

Para esta variable se escoge un solo nivel porque la condición de trabajo continuo de los enfriadores no permite que se varíe este parámetro ya que un cambio en el régimen de trabajo puede traer consecuencias negativas en cuanto a la calidad del proceso de enfriamiento, el valor seleccionado es el estándar $n = 0,102$ 1/s.

3.4- Técnica experimental

El material proveniente de los yacimientos se somete a un proceso de secado, molienda hasta obtener una granulometría de 0,074 mm en un 80 % con una humedad promedio de 4,5 %. Después ocurre la reducción del mineral en los hornos de soleras múltiples, al ser alimentado el horno comienza la experimentación.

Debido a la automatización existente en la planta los valores de los parámetros del proceso son censados por el instrumento correspondiente a cada uno de ellos y la señal se envía al ordenador ubicado en la oficina de control del proceso.

El resultado del control automático es la cuantificación de los valores en el monitor de la PC, ver Figura 1 y 2 (Anexos) luego se toman los resultados y se repite el experimento de acuerdo con los niveles prefijados para cada variable para un tiempo de retención de 40 min.

De esta manera se procede para las tres réplicas de las 75 corridas experimentales y para garantizar representatividad de los experimentos al objeto real estos se realizarán en diferentes días lo que garantiza la heterogeneidad de las condiciones de trabajo.

3.5- Procesamiento estadístico de los resultados

El mismo se efectúa mediante los errores admisibles de los valores de las variables, utilizando como herramienta "Microsoft Excel; Mathcad Plus 6.0". Los parámetros de cálculo del análisis estadístico son:

Media aritmética:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.1)$$

Donde:

x_i - elementos de la serie.

n - número de pruebas.

Desviación media:

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (3.2)$$

La varianza muestral:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (3.3)$$

La raíz cuadrada de la varianza muestral se denomina error estándar S_x . El error estándar de la media aritmética es:

$$\delta = \frac{t_d \cdot S_x}{\sqrt{n}} \quad (3.4)$$

3.6- Preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor.

La preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor juega un papel fundamental en la identificación del modelo físico-matemático que describa el comportamiento dinámico del proceso de enfriamiento del mineral. Estos coeficientes permiten establecer la ecuación del modelo en función de las variables del proceso.

Para la preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor se utilizaron los valores medios de las mediciones realizadas, los cuales se determinaron a través de un análisis de estadística descriptiva, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.1, los cuales se obtuvieron de las Tablas 1, 2, 3 y 4 (Anexos).

Los experimentos 1 y 2 se realizaron bajo condiciones similares, diferenciándose solamente en los valores del flujo másico de mineral. Durante la realización del experimento 3 influyeron algunas perturbaciones propias del mismo proceso (elevadas temperaturas a la entrada, temperatura del medio ambiente superior a la promedio, etc.).

Tabla 3.1 Resultados del análisis estadístico para la determinación de las medias de las mediciones realizadas.

	<i>Ms(Kg//s)</i>	Temperatura °C			
		<i>Entrada</i>	<i>Salida</i>	<i>Pared</i>	<i>Agua Pisc.</i>
Media	10,65	701,52	245,55	104,92	74,44
Error típico	0,06	1,23	3,06	0,60	0,54
Mediana	10,78	706,00	241,00	105,00	74,00
Desviación estándar	0,91	18,48	45,91	5,67	2,29
Varianza de la muestra	0,83	341,37	2107,52	32,18	5,22
Mínimo	7,89	665,00	135,00	70,00	95,00
Máximo	12,11	740,00	336,00	79,00	120,00
Suma	2393,56	157841,00	55249,00	1339,99	9443,00
Cuenta	225,00	225,00	225,00	18,00	90,00

Para la Tabla 3.1 así como para las numeradas (1 – 3) en los Anexos se cumple la nomenclatura siguiente.

Ms – Flujo másico de sólido; kg/s

Nota: El valor de la temperatura teórica se expresa en grados Celsius (°C) debido que en el proceso real el valor experimental de esta variable está expresado en esta misma unidad de medida, para llevarlas al sistema internacional [grados Kelvin (K)] solo es necesario incrementar en 273 los valores de temperatura tabulados.

En el capítulo II se obtuvo el modelo matemático del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios. Este modelo contiene una gran cantidad de coeficientes que necesitan ser valorados para poder adecuar el modelo al objeto. Es por tanto de gran necesidad llevar a cabo la identificación preliminar mediante la determinación de los parámetros que forman el modelo a partir de los valores físicos de los mismos y el comportamiento físico del proceso. Los datos iniciales para el proceso de preidentificación son los siguientes:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 10,65 \frac{\text{kg}}{\text{s}}; \theta = 974,74 \text{K}; \theta_p = 378,07 \text{K}; \theta_{\text{agua}} = 347,59 \text{K}; \theta_{\text{aire}} = 305,15 \text{K}; \\ n &= 0,102 \frac{\text{l}}{\text{s}}; \varphi = 1^\circ; D_e = 3,08 \text{m}; D_i = 3,04 \text{m}; C = 0,934 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}; \rho = 3300 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}; \\ \rho_{\text{agua}} &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; C_{\text{agua}} = 4,217 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}; C_p = 1,06 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}; L = 30 \text{m}; \rho_p = 7800 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \\ \dot{m}_{\text{agua}} &= 29,026 \frac{\text{kg}}{\text{s}}; M_p = 1360 \frac{\text{kg}}{\text{m}}; a = 0,516 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned}$$

3.6.1- Determinación del coeficiente superficial de transferencia de calor del sólido a la pared por unidad de longitud K_1 .

La determinación de K_1 se realiza mediante la expresión (2.11) para lo cual es necesario determinar los coeficientes de transferencia de calor del sólido a la pared cubierta por el sólido α_{pcs} y del sólido a la pared descubierta por el sólido α_{pds} , estos coeficientes se calculan a través de las ecuaciones (2.9) y (2.10) respectivamente.

Por lo tanto para determinar α_{pcs} , es necesario conocer los siguientes parámetros:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K}; k = 0,055; \lambda =; \gamma = 800 \frac{kg}{m^3}; \xi_p = 0,90; \xi_s = 0,90$$

Por lo tanto:

$$\alpha_{pcs} = 3,778 \frac{kW}{mK}; \alpha_{pds} = 0,678 \frac{kW}{mK}$$

Una vez determinado los coeficientes α_{pcs} y α_{pds} , se necesita conocer el área de la pared cubierta por el sólido A_{pcs} y el área de la pared descubierta por el sólido A_{pds} las cuales se obtienen a través de las ecuaciones (2.12) y (2.13) respectivamente y que dependen del ángulo β el cual se determina a través de la ecuación (2.7).

Para la determinación del ángulo β , es necesario determinar la velocidad lineal del mineral por el interior del cilindro, obteniéndose a partir de la ecuación (2.8).

$$V_m = 0,031 \frac{m}{s}; \beta = 0,406; A_{pcs} = 1,235 m^2; A_{pds} = 8,316 m^2$$

Resultando un coeficiente superficial de transferencia del sólido a la pared.

$$K_l = 2,743 \frac{kW}{mK}$$

3.6.2- Determinación del coeficiente superficial de transferencia de calor de la pared al agua por unidad de longitud K_2 .

Para determinar K_2 es necesario tener en cuenta la cantidad de calor recibida por la pared a través del mineral en su interior y que es transferida por conducción a través del cilindro que luego es transferida al agua de la piscina y a la película de agua que cubre el cilindro en la parte que no está sumergida en la piscina. Por lo tanto en este caso tenemos que tener en cuenta los modos de transferencia de calor por conducción y convección, en este último se debe tener en cuenta que parte de la

película de agua que cubre el enfriador se evapora por lo que esta zona de transferencia de calor se trata como un caso especial de la convección que lo es la ebullición.

A través de la ecuación (2.22) se determina el coeficiente de transferencia de calor a través de la pared del cilindro por unidad de longitud al agua de la piscina $\alpha_{c.agua}$, el cual depende de los valores de los números de Reynolds y Prandtl, así como de las constantes adimensionales C y m, que aparecen en la Tabla 2.1.

$$\rho_{agua} = 976,563 \frac{kg}{m^3}; v_{agua} = \frac{m}{s}; \mu_{agua} = 389 \cdot 10^{-6} \frac{N \cdot s}{m^2}$$

Entonces a través de la ecuación (2.20) se determinó el número de Reynolds.

$$R_{eD} = 1,272 \cdot 10^5$$

Luego se obtienen los valores tabulados de:

$$\lambda_{agua} = 0,668 \frac{W}{mK}; C = 0,027; m = 0,805; P_r = 2,45$$

Se obtiene a través de la ecuación (2.22) el coeficiente de transferencia de calor:

$$\alpha_{c.agua} = 0,102 \frac{kW}{m^2 K}$$

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor a través de la pared del cilindro por unidad de longitud a la película de agua que cubre a la zona no sumergida en la piscina $\alpha_{sat.}$ se utiliza la ecuación (2.26), la cual establece una relación entre el flujo de calor por unidad de área y la diferencia de temperatura entre la superficie exterior y la temperatura de saturación a la presión de trabajo, para la cual es necesario conocer los siguientes parámetros:

$$\mu_f = 297 \cdot 10^{-6} \frac{N \cdot s}{m^2}; \quad h_{fg} = 2257 \frac{kJ}{kg}; \quad g = 9,81 \frac{m}{s^2}; \quad \rho_l = 957,854 \frac{kg}{m^3};$$

$$\rho_v = 0,596 \frac{kg}{m^3}$$

$$\sigma_s = 58,9 \cdot 10^{-3} \frac{N}{m}; C_{p,L} = 4,217 \frac{kJ}{kgK}; \Delta T_e = 5K; C_{s,f} = 0,0130 \text{ y } n = 1$$

Resultando a través de la ecuación (2.26)

$$\alpha_{sat.} = 3,314 \frac{kW}{m^2 K}$$

Para determinar las zonas de transferencia de calor para la superficie sumergida en la piscina y la no sumergida se tuvieron en cuenta las ecuaciones (2.17) y (2.23) para las que se tuvo en cuenta la altura del agua en la piscina.

$$H_{agua} = 1m; \Pi_{pca} = 0,772; \Pi_{pda} = 1,228$$

Resultando a través de la ecuación (2.16) para $\lambda_{carc} = 58 \frac{W}{mK}$.

$$K_2 = 0,724 \frac{kW}{mK}$$

3.6.3- Determinación del coeficiente superficial de transferencia de calor de la pared al agua por unidad de longitud K_4 .

El coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio α_{agua} ; se determina a través de la ecuación (2.39) la cual se deduce a través del equilibrio entre la transmisión de calor por convección y el calor perdido por evaporación desde el líquido representada en la ecuación (2.31). Para la obtener la solución de la ecuación (2.39) es necesario conocer el coeficiente de transferencia de masa el cual se determina a través de la ecuación (2.37) y que depende el número de Sherwood, quien a su vez depende del número de Reynolds, ecuación (2.35) y de Schmidt, ecuación (2.36).

$$h_{fgv} = 2329 \frac{kJ}{kg}; v_{aire} = 15,89 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}; D_{AB} = 0,26 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s}; v_{aire} = 2,2 \frac{m}{s}$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio α_{agua} a través de la ecuación (2.39) es:

$$\alpha_{agua} = 0,066 \frac{kW}{m^2 K}$$

Para determinar coeficiente superficial de transferencia de calor de la pared al agua por unidad de longitud K_4 , es necesario multiplicar el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio α_{agua} por el área ocupada por el agua.

$$A_{agua} = 9,676 m^2; K_4 = 0,638 \frac{W}{mK}$$

Nota: Para la realización de los cálculos para la preidentificación de los coeficientes superficiales de transferencia de calor, se utilizó el Software Mathcad Proffseional, del cual aparecen las hojas de cálculo en los Anexos.

3.7- Comportamiento de la temperatura del mineral a la salida del enfriador en función de los coeficientes preidentificados.

Con el empleo del modelo y una vez preidentificado los coeficientes superficiales de transferencia de calor se estudia el comportamiento de la temperatura del mineral y del agua en la piscina en función de los parámetros analizados.

En las Figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, y 3.5, se puede observar la variación de la temperatura del mineral en toda la longitud del cilindro, con respecto a los demás parámetros que influyen en la eficiencia del enfriador de mineral.

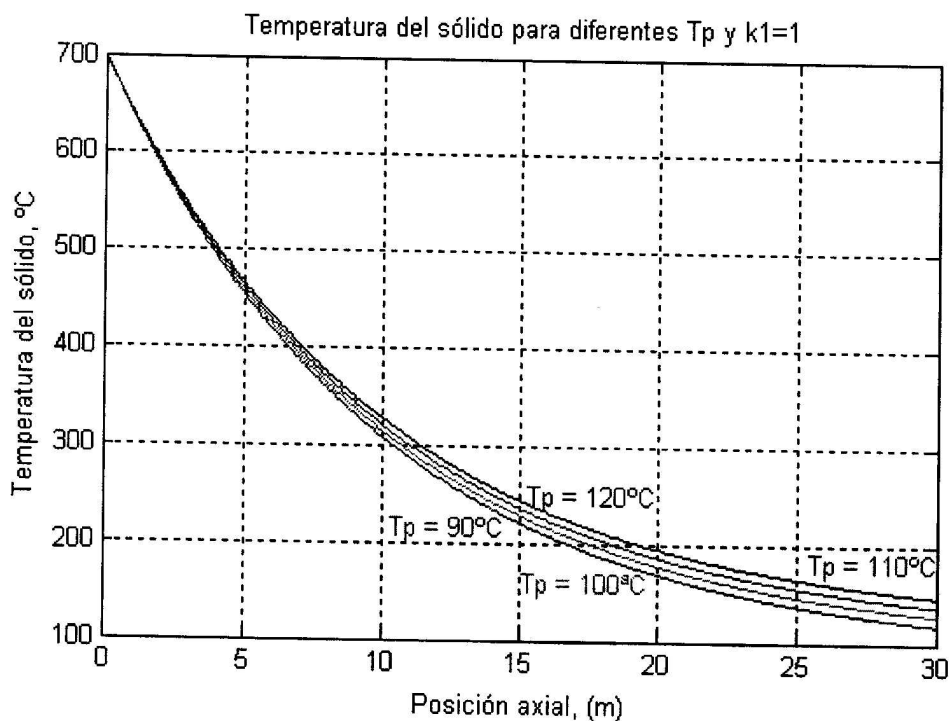


Figura 3.1 Variación de la temperatura del mineral en función de la longitud del cilindro, para un coeficiente superficial de transferencia de calor $K_1=1$ y diferentes valores de temperatura de la pared.

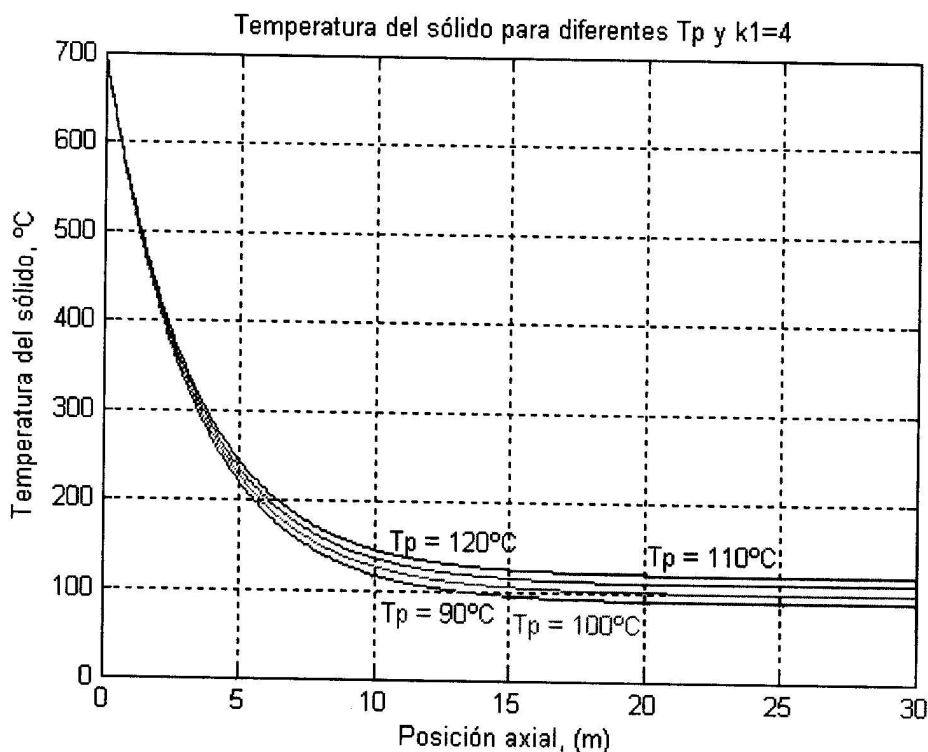


Figura 3.2 Variación de la temperatura del mineral en función de la longitud del cilindro para un coeficiente superficial de transferencia de calor $K_1=3$ y diferentes valores de temperatura de la pared.

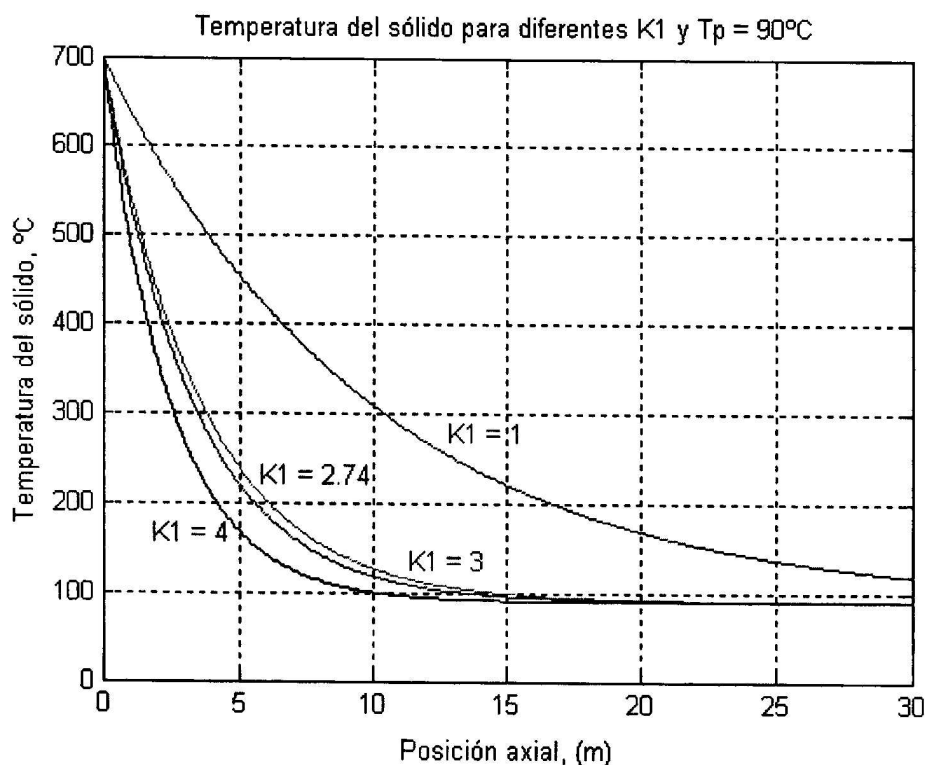


Figura 3.3 Variación de la temperatura del mineral en función de la longitud del cilindro para una de temperatura de la pared del 90°C y diferentes valores coeficiente superficial de transferencia de calor K_1 .

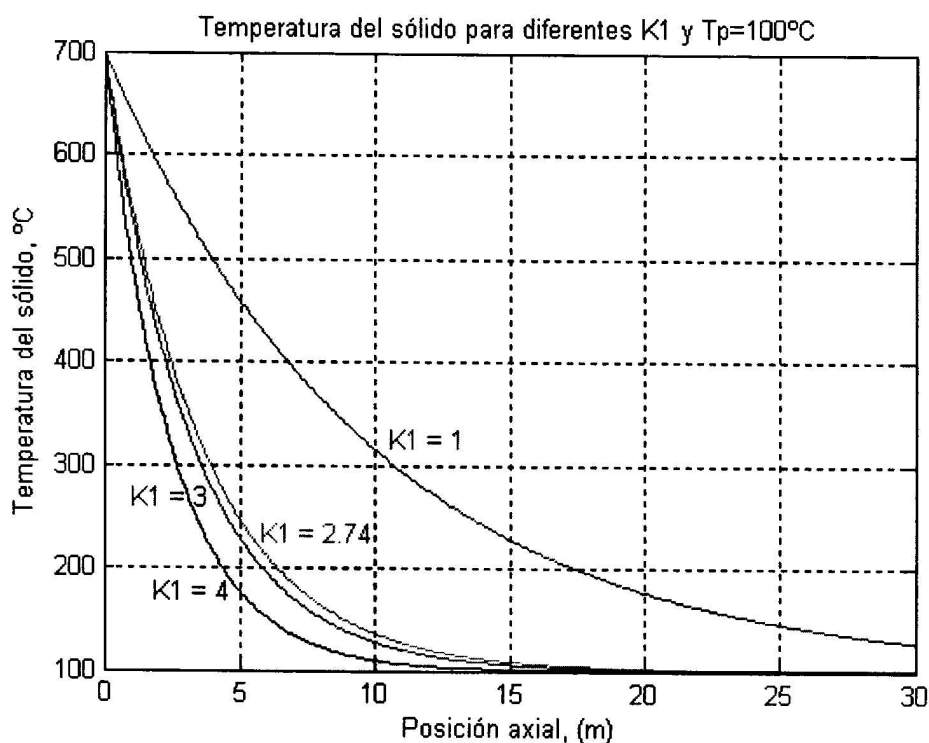


Figura 3.4 Variación de la temperatura del mineral en función de la longitud del cilindro para una de temperatura de la pared del 100°C y diferentes valores coeficiente superficial de transferencia de calor K_1 .

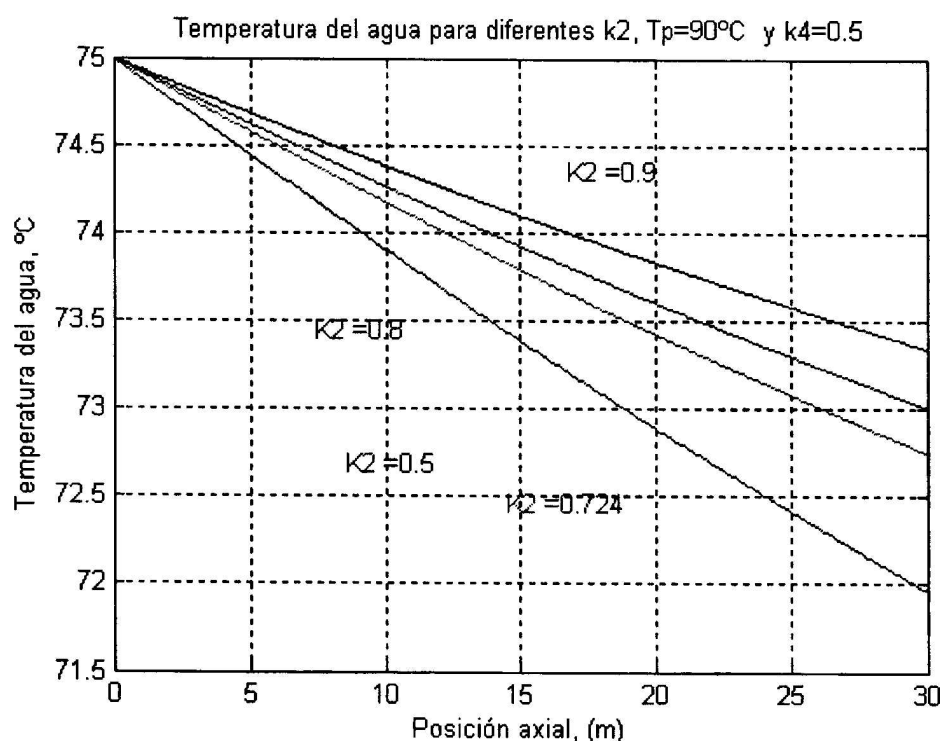


Figura 3.5 Variación de la temperatura del agua en función de la longitud del cilindro para diferentes valores del coeficiente superficial de transferencia de calor K_2 a la temperatura de la pared de 90°C y $K_4=0.5$.

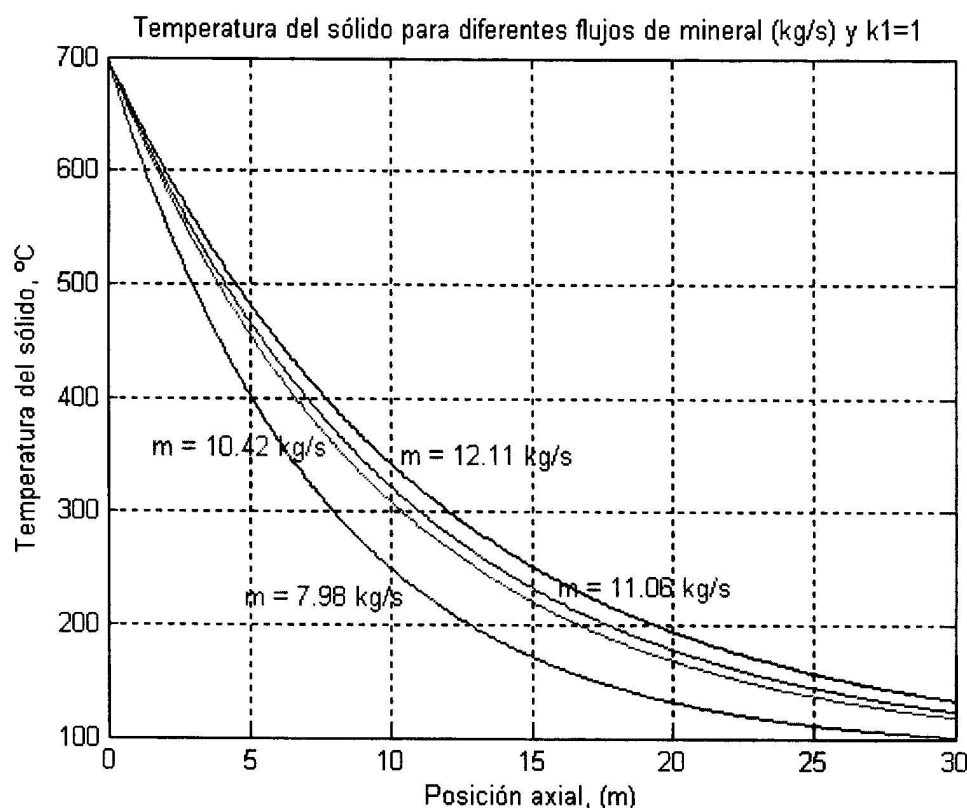


Figura 3.6 Variación de la temperatura del sólido en función de la longitud del cilindro para diferentes flujos de mineral y $K_1=1$.

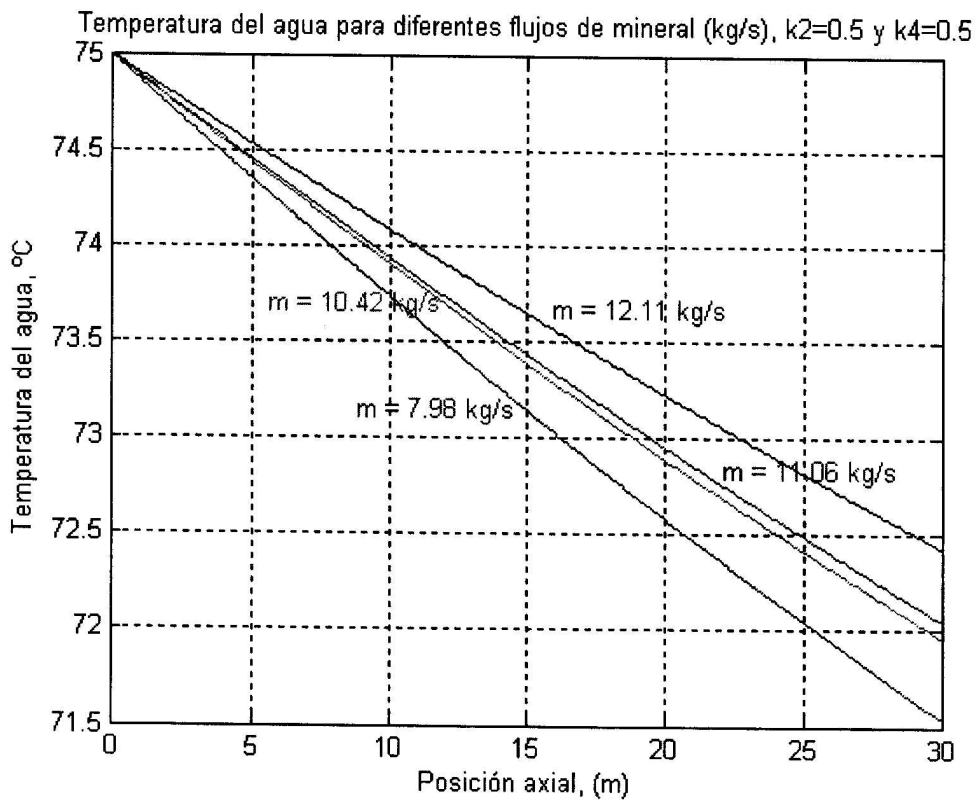


Figura 3.11 Variación de la temperatura del agua en función de la longitud del cilindro para diferentes flujos de mineral y $K_2=0,5$ y $K_4=0,5$.

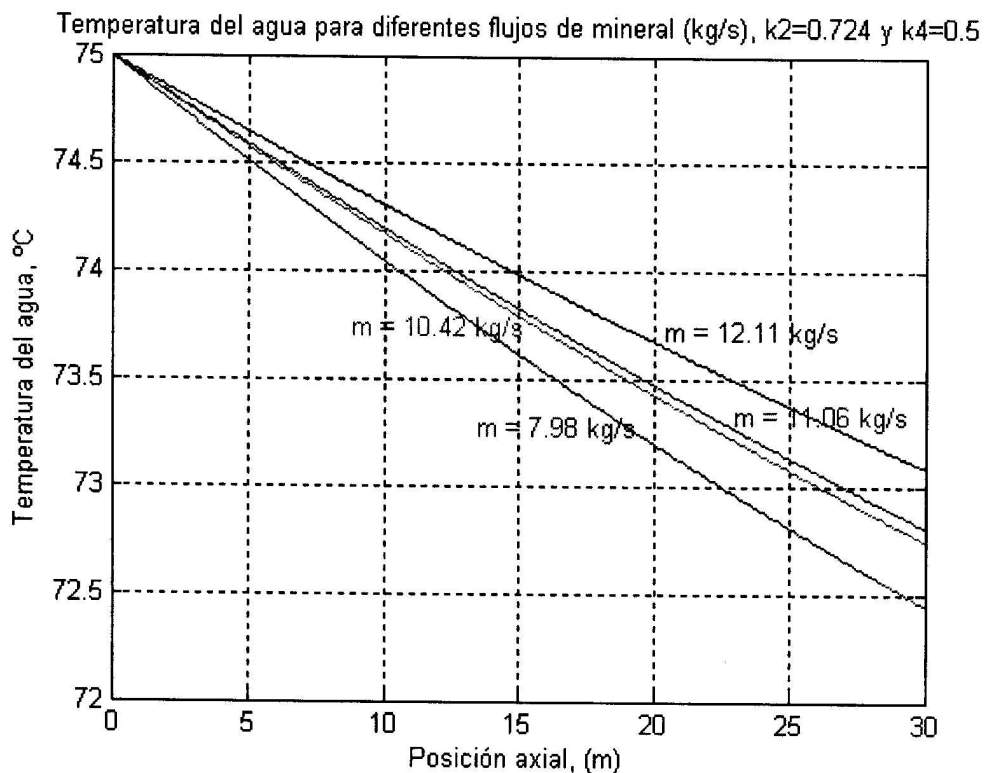


Figura 3.12 Variación de la temperatura del agua en función de la longitud del cilindro para diferentes flujos de mineral y $K_2=0,724$ y $K_4=0,5$.

3.8- Conclusiones

- Como se ha podido observar en la Figura 3.1 el mineral experimenta un enfriamiento a medida que se desplaza por el interior del cilindro, teniendo un comportamiento similar para diferentes valores de temperatura de la pared, manteniendo constante el coeficiente superficial de transferencia de calor K_1 , el cual caracteriza el proceso de transferencia de calor por conducción y radiación del mineral a la pared del cilindro.
- En la Figura 3.2 el comportamiento de las curvas es similar al de la Figura 3.1, acentuándose la pendiente con lo que se logra un enfriamiento más rápido del mineral, esto para valores del coeficiente superficial de transferencia de calor $K_1 = 3$.
- En las Figuras 3.3 y 3.4, se observa el comportamiento de la temperatura de sólido para diferentes valores de K_1 , demostrándose que a medida que se incrementa el valor del coeficiente superficial de transferencia de calor para una temperatura de la pared constante el enfriamiento del mineral es más rápido.
- En la Figura 3.5 se observa la variación de la temperatura del agua para diferentes valores de K_2 , manteniendo constante la temperatura de la pared y para un coeficiente superficial de transferencia de calor K_4 igual a 0,5, siendo este último quien caracteriza la transferencia de calor del agua al medio.
- En las Figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 se observa que para menores valores de flujo de mineral y mayores valores de K_1 la disminución de la temperatura es mucho más rápida, a medida que aumenta el flujo y para valores pequeños de K_1 la pendiente de la curva disminuye.
- En las Figuras 3.11 y 3.12 se observa que mayores valores del flujo de mineral y del coeficiente superficial de transferencia de calor K_2 , la temperatura del agua en la piscina se incrementa..

CAPÍTULO IV

VALORACIÓN TÉCNICO - ECONÓMICA E IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL

4.1- Introducción

En la actualidad resulta generalmente admitido que los ingresos presentes y futuros de la sociedad, así como la producción continua de bienes y servicios dependen de la disponibilidad no solo de capital y fuerza laboral, sino también de recursos naturales y del medio ambiente. Si no se toma adecuadamente el costo y valor del medio ambiente, puede llegarse a una visión errónea de la riqueza, los ingresos de la sociedad y de su auténtico potencial de desarrollo sostenible.

En consecuencia, se hace necesaria una modificación profunda en el enfoque económico del diseño de nuevos productos, en el que se considere el desgaste y deterioro de los recursos naturales y valoren los bienes medioambientales, incorporando progresivamente los costos ambientales en el precio del costo de los productos comercializados, en una gestión del ciclo de vida de productos y procesos.

Para combatir las amenazas al medio ambiente es necesario conocer la magnitud de los problemas existentes y su defensa puede ser analizada de dos formas fundamentales: la acción preventiva, que evita la ocurrencia de impactos y fenómenos adversos, basada en la reformación y reciclaje de las materias primas empleadas, así como los desechos resultados de la aplicación de técnicas contaminantes y acción correctiva, en la cual de ocurrir los impactos, plantea rápido posibles acciones que atenúen los efectos de los mismos, con medidas de mitigación y compensación que aseguren el llevar al medio ambiente a niveles aceptables.

Es oportuno destacar que todas las inversiones e investigaciones que se realizan en Cuba deben cumplir tres requisitos inviolables: primero, deben ser compatibles con los principios de la defensa nacional, deben ser económicamente factibles y deben contribuir a la preservación y mejora del medio ambiente, en correspondencia con esto:

El **objetivo** del presente capítulo es:

Valorar económicamente la propuesta efectuada considerando el impacto social y ambiental asociado a la misma.

4.2- Valoración técnico-económica

Para realizar la valoración técnico-económica del proceso de enfriamiento se deben analizar las pérdidas que existen actualmente en el sistema de tanque de contacto (ver Anexos Figura 6) por ser en este donde tiene repercusión el proceso analizado, estas pérdidas pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Pérdidas por evaporación del amoníaco.
- Pérdidas por mantenimiento no planificado.
- Pérdidas por consumo de energía eléctrica.
- Pérdidas metalúrgicas.

Pérdidas por evaporación del amoníaco

Estas ocurren cuando el proceso de enfriamiento es deficiente y se obtienen altas temperaturas del mineral a la salida de los enfriadores, en estas condiciones se mezcla el mineral caliente con el amoníaco a temperatura ambiente y se produce un proceso de evaporación del NH_3 en el cual se pierde parte de este reactivo. La metodología para el cálculo de esta pérdida se muestra a continuación.

➤ **Determinación de las pérdidas de amoníaco (NH_3) en los tanques de contacto**

Para determinar las pérdidas de amoníaco en los tanques de contacto se tomaron muestras de licor de las canales de las series (A, B y C), así como muestras de la pulpa descargadas por las bombas en las tinas, en ambos casos se le efectuó análisis de concentración de NH_3 , además se controlaron los siguientes parámetros:

- Temperatura en cada serie de contacto.
- Densidad de la pulpa.
- Tonelaje por serie.

Estos permitieron calcular el volumen de licor a cada serie, las toneladas de NH_3 de entrada y de salida.

Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas (5 y 6) de los Anexos.

Para calcular el por ciento de incidencia de las pérdidas por tanques de contacto en el total de pérdidas en la fábrica se determinaron:

- Pérdidas de NH_3 en la pulpa de carbonato bombeada a calcinación (11,515 t/día)
- Pérdidas de NH_3 en la cola bombeada al dique (7,827 t/día).
- Pérdidas por el sistema de absorción de la planta Lixiviación y Lavado (1,519 t/día).
- Pérdidas por el sistema de absorción de la planta Recuperación de Amoníaco (0,041 t/día).
- Pérdidas totales del día (59,52 t /día).

Luego las pérdidas económicas diarias por evaporación del amoníaco en los tanques de contacto en las condiciones actuales es de 10,93 t/día (ver Anexos Tabla 11), considerando que el precio actual del NH_3 es 335,312 USD/t éstas ascienden a 3666,43 USD por tanto las pérdidas económicas para un año de trabajo continuo es 1337710,45 USD.

Pérdidas por mantenimiento no planificado

Estas pérdidas surgen por el deterioro prematuro de algunos elementos y accesorios que componen el sistema de los tanques de contacto, el mismo está dado porque el Magnesio a altas temperaturas se hace soluble en la pulpa; se incrusta en las paredes de los tanques de contacto y en las tuberías por donde es transportado, las cuales son cambiadas cada dos o tres meses aproximadamente (normalmente en las condiciones del proyecto el periodo de reparación de amplia) lo que genera pérdidas de 12 570 USD por cada tramo de tubería según estudios realizados por el personal de mantenimiento de la planta.

Pérdidas por consumo de energía eléctrica

Parte de los gastos en energía eléctrica que ocurren en el sistema de los tanques de contacto están dados por la sobrecargas en los motores de agitación del tanque al aumentar la densidad de la pulpa y además por la incorporación adicional de las bombas que se utilizan para retirar los altos niveles de los tanques, el valor de estas pérdidas se reflejan en las Tablas (4.1 y 4.2).

Tabla 4.1 Pérdidas por trabajo de motores asincrónicos.

Motor / Causa	Cantidad	Energía perdida en un mes (MWh)	Precio del MWh (USD)	Pérdidas al año (USD)
Motor de reserva en sistema de bombeo del tanque trabajando al vacío (30 días).	4	0,06	70	61320

Tabla 4.2 Pérdidas eléctricas por aumento de la densidad de la pulpa en el tanque.

Variación de la densidad (kg/m ³)	Variación de corriente y potencia	Tiempo de ocurrencia al mes (h)	Energía perdida al mes (kWh)	Precio del kW (USD)	Pérdidas al año (USD)
1130 – 1165	I = 43,7 - 50,3 (A) P = 26,6 – 30,66 (kW)	288 (40)%	1169,28	0,0218	305,88
Pérdidas totales en los motores de una serie (1 tanque)					305,88

Pérdidas metalúrgicas

Ocurren en los reactores producto al aumento de la densidad de la pulpa y la temperatura a la salida del tanque de contacto, las mismas disminuyen considerablemente la posibilidad de extracción (de Níquel y Cobalto) en la empresa y constituyen las mayores pérdidas del sistema, sus valores se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Pérdidas metalúrgicas en el sistema del tanque.

Valores Nominales	Extracción en los Reactores (%)	Rangos de variación	Variación de la extracción	Pérdidas al año	Total (USD)
Temp.(K) (303 - 314)	Níquel = 90 Cobalto = 25	Temp. (K) (316 – 323)	Níquel = 88,5 Cobalto = 18	Ni = 149,7 Co = 53,6	Ni = 1464614,03 Co = 1746689,7
Densidad (kg/m ³) 1130- 1140	Níquel = 90 Cobalto = 25	Densidad (kg/m ³) 1150- 1180	Níquel = 89 Cobalto = 19	Ni = 149 Co = 55,6	Ni = 1027173,91 Co = 1565208
Pérdidas metalúrgicas totales en un año (USD)			Níquel = 2 054 347,82 Cobalto = 3 130 416,00 Total = 5 184 763, 82		

La modernización total del proceso de enfriamiento del mineral de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara desde el punto de vista de su automatización y control según las firmas productoras tiene un valor aproximado de 3 millones de dólares, si se considera el costo total del equipamiento y el que se incurre en el montaje, transporte y mano de obra. El ahorro anual por concepto de evaporación del amoniaco (en las nuevas condiciones se evaporan alrededor de 7 t/día) y consumo de energía eléctrica (considerando que el costo promedio de la energía es 70 dólares el MW-h) es de 542613.29 USD por lo que el tiempo de recuperación de la inversión por este concepto sería de 5,52 años, el que disminuye cuando se suma la reducción de los costos de mantenimiento y medioambientales debido al descenso de las emisiones de polvos a la atmósfera y la humanización de la labor de los operarios.

4.3- Impacto social

Esta investigación tiene gran importancia para la empresa Ernesto Che Guevara, porque con la estabilización de la temperatura del mineral a la salida de los enfriadores se logra un adecuado proceso de enfriamiento lo que permite una mejor eficiencia y mayor producción de níquel y Cobalto, factor este decisivo para el desarrollo de la región y del país por ser la producción niquelífera junto al turismo los principales renglones económicos en la actualidad. La incorporación de estos resultados permite humanizar la labor de los operadores que están expuestos a las

emisiones gaseosas de amoníaco y gas carbónico, letales para la vida en altas concentraciones.

También con su implementación se mejora ostensiblemente el entorno laboral, el cual es bastante pésimo para la planta de Lixiviación y Lavado ya que en esta se alcanza el 33% del total de contaminación en la empresa de acuerdo con lo planteado por Hurtado (1999), disminuyen las emisiones gaseosas hacia los barrios residenciales de la comunidad, aumentando la calidad del aire, esto hará posible una mitigación de los problemas respiratorios en los niños, adultos y demás seres vivos. Otro aspecto positivo lo representa la posibilidad de obtener mejores índices de estimulación al poder cumplir exitosamente los planes de producción, lo que repercute favorablemente en las familias de los obreros.

Este trabajo además de los resultados antes expuestos aporta una metodología de cálculo que permite ser utilizada por los estudiantes y otras personas interesadas en la temática para realizar cualquier análisis que sobre el funcionamiento del proceso se requiera sin necesidad de exponer al personal investigador a las emisiones gaseosas y en contacto con sustancias altamente tóxicas y nocivas.

4.4- Impacto ambiental

La preocupación por el medio ambiente es una de las corrientes socioculturales más extensas de la actualidad. El hombre está empezando a proteger el entorno porque sabe que han de vivir y sobre vivir juntos, la degradación del medio ambiente es una piedra angular en la desaparición de una u otra especie viva.

La velocidad del cambio tecnológico impulsado por el paradigma tecno-económico actual, incide directamente en todas las actividades y esferas de la vida social.

El desarrollo de la industria minero metalúrgica en la región de Moa, es una muestra de todo lo agresiva que puede ser la actividad humana sobre el medio ambiente, sin embargo industria y ecología no son incompatibles, se pueden compaginar y coexistir, la interacción empresa y medio ambiente ha de ser beneficiosa y llegar a formar parte del entorno físico, social y humano de la región.

La explotación de los recursos perteneciente a la Empresa “Ernesto Che Guevara” representa un doble impacto sobre el medio, ya que primero emplea y consume los recursos naturales de la zona, como yacimientos minerales, produciendo residuos potencialmente negativos como la emisión de gases, ruido, polvos, vibraciones, vertidos, e impacto visual o positivo como el establecimiento de fuentes de empleo, desarrollo inducido en la región, etc.

Al realizar un estudio del comportamiento ambiental del proceso de enfriamiento del mineral reducido en la planta de hornos de reducción se analizarán todos los factores que de una forma u otra influyen, haciendo énfasis fundamentalmente en los más predominantes.

Identificación de las acciones o actividades con repercusión ambiental.

- ☐ Derrame de mineral
- ☐ Escape de gases contaminantes
- ☐ Emisiones continua de polvo
- ☐ Emisiones continuas de ruido

Tabla 4.4 Identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones.

Medio Físico	Medio socio-económico
Suelo	Hombre
Agua	Aspectos sociales
Aire	Aspectos económicos

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 tanto en el objeto como en los elementos externos a este. En la Tabla (4.5) se muestran los impactos ambientales en la planta de hornos de reducción, la misma servirá como base para el establecimiento de los impactos para el objeto de estudio.

Tabla 4.5 Identificación de los impactos ambientales en la planta hornos de reducción.

Acciones o Actividades	Factores ambientales	Impactos Ambientales
Derrame de mineral	Económico	Pérdidas por concepto económico
Escape de gases contaminantes	Aire	Disminución de la calidad del aire
Escape de gases contaminantes	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Escape de gases contaminantes	Económico	Pérdidas por concepto económico
Emisiones de polvo	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Emisiones de Ruido continuo	Hombre	Pérdidas de la sensibilidad auditiva

De los impactos representados en la Tabla (4.5) para el proceso de enfriamiento solo se cumplen algunos y también se agregan otros, todos estos impactos correspondientes al proceso en estudio a continuación se relacionan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Identificación de los impactos ambientales en el proceso de enfriamiento.

Acciones o Actividades	Factores ambientales	Impactos Ambientales
Derrame de mineral	Económico	Pérdidas por concepto económico
Evaporación de Amoníaco	Aire	Disminución de la calidad del aire
Evaporación de Amoníaco	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Evaporación de Amoníaco	Económico	Pérdidas por concepto económico
Emisiones de Ruido continuo	Hombre	Pérdidas de la sensibilidad auditiva

Para comprender cual es la situación ambiental real que actualmente presenta la planta hornos de reducción y el proceso de enfriamiento, en el epígrafe posterior se relacionan algunos estándares del banco mundial 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.

4.4.1- Recomendaciones del banco mundial sobre medio ambiente, salud y seguridad en la minería a cielo abierto

☞ Calidad del aire en los puestos de trabajo

- El monitoreo periódico de los puestos de trabajo debe dirigirse a los contaminantes del aire relevantes 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
 - Monóxido de Carbono 29 mg/m³
 - Cobre 1 mg/m³
 - Sílice libre 5 mg/m³
 - Cianuro de Hidrógeno 11 mg/m³
 - Sulfuro de Hidrógeno 14 mg/m³
 - Plomo 0,15 mg/m³
 - Dióxido de Nitrógeno 6
 - Polvo inerte 10 mg/m³
 - Dióxido de Azufre 5 mg/m³

☞ El ruido en los puestos de trabajo

- 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 expuesto a los niveles de ruido superiores a 85 dB (A).

4.4.2- Mediciones realizadas en la planta hornos de reducción de la empresa Ernesto Che Guevara

Mediciones de gases contaminantes

La medición de gases se realizó en condiciones normales de trabajo de la planta, en la toma de muestras se utilizaron los métodos colorimétrico y pasivo, para la determinación de las concentraciones de los diferentes gases contaminantes en los puestos de trabajo, también se realizó una campaña de mediciones instantáneas utilizando un gasoanalizador portátil de la firma francesa OLDHAN equipado con sensores electroquímicos para la medición de SO₂, H₂S, NH₃ y NO que tiene una sensibilidad de 0,1 ppm (parte por millón) el SO₂ y de 1 ppm para el resto de los gases. Los resultados obtenidos por ambos métodos se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Valores de la concentración de los gases contaminantes medidos por los métodos colorimétrico y pasivo. (referido a 8 horas de trabajo).

Método	Punto de muestreo	SO ₂ (mg/m ³)	H ₂ S (mg/m ³)	NO (mg/m ³)	NO ₂ (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)	NH ₃ (mg/m ³)
Colorimétrico	H. Reducc.	0,03	0,11	0	0	0	0,06
Método	Punto de muestreo	SO ₂ (mg/m ³)	H ₂ S (mg/m ³)	Compuestos Orgánicos			NH ₃ (mg/m ³)
				Benceno	Tolueno	Xileno	
Pasivo	H. Reducc.	0,03	0	0,01	0,002	0,01	--

Se realizaron 10 mediciones en el nivel 2 de la losa 2, con el gasoanalizador habilitado con los sensores para detectar SO₂, H₂S, y NH₃, detectándose en dos ocasiones concentraciones máximas de 5 ppm para el SO₂, que igualan el valor de exposición corta (STEL), establecido por la Ocupacional Safety Health Administration (OSHA). De manera general, el 90% de las mediciones de este contaminante en esta área arrojaron valores comprendidos entre 3 y 5 ppm, por lo que se recomienda el monitoreo continuo de este gas, y en función de los resultados, aplicar las medidas de protección previstas para los trabajadores, da la posibilidad de que ocurran con frecuencia eventos que superen los niveles STEL de contaminación del ambiente laboral por este gas.

El máximo valor detectado para el H₂S es de 1 ppm muy por debajo del STEL establecido por OSHA, mientras que la concentración de NH₃ estuvo en todos los casos, por debajo del umbral de sensibilidad del gasoanalizador.

En el nivel 2 de la losa 1 se realizaron 10 mediciones con los sensores de SO₂, H₂S y NO y en todos los casos las concentraciones de los 3 contaminantes estuvieron por debajo del umbral de sensibilidad del equipo de medición.

En el nivel 23 losa 2 se realizaron 10 mediciones con los sensores de SO₂, H₂S y NH₃ y en todos los casos la concentración para el H₂S estuvieron por debajo del umbral de sensibilidad [límite de detección (LD)] del equipo de medición. Para el NH₃ se obtuvieron 3 valores de 1 ppm y el resto por debajo del umbral de sensibilidad, mientras que para el SO₂ se obtuvieron valores de concentración comprendidos entre 0,1 y 0,6 ppm, en general muy por debajo de STEL establecido por OSHA. Los valores antes mencionados se relacionan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Valores instantáneos medidos con el gasoanalizador en la planta hornos de reducción.

Hornos de Reducción Nivel 2 losa 2			Hornos de Reducción Nivel 23 losa 2			Hornos de Reducción Nivel 2 losa 1		
H ₂ S	SO ₂	NH ₃	H ₂ S	SO ₂	NH ₃	H ₂ S	SO ₂	NO
< LD	2	< LD	< LD	0,6	1	< LD	< LD	< LD
< LD	3	< LD	< LD	0,6	1	< LD	< LD	< LD
< LD	4	< LD	< LD	0,5	1	< LD	< LD	< LD
< LD	4	< LD	< LD	0,3	< LD	< LD	< LD	< LD
1	3	< LD	< LD	0,2	< LD	< LD	< LD	< LD
1	3	< LD	< LD	0,1	< LD	< LD	< LD	< LD
< LD	5	< LD	< LD	0,2	< LD	< LD	< LD	< LD
< LD	4	< LD	< LD	0,1	< LD	< LD	< LD	< LD
< LD	5	< LD	< LD	0,1	< LD	< LD	< LD	< LD
1	4	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Mediciones de polvo en suspensión

El muestreo se llevó a cabo en los lugares más críticos de la planta. La técnica para la determinación total de polvo en suspensión en el aire se basa en la retención cuantitativa del polvo al pasar el aire a través de un filtro. La toma de muestra se realizó según NC 19-01-31, mediante un captador de bajo volumen de la firma AIR METRICS, la técnica de toma de muestra correspondiente al método de ensayo permitió que esta se realizara en la zona respiratoria del trabajador durante la ejecución de su actividad laboral habitual. Fueron tomadas muestras en condiciones normales de producción teniendo en cuenta los procesos tecnológicos fundamentales y las principales fuentes de emisiones difusas y fugitivas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Resultados de los análisis de polvo en suspensión

Estación No.	Descripción del punto de muestreo	Concentración (mg/m³)
1	Hornos Reducción (Nivel 4 losa 2)	4,4
2	Romana (losa 2 nivel 23)	2,26

Estos valores han disminuidos sensiblemente comparados con los obtenidos en estudios realizados por investigadores del ISMM en el año 1995 pero son muy similares a los obtenidos por CESIGMA.SA en el año 1998, aunque se evidencia una sensible mejora de la calidad del aire en el medio ambiente laboral respecto a este indicador (lo que está dado por los cambios que se han venido realizando con el objetivo de mejorar la calidad del aire en los puestos de trabajo) todavía siguen estando por encima de la concentración máxima admisible (CMA).

Mediciones de ruido

Dada la relativamente lejana ubicación de la industria y el yacimiento actualmente en explotación, con respecto a los asentamientos humanos más cercanos, estos no constituyen una fuente importante de riesgo por concepto del ruido para los mismos por lo que las mediciones se realizaron en los puestos de trabajo y en las áreas consideradas más ruidosas.

Para la evaluación de las características de ruidos se determinó el nivel sonoro expresado en decibeles A (dBA), siendo esta la unidad que expresa el nivel sonoro, utilizando para su medición el filtro de ponderación A, que proporciona una respuesta muy aproximada al comportamiento del oído humano.

Para este estudio se tomó como definición de ruido, aquel sonido que por su intensidad, composición espectral u otras causas, es no deseado o puede originar daños a la salud humana. Los niveles máximos admisibles de ruido y los aspectos de protección contra este, constituyen los requisitos higiénicos sanitarios que habrán de observarse en los locales y puestos de trabajo con el objetivo de disminuir los efectos nocivos sobre los trabajadores que en ellos desarrollan su actividad laboral.

Un local de trabajo es ruidoso, cuando en el mismo hay un nivel sonoro continuo equivalente o superior a 85 dB (A). Las zonas con niveles sonoros superiores a este valor se consideran con riesgo de la pérdida del trabajador y debe indicarse con señales de seguridad.

En las diferentes partes de la planta las fuentes de ruido atendiendo a su posicionamiento, se consideran fundamentalmente estática y los ruidos que estas emiten, atendiendo a la naturaleza de su espectro, se consideran continuos. Por la variabilidad en el tiempo de esta su comportamiento es muy variado, ya que se puede decir, que cada fuente emite un sonido diferente, sin embargo es posible clasificar los ruidos en cuatro tipos:

Ruido de impulso: Son de corta duración y producen un nivel de presión sonora muy elevado, la diferencia estriba en que este se produce por cambios bruscos de la presión.

Ruido de impacto: Es un ruido de muy corta duración, por tanto el nivel de presión aumenta rápidamente. Se producen por el choque de superficies sólidas. Es el caso de muchas máquinas empleadas en la industria.

Ruido continuo: Es el que su espectro de frecuencia no varía con el tiempo, ni tampoco varían los niveles de presión acústica, este tipo de ruido es muy raro que se produzca en una ciudad o en un recinto industrial.

Ruido intermitente: Son aquellos cuyos niveles de presión y espectro de frecuencia varían entre unos límites muy estrechos y además esta variación es muy constante. Es el tipo de ruido más común en las industrias y en general se puede descomponer en un ruido de fondo con variación del nivel de presión sonora.

Efecto sobre la salud humana

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 de 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.

En estudios realizados por la Agencia de Protección Ambiental (APA) se ha llegado a la conclusión de que existe riesgo de pérdida definitiva del oído, después de 40 años de exposición diaria a un nivel constante de ruido, expresado en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Límites de exposición diaria a distintos niveles de ruidos equivalente.

Nivel de Ruido Equivalente Leq dB(A)	Exposición diaria Horas	Nivel de Ruido Equivalente Leq dB(A)	Exposición diaria Horas
75	8	81	2
78	4	84	1

Es importante recordar que los valores indicados anteriormente, están establecido según la hipótesis de que existe un silencio completo durante el resto del tiempo.

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

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

El ruido también produce en el sistema neuro-vegetativo, una serie de modificaciones funcionales que son reacciones de defensa del organismo frente a una agresión externa, por ejemplo: la elevación de la presión arterial, aceleración del ritmo cardíaco y de los movimientos respiratorios, tensión muscular, descarga de hormonas en sangre, etc. 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.

Impactos potenciales a la calidad del aire en la planta hornos de reducción.

La instalación de 8 nuevas cámaras con una capacidad de 30 t/h (brutas); 27 (netas), con un sistema de limpieza de gases, enfriamiento del mineral reducido y el nudo de alimentación compuesto por la alimentación del mineral propiamente dicho y el sistema de petróleo aditivo. Pueden aumentar potencialmente los niveles de gases y polvo que actualmente existen en el interior de la planta, de no implementarse la soluciones previstas a los problemas de hermeticidad de los transportadores, la eficiencia de los sistemas de aspiración para controlar la regulación de la presión de los hornos. De ser utilizado el crudo nacional como aditivo o como combustible, cualquiera de estas dos variantes provocará que se genere una mayor cantidad de SO_2 en el proceso, lo que puede afectar al medio ambiente laboral sensiblemente.

4.5- Conclusiones del capítulo IV

- Las altas temperaturas del mineral a la salida del proceso de enfriamiento repercuten negativamente en la planta de Lixiviación y Lavado, destacándose cuatro pérdidas fundamentales, ellas son: pérdidas por evaporación del amoníaco, pérdidas por mantenimiento no planificado, pérdidas por consumo de energía eléctrica y pérdidas metalúrgicas, sumadas todas representan una pérdida económica de 6596670.15 USD al año.

El proceso de enfriamiento como parte importante de la planta hornos de reducción presenta cuatro formas principales de contaminación: el derrame de mineral, el sobre calentamiento del medio ambiente laboral por altas temperaturas, las emisiones de ruido y la evaporación del amoniaco, las mismas aunque tienen sus influencia negativa en los obreros que laboran expuestos a ellas se encuentran dentro de los estándares internacionales.

CONCLUSIONES

- En la literatura consultada es pobre la información sobre la modelación físico-matemática de enfriadores de mineral cilíndrico rotatorios y se limitan a realizar balances de energía sin llevar a cabo una caracterización profunda del objeto de estudio.
- El análisis del proceso de enfriamiento de mineral como objeto de modelación matemática definió los parámetros de entrada del proceso: m_{em} - flujo de mineral, T_{em} - temperatura del mineral a la entrada del enfriador, m_{ea} - flujo de agua de entrada a la piscina, T_{ea} - temperatura del agua a la entrada de la piscina, n - número de revoluciones del tambor; los parámetros de salida: T_{sm} - temperatura del mineral a la salida del enfriador, T_{sa} - temperatura del agua a la salida en la piscina; y las perturbaciones: P_T - presión de trabajo en el interior del enfriador, γ - coeficiente de llenado del tambor, T_{ma} - temperatura del medio ambiente, H_{ma} - humedad relativa del medio ambiente.
- Se obtuvieron tres ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (2.15), (2.28) y (2.42) que conforman el modelo matemático que caracteriza el comportamiento dinámico del proceso de enfriamiento de mineral en los cilindros rotatorios horizontales.
- A través de la metodología de cálculo establecida se realizó la identificación preliminar de los coeficientes superficiales de transferencia de calor por unidad de longitud obteniéndose: $K_1 = 2,743 \frac{kW}{mK}$, $K_2 = 0,724 \frac{kW}{mK}$, $K_4 = 0,638 \frac{W}{mK}$
- Las curvas obtenidas como resultado de la identificación preliminar del modelo muestran la tendencia a la disminución de la temperatura del mineral con la variación de la longitud del tambor para diferentes valores de coeficientes superficiales de transferencia de calor, de temperatura de la pared y de temperatura del agua en la piscina.

CONCLUSIONES

- En la literatura consultada es pobre la información sobre la modelación físico-matemática de enfriadores de mineral cilíndrico rotatorios y se limitan a realizar balances de energía sin llevar a cabo una caracterización profunda del objeto de estudio.
- El análisis del proceso de enfriamiento de mineral como objeto de modelación matemática definió los parámetros de entrada del proceso: m_{em} - flujo de mineral, T_{em} - temperatura del mineral a la entrada del enfriador, m_{ea} - flujo de agua de entrada a la piscina, T_{ea} - temperatura del agua a la entrada de la piscina, n - número de revoluciones del tambor; los parámetros de salida: T_{sm} - temperatura del mineral a la salida del enfriador, T_{sa} - temperatura del agua a la salida en la piscina; y las perturbaciones: P_T - presión de trabajo en el interior del enfriador, γ - coeficiente de llenado del tambor, T_{ma} - temperatura del medio ambiente, H_{ma} - humedad relativa del medio ambiente.
- Se obtuvieron tres ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (2.15), (2.28) y (2.42) que conforman el modelo matemático que caracteriza el comportamiento dinámico del proceso de enfriamiento de mineral en los cilindros rotatorios horizontales.
- A través de la metodología de cálculo establecida se realizó la identificación preliminar de los coeficientes superficiales de transferencia de calor por unidad de longitud obteniéndose: $K_1 = 2,743 \frac{kW}{mK}$, $K_2 = 0,724 \frac{kW}{mK}$, $K_4 = 0,638 \frac{W}{mK}$
- Las curvas obtenidas como resultado de la identificación preliminar del modelo muestran la tendencia a la disminución de la temperatura del mineral con la variación de la longitud del tambor para diferentes valores de coeficientes superficiales de transferencia de calor, de temperatura de la pared y de temperatura del agua en la piscina.

RECOMENDACIONES

- Caracterizar experimentalmente el enfriador de mineral cilíndrico rotatorio como objeto de modelación matemática.
- Realizar la validación del modelo físico-matemático a escala industrial.
- Continuar con la búsqueda bibliográfica sobre la temática tratada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aróstegui, J. M. *Metodología del Conocimiento Científico*. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales, 1978. 445 p.
2. Arzola Ruiz, J. *Sistemas de Ingeniería*, La Habana: Editorial "Felix Varela", 2000. 482p.
3. Boateng, A. A; Barr, P.V. *Modelling of particle mixing and segregation in the transverse plane of a rotary klin*. Chemical Engineering Science, September 1996 vol. 51 pp. 4167-4181.
4. Boateng, A. A; Barr, P.V. *Granular flow behaviour in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder*. Journal of Fluid Mechanics, January 10, 1997 vol. 330 pp. 233-249.
5. Bui, R. T. *Computational modelling of thermophysical processes in the light metals industry*. Reveu Generale de Termique, Septiembre 1997 vol. 36 pp. 575-591.
6. Burmeister, L. C., *Convective Heat Transfer*, Wiley Interscience, New York, 1983.
7. Chang, A. *Una Visión Sobre las Reservas Estratégicas de Eficiencia Metalúrgica en la Tecnología Carbonato-Amóniacal*. Minería y Geología. 16 (1):13 – 19, 1999.
8. Columbié Navarro, A., Guzman del Río, D., Muñoz Moner A. *Análisis del proceso de calcinación del C.B.N como objeto de regulación automática*. Revista Minería y Geología No.2, 1991.
9. Columbié, A. *Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2001. 98p.
10. Conde, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Felix Varela, 1994. Tomo I.
11. Contaminación por ruido. http://www.conam.gob.pe/educamb/cont_ruido.htm. Junio 2004.
12. Contaminación por ruido.
http://members.fortunecity.es/robertexto/archivo4/contam_ruidos.htm. Junio 2004.
13. Correa, N. *Balance energético en el enfriador de mineral en la planta de Hornos de reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Ramón, Gonzáles Marrero. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2000. 43p.
14. Detkov S. P. *Movimiento del mineral en horno rotatorio*; Revista Ts. M 1980. No.11, pp 54-57.

15. Evaporación del agua. <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/pregunta/p-7.htm>. Junio 2004.
16. Faires, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
17. Farrel, G; E. Egaña; F. Fernández. *Investigación científica y nuevas tecnologías*. La Habana: Editorial Científico-Técnica, 2003. 132p.
18. Folliot: Publication technique No.70. centre d'estudet de Recherche de l'Industries des Liants Hydrauliques, Paris, 1955.
19. Fox, R. W., and A.T. McDonald, *Introduction to Fluid Mechanics*, WILEY, New York, 1993.
20. Garcia. S; R. Arredondo. *Simulación de un reactor catalítico industrial*. <http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transfereencia/Transferencia46/eep-06.htm>. Abril, 2004.
21. Guerra, J. D.; E. S. Pereda: *Introducción al análisis estadístico para proceso*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1987. pp368.
22. Guzmán D. *Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa, Cuba. 2001. 124p.
23. Houge, O; M, Watson; R. A. Ragatz. *Principios de los procesos químicos*. T.I. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1978.
24. Hurtado, F. G. *Estudio de la Influencia en el Medio Ambiente del Sistema de Generación de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara y el Sistema de Transmisión Eléctrico Adyacente*. Tesis doctoral. ISMM, Moa. 1999. 120p.
25. Incropera, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II. III.
26. Isachenko, V; V. Osipova; A. Sukomel. *Transmisión del calor*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1979. pp 556.
27. Jiménez, H. *Mathematical modeling of momentum, heat and mass transfer in porous media*. <http://www.itc.mx/w3/bioquimica/hugoji.php> . Abril, 2004.
28. Khakhar, D. V.; McCarthy, J. J.; Ottino, J. M. *Radial segregation of granular mixtures in rotating cylinders*. *Physics of Fluid*, December 1997 vol. 9 pp.3600-3614.

29. Lago de Plachco, M; H, Lucena. *Fenómenos de Transferencia de Masa, Calor y Momentum*. <http://web.tampabay.rr.com/ig/transferencia.htm>. Abril, 2004.
30. Lesgilación sobre ruido. <http://www.ruidos.org/normas.html>. Junio 2004.
31. Manual de Operaciones de la planta Hornos de Reducción de la empresa Comandante "Ernesto Che Guevara", 1985. 219 p.
32. Maqueira, R; C. Rodríguez. *Laboratorio de matemática superior*. La Habana: Editorial "Felix Varela", 2002. 405p.
33. Marrero Ramírez S. *Algoritmos y sistemas de control del proceso de reducción del mineral laterítico en hornos de soleras múltiples*. Tesis doctoral. San Petersburgo.1989.
34. Martín J. *Investigación de la modelación matemática del horno de calcinación*. Vol No.2. Informe técnico 16/5/1978. Nicaro.
35. Mason, D; P. Marjanovic; A. Levy. *A simulation system for pneumatic conveying systems*. *Powder Technology*. 95 (1): 7 – 14, 1998.
36. Mesa Redonda Informativa Sobre el Desarrollo de la Ciencia y la Técnica en Cuba, C. Habana, Enero 30 del 2001.
37. Mesarovich, M. *Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas*. Editorial MIR. URSS, pp. 422-436, 1996.
38. Mijiev.,Mijjeiva. *Fundamentos de termotransferencia*. Editorial Mir, 1979.
39. Montadas, K. *Estudio de la atmósfera dentro de los enfriadores de los hornos de reducción*". José, Oriol Rodríguez. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 1991. 55p.
40. Nukiyama, S., "The maximum and minimum values of the heat transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure" J. Japan Soc. Mech. Eng., 37,367, 1934 (Translation: Int. J. Heat Mass Transfer, 9, 1419), 1966.
41. Perron, J. and R. T. Bui, "Fours rotatifs: Modele dynamique du mouvement du lit", Can. J. Chem. Eng. 72, 16-25 (1994).
42. Perry, C; J, Perry. *Chemical Engineers hand book*. University of Oklahoma. La Habana,1967.
43. Problemas, ecuación Clausius-Clapeyron.
<http://eros.pquim.unam.mx/~rodolfo/oax98b.dir/prosol/>. Junio 2004.

44. Pupo, González, Juana. Análisis de regresión y series cronológicas. La Habana: Editorial "Félix Varela", 1983
45. Quintana, R. *Conferencia Sobre la Industria Cubana del Níquel. II Seminario de Perfeccionamiento de Cuadros*, ISMM, Octubre 1999.
46. Rabell González, D., Morales Morales Y. Evaluación de los enfriadores de mineral de la Empresa Comandante "Ernesto Che Guevara". Manuel Valle Matos. Trabajo de Diploma. Santiago de Cuba: UO, 1998. 65p.
47. Rioshkevich A. S, A. M Podkorbinshky, M. M Rejnik. *Modelo matemático de la transferencia de calor y de masa para la tostación de menas oxidadas de níquel en hornos rotatorios*. Revista Ts.M, 1979, No. 6 pp. 11-15.
48. Rohsenow, W. M., M "A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids". Trans. ASME, 74, 969, 1952.
49. Sai, P. S.T., G. D. Surender and A. D. Damodaran, "Prediction of axial velocity profiles and solid hold-Up in a rotary kiln", Can. J. Chem. Eng. 70, 438-44 (1992).
50. Sverdlik G. I. Gregoreu G. G. *Peculiaridades del paso del movimiento de materiales en un tambor rotatorio a un régimen de cataratas*. Revista Ts.M. 1979. No.1pp.9-12.
51. Swokowski, E. *Cálculo con geometría analítica*. Editorial PWS-KENT, 1999. Tomo I.
52. Torres, E. *Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2003. 105p.
53. Transferencia de calor. <http://www.ramos.utfsm.cl/pqui/tcalor/>. Junio 2004.
54. Transferencia de calor. <http://www.cca.org.mx/dds/web/ventana/ligas/nlaboratorio10.htm>. Junio 2004.
55. Transmisión de calor por convección correlaciones para la convección natural. <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/14.pdf>. Junio 2004.
56. Tyrrell J. *Development of an instrument for measuring inter-particle forces*. Powder Technology. 12: 1-16, 2001.
57. Viera, R; S. López; M. Noemí. *Modelación matemática para ingenieros químicos*. Pueblo y Educación, La Habana, 1988. pp240.
58. Zanchini E, Pulurentil. Periodic heat conduction with relation timer in cylindrical geometry heat and transfer. Springer-Verlag, 1998.

ANEXO 1

Tabla 1 Resultados experimentales del proceso de enfriamiento del mineral reducido para el Experimento 1.

Réplica 1			Réplica 2			Réplica 3		
Ms(Kg/s)	Temperatura °C		Ms(Kg/s)	Temperatura °C		Ms(Kg/s)	Temperatura °C	
	Entrada	Salida		Entrada	Salida		Entrada	Salida
7,89	675	190	10,22	672	242	10,22	669	240
7,89	673	190	10,22	672	241	10,78	687	269
8,44	697	235	10,22	672	243	10,78	687	268
8,44	694	236	10,22	672	244	10,78	686	270
8,44	673	230	10,22	677	242	10,78	688	273
8,44	674	216	10,22	677	235	10,78	700	278
8,44	700	230	10,22	673	233	10,78	690	272
8,44	707	254	10,22	677	238	10,78	683	270
8,44	710	251	10,22	676	246	10,78	690	277
8,44	710	243	10,22	665	232	10,78	678	273
8,44	709	247	10,22	668	236	10,78	690	273
8,44	715	249	10,22	672	248	10,78	690	278
8,44	706	247	10,22	668	236	10,78	684	279
8,44	704	248	10,22	677	235	10,78	688	281
8,44	703	241	10,22	673	235	10,78	690	283
9,56	711	249	10,22	672	238	10,78	690	286
9,56	696	241	10,22	675	238	10,78	684	268
9,56	717	260	10,22	669	242	10,78	683	270
9,56	673	229	10,22	669	244	10,78	689	271
9,56	680	232	10,22	669	247	10,78	687	283
9,56	716	257	10,22	669	241	10,78	694	286
9,56	690	238	10,22	670	247	10,78	689	270
9,56	695	242	10,22	665	242	10,78	690	276
9,56	690	240	10,22	676	246	10,78	691	281
9,56	696	249	10,22	670	243	10,78	683	268

ANEXO 2

Tabla 2 Resultados experimentales del proceso de enfriamiento del mineral reducido para el Experimento 2.

Réplica 1			Réplica 2			Réplica 3		
Ms(Kg/s)	Temperatura °C		Ms(Kg/s)	Temperatura °C		Ms(Kg/s)	Temperatura °C	
	Entrada	Salida		Entrada	Salida		Entrada	Salida
10,56	708	228	10,56	716	230	10,83	724	243
10,56	707	229	10,56	710	228	11,39	726	240
10,56	705	229	10,56	709	228	11,39	724	205
10,56	705	229	10,83	722	233	11,39	728	199
10,56	707	230	10,83	724	232	11,39	730	197
10,56	707	233	10,83	723	232	11,39	736	195
10,56	709	235	10,83	722	232	11,39	740	194
10,56	709	236	10,83	722	232	11,39	740	193
10,56	710	239	10,83	722	232	11,39	737	198
10,56	721	243	10,83	722	233	11,39	730	251
10,56	721	243	10,83	723	235	11,39	725	248
10,56	724	241	10,83	722	237	11,39	723	244
10,56	725	240	10,83	723	239	11,39	727	240
10,56	725	237	10,83	723	240	11,39	727	234
10,56	725	233	10,83	723	242	11,39	727	230
10,56	726	235	10,83	723	242	11,39	728	223
10,56	726	235	10,83	722	243	11,39	727	218
10,56	724	234	10,83	720	238	11,39	722	210
10,56	724	233	10,83	720	237	11,39	718	215
10,56	723	231	10,83	721	237	11,39	706	223
10,83	720	233	10,83	721	238	11,39	713	228
10,56	723	203	10,83	722	238	11,39	710	234
10,56	719	227	10,83	720	237	11,39	708	237
10,56	721	228	10,83	722	237	11,39	707	242
10,56	721	227	10,83	721	236	11,39	706	247

ANEXO 3

Tabla 3 Resultados experimentales del proceso de enfriamiento del mineral reducido para el Experimento 3.

Réplica 1			Réplica 2			Réplica 3		
Ms(Kg/s)	Temperatura °C		Ms(Kg/s)	Temperatura °C		Ms(Kg/s)	Temperatura °C	
	Entrada	Salida		Entrada	Salida		Entrada	Salida
9,89	702	289	11,06	708	282	12,11	686	295
9,89	701	288	11,06	710	276	12,11	717	300
9,89	706	290	11,06	709	280	12,11	684	303
9,89	704	290	11,06	708	282	12,11	683	308
9,89	701	288	11,06	709	282	12,11	680	313
9,89	700	286	11,06	709	281	12,11	679	315
9,89	701	284	11,06	709	281	12,11	679	317
9,89	704	284	11,06	709	280	12,11	679	321
9,89	710	146	11,06	710	280	12,11	680	145
9,89	708	146	11,06	707	282	12,11	680	322
9,89	710	148	11,06	707	282	12,11	680	325
9,89	710	152	11,06	708	283	12,11	682	326
9,89	710	152	11,06	708	281	12,11	682	328
9,89	710	152	11,06	708	333	12,11	683	328
9,89	710	152	11,06	708	333	12,11	684	330
9,89	710	156	11,06	708	333	12,11	683	333
9,89	705	172	11,06	708	332	12,11	684	333
9,89	701	178	11,06	708	335	12,11	685	143
9,89	703	161	11,06	707	336	12,11	686	141
9,89	704	163	11,06	708	336	12,11	690	140
9,89	706	168	11,06	707	336	12,11	690	138
9,89	700	181	11,06	707	282	12,11	690	138
9,89	700	183	11,06	708	283	12,11	690	137
9,89	700	321	12,11	679	322	12,11	689	135
11,06	707	281	12,11	686	287	12,11	689	136

ANEXO 4

Tabla 4 Resultados experimentales del proceso de enfriamiento del mineral reducido para la pared y el agua en la piscina.

Temperatura °C					
de la Pared					del Agua de la piscina
98	105	95	106	112	71,83
103	98	102	105	108	72,16
98	104	104	106	104	73
106	100	105	120	105	73
98	100	100	112	109	76
100	106	98	114	102	73,8
100	101	100	120	110	77,4
104	107	98	116	105	74,8
106	100	103	118	107	79
101	98	106	108	107	77
101	96	108	100	104	77
105	103	102	104	107	76
98	112	115	109	98	75
97	112	106	108	96	73
101	114	114	107	103	74
98	108	106	110	110	70
103	106	100	106	115	73
100	101	100	109	113	74

ANEXO 5

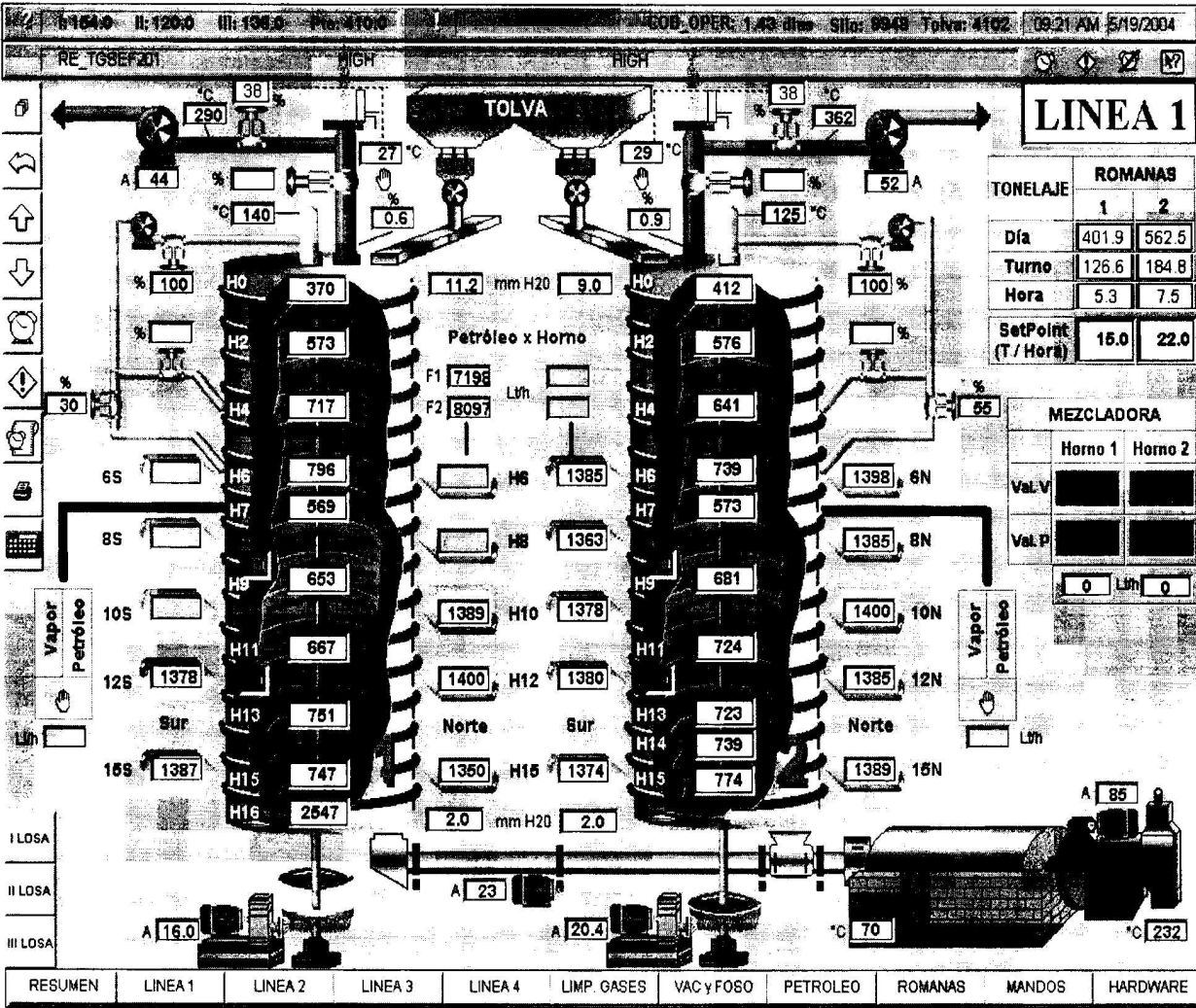


Figura 1 Representa el proceso de control de los parámetros correspondiente al proceso de enfriamiento del mineral.

En la misma se puede obtener los parámetros siguientes: temperatura de descarga de los hornos, temperatura del mineral a la entrada y a la salida del enfriador, además también está registrado el valor del agua en la piscina y otras variables que no son objeto de estudio de este trabajo.

ANEXO 6

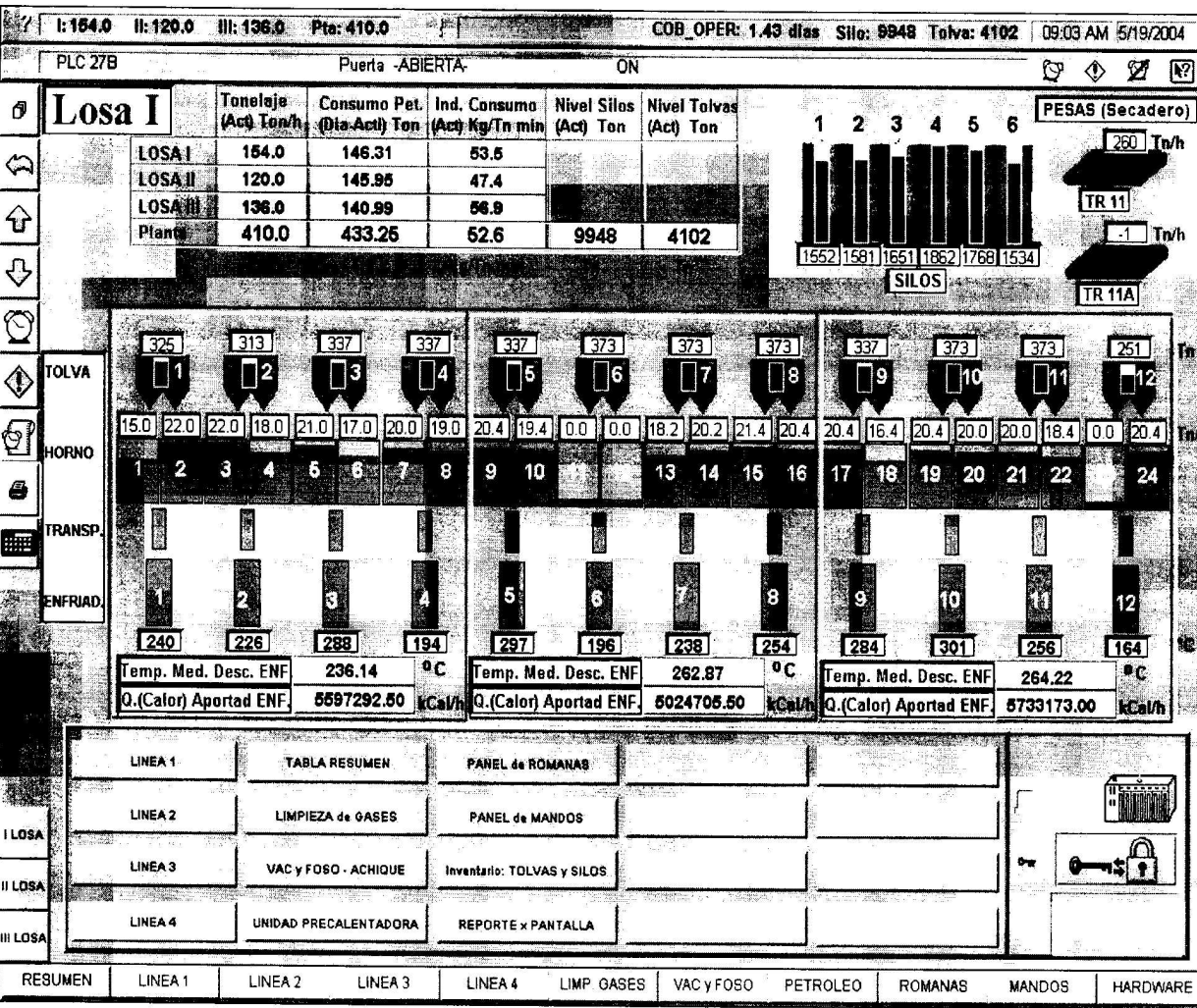


Figura 2 Representa el proceso de control de los parámetros correspondiente al proceso de enfriamiento del mineral.

Muestra los parámetros siguientes: Flujo másico de mineral a la descarga de los hornos, temperatura del mineral a la salida del enfriador, también está registrado el valor del calor aportado por el mineral, ect.

ANEXO 7



Figura 3 Transportador rotatorio que alimenta el mineral reducido al enfriador, en la ilustración también se puede apreciar el proceso de enfriamiento con agua al que está sometido este equipo.

ANEXO 8

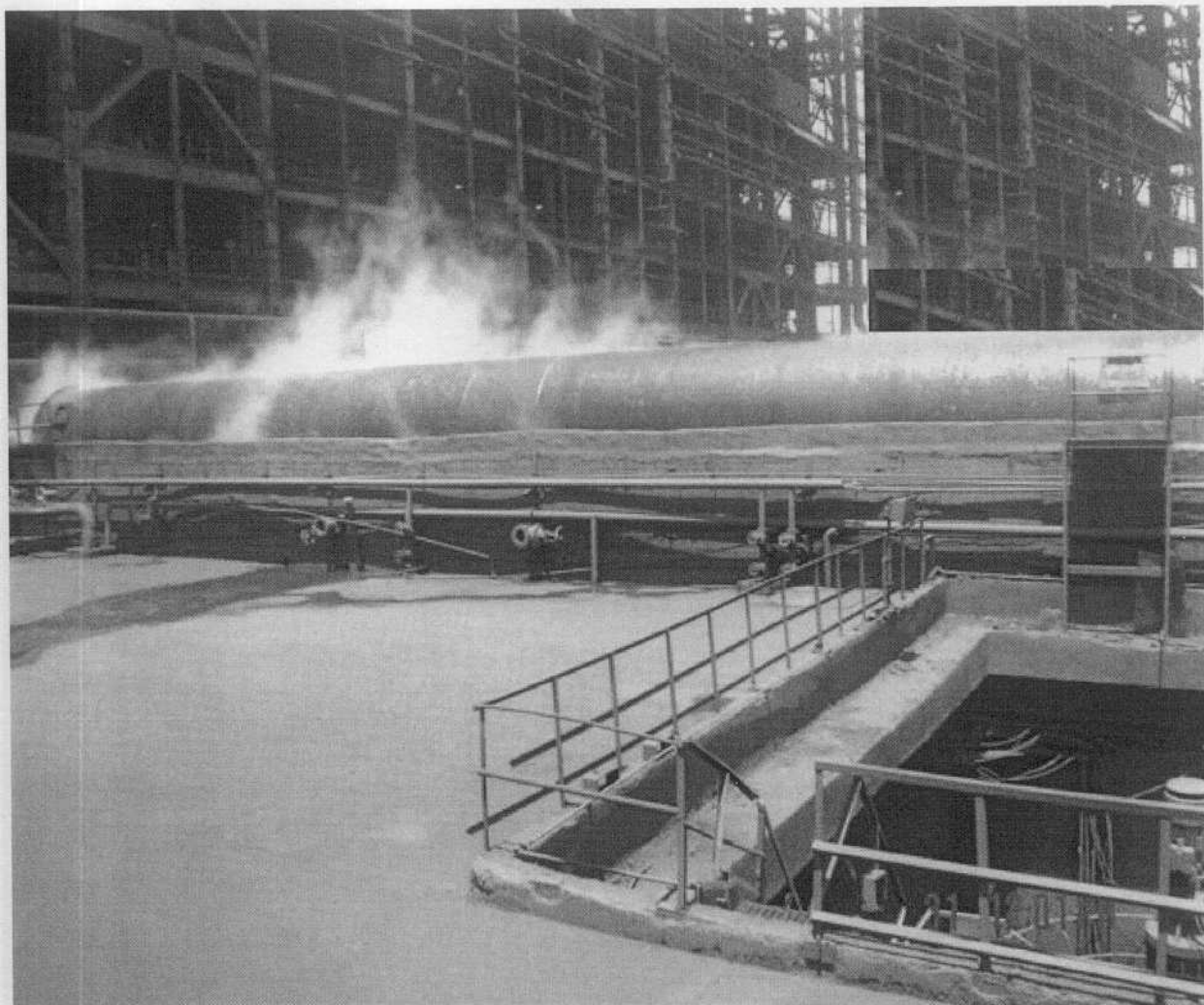


Figura 4 Instalación destinada para el proceso de enfriamiento estudiado, al fondo se encuentra la sección de los hornos de reducción.

ANEXO 9



Figura 5 Vista superior de la instalación, en la imagen se puede observar fácilmente el proceso de ebullición y evaporación de la película de agua.

ANEXO 10

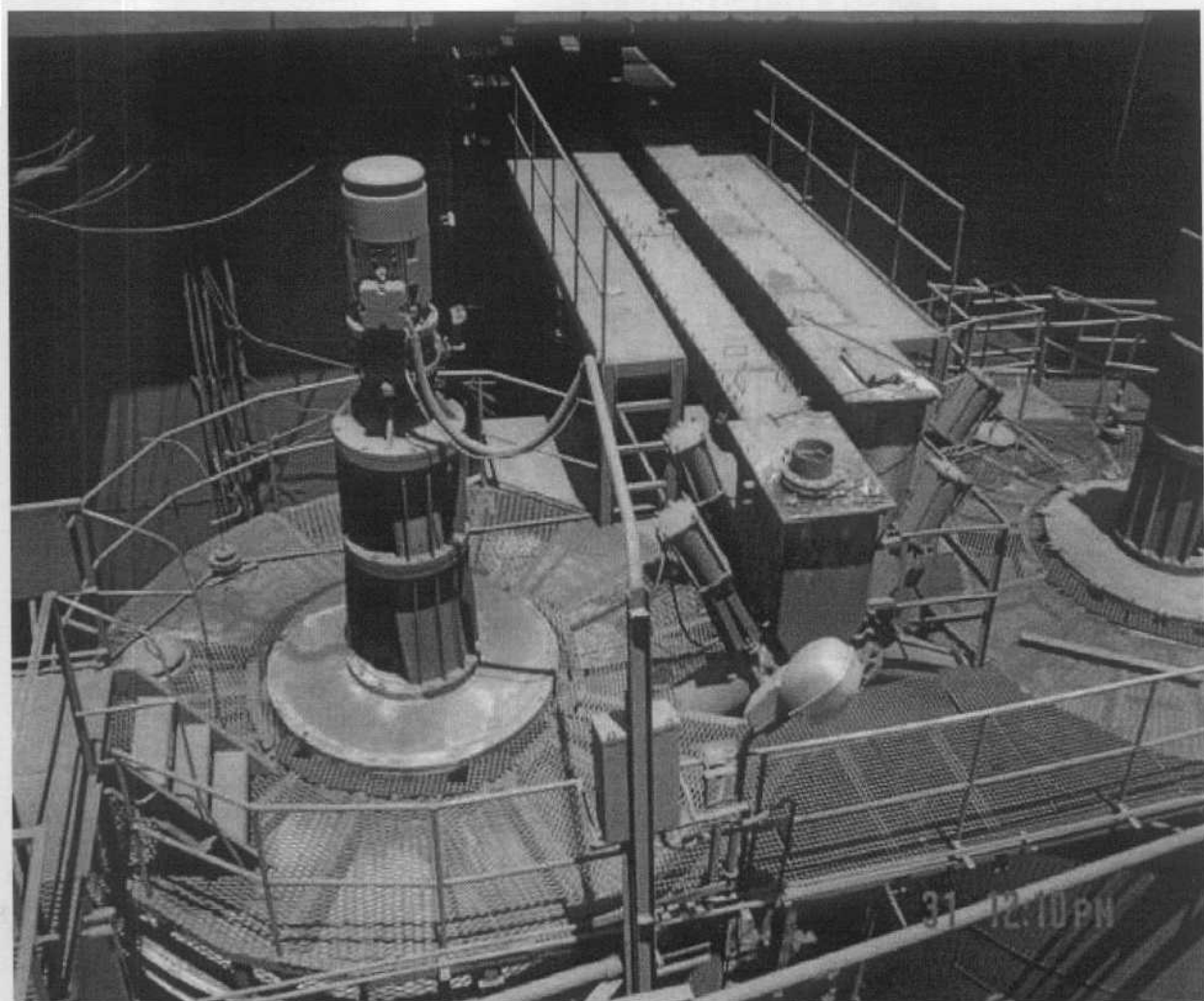


Figura 6 Sección del sistema de tanques de contacto y la canal de lixiviación.

ANEXO 11

Tabla 5 Muestras de licor en las canales de las series A, B y C.

Hora	Enfría NH ₃ (g/Lts)	SERIE A					SERIE B					SERIE C					
		Temp. (°C)	Densidad (g/l)	NH ₃ (g/l)	Difer.	Ton.	Temp. (°C)	Densidad (g/l)	NH ₃ (g/Lts)	Difer.	Ton.	Temp. (°C)	Densidad (g/Lts)	NH ₃ (g/Lts)	Difer.	Ton.	Promedio
1	52,6	43	1140	52,2	0,4	84	46	1150	52,4	0,2	112	44	1150	50,8	1,8	168	1,2
2	52,2	43	1140	51,8	0,4	84	46	1150	52	0,2	112	44	1150	51,2	1	168	0,9
3	53,2	45	1150	52,8	0,4	84	48	1140	52,4	0,8	112	47	1150	52,2	1	168	0,8
4	53,8	45	1150	53,2	0,6	84	48	1140	52,8	1	112	47	1150	53	0,8	168	0,8
5	53,4	45	1140	53,2	0,2	84	48	1140	52,8	0,6	112	47	1150	52,8	0,6	164	0,4
6	53,4	45	1140	53	0,4	84	48	1140	52,6	0,8	112	47	1150	52,8	0,6	112	0,6

Tabla 6 Muestras de la pulpa descargada por las bombas en las tinas series A, B y C.

Tabla 3. Maestros de la papa de la zona												
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$C_{AT} = (0,155 + 0,325 + 0,663) \cdot 24 = 27,336 \text{ Ton/día}$ $C_{AT} \Rightarrow$ Consumo de amoniaco en los tanques de contacto para un día

Luego las pérdidas por evaporación del Amoniaco constituyen el 40% del valor calculado anteriormente.

Anexo 12

Hoja de cálculo para la preidentificación de los coeficientes superficiales de transferencia de calor.

$$M_m := 10.65 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

Flujo másico de mineral; kg/s.

$$\rho_M := 3300 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del mineral; kg/m³

$$n := 0.102 \cdot \frac{1}{\text{sec}}$$

Número de revoluciones del cilindro

$$\theta := 974.74 \cdot \text{K}$$

Temperatura del mineral; K.

$$\theta_p := 378.07 \cdot \text{K}$$

Temperatura de la pared; K.

$$\theta_s := 518.71 \cdot \text{K}$$

Temperatura a la que sale el mineral; K.

$$\theta_{\text{agua}} := 347.59 \cdot \text{K}$$

Temperatura del agua en la piscina; K.

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

Temperatura de saturación del agua a la Po; K.

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

Temperatura de saturación del aire; K.

$$\lambda_{\text{mate}} := 58 \cdot \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Conductividad térmica del material; W/m K.

$$R_1 := 1.52 \cdot \text{m}$$

Radio interior del cilindro; m.

$$R_2 := 1.54 \cdot \text{m}$$

Radio exterior del cilindro; m.

$$L := 30 \cdot \text{m}$$

Longitud del enfriador; m.

$$D_i := 2 \cdot R_1$$

Diámetro interior del enfriador; m

$$D_i = 3.04 \text{ m}$$

$$D_e := 2 \cdot R_2$$

Diámetro exterior del enfriador; m

$$D_e = 3.08 \text{ m}$$

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

Constante de Stefan-Boltzman

$$\xi_s := 0.90$$

Emisividad del sólido.

$$\Omega := 1 \cdot \text{deg}$$

Ángulo de inclinación del cilindro.

$$V_M := 5.78 \cdot D_i \cdot \Omega \cdot n$$

Velocidad lineal del mineral dentro del cilindro; m/s.

$$V_M = 0.031 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\beta := \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_m}{2 \cdot R_1^2 \cdot \rho_M \cdot V_M}}$$

$$\beta = 0.406$$

$$A1 := 2R1 \cdot \sin(\beta)$$

$$A1 = 1.201 \text{ m}$$

El calor del sólido a la pared se transmite por conducción, convección y radiación, de la pared del sólido a la pared cubierta y del sólido a la pared descubierta.

$$k := 1.13$$

Coef. de no-uniformidad de la temperatura del mineral.

$$Cpm := 0.934 \cdot 10^3 \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Calor específico del mineral ; J/kgK.

$$\gamma := 800 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Masa (a granel) del mineral; kg/m3

$$\lambda_{\text{mine}} := 30 \cdot \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Conductividad térmica del mineral; W/m K.

$$\xi_p := 0.90$$

$$\alpha_{\text{pcs}} := k \cdot \sqrt{Cpm \cdot \lambda_{\text{mine}} \cdot \gamma \cdot n} + \left(\sigma \cdot \frac{\xi_s \cdot \xi_p}{\frac{1}{\xi_s} + \frac{1}{\xi_p} - 1} \cdot \frac{\theta^4 - \theta_p^4}{\theta - \theta_p} \right)$$

$$\alpha_{\text{pcs}} = 1.764 \times 10^3 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\alpha_{\text{pds}} := \sigma \cdot \xi_s \cdot \xi_p \cdot \frac{(\theta^4 - \theta_p^4)}{\theta - \theta_p}$$

$$A_{\text{pcs}} := \frac{2 \cdot \pi \cdot Di \cdot \beta}{360 \cdot \text{deg}}$$

$$A_{\text{pds}} := \pi \cdot Di \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \beta}{360 \cdot \text{deg}} \right)$$

$$\alpha_{\text{pds}} = 67.912 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$A_{\text{pcs}} = 1.235 \text{ m}$$

$$A_{\text{pds}} = 8.316 \text{ m}$$

$$K1 := \alpha_{\text{pcs}} \cdot A_{\text{pcs}} + \alpha_{\text{pds}} \cdot A_{\text{pds}}$$

$$K1 = 2.743 \times 10^3 \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Balance térmico para la pared.

Determinación del coeficiente de T.C total de la pared dentro del agua.

$$v_{\text{spec}} := 1.024 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen específico del agua; m3/kg

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

Densidad del agua a 345 K; kg/m3

$$\rho_{\text{agua}} = 976.563 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu := 389 \cdot 10^{-6} \frac{\text{newton} \cdot \text{sec}}{\text{m}^2}$$

Coeficiente dinámico de viscosidad; N s/m²

$$Vagua := \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot R2$$

Velocidad del fluido; m/s.

$$Vagua = 0.016 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re1 := \frac{\rho_{agua} \cdot Vagua \cdot De}{\mu}$$

Número de Reynolds

$$Re1 = 1.272 \times 10^5$$

$$kf := 0.668 \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Conductividad térmica del fluido; W/m K.

$$C := 0.027$$

$$M := 0.805$$

Constantes para flujo por el exterior de cilindros; (adimensionales).

$$Pr := 2.45$$

Número de Prandtl.

$$\alpha_{cagua} := \frac{kf \cdot \left(C \cdot Re1^M \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right)}{De}$$

Coef. de TC por convección; W/m² K.

$$\alpha_{cagua} = 101.483 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$Hagua := 1 \cdot \text{m}$$

$$\Pi_{pca} := \frac{\left(2 \cdot \arccos \left(1 - \frac{Hagua}{R2} \right) \right)}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$\Pi_{pca} = 0.772$$

Determinación del coeficiente de T.C total de la pared fuera del agua.

$$\mu_f := 279 \cdot 10^{-6} \frac{\text{newton} \cdot \text{sec}}{\text{m}^2}$$

Coeficiente dinámico de viscosidad; N s/m²

$$h_{fg} := 2257 \cdot 10^3 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Calor latente de vaporización a 100°C; J/kg

$$g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v_{liq} := 1.044 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen específico del líquido a 373,15 K; m³/kg

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

$$\rho_{liq} = 957.854 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del líquido; kg/m³

$$v_v := 1.679 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen específico del vapor; m³/kg

$$\rho_v := \frac{1}{v_v}$$

$$\rho_v = 0.596 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del vapor; kg/m}^3$$

$$\sigma_s := 58.9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{newton}}{\text{m}}$$

Tensión superficial; N/m.

$$C_{pl} := 4.217 \cdot 10^3 \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Calor específico del líquido; J/kgK.

$$C_{sf} := 0.0130$$

$$n := 1$$

Constantes que dependen de la combinación superficie líquido; (adimensionales).

$$\Delta T_e := \theta_p - \theta_{sat}$$

$$\Delta T_e = 4.92 \text{ K}$$

Diferencia de temperatura entre la superficie exterior y la temperatura de saturación a la presión de trabajo; K.

$$Pr_l := 1.76$$

Número de Prandtl.

$$\alpha_{sat} := \frac{\mu_f \cdot h_{fg} \left[\frac{g \cdot (\rho_{liq} - \rho_v)}{\sigma_s} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{C_{pl} \cdot \Delta T_e}{C_{sf} \cdot h_{fg} \cdot Pr_l^n} \right)^3}{\Delta T_e}$$

$$\alpha_{sat} = 3.314 \times 10^3 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{Coef. de TC por convección de la pared al agua; W/m}^2 \text{ K.}$$

$$Pr_{pda} := \frac{\left(360 \cdot \text{deg} - 2 \cdot \text{acos} \left(1 - \frac{H_{agua}}{R_2} \right) \right)}{180 \cdot \text{deg}}$$

$$Pr_{pda} = 1.228$$

$$K_2 := \frac{1}{\frac{\ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right)}{2\pi \lambda_{mate}} + \frac{1}{Pr_{pca} \cdot \pi \cdot \alpha_{cagua} \cdot D_e} + \frac{1}{Pr_{pda} \cdot \pi \cdot \alpha_{sat} \cdot D_e}}$$

$$K_2 = 724.36 \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$K_3 := K_1 + K_2$$

$$K_3 = 3.467 \times 10^3 \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

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

Velocidad del aire; m/s

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

$$\text{Reaire} := \frac{\text{Vaire} \cdot \text{De}}{\text{vaire}}$$

$$\text{Reaire} = 4.264 \times 10^5$$

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

$$\text{Sc} := \frac{\text{vaire}}{\text{DAB}}$$

$$\text{Sc} = 0.611$$

$$\text{Sh} := 0.0296 \text{Reaire}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Sh} = 801.472$$

$$\text{hm} := \frac{\text{Sh} \cdot \text{DAB}}{\text{De}}$$

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

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

Volumen específico del vapor de agua a 32°C; m³/kg

$$\rho_{\text{va}} := \frac{1}{\text{vva}}$$

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

Densidad del vapor; kg/m³

$$\text{vvas} := 4.683 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen específico del vapor de agua saturado a 70°C; m³/kg

$$\rho_{\text{vas}} := \frac{1}{\text{vvas}}$$

$$\rho_{\text{vas}} = 0.214 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del vapor; kg/m³

$$\alpha_{\text{agua}} := \frac{h_{\text{fgv}} \cdot [\rho_{\text{m}} \cdot (\rho_{\text{vas}} - \rho_{\text{va}})]}{(\theta_{\text{fagua}} - \theta_{\text{aire}})}$$

$$\alpha_{\text{agua}} = 65.975 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$K4 := \alpha_{\text{agua}} \cdot A_{\text{agua}}$$

$$K4 = 638.386 \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$K5 := K2 + K4$$

$$K5 = 1.363 \times 10^3 \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$