



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

TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Título: Obtención de los parámetros de funcionamiento del enfriador rotatorio a escala piloto del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Autor: Carlos Zalazar Oliva

Tutores: MSc. Ever Góngora Leyva

MSc. Marbelis Lamorú Urgellés

“AÑO 52 DE LA REVOLUCIÓN”

MOA 2010

Declaración de autoridad

Yo: Carlos Zalazar Oliva

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

Autor: Carlos Zalazar Oliva

Tutor: M.Sc Marbelis Lamorú Urgellés

Firma: _____

Firma: _____

Tutor: M.Sc Ever Gongora Leyva

Firma: _____

PENSAMIENTO

“... La vida debe ser diaria, móvil, útil y el primer deber de un hombre de estos días, es ser un hombre de su tiempo. No aplicar teorías ajenas, sino descubrir las propias. No estorbar a su país con abstracciones, sino inquirir la manera de hacer prácticas las útiles. Si de algo serví antes de ahora, ya no me acuerdo: lo que quiero es servir más...”

José Martí

AGRADECIMIENTOS

Una obra se concibe cuando el caudal de ideas y arduo trabajo logran vencer la inercia del comienzo, pero solo con valiosas colaboraciones, es posible transitar el largo camino entre el inicio y el fin. Es por ello que dejo constancia de mi especial agradecimiento:

A mis tutores: el MSc. Ever Góngora Leyva, por su amistad incondicional, por su apoyo y cooperación para la realización de este trabajo, por su voluntad, orientación y dedicación absoluta que me ha dado desde que entré a la universidad; a la MSc. Marbelis Lamorú Urgellés, sus incontables ayudas en la realización de este trabajo, sus constantes muestras de afecto y cariño.

A mis Padres, Lutmila y Jorge, también a otros que no son mis padres biológicos pero los considero como tal, (Adolfo e Iraiza), por sus esfuerzos realizados en todas las esferas de mi vida para que pudiera alcanzar esta meta, por su cariño y comprensión que nunca me han faltado, a ellos que han sido y serán por siempre motivos de inspiración para lograr mis aspiraciones futuras.

A mis amigos y hermanos: Joelmis, Ramón, Maria, Juan José, Emilio, Rolando Ariannis, Arianna, Adriana, Disneris y Alberto, por la incondicional amistad, el apoyo que siempre me han brindado, que me brindan y por el aliento que siempre me han dado en los momentos mas difíciles de la vida.

Y en especial quiero agradecer a mi Padre que siempre me ha dado fuerzas y me ha ayudado porque sin su ayuda y su misericordia no hubiese llegado hasta aquí. Y puedo decir eveneser.

A los nombrados y demás personas que verdaderamente consideran merecer este sincero agradecimiento y que imperdonablemente he olvidado.

A Todos Muchas Gracias

El autor.

DEDICATORIA

Al culminar una meta deseada impone momentos de especial alegría, cuando se quiere resumir, los momentos de duda, dolor, nostalgia, se deben tener presentes aquellas personas que por su dedicación y amor contribuyeron a la realidad que representa llegar hasta el final, en especial dedico este logro personal:

A mis padres: Lutmila, Jorge, por todo el amor que me han transmitido hasta hoy y porque así es de grande el amor que les profeso. A ellos que además de mi existencia le debo todo lo que soy y lo que pueda ser mientras viva. Por todo esto le dedico este mérito que también es suyo para que estén siempre orgulloso de su hijo.

A mi hermano Joelmis para que le sirva de ejemplo y que continúe esforzándose y logre todos sus sueños.

A mis pastores: Adolfo e Iraiza por lo que representan en mi vida, por ser fuentes de inspiración en mi quehacer personal y espiritual, por su incansable apoyo, porque sé que su mayor sueño al igual que para sus otros hijos es verme triunfar y llegar a la meta .

A mis tíos, Ronni, Rubén, Rolman, Roinier, Norquis y Orlando, por su constante preocupación por mis estudios y su consideración.

A mis primos : Darlin, Osmanis y Orleidis por su ayuda y el apollo que siempre me han brindado.

A mis amigos Ever, Yoalbys, Marbelis, Zehidy, por la excelente amistad que me brindan y por las modestas e incontables ayudas prestadas.

A mis compañeros de estudios; Hector, Yariel, Diolvis, Javier, Zehidy, por su amistad y su ayuda durante 5 años que hemos pasado juntos a los cuales también les deseo éxito.

A todos les dedico este éxito.

El autor.

RESUMEN

Para la realización del trabajo se hizo una búsqueda bibliográfica acerca de los trabajos precedentes y se estableció el estado del arte relacionado con la temática en cuestión. Se realiza una exposición de aquellos aspectos más significativos del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido y las características fundamentales de operación del enfriador de mineral. También se exponen algunos de los conceptos, principios y teoremas que se deben de tener en cuenta para el escalado de cualquier equipo.

Se establecieron los procedimientos de cálculos para la determinación de los parámetros de funcionamiento del enfriador de mineral a escala piloto mediante los criterios de semejanzas. Para la solución de las ecuaciones se utilizó el Software Mathcad Profesional.

Se analizaron los números adimensionales relacionados con el proceso de transferencia de calor por convección libre como el Nusselt, Grashof y el Prandtl.

A demás se hizo un análisis de los resultados obtenidos en los cálculos y la valoración económica para la instrumentación del equipo comparándola con lo que costaría hacerlo el modelo a escala industrial

SUMMARY

For the realization of the work he was carried out the bibliographical search about the precedent works and the state of the art related with the thematic one settled down in question. It was made an exhibition of those more significant aspects of the process of cooling of the mineral and the fundamental characteristics of operation of the mineral cooler. Some of the concepts, principles and theorems are also exposed that one should have in bill for the one climbed of any team.

The procedures of calculations settled down for the determination of the values of the magnitudes for the operation from the mineral cooler to scale pole by means of the approaches of likeness. For the solution of the equations the Software Mathcad Professional was used.

The numbers adimensionales related with the process of transfer of heat were analyzed by free convection as the Nusselt, Grashof and the Prandtl.

To other it was made an analysis of the obtained results and an economic valuation for the instrumentation of the team comparing it with what would cost to make it the pattern to industrial scale.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.1- Introducción	5
1.2- Trabajos precedentes	5
1.3- Flujo tecnológico de la planta	8
1.4- Descripción de la instalación	9
1.5- Análisis del Proceso de enfriamiento del mineral reducido.....	10
1.6- Definición ampliada del proceso de escalado.....	14
1.7- Criterio para los límites entre escala.....	16
1.7.1- Escala de laboratorio	17
1.7.2- Escala de banco	17
1.7.3- Escala piloto.....	18
1.7.4- Escala semi-industrial	19
1.7.5- Escala industrial.....	19
1.8- Criterios de semejanza	19
1.8.1- Teoremas de la semejanza.....	20
1.8.2- Riesgos y limitaciones en el uso de los criterios de semejanza para el escalado.....	21
1.9. Conclusión del Capítulo I.....	22
CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA ESTABLECER LOS PARÁMETROS DEL ESCALADO.....	25
2.1- Introducción	25
2.2- Criterios de semejanzas	25
2.3- Semejanza de los procesos de intercambio de calor por convección.....	26
2.3.1- Condiciones de semejanza en el intercambio de calor durante el movimiento forzado del agente portador de calor	26
2.3.2- Condiciones de semejanza de los procesos de intercambio de calor durante la convección libre	28

2.3.3- Condiciones de semejanza de los procesos de intercambio de calor por convección, durante el movimiento libre y forzado simultáneo del agente portador de calor	31
2.4- Determinación de los parámetros fundamentales para el enfriador de mineral a escala piloto.....	32
2.5- Conclusiones de Capítulo II.....	34
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.	37
3.1- Introducción	37
3.2- Determinación de las constantes de semejanzas.....	37
3.3- Determinación de los parámetros de operación	39
3.3.1- Velocidad de rotación del cilindro del enfriador a escala piloto.....	40
3.3.2- Tiempo de retención del mineral.....	40
3.3.3- Flujo del Mineral.....	42
3.3.4- Temperatura de entrada del mineral.....	43
3.3.5- Flujo del agua	43
3.4- Comportamientos de los números adimensionales	43
3.5- Valoración económica	45
3.6- Valoración del impacto ambiental	47
CONCLUSIONES:.....	49
RECOMENDACIONES:.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	51

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 la modernización de sus plantas con el objetivo de disminuir los costos de producción por tonelada de níquel.

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

En la planta piloto se realizan estudios, como su nombre lo indica a una escala intermedia entre el laboratorio y el proceso industrial .

Fundamento de la investigación

La planta de Hornos de Reducción tiene una importancia vital dentro del proceso de obtención del níquel, es en ésta donde se crean las condiciones (reducción de 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 (pues en ellos se debe enfriar el mineral desde la temperatura de 700 °C a la salida del horno hasta 200 °C que sale del enfriador), de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de lixiviación y lavado.

Desde hace varios años los enfriadores han presentado problemas con el enfriamiento del mineral que llega a ellos proveniente de los hornos de reducción, en la actualidad estos problemas persisten debido, entre otros factores, a la ausencia de investigaciones realizadas.

El proceso de enfriamiento del mineral laterítico ha sido objeto de estudio con el objetivo de profundizar en los complejos fenómenos que tienen lugar durante el proceso industrial. Los investigadores han realizado grandes esfuerzos dirigidos hacia el mejoramiento de la

eficiencia de este proceso, al apoyarse en la modelación matemática y simulación del mismo.

En el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa con el objetivo de validar el modelo matemático propuesto por Góngora (2004 y 2009), se construyó un enfriador de mineral a una escala 10:1, el cual cumple con los criterios de semejanza geométrica. (Ver anexos 1).

El proceso de escalado es el conjunto de etapas que forman parte de la ejecución comercial de una idea. Dichas etapas son: Investigación y Desarrollo, Ingeniería, Inversiones y Arranque y puesta en marcha hasta estabilizar la producción.

Los objetivos que persiguen con el escalado son: producir consecuentemente un producto idéntico en el proceso comercial como fue producido en las pruebas a escala pequeña. Es necesario entender como producto, todo tipo de resultado (investigativo o de ingeniería) que conduce a: perfeccionar o crear un equipo o proceso, mejorar u obtener un semiproducto o producto final comercializable. Poner en marcha la inversión dentro de un período de tiempo razonable.

El enfriador de mineral a escala piloto debe reproducir el proceso de enfriamiento de mineral industrial y para ello es necesario llevar a escala los parámetros de operación del mismo, cumpliendo con los criterios de semejanza, dinámica, cinemática y térmica.

Para garantizar el cumplimiento de esos criterios es necesario tener en cuenta la **situación problemática** que se manifiesta en la instalación:

No se conocen los parámetros de funcionamiento del enfriador a escala piloto, lo cual incurre en que tenga un influjo de mineral discontinuo y que el tiempo de retención del mineral sea elevado dando resultados inexactos en la investigación.

Problema a resolver: No se conocen los parámetros de funcionamiento del modelo escala piloto del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Como **objeto de estudio de la investigación** se plantea: el proceso de enfriamiento del mineral.

El correcto análisis de esta problemática exige una evaluación integral del enfriador de mineral dada la gran complejidad del proceso que se realiza en él.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**: Con la selección de una metodología de cálculo se podría obtener los parámetros de funcionamiento del enfriador de mineral a escala piloto lo que permitiría la experimentación activa en el proceso de transferencia de calor y del desplazamiento del mineral, determinando así el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso y su posterior aplicación a escala industrial.

Objetivo general del trabajo:

Obtener los valores para los parámetros de funcionamiento del enfriador a escala piloto del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

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

1. Realizar un análisis bibliográfico sobre la temática en estudio que permita el establecimiento del estado del arte.
2. Caracterización de la instalación objeto de estudio.
3. Identificar las variables más importantes que intervienen en el proceso.
4. Establecer una metodología de cálculo para determinar los parámetros requeridos para el funcionamiento del enfriador de mineral a escala piloto.
5. Hacer un análisis de los resultados obtenidos en la investigación.
6. Realizar una valoración económica y medioambiental sobre la temática tratada.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1- Introducción

En el presente capítulo se realiza un análisis de las diferentes publicaciones expuestas en la bibliografía especializada en la temática estudiada, con el objetivo de disponer de los elementos básicos esenciales para el desarrollo del trabajo. Se abordan además temas relacionados con el proceso de enfriamiento del mineral el cual es muy importante dentro de los procesos de obtención del níquel y en particular los enfriadores de mineral, de los que depende en gran medida la realización racional del proceso de lixiviación y lavado.

1.2- Trabajos precedentes

Durante el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica estuvo dirigida a los aspectos fundamentales: la información relacionada con el enfoque teórico-metodológico y los trabajos que sobre el tema de la modelación y simulación de procesos térmicos y de flujo desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado en los últimos años.

Es importante revisar a Diomidovski, (1970); Holland and Chagman, (1972); Dobrojtov, (1978)), donde exponen leyes y teoremas de semejanza para la reproducibilidad de los procesos.

Mijeev y Mijeeva (1979), exponen algunos de los elementos mas importantes que se deben de tener en cuenta para el escalado de los procesos de intercambio de calor (convección). En ella analiza los principales números adimensionales que caracterizan los procesos en la convección libre, forzada y mixta.

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 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 Folliot (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.

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

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 despremiar 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.

González (2000), aborda los principales principios básicos para el escalado industrial, algunas consideraciones esenciales para los trabajos de investigación y desarrollo a demás expone y clasifica a los modelos a escala en función de la productividad, y tiempo de explotación. Otros de los elementos de gran importancia que se tiene en cuenta en el trabajo son algunos de los problemas que surgen relacionados con el cambio de escala y el tamaño del modelo.

Góngora (2004), realiza la modelación matemática del proceso de enfriamiento de mineral reducido a escala industrial, quedando el modelo conformado por 3 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, estableciendo también las ecuaciones de enlace que permiten determinar los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud.

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.

Cala (2005), demuestra que la temperatura de la pared del enfriador de mineral laterítico no sobrepasa la temperatura de saturación del agua, por lo que no existe transferencia de calor por ebullición en el proceso.

Otros trabajos (Casals y Perdomo 2007; Sotto 2007) desarrollaron el diagnóstico térmico de los enfriadores utilizados en la empresa Ernesto Che Guevara, por su parte Londres (2007), simuló el comportamiento térmico de estos equipos a partir del empleo del software profesional ANSYS versión 7.0.

Valle (2000), identifica los modos de transferencia de calor existentes en el proceso, permitiendo de esta forma hacer una mejor caracterización del proceso de transferencia de calor en el objeto real. A demás con ayuda del Matlab establece un algoritmo de cálculo para la evaluación del proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales

rotatorios, el cual le permitió evaluar el comportamiento del proceso de transferencia de calor para el enfriamiento de mineral.

García (2009), expone en su trabajo una metodología para la determinación de las características geométrica del enfriador de mineral a escala piloto del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Resulta evidente que la consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática en estudio. Esto impone la necesidad de realizar una investigación que permita caracterizar térmicamente el proceso de enfriamiento del mineral reducido a escala piloto, para su posterior aplicación en el proceso industrial, lo cual representará una incursión novedosa en este campo para las industrias cubanas del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

1.3- Flujo tecnológico de la planta

Dentro del proceso de obtención de níquel la planta de hornos de reducción tiene como función fundamental reducir el níquel y el cobalto del mineral secado y reducido que fue almacenado en los silos. Utilizando 24 hornos de múltiples hogares y 12 electrofiltros con el objetivo de recuperar el mineral que se escapa con los gases.

El mineral es recepcionado en los silos con un 4 % de humedad. Luego se suministra por un grupo de bombas neumáticas a presión hacia la tolva de los hornos, cuya capacidad es de 320 toneladas.

Es dosificado a los hornos a través de una romana que pesa el tonelaje que se alimenta y luego mediante un transportador sinfín se alimenta el hogar cero.

Una vez que el horno ha sido encamado, la temperatura desciende como consecuencia de la cama que se ha alimentado en el interior de los hogares. A partir de esta condición comienza el régimen normal de operaciones (mineral alimentado, horno en rotación, perfil de temperatura en la cámara, perfil de temperatura en hogares e ignición del hogar 4 y 6 para quemar el monóxido de carbono que extraen los ventiladores y lo hacen pasar a través de los electrofiltros para su purificación).

En cada uno de los hogares ocurre una cinética de reacciones químicas que permiten la selección extractiva del níquel y el cobalto y la reducción del hierro que conforma el mineral alimentado.

El tiempo de retención de mineral desde que se alimenta hasta que se descarga por la parte inferior del horno es de 90 minutos.

El mineral después de reducido, es descargado al transportador rotatorio que lo conduce al tambor enfriador de donde sale hacia los canales de contacto de la planta de lixiviación y lavado.

1.4- Descripción de la instalación

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

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

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 amoniacoal, en las siguientes condiciones de trabajo:

- | | |
|---|-----------------------|
| ▪ Temperatura del mineral a la entrada | 650 a 700 °C |
| ▪ Temperatura a la salida | 200 °C |
| ▪ Temperatura del agua en la entrada | 30 °C |
| ▪ Presión de trabajo | 0,01 a 0,02 kPa |
| ▪ Consumo de agua para enfriar el tambor. | 107 m ³ /h |

- Consumo de agua para enfriar los cojinetes. 1 m³/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, éste se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que se enfría con el agua de 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).

1.5- Análisis del Proceso de enfriamiento del mineral reducido

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

El enfriador utilizado en el proceso es un equipo de transferencia de calor, el mismo está dispuesto horizontalmente como una instalación de transporte (ver anexo 2). 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 m 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, éste 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, al predominar 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 éste que no es frecuente en este proceso.

Desde la masa del 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.

Una vez transferido el flujo de calor hasta la superficie exterior del enfriador, éste intercambia calor con el agua de la piscina que se encuentra por encima de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, dando lugar al calentamiento progresivo de la misma hasta valores entre 70 y $76 \text{ }^\circ\text{C}$, 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.

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 evaporación. 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

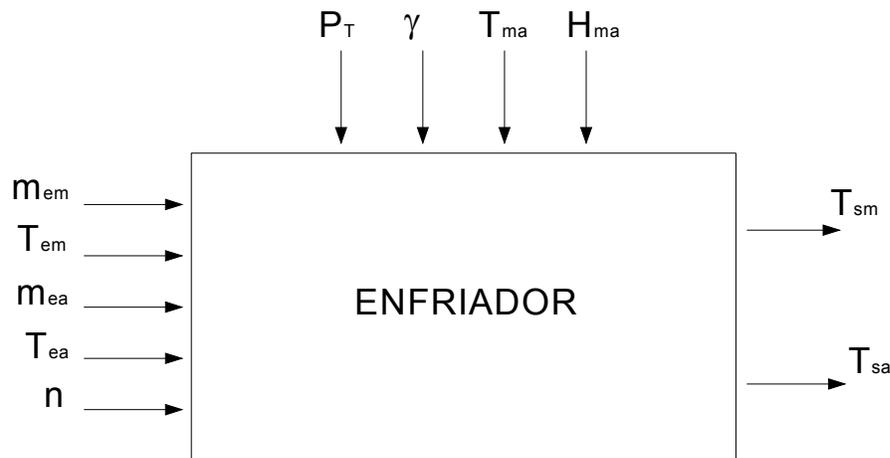


Figura 1.1 Esquema estructural del proceso de enfriamiento del mineral.

Los parámetros de entrada del proceso son:

- $m_{em} \Rightarrow$ Flujo del 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.

1.6- Definición ampliada del proceso de escalado

Para comprender mejor la evolución que han tenido los conceptos relativos al uso de modelos y a las escalas, se debe partir de una de las expresiones más antiguas al respecto, escrita por Leonardo Da Vinci en sus "Notas", aproximadamente en el año 1500 y citada por Johnstone y Thring(1957):

"Dice Vitruvio que los pequeños modelos no son útiles para conocer los efectos de los grandes y yo aquí propongo probar que esa conclusión es falsa"

(El Vitruvio a que se refería Da Vinci era Marco Vitruvio Polión, arquitecto romano del siglo primero de nuestra era, autor de un tratado de arquitectura, dedicado a Augusto).

Ya a inicios de siglo, en el primer manual de Ingeniería Química que se conoce, su autor, George E. Davis afirmaba:

Un experimento pequeño, realizado en el laboratorio con pocos gramos de material no será muy útil como guía para la construcción de una planta a gran escala, pero no hay duda de que un experimento basado en unos pocos kilogramos nos dará casi todos los datos requeridos(...)

Y en 1916, L. H. Baekeland, escribe una de las frases más famosas al respecto y que mejor aclara el propósito final de los experimentos relacionados con los modelos y las plantas piloto:

"Commit your blunders on a small scale and make your profits one large scale".

(Cometa sus errores en una escala pequeña y obtenga sus ganancias en una escala grande)

En todas estas expresiones se habla de modelos y escalas, grandes y pequeñas y esos conceptos se unen con el de escalado.

En la práctica existen muchas definiciones del término escalado. Una de las clásicas lo limita al estudio de los problemas asociados a la transferencia de datos del laboratorio y la planta piloto a la producción industrial. Una definición más reciente plantea que el

escalado hace uso de los datos del laboratorio y/o planta piloto, complementados con modelos a gran escala y modelación matemática para determinar las dimensiones y el tamaño de una unidad industrial. Otra definición señala que éste consiste en el complejo de técnicas y metodologías que se utilizan para transferir un proceso desarrollado en una escala menor, a la escala de producción y esta última se ajusta bastante a la concepción actual y por ello se toman, como definición de escalado, una variante de la anterior:

González (2000), plantea que el escalado es el proceso mediante el cual se logra la exitosa puesta en marcha y la operación económica de una unidad a escala comercial basándose, al menos en parte, en resultados de investigaciones realizadas a una escala más pequeña.

De esta definición de escalado quedan excluidos los casos de diseño de unidades industriales realizados con procedimientos de cálculos tradicionales, para los cuales sólo se necesitan los datos de las propiedades físico-químicas de las sustancias en proceso y las cantidades a procesar para obtener los valores de diseño requeridos.

Para que el concepto de escalado sea aplicado, es imprescindible que el diseño se realice sobre la base de investigaciones que se tengan que realizar con ese fin específico, a una escala inferior a la industrial, pero no se requiere que se transite por todas las etapas convencionales en que se dividen los procesos de Investigación y Desarrollo.

El proceso completo, desde la escala de laboratorio hasta la comercial, pasando por trabajos de banco, planta piloto y escala semi-industrial, es largo y costoso y debe ser reducido en todo lo posible, con el fin de acortar el tiempo que media entre la concepción de un producto y su introducción en el mercado.

No existe duda alguna que es técnicamente posible transferir casi cualquier proceso desarrollado a nivel de laboratorio, directamente a la producción industrial a gran escala, si se dispone de suficiente tiempo y dinero, de forma que los diseñadores consideren factores de seguridad suficientemente amplios y que se esté dispuesto a un largo período de puesta en marcha, que permita adiestrar al personal y descubrir las diferentes causas de interrupciones y problemas de operación y afrontar los riesgos inevitables en la operación de nuevos procesos no suficientemente estudiados.

Tampoco existe duda que los datos obtenidos en plantas de pequeña escala, correctamente diseñadas y operadas, son mucho más seguros para el diseño que los obtenidos directamente del laboratorio, con lo cual se pueden reducir considerablemente los factores de seguridad en el diseño y reducir apreciablemente el período y los riesgos de la puesta en marcha de las unidades comerciales, pero para obtener dichos datos se requiere a su vez de tiempo y empleo de recursos materiales y humanos.

En todos los casos resulta imprescindible el análisis detallado de las características del proceso que se pretende desarrollar y del nivel de conocimientos que se tiene sobre el mismo, para poder decidir las etapas que hay que acometer y planificarlas adecuadamente, de forma tal que se emplee el mínimo de recursos y se culmine en el menor tiempo posible.

Las técnicas de escalado se han desarrollado precisamente con el objetivo de reducir al mínimo indispensable ese tiempo de Investigación y Desarrollo y en ellas juegan un papel determinante las consideraciones técnico económicas.

Finalmente se debe considerar otro objetivo ligado al concepto de escalado y que es el estudio del comportamiento de una planta en producción existente, a partir de una unidad pequeña que reproduce, en lo fundamental, el funcionamiento de la unidad comercial. Este objetivo cae dentro de la esfera del estudio de los procesos pero en principio no se diferencia del objetivo relacionado con el desarrollo de nuevos procesos, al ser la única diferencia práctica el hecho que para el estudio de los procesos se requiere, casi siempre, solamente de la etapa equivalente a la planta piloto.

1.7- Criterio para los límites entre escala

Para la definición de los límites entre una escala y otra existe una gran diversidad de criterios y en muchos casos se ha utilizado el volumen de los equipos como el criterio fundamental, aunque en ese caso en realidad lo que se trata es de un significado particular del concepto de escalado, bastante más restringido que el concepto de escalado adoptado modernamente.

No obstante, en realidad el mejor criterio de definición de los límites entre las distintas escalas es la de los objetivos que se persiguen con cada una de ellas y los resultados que se esperan. Con ese criterio más amplio se pueden considerar la realización de etapas,

por ejemplo de banco y piloto, con equipos de pequeño volumen, normalmente considerados de laboratorio, en los casos en que el nivel de precisión y automatización sea tan elevado y la necesidad de obtener productos de muestra tan pequeña, que se puedan cubrir entonces los objetivos señalados para esas etapas, con un considerable ahorro económico.

1.7.1- Escala de laboratorio

El laboratorio constituye la unidad primaria de investigación en la que quedan determinadas las metódicas de síntesis o procesamiento y se establecen las condiciones bajo las cuales se obtienen los mejores resultados. El laboratorio confirma o rechaza las hipótesis obtenidas del conocimiento previo y de la literatura y se obtienen datos que contribuyen a enriquecer la información sistematizada, que constituye la base para el trabajo a escala de banco y/o planta piloto. Además se obtiene información para la realización de evaluaciones económicas preliminares y se determinan diversas propiedades físico-químicas, necesarias para los cálculos ingenieriles y la formulación y comprobación de modelos matemáticos. Los objetivos principales de esta etapa son: la obtención, recuperación y purificación de los productos de interés, así como el análisis y caracterización de los mismos. Además, en el caso de la Síntesis Química se definen otros objetivos como:

- ✓ Conocer la influencia de las variable macroscópicas (composición, temperatura, pH, etc.) en el rendimiento u otro parámetro que caracterice la eficiencia del sistema.
- ✓ Optimización de la síntesis a ese nivel.
- ✓ Conocimiento de la cinética, incluyendo la construcción de modelos matemáticos.
- ✓ Propiedades físicas y químicas del nuevo producto.
- ✓ Influencia de los reactivos empleados en los cambios de escala.
- ✓ Caracterización de los subproductos y residuales.
- ✓ Evaluación económica preliminar.

1.7.2- Escala de banco

En esta etapa la investigación comienza a adquirir un carácter tecnológico y posee sus particularidades que la distinguen:

- ✓ Se orienta a la configuración de las unidades experimentales con características geométricas y operacionales similares a los equipos de planta piloto o industriales disponibles o recomendables, a diferencia de la etapa de laboratorio, donde el equipamiento utilizado difiere considerablemente del industrial.
- ✓ Conlleva un mayor nivel de instrumentación y automatización.
- ✓ El trabajo experimental se orienta hacia el completamiento y precisión de la información de laboratorio.
- ✓ Los estudios de banco constituyen un paso de gran importancia y pueden contribuir a reducir considerablemente los costos de la investigación y obviar en algunos casos, la necesidad de los trabajos a escala piloto.

Los objetivos principales de esta etapa son:

1. Revelar la esencia de los fenómenos que ocurren en los procesos.
2. Revelar los pasos controlantes o críticos en las operaciones.
3. Verificar hipótesis de modelos matemáticos.
4. Aportar información para cálculos y diseños de ingeniería.

1.7.3- Escala piloto

Los estudios de escala piloto resultan de especial importancia para el cambio de escala en muchos procesos, pero poseen un alto costo y la decisión de su realización debe estar subordinada a un conjunto de factores entre los cuales se destacan:

- ✓ Tipo de proceso
- ✓ Nivel de información disponible
- ✓ Tamaño propuesto para la unidad industrial

La planta piloto debe montarse y operarse de manera que permita satisfacer al menos uno de los siguientes objetivos principales:

1. Evaluar la factibilidad de un proceso tecnológico.
2. Obtener la información para el diseño de una planta comercial.
3. Obtener cantidades de productos con fines de ensayo o promoción.

1.7.4- Escala semi-industrial

Esta es una etapa cara del proceso de escalado que puede prolongar excesivamente la introducción de una nueva tecnología en el mercado y sólo se realiza para aquellas tecnologías de una gran complejidad y que representan un salto apreciable en el nivel de desarrollo existente. En ocasiones, a las plantas de este tipo se le han denominado plantas demostrativas, aunque otros autores prefieren el término de plantas prototipo. Estas plantas se construyen de igual forma que una planta de escala completa, pero a una capacidad de producción menor, usualmente un décimo de la proyectada para la escala definitiva, que permite el acopio de experiencias durante su funcionamiento y sirve de modelo a las futuras plantas industriales que se construyan. En la mayoría de las ocasiones esta etapa del escalado puede omitirse, lo que representa una considerable reducción en el periodo de desarrollo de una tecnología.

1.7.5- Escala industrial

Normalmente esta escala no se considera una parte del proceso de investigación y desarrollo. Esto constituye un error conceptual con fuertes implicaciones de índole práctica. Realmente la industria constituye, no sólo una prueba de validación de las experiencias precedentes, sino que enriquece la información ingenieril disponible y los modelos matemáticos formulados, brinda información de gran valor para el perfeccionamiento de equipos y para la optimización del propio proceso productivo. Además en la mayoría de los casos las instalaciones a escala de banco y/o piloto se diseñan a partir de un "scale-down" de la instalación industrial existente o supuesta, sobre la base de la experiencia acumulada con la operación de otras industrias; por tanto, la escala industrial debe ser considerada una etapa importante en el conjunto de las tareas de Investigación y Desarrollo.

1.8- Criterios de semejanza

El concepto de semejanza entre los fenómenos físicos se reduce a los postulados siguientes:

Primer postulado: El concepto de semejanza en cuantos a los fenómenos físicos es aceptable solamente a fenómenos de un mismo género con igual calidad y que se

describen analíticamente con ecuaciones que tienen tanto igual la forma como el contenido.

Si la descripción matemática de dos fenómenos cualesquiera tiene forma igual, pero su contenido físico es diferente, dichos fenómenos se le denominan analógicos, tal analogía se da por ejemplo entre los procesos de la conductividad térmica, electro conductividad y difusión.

Segundo postulado: La premisa obligatoria para la semejanza entre los fenómenos físicos ha de ser su semejanza geométrica.

Tercer Postulado: Al llevar a cabo el análisis de los fenómenos semejantes pueden compararse únicamente las magnitudes homogéneas solo en los puntos homólogos del espacio y en los momentos homólogos del tiempo.

Las magnitudes que tienen un mismo sentido físico e igual dimensión se le llaman homogéneas. Se le denominan homólogos a los puntos de los sistemas geoméricamente semejantes.

Cuarto Postulado: La semejanza de dos fenómenos físicos significa que todas las magnitudes que caracterizan los fenómenos examinados son similares. Esto significa que en los puntos homólogos del espacio y en los instantes homólogos cualquier magnitud del primer fenómeno es directamente proporcional a la magnitud homogénea del segundo fenómeno.

1.8.1- Teoremas de la semejanza

1. El primer teorema establece la relación entre las constantes de semejanzas y permite hallar los números de semejanzas. En su forma general este teorema se enuncia así: los procesos semejantes tienen igual números de semejanzas.
2. El segundo teorema define que la dependencia existente entre las variables que caracterizan cualquier proceso, puede representarse como la dependencia entre los números de semejanzas, K_1, K_2, K_n .
3. El tercer teorema plantea que son semejantes aquellos procesos cuyas condiciones de univocidad son idénticas y cuyos números de semejanzas, compuestos por las

magnitudes que forman parte de las condiciones de univocidad tienen idéntico valor numérico.

1.8.2- Riesgos y limitaciones en el uso de los criterios de semejanza para el escalado

Una de las **limitaciones** para que el principio de semejanza no haya sido desde un inicio más ampliamente aplicado a las plantas piloto consiste en que la semejanza estricta requiere que el modelo o el prototipo operen bajo condiciones que son impracticables o que cambian el régimen de flujo. En el libro de González, (2000) se ilustran algunos ejemplos para el estudio del proceso mecánico.

En determinados casos, la semejanza de Reynolds requiere velocidades de flujo en escala pequeña que se aproximan a la velocidad del sonido y entonces, el número de Mach llega a ser importante en el modelo, aunque no en el prototipo, por lo cual los regímenes son diferentes y es imposible la semejanza dinámica.

Sin embargo, en los modelos a escala de planta piloto, esto no es un problema tan serio y se transforma a veces incluso en una ventaja, ya que se pueden realizar las experiencias en condiciones mucho más fáciles que en el prototipo. Por ejemplo, cuando se modela el flujo gaseoso a baja velocidad, como es el caso de sistemas de ventilación o los hornos, si la velocidad de flujo en el prototipo es de orden de 2-10 m/s , y la razón de escala se toma igual a 10, entonces en el modelo la velocidad necesaria será de 20-100 m/s , velocidad para la cual ya puede ser marcado el efecto de la compresibilidad y el número de Mach debe ser añadido al de Reynolds para lograr la semejanza. Sin embargo, esto puede solucionarse favorablemente al usar agua en el modelo, cuya viscosidad cinemática es casi veinte veces mayor que la del aire y con esas condiciones la velocidad del modelo sería sólo de 1 a 5 m/s , perfectamente obtenible. Esto permite también sustituir el trabajo, por ejemplo, con gases calientes y otros fluidos difíciles y costosos de manipular, por el trabajo con fluidos como el agua, el aire frío u otros con condiciones mejores y más económicas de funcionamiento.

Estas posibilidades han hecho muy popular el uso de modelos a gran escala los cuales simulan el proceso físico real adoptando condiciones mucho más suaves de operación, generalmente a temperatura y presión ambiente y utilizando fluidos más baratos y menos difíciles de manejar. Estos modelos se construyen en tamaños casi iguales a los de la

planta a gran escala, aunque también se construyen en diferentes tamaños para examinar con precisión el efecto de los factores de escala en el fenómeno estudiado y ayudar a la obtención de los datos requeridos para el escalado.

En todos los casos como los demás tipos de modelos, se han usado los equipos de laboratorio, banco o piloto, desarrollando con las mismas investigaciones de los mecanismos físicos que son más sensibles al tamaño que son los procesos hidrodinámicos.

Cuando se trata de las plantas piloto en las cuales los fluidos a procesar son iguales que los prototipos, no se pueden utilizar estos procedimientos y hay que utilizar otros medios entre los que se destacan el uso de elementos o modelos de elementos y la extrapolación.

Durante el escalado por la teoría de los modelos los investigadores se enfrentan a una serie de riesgos que pueden hacer fracasar los objetivos del proyecto, entre los cuales están:

- ✓ La incompatibilidad de las funciones criterioles seleccionadas.
- ✓ Los efectos de frontera del sistema material y respecto a la geometría del equipo.
- ✓ El efecto de la selección de la instalación experimental (tamaño y tipo de material: del modelo físico, sustancias simuladoras, potencia de agitadores mecánicos, empaquetadura de reactores) sobre la semejanza en las propiedades físicas del fluido y los parámetros de operación en el prototipo.

En casos anteriores se analizó **la incompatibilidad de los criterios de semejanza**, la cual crece con la cantidad de estos en una ecuación criterial dada, y aún más, cuando los sistemas son homólogos. Es por ello que en la práctica del escalado, se hace necesario reducir el número de criterios en dichas ecuaciones. En estos casos, es de gran ayuda la aplicación del concepto de régimen y la determinación de su naturaleza.

1.9. Conclusión del Capítulo I

- ✓ Existe un soporte teórico satisfactorio que permite el establecimiento de un procedimiento de cálculo útil para la obtención de los parámetros de explotación del enfriador de mineral a escala piloto del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA ESTABLECER LOS PARÁMETROS DEL ESCALADO

2.1- Introducción

El conocimiento del proceso, el desarrollo de expresiones matemáticas que representen los fenómenos físicos de los sistemas y el proyecto para la implementación de las nuevas tecnologías es un tema de primordial importancia en el desarrollo actual del sector industrial.

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

Establecer el procedimiento de cálculo adecuado para la determinación de acuerdo con los criterios de semejanza para la obtención de los parámetros de operación del enfriador a escala piloto.

2.2- Criterios de semejanzas

Lo primero que se debe tener en cuenta es que se cumpla el **primer postulado** para que después se tengan en cuenta los demás, en el cual se analiza a partir de la ecuación 2.1 para la obtención de la constante de semejanza geométrica.

$$\frac{I_1''}{I_1'} \cdot \frac{I_2''}{I_2'} \cdot \frac{I_3''}{I_3'} = C_1 \quad (2.1)$$

Donde:

- I_1', I_2', I_3' - son las dimensiones lineales de los lados de una figura
- I_1'', I_2'', I_3'' - son las dimensiones lineales homólogas de otra figura semejante a la primera.
- C_1 - factor de proporcionalidad o la constante de la similitud geométrica.

Cuarto Postulado: La semejanza de los fenómenos físicos significa que todas las magnitudes que caracterizan los fenómenos examinados son similares. Esto significa que en los puntos homólogos del espacio y en los instantes homólogos cualquier magnitud φ' del primer fenómeno es directamente proporcional a la magnitud homogénea φ'' del segundo fenómeno es φ decir:

$$\varphi'' = C_\varphi \cdot \varphi^1 \quad (2.2)$$

Donde:

C_φ - constante de semejanza

El factor de proporcionalidad C_φ no depende de las coordenadas del tiempo. Simultáneamente cada magnitud física φ tiene una constante de semejanza C_φ que se diferencia numéricamente una de la otra.

El proceso de intercambio de calor por convección, la temperatura, la viscosidad, la presión y los parámetros físicos del medio (coeficiente de viscosidad, conductividad térmica, densidad y otros) pueden tener en diferentes puntos valores distintos, sin embargo la similitud entre dos procesos semejantes se da cuando todas estas magnitudes en todo el volumen del sistema examinado son semejantes, existe similitud del campo entre estas magnitudes. Para cada una de estas magnitudes existe su propia constante de semejanza.

2.3- Semejanza de los procesos de intercambio de calor por convección

Los procesos de intercambio de calor durante el movimiento forzado de un agente portador de calor, la convección libre se desarrolla de un modo distinto. Para estos procesos también resultan diferentes los números de semejanzas. Por eso es conveniente examinar inicialmente estos dos casos por separados.

2.3.1- Condiciones de semejanza en el intercambio de calor durante el movimiento forzado del agente portador de calor

Primera condición: Pueden ser semejantes solo los procesos del intercambio de calor que transcurren en sistemas geoméricamente semejantes.

Segunda condición: La premisa indispensable para que se halle similitud debe ser la semejanza entre los campos de velocidad, temperatura y de presiones en las secciones de entrada o inicial de tales sistemas.

Si se cumplen estas condiciones, los procesos estacionarios de intercambio de calor por convección durante el movimiento forzado serán semejantes sí:

$$R_e = iden$$

$$P_r = iden$$

El número de Reynolds determina la similitud hidromecánica entre las corrientes de los agentes portadores de calor, se puede obtener a través de la ecuación 2.3.

$$R_e = \frac{W_o \cdot l}{\nu} \quad (2.3)$$

Donde:

- W_o - es la velocidad característica de la corriente media, del líquido o del gas en la sección inicial del sistema, (m/s)
- l - es la dimensión característica geométrica del sistema (diámetro, la longitud de la lámina), (m)
- ν - es el coeficiente cinemático de viscosidad del agente portador de calor, (m²/s)

El número de Prandtl es la característica termo física del agente portador de calor. Cuando son iguales los números de Reynolds las condiciones de igualdad de los números de Prandtl aseguran la semejanza térmica, es decir, la similitud de los campos de las diferencias de temperaturas entre dos medios y de los flujos térmicos en todo el volumen de los sistemas analizados.

En los procesos de intercambio de calor por convección en calidad de número determinado interviene el número de Nusselt (Nu) que caracteriza la intensidad del proceso de transferencia de calor por convección. El número de Nusselt se determina por la ecuación 2.4.

$$N_u = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (2.4)$$

Donde:

- α - coeficiente de traspaso de calor, (W/m²K)
- l - dimensión geométrica característica, (m)
- λ - coeficiente de conductividad térmica del agente portador de calor, (W/mK)

La ecuación de semejanza para los procesos de intercambio de calor por convección durante el movimiento forzado del agente portador de calor tiene la siguiente forma:

$$N_u = f(R_e, Pr)$$

Las condiciones de semejanzas expuestas anteriormente se determinan mediante el análisis de la descripción matemática en los procesos. En el caso del movimiento forzado del agente portador de calor, el cuadro hidromecánico no depende del intercambio de calor, es por eso que las condiciones de semejanza hidromecánica son la premisa indispensable de la similitud térmica. Esta se reduce a la similitud de los campos de velocidad y de presión en la sección de entrada de los sistemas y al cumplimiento de las condiciones

$$R_e = iden$$

$$P_r = iden$$

La igualdad de los números del Re se desprende de la ecuación que enlaza las constantes de semejanzas.

$$c_\rho c_\omega c_l / c_\mu = 1 \tag{2.5}$$

Donde:

- C_μ - Constante de semejanza para coeficiente dinámico de viscosidad.
- C_ρ - Constante de semejanza para la densidad del flujo.
- C_ω - Constante de semejanza para la velocidad cinemática.

2.3.2- Condiciones de semejanza de los procesos de intercambio de calor durante la convección libre

El proceso de convección libre surge como consecuencia de la diferencia entre las densidades de las partículas calientes y las frías del agente portador de calor. Para la mayoría de los agentes portadores de calor en este intervalo de temperatura que suele usarse en la práctica, la dependencia que tiene la densidad en función de la temperatura, pues con la aproximación suficiente se puede considerar como una dependencia lineal. De este modo, si en un punto alejado del cuerpo caliente la temperatura del agente portador

de calor es igual a t_{F1} y en cierto punto cerca de la superficie es igual a t , se puede considerar que los valores correspondientes de densidad ρ_{F1} y ρ están ligados por la ecuación 2.6.

$$\rho = \rho_{F1} [1 - \beta(t - t_{F1})] \quad (2.6)$$

Donde:

- β - coeficiente térmico de dilatación cúbica del medio.

En el caso de la convección libre debe de existir la similitud de los campos de temperatura en las superficies de calefacción o de enfriamiento. Al cumplir estas exigencias los procesos estacionarios de la convección libre serán semejantes si se cumple que:

Gr = iden

Pr = iden

Gr caracteriza la eficacia relativa de fuerza de sustentación que provoca el movimiento de convección libre del medio y se determina por la ecuación 2.7.

$$Gr = g \cdot \beta \cdot \Delta t \frac{L^3}{\nu^2} \quad (2.7)$$

Donde:

- g - aceleración de la caída libre, (m/s^2)
- β - coeficiente térmico de dilatación cúbica del medio
- Δt - diferencia de temperatura entre dos medios, (K)
- l - dimensión característica lineal del sistema, (m)
- ν - es el coeficiente cinemática de viscosidad, (m^2/s)

El número de Pr es la característica termofísica del agente portador de calor, determinándose por la ecuación 2.8.

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (2.8)$$

El número de Nusselt, se determina a través de la ecuación 2.4, que es válida para la convección libre también. $Nu = f(Gr, Pr)$ ecuación de semejanza para los procesos del intercambio de calor durante la convección libre.

Para garantizar las condiciones $Gr = idem$, $Pr = idem$ anterior es necesario determinar las constantes de semejanza para cada proceso.

Al igual en que la convección forzada, los números de semejanzas pueden obtenerse del análisis de la descripción matemática para los procesos de la convección libre.

Según la definición general de los procesos que sean semejantes las constantes de semejanzas son:

$$v''/v' = C_v; \quad W''/W' = C_w; \quad \Delta P''/\Delta P' = C_{\Delta P};$$

$$\alpha''/\alpha' = C_\alpha; \quad g\beta''/g\beta' = C_{g\beta}$$

Y de manera análoga para los parámetros físicos:

$$C_p; C_{cp}; C_\lambda; C_\mu$$

La ecuación de conductividad térmica que proporciona la condición de semejanza térmica:

$$C_{cp} C_\rho C_\omega C_v / C_l = C_\lambda C_\sigma / C_l^2 \quad (2.9)$$

Las condiciones que caracterizan las similitudes dinámicas son:

$$C_\rho C_{g\beta} C_v C_L^2 / C_\mu C_w = 1, \quad (2.10)$$

$$C_\rho C_w C_L / C_\mu = 1, \quad (2.11)$$

$$C_{\Delta P} / C_L C_{g\beta} C_\rho C_v = 1, \quad (2.12)$$

Puesto que en el proceso de la convección libre la velocidad está en función del proceso, es conveniente eliminar la constante de semejanza C_w de las demás correlaciones utilizando la igualdad $C_\rho C_w C_L / C_\mu = 1$,. Entonces las correlaciones precedentes se pueden reescribir de la forma:

$$\frac{C_{cp} \cdot C_\mu}{C_\lambda} = 1 \quad (2.13)$$

$$\frac{C_p^2 \cdot C_g \beta \cdot C_v \cdot Cl^3}{C_\mu^2} = 1 \quad (2.14)$$

$$\frac{C_{\Delta P}}{Cl \cdot C_g \beta \cdot C_p \cdot C_v} = 1 \quad (2.15)$$

Y final mente la condición

$$C_\alpha C_L / C_w = 1, \quad (2.16)$$

Al introducir los valores en las ecuaciones 2.13, 2.14, 2.15 en ves de constante de semejanza sus valores de la ecuación se tiene:

$$C_\rho' \mu' / \lambda' = C_\rho'' \mu'' / \lambda'' = Pr = Iden$$

$$g\beta' \Delta t' \frac{l'^3}{\nu'^2} = g\beta'' \Delta t'' \frac{l''^3}{\nu''^2} = Gr = Iden$$

$$\Delta P' / \rho' g\beta' \Delta t' l' = \Delta P'' / \rho'' g\beta'' \Delta t'' l'' = Iden$$

$$\alpha' l' / \lambda' = \alpha'' l'' / \lambda'' = Nu = Iden$$

Los números de Prandtl (Pr) y de Grashof (Gr) están compuesto por la magnitudes dadas en la condiciones de univocidad. Estos números de semejanza determinan los procesos del intercambio de calor durante la convección libre. Los tres números de semejanza restantes contiene las magnitudes que están en función del proceso: velocidad (W), diferencia de presión ΔP y coeficiente de traspaso de calor (α) los cuales son números de semejanza determinados.

2.3.3- Condiciones de semejanza de los procesos de intercambio de calor por convección, durante el movimiento libre y forzado simultáneo del agente portador de calor

$Nu = f(Re, Gr, Pr)$ esta es la relación de semejanza para la emisión calorífica cuando existe movimiento simultáneo forzado y libre.

Antes de llevar a cabo cualquier experimento hay que conocer de ante mano:

- 1- Qué magnitudes hay que medir durante el experimento.
- 2- Como elaborar los resultados del ensayo.

3- Qué fenómenos son semejantes al estudiado.

Las respuestas a estas preguntas la tienen los tres teoremas de semejanza por ejemplo:

El primer teorema responde a la primera: durante los experimentos hay que medir todas las magnitudes que se contienen en los números de semejanza del proceso que se estudia.

El segundo teorema responde a la segunda pregunta: los resultados del ensayo es conveniente expresarlos en los números de semejanza y la dependencia entre ellos debe representarse en forma de las ecuaciones de semejanza, esto permite hallar la regularidad general aplicable a todos los procesos análogos al estudiado.

La respuesta a la tercera pregunta la da el tercer teorema: son semejantes aquellos fenómenos en que son semejantes las condiciones de univocidad y son iguales los números determinantes de semejanza (criterios de similitud).

2.4- Determinación de los parámetros fundamentales para el enfriador de mineral a escala piloto

Partiendo del modelo real y de las ecuaciones para determinar los parámetros de operación como la productividad, velocidad de rotación y el tiempo de retención del mineral dentro del enfriador, se pueden determinar los elementos para el modelo a escala piloto.

Para cualquier equipo metalúrgico, la productividad (A, en t/día; kg/día) puede ser resumida por la expresión:

$$A = V_m \cdot \varphi \cdot \omega_{max} \cdot T \quad (2.17)$$

Donde:

- V_m - Es el volumen de material a transformar, (m³)
- ω_{max} - Velocidad máxima de transformación del componente útil en producto kg/(m³.mn)
- T - es la jornada de trabajo del equipo, o sea, el tiempo de trabajo continuo del equipo en un tiempo dado.

- A - Productividad, (t/día)

En esta expresión, ϕ es el coeficiente de agitación y contacto, cuyo valor oscila entre 0 y 1. La unidad significa que todas las partículas de la fase transformada tienen garantizadas la energía y el reactivo que necesitan en el espacio que se encuentran a un mismo tiempo.

La productividad tiene un componente tecnológico, independiente del equipo donde se efectúa, relacionado con la ω_{\max} que depende de la naturaleza de la masa del producto y los reactivos, además del suministro de energía a dicho sistema material. De acuerdo con la teoría de los procesos piro e hidro-metalúrgicos, esto dependerá de:

- ✓ El tamaño de las partículas.
- ✓ Las condiciones de T, P, Concentración de reactivos.
- ✓ La presencia de catalizadores de las reacciones principales.
- ✓ La velocidad de suministro de la energía y los reactivos.

Para cada metal o compuesto en un sistema material dado existirá una expresión matemática para determinar ω_{\max} .

En numerosas ocasiones es imposible determinar la velocidad de algunas reacciones por razones de complejidad mineralógica o de fases de compuestos que no permiten aislarlas, lo que hace imposible la determinación de la productividad por la expresión. En estos casos, se actúa empíricamente sustituyendo

$$\phi \cdot \omega_{\max} = \rho / T_R \quad (2.18)$$

Donde:

- ρ - Masa volumétrica del material transformado, (kg/m³)
- τ_R - Tiempo de retención del material transformado en el equipo.

Para determinar el volumen del mineral se tiene en cuenta la geometría del enfriador y el coeficiente de llenado, para este tipo de enfriador de mineral de cilindros rotatorios se determina por la ecuación siguiente:

$$V_{\min} = V_c \cdot \psi \quad (2.19)$$

Donde

- V_c - Volumen del cilindro rotatorio, m³

- Ψ -Coeficiente de llenado

La velocidad del sólido según expresión desarrollada por Diomidovskiy D.A. en el Instituto de Minas de Leningrado, se calcula a través de la ecuación (2.20), referenciada por Chang (1997).

$$V_m = 5,78D_i \cdot \varphi \cdot n \quad (2.20)$$

Donde:

- φ - Ángulo de inclinación del cilindro
- n - Velocidad de rotación, (1/s)

Para determinar la velocidad de rotación del cilindro según Alepuz (1996) se igual las aceleraciones centrípeta para garantizar la semejanza en los dos procesos industrial y a escala piloto y despejar el número de revoluciones de la ecuaciones se obtiene la ecuación 2.21:

$$rpm_n := \sqrt{rpm_m^2 \cdot \left(\frac{da_m}{da_n} \right)} \quad (2.21)$$

Donde:

- rpm.n.- Número de revoluciones del modelo, (rev/min)
- rpm.m. -Número de revoluciones del industrial, (rev/min)
- da.m. - Diámetro del cilindro del industrial, (m)
- da.n. - Diámetro del cilindro del modelo, (m)

2.5- Conclusiones de Capítulo II

- Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la determinación de las constantes de semejanzas para los enfriadores de mineral, entre el industrial y el escala piloto, el mismo tiene en cuenta la transferencia de calor por convección libre de la pared del enfriador con el agua.
- Garantizando la condición planteada para las ecuaciones 2.13, 2.14; 2.15 y 2.16 se logra la semejanza para los procesos de intercambio de calor en el enfriador a escala piloto.

CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.

3.1- Introducción

Para la realización de toda investigación es necesaria la medición de los principales parámetros que caracterizan el objeto de estudio. En el caso específico de las instalaciones industriales no siempre es posible variar un parámetro para determinar su influencia en otras variables. Las instalaciones piloto o de laboratorio se diseñan con el objetivo de experimentar el comportamiento de las variables que caracterizan un proceso determinado.

En el presente capítulo se tienen como **objetivos**:

- ✓ Determinar las constantes de semejanzas del proceso para las variables que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral
- ✓ Obtener los principales parámetros de operación del enfriador de mineral a escala piloto.

3.2- Determinación de las constantes de semejanzas

Para determinar los valores de los parámetros de funcionamiento que garanticen la semejanza dinámica, cinemática y térmica es necesario determinar las constantes para cada proceso. Según la teoría de la semejanza, estas constantes pueden variar numéricamente para cada uno de los elementos, que deben cumplir algunas condiciones tale como:

- a. Debe existir semejanza geométrica entre los dos modelos.
- b. Los números adimensionales que describen el proceso sean iguales.

Para el enfriador de mineral de la empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” el proceso que describe el intercambio de calor por el exterior está dado por la convección libre desde la pared del enfriador al agua, ya que la velocidad de la película de agua sobre el cilindro del enfriador es igual a la de rotación y se considera en relación al cilindro igual a cero. También por la relación Gr/Re^2 , donde se analiza la interface en procesos de intercambio

de calor, donde según los cálculos obtenidos (ver anexo 4) se determinó el tipo de convección que predomina por el exterior del cilindro, que es la convección libre. Por lo tanto los números adimensionales que caracterizan dicho proceso son Gr, Pr y el Nu.

Para determinar las constantes de semejanza que describen dicho proceso y que cumpla con la condiciones, de que los números adimensionales que intervienen en la convección libre, tales como: Grashof (Gr), Prandtl (Pr) y el Nusselt (Nu), del modelo industrial y del escala piloto sean iguales, se seleccionan las magnitudes físicas que dependen de la temperatura del agua, para la cual, el intercambio de calor es más eficiente.

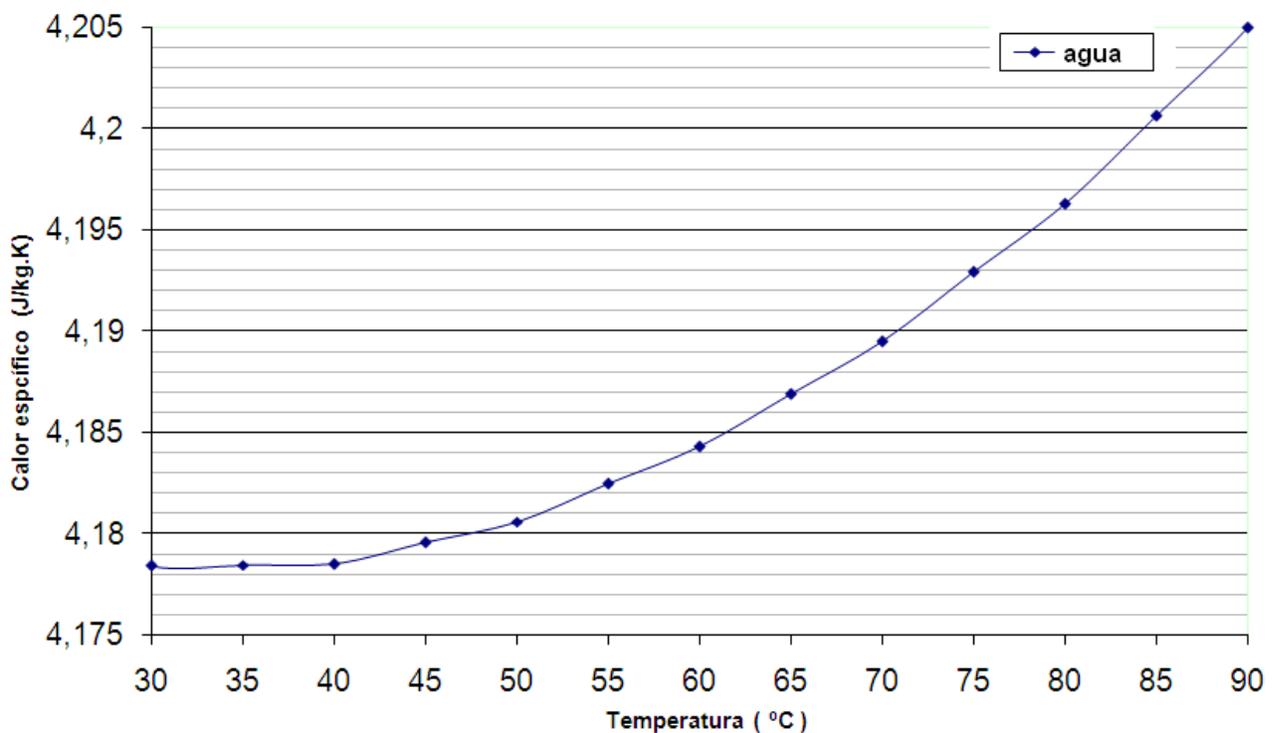


Figura 3.1: Comportamiento del calor específico del agua.

En la figura 3.1 se muestra el comportamiento del agua en función de la temperatura y del calor específico, en la cual se evidencia que a medida que aumenta la temperatura, el agua incrementa su capacidad de absorber calor, por lo cual, el rango de temperatura donde es mejor el intercambio de calor con el agua es entre los 65 y 85 °C .

Según el apéndice A, tabla A-9 del Holman (1999) (ver anexos 3), se toman los valores, calor específico, densidad del agua y el coeficiente de velocidad cinemática, para la

temperatura del agua igual a 71 °C y a través de la ecuación (2.2) del capítulo II se determinan las constantes de semejanzas para dichas magnitudes, las cuales son:

- ✓ $C_{pm}=4.18 \text{ kJ/kg.K}$ $C_{cp}= 1$ *Calor específico del agua*
- ✓ $\rho_{\text{agua}}=977.3 \text{ kg/m}^3$ $C_{\rho_{\text{agua}}}= 1$ *Densidad cinemática*
- ✓ $\mu=4.01 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m.s}$ $C_{\mu}= 1$ *Coefficiente de velocidad cinemática*

Se debe destacar que el material con que está construido el enfriador de mineral a escala piloto es el mismo que el usado en el industrial, siendo el valor del coeficiente de conductividad térmica el mismo para ambos casos, por tanto el coeficiente de escala para la conductividad térmica del material del cilindro es $C_{\lambda}= 1$.

Con los valores de las constantes de semejanzas ya obtenidas anteriormente se procedió a determinar las demás constantes para los procesos de intercambio de calor teniendo en cuenta la condición de que los números adimensionales que intervienen en el proceso tienen que ser iguales.

Según las ecuaciones 2.13, 2.14, 2.15 que se exponen en el capítulo II puede garantizar la semejanza para la convección libre.

Despejando las demás variables de estas ecuaciones se obtuvieron las constantes de semejanzas restantes para el proceso de intercambio de calor, (ver anexo 5 A)) las cuales se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Constantes de semejanzas

Constantes de semejanza	Magnitud	Valor
Viscosidad cinemática	C_v	1
Variación de presión	$C_{\Delta P}$	100
Coefficiente de traspaso de calor	C_{α}	10

3.3- Determinación de los parámetros de operación

Establecidas las contantes de semejanzas para el proceso de intercambio de calor se pueden determinar los parámetros de operación del enfriador a escala piloto.

Partiendo de los principales parámetros operativos del modelo real del enfriador de mineral de la empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” los cuales se exponen en el capítulo I.

3.3.1- Velocidad de rotación del cilindro del enfriador a escala piloto

Para garantizar que la velocidad de rotación del enfriador a escala piloto sea semejante a la del industrial, se igualaron las aceleraciones centrípetas de ambos equipos, y se determina a través de la ecuación 2.21 que para la instalación a escala piloto debe ser de 19,9 rev/min según Alepuz (1996) y fue así mayor que la industrial que es de 6,14 rev/min . Se evidenció que existen parámetros como la velocidad de rotación del cilindro que incrementa considerablemente durante el escalado.

3.3.2- Tiempo de retención del mineral

En la bibliografía consultada existen diversas ecuaciones, obtenidas empíricamente, que permiten determinar el tiempo de retención de una sustancia sólida durante su movimiento por el interior de un cilindro horizontal rotatorio. Dentro de esos equipos se destacan: hornos cilíndricos, secadores y calcinadores solo por mencionar algunos. No obstante, se debe tener presente que por las características constructivas de los enfriadores de mineral, no poseer ángulo de inclinación que garantice el desplazamiento del mineral en su interior y poseer un sistema de raspadores que no están contemplados en la bibliografía consultada y de los cuales no aparece criterio acerca del funcionamiento, hacen que esas ecuaciones mostradas en la bibliografía no sean del todo aplicables al objeto de estudio.

Todo lo antes expuesto demuestra que para determinar el tiempo de retención, el método más eficaz es el experimental, si se tiene en cuenta además las dificultades que se presentan en las industrias para determinar el tiempo de retención y este varía según la cantidad de mineral, tipo de carros y dimensiones del cilindro.

Según Valle (2008), el tiempo de retención para los enfriadores de la empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” es aproximadamente de 45 min .

No obstante hasta la fecha autores como Góngora (2004) y Lamorú (2008) utilizaron la ecuación 2.20, planteada por Diomidovskiy para hornos metalúrgicos y que aparece referenciada por Chang (2004), en los enfriadores de mineral de cilindros rotatorios.

Para la obtención del tiempo de retención del mineral en el interior del cilindro, se hicieron pruebas con mineral frío en el enfriador a escala piloto, en la cual se demostró que: el tiempo de retención del mineral es aproximadamente 12 min lo que quiere decir que se puede utilizar la ecuación 2.20 (planteada por Diomidovskiy para equipos metalúrgicos) en los enfriadores de mineral de cilindros rotatorios.

Por otra parte Pollard (1989) plantea que el tiempo de residencia, es uno de los parámetros principales de diseño y cuando el porcentaje de llenado es menor del 20 % , el flujo de sólidos no tiene una dependencia significativa.

A demás expone que por su diseño se puede regular el tiempo de residencia del sólido variando su flujo, ángulo de inclinación y velocidad de rotación del mismo, variables estas de gran importancia.

Sriram (1999), expone que unas de las ventajas significativas de su diseño, que con paletas interiores distribuidas uniformemente, permite un contacto gas-sólido muy favorable para cualquier relación de longitud y diámetro, evitando el efecto de canalizaciones.

Criterio de tiempo de retención

Valle (2000), en una de sus investigaciones plantea que el tiempo de retención del mineral para el enfriador de mineral de la empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” está entre los rangos de 35 a 40 min . Turra (1998), en otro trabajo plantea que el tiempo de retención es de 40 min .

Para estos tiempos de retención y el un flujo de mineral que oscila entre 25 a 43 t/h según Spenser (2009), se determinó el comportamiento de coeficiente de llenado.

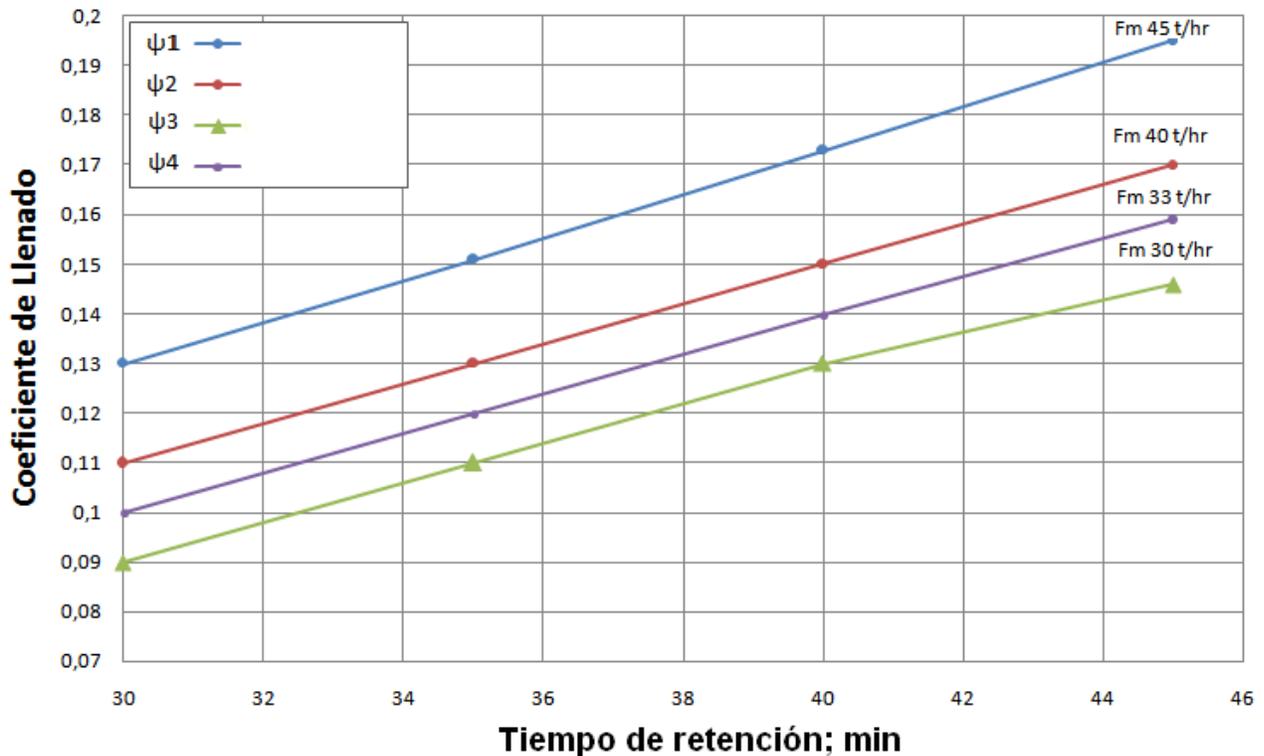


Figura 3.2 Comportamiento del Coeficiente de llenado

En la Figura 3.2 se muestra el comportamiento del coeficiente de llenado contra el tiempo de retención para diferentes flujos de mineral. Se debe destacar que el coeficiente de llenado asume valores entre 0,08 y 0,15, los cuales son establecidos para la operación eficiente de estos equipos. Se observa además que para un tiempo de retención de 44 min y un flujo de mineral superior a los 33 t/h , el coeficiente de llenado alcanza valores superiores de los 0.15 .

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente se puede considerar que esto sea unas de las causas por la cual la temperatura del mineral a la salida en el enfriador se mayor que la requerida en el proceso, debido que al aumento del porcentaje de mineral en el interior del enfriador disminuya el traspaso del flujo de calor por el bajo coeficiente de conductividad térmica del mineral.

3.3.3- Flujo del Mineral

Con el fin de establecer semejanza entre los parámetros de operación, se estableció que el coeficiente de llenado sería el mismo para las instalaciones industriales y piloto. Partiendo de esta condición se pudo determinar la cantidad de mineral que debe haber

dentro del cilindro para un instante de tiempo determinado. Relacionando la velocidad del mineral y su tiempo de retención se determinó que la productividad para el enfriador a escala piloto es de 123 kg/h (ver anexo 5 B).

3.3.4- Temperatura de entrada del mineral

Esta variable depende del proceso metalúrgico, ya que la misma se fija de manera que garantice la reducción del óxido de níquel a níquel metálico, que depende además de las características mineralógicas de la sustancia de trabajo. Otro elemento a considerar es que esta variable es considerada una perturbación dentro del proceso de enfriamiento, ya que en condiciones reales de operación es imposible mantenerla constante. Por tales motivos a la hora de realizar los experimentos carecería de sentido lógico enfriar el mineral para luego introducirlo en el enfriador de mineral reducido.

Otro aspecto importante está relacionado con la cantidad de calor que debe ser evacuado durante el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, ya que al mantener la temperatura de entrada para el proceso a escala piloto en el mismo rango que el industrial (750 a 600 °C), da la impresión que la cantidad de calor por área sería mayor y no se cumplirían los criterios de semejanzas, se debe tener en cuenta que se mantiene el coeficiente de llenado, se reduce considerablemente el flujo y la cantidad de mineral en el interior del cilindro, por lo que según la ecuación de calor la cantidad de calor resultante sería mucho menor para la instalación piloto que para la industrial.

3.3.5- Flujo del agua

Partiendo del principio de funcionamiento del objeto de estudio, que es intercambiador de calor y su objetivo es enfriar el mineral laterítico reducido hasta una temperatura de entre 150 y 200 °C , se determinó que para un flujo de mineral de 123 kg/h es necesario un flujo de agua de 0,308 m³/h , se garantiza que la temperatura de salida de la piscina sea de 70 °C .

3.4- Comportamientos de los números adimensionales

Determinadas las constantes de semejanzas y los parámetros de explotación del enfriador de mineral a escala piloto, se procedió a evaluar los números adimensionales que describen el proceso de intercambio de calor por convección libre, como el Grashof (Gr),

Prandtl (Pr), y el Nusselt (Nu), con el objetivo de comprobar la condición plateada por Mijeev y Mijeeva (1979) , donde se manifiesta que para que exista semejanza térmica, cinemática, dinámica tiene que cumplirse que los números adimensionales que describen el proceso de intercambio de calor sean iguales.

Para determinar el posible comportamiento del Grashof (Gr) en la instalación industrial y a escala piloto, se tomaron cinco valores de temperaturas en la superficie de la pared del cilindro, las cuales se determinaron mediante el cálculo de transferencia de calor, teniendo en cuenta la productividad para ambos modelos con el objetivo de comprobar la similitud de los números que describen el proceso de la convección libre.

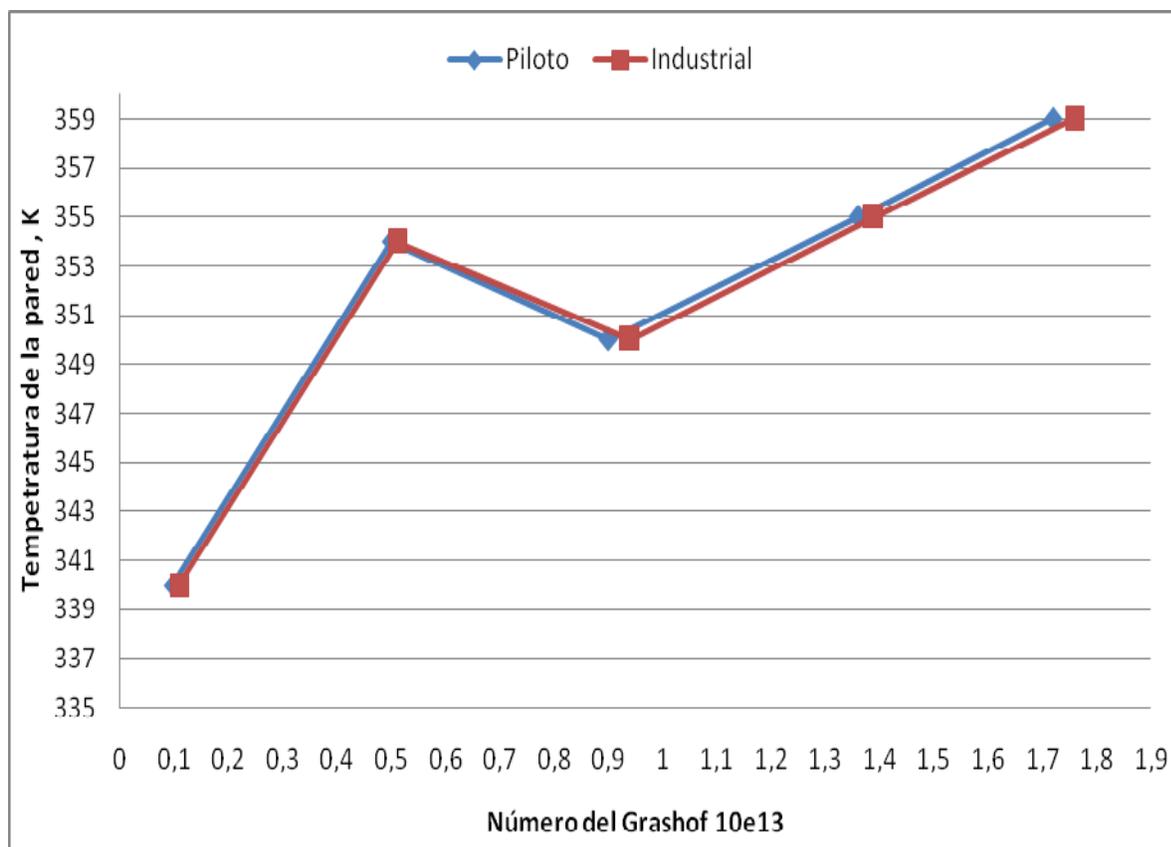


Figura 3.3: Comportamiento del Grashof.

La figura 3.3 muestra el comportamiento del número de Grashof tanto para el enfriador de mineral a escala piloto como del industrial ubicado en la empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara”, en función de la temperatura de la pared del enfriador de mineral para un rango de velocidad de rotación 6,14 y 19,9 rev/min , para el enfriador industrial y el piloto

respectivamente y un flujo de mineral de 44 y 0,123 t/h . Se comprobó además la similitud de los Grashof en los dos procesos.

El Nusselt es el número adimensional que caracteriza la intensidad del proceso de transferencia de calor por convección y según la teoría de la semejanza planteada en el Mijeev y Mijeeva (1979) garantizado la igualdad de este número se garantiza la semejanza térmica en dicho proceso. La figura 3.4 muestra el comportamiento del Nusselt para los dos procesos el industrial y el del modelo a escala piloto.

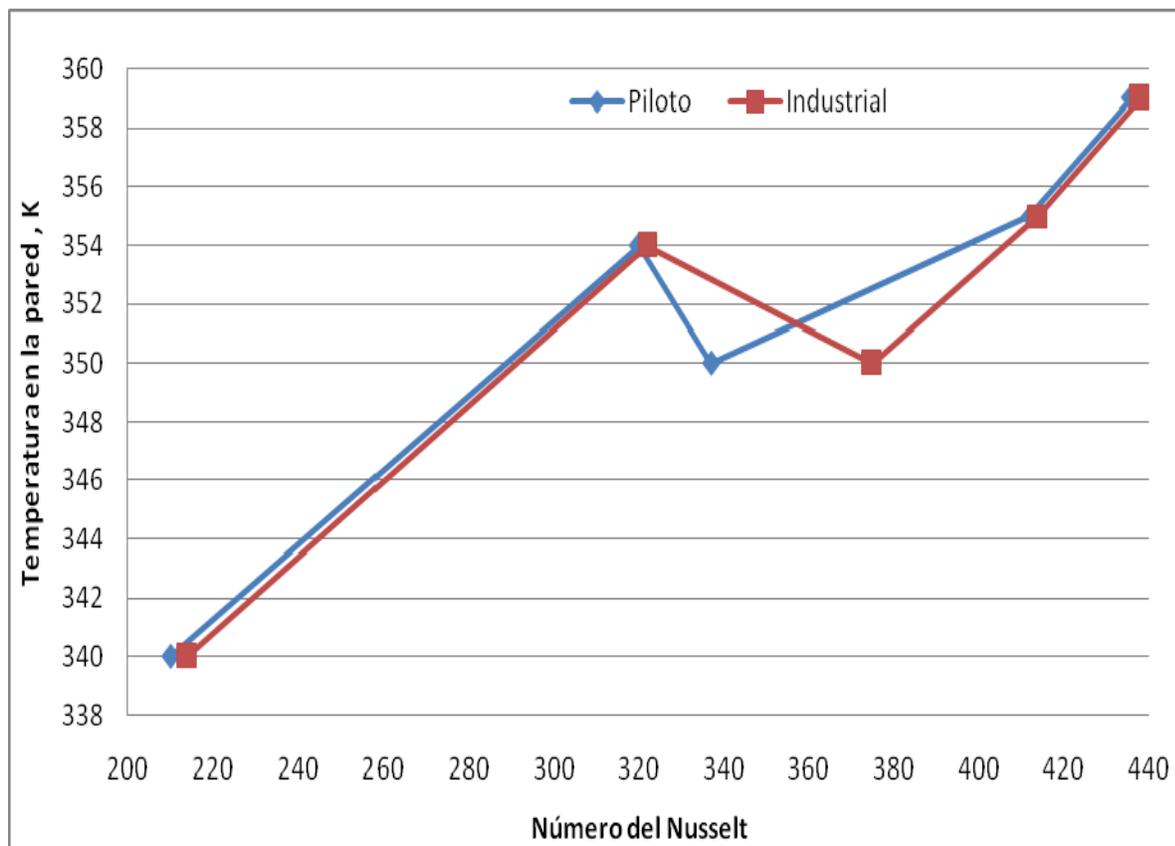


Figura 3.4: Comportamiento del Nusselt.

3.5- Valoración económica

Toda investigación debe llevar aparejado una evaluación económica que garantice que los recursos materiales, financieros y humanos, son aprovechados con eficiencia, seguridad y con el menor impacto al medioambiente y garantizar el uso racional de los recursos energéticos.

Para obtener buenos resultados en la experimentación es necesario añadir determinados instrumentos de medición que permitan controlar las variables de más importancia en el proceso (ver anexo 7).

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

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

Instrumentación	Precio CUC	Cantidad; U		Total. CUC	
		Indust.	Piloto	Indust.	Piloto
Termorresistencia Pt 100	196,80	27	9	5313,6	393.6
Termopar tipo K	196,80	1	1	196,8	196,80
Transmisor de presión relativa	813,60	4	2	3254,4	1627,2
Transmisor de presión diferencial	813,60	8	4	3254,4	3254,4
Cable de red de cobre UTP	0,42	20 m	3 m	8,4	2,52
Conectores plásticos	0,58	2	2	1,16	0.58
Adaptador opcional con batería	217,20	1	1	217,2	217.20
CPU TSX Momentum M1	690	1	1	690	690.00
Módulo de entradas analógicas	720	1	1	720	720.00
Módulo de salida analógica	720	1	1	720	720.00
Módulos adaptadores de comunicación Interbus.	312	1	1	312	312.00
Fuente de alimentación	300	1	1	300	300
Total				14987	9811.9

En la tabla 3.3 se analizan la cantidad de elementos y el costo de la instrumentación que se necesita para los enfriadores de mineral industrial y piloto, en la cual se determinó que el costo total para la instrumentación de un enfriador de mineral a escala industrial es de 14987 CUC y para el modelo a escala piloto es de 9811.9 CUC , la diferencia en el costo de instrumentación de los enfriadores de mineral a escala piloto e industrial es de 5176,06 CUC.

Tabla 3.4 Consumo energético.

Elementos	Precio (CUC/kWh)	Consumo		Importe (1 hora)	
		Industrial	Piloto	Industrial	Piloto
Motor eléctrico principal	0,45	90	1,5	40.5	0.97
Motor eléctrico auxiliar	0,45	11	-	4.95	-

En la tabla 3.4 aparecen los elementos que consumen energía tanto para la instalación industrial como el piloto en la cual se muestra que el consumo de energía por hora para el industrial es de 90 kWh lo que representa un total de 40,5 CUC por hora los que equivaldría en un día para 979 CUC y la de la instalación a escala piloto es de 1,5 kWh lo que representa un gato de 23.30 CUC/h .

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

3.6- Valoración del impacto ambiental

La instalación que se construye con la realización de este trabajo, genera mínimas afectaciones al medioambiente, producto que la misma está diseñada para garantizar que no se arroje mineral al medio, además no se usan reactivos que contaminan el ambiente y provoquen enfermedades respiratorias a los operarios.

No obstante para la operación de la instalación los investigadores y personal que labore en la instalación deberán cumplir las normas de protección e higiene del trabajo para evitar cualquier incidente negativo.

CONCLUSIONES:

- ✓ Los trabajos precedentes no recogen información detallada sobre cómo llevar a cabo el escalado de un enfriador cilíndrico rotatorio.
- ✓ Se estableció el procedimiento de cálculo para obtención de los parámetros de explotación y la evaluación de los criterios de semejanza para el escalado del enfriador cilíndrico rotatorio.
- ✓ Se determinó que la velocidad de rotación para el enfriador a escala piloto la cual debe de ser 19.9 rev/min , para un tiempo de residencia del mineral dentro del cilindro 12 minutos.
- ✓ Se obtuvo por medio de la metodología planteada en el capítulo II la productividad que garantiza la semejanza entre los dos modelos, industrial y el escala piloto la cual oscila entre 100 y 123 kg/h de mineral.

RECOMENDACIONES:

- ✓ Continuar con el estudio de la temática para garantizar la calidad en la investigación a escala de laboratorio.
- ✓ Determinar de manera experimental y para diferentes regímenes de trabajo las variables que caracterizan el proceso de enfriamiento de mineral a escala de laboratorio y compararla con el proceso industrial.
- ✓ Conservar y dar mantenimiento a la instalación siempre que el equipo se detenga por un periodo largo. (Ver anexo 8)

BIBLIOGRAFÍA.

1. ALEPUZ M, Hector. Determinación del ángulo de reposo del mineral reducido en los enfriadores de la planta de horno. Informe técnico. Empresa Cmdte René Ramos Latour. Nicaro 1996.
2. BAEKELAND, K.S., J. **Ind. Eng. Chem.**, **8**:184 (1916).
3. CALA, E Estudio del proceso e enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios horizontales como objeto de modelación matemática. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2005. 71p.
4. COLUMBIÉ, A. Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2001. 98p.
5. DIOMIDOVSKI, D. A, Hornos de la metalurgia no ferrosa. Ed. Metalurgia, Moscú, 1970. 704 p.
6. DOBROJOTOV, G. N., Procesos y Aparatos de la producción hidrometalúrgica. Ed. Instituto de Minas de St. Petersburgo, 1978. 85 p.
7. FOLLLOT: Publication technique No.70. centre destudet de Recherche de l'Industries des Liants Hydrauliques, Paris, 1955.
8. GARCÍA Meriño, Doris Antonio. Establecimientos de los parámetros de diseño y explotación del enfriador experimental. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2009.
9. GONGORA, E. Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la Planta Hornos de Reducción de la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2004. 83p.
10. GONZÁLEZ Castellanos, Roberto. Principios básicos de escalado. Editorial Universitaria del Ministerio de Educación Superior de la República de Cuba, Ciudad de Matanzas, diciembre 2000.
11. 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.
12. HOLLAND, F.A. and Chadman, F.S, Liquid Mixing and Processing in Stirred tanks. Ed. Jimia, Moscú, 1974. 207 p.

13. INCROPERA, F. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II. III.
14. JONSTONE, R.E., Thring, M. E., "Pilot Plants, Models and Scale-up Methods in Chemical Engineering", Mc.Graw-Hill Books C., New York, 1957.
15. LAMORU, U, M. Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico. Tesis de Maestría. ISMM. Moa 2008.
16. LARROCHE C. Spore production of *Penicillium Roquefort* in fermentors filled with buckwheat seeds: batch and semi-continuous cultivation. / C. Larroche, Gros J. En *Apply Microbiological Biotechnology* 24:134–139. 1986.
17. LONDRES Mena, J. Modelación y simulación del proceso de enfriamiento del mineral reducido en cilindros horizontales rotatorios por el método de elementos finitos. Olivares, J.M. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2007. 59p
18. M. A. Mijeev, I. M. Mijeeva. Fundamentos de la termo transferencia. Editorial Mir Modcú, año 1979. 375 P .
19. MATTHEW T. Bioreactors for Solid-State Fermentation on the Basis of Dimensionless. / T. Matthew, David. Mitchell *BIOTECHNOLOGY AND BIOENGINEERING*, Edit 2000 John Wiley & Sons, Inc.. 67(3), Febrero 5, 2002.
20. MATTISSON, T. Residence Time Distributions of Gas Flowing Through Rotating Drum Bioreactors. / T. Mattisson, Hardin, T. y D. Mitchell. En *Biotechnology and Bioengineering*, 74(2), july, 2001
21. PERDOMO Mena, J.J.; Matos Casals, D. Evaluación de la influencia del agua de enfriamiento en el proceso de transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Góngora, E.; Lamorú, M; Olivares, J.M. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2007. 53p
22. PERRON, J. and R. T. Bui, "Fours rotatifs: Modele dynamique du mouvement du lit", *Can. J. Chem. Eng.* 72, 16-25. 1994.
23. PERRY, R. *Chemical Engineering Handbook*. / R. Perry; D. W. Green, Edot. McGraw-Hill, 1999. Disponible en formato electrónico.

24. POLLARD, B. L. Kinetics of Radial Segregation of Different Sized Irregular Particles in Rotary Kiln. / B. L. Pollard. H. Henein. En Metallurgical Quartely, 28(1): 29-40, july 1989.
25. PORTILLO Pérez de Viñaspre, Fabiola. Mar Molinero, Cecilio. Método no lineales de escalado optimo. Departamento de Economía y Empresa Facultad de Ciencias Empresariales. Universidad de la Rioja, diciembre 2007.
26. SAI, P. S.T., G. D. Surender and A. D. Damodaran, "Predicction of axial velocity profiles and solid hold-Up in a rotary klin", Can. J. Chen. Eng. 70, 438-44. 1992.
27. SPENCER, Rodríguez, Yudmila. Caracterización del proceso de enfriamiento del mineral en el proceso CARON, con ayuda de Redes Neuronales Artificiales. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2009.
28. SRIRAM, V. Transient Response of Granular Bed Motion in Rotary Kiln / V. Sriram y P. S. T. Sai. En The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol 77, junio, 1999
29. TUNRA. Ore Cooler Evaluation. The Uniersity Of New Castle Research Associates Limited. 1998. 18p.
30. VALLE MATOS, M; Garcia Pérez, M; Rabell González, D; Morales, Y. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Cdte. Ernesto Che Guevara de Moa (II). *Tecnología Química*. 2000b. 20 (2): 10-15.

Anexos # 1

A)



B)



A) Vista frontal, B) vista lateral del enfriador de mineral a escala Piloto del ISMM

Anexos # 2

A)



B)



A) Vista frontal, B) vista lateral del enfriador de mineral de la empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara”

Anexo #3
Tabla A-9 del Holman. Propiedades del agua (líquido saturado)

Temperatura °C	Cp, (kJ/kg °C)	ρ , (kg/m ³)	μ 10 ⁻⁴ , (kg/m s)
43,33	4,174	990,6	6,16
48,89	4,174	988,8	5,62
54,44	4,179	985,7	5,13
60	4,179	983,3	4,71
65,5	4,183	980,3	4,3
71,1	4,186	977,3	4,01
76,6	4,191	973,7	3,72
82,22	4,195	970,2	3,47
87,78	4,199	966,7	3,27
93,33	4,204	963,2	3,06
104	4,216	955,1	2,67

ANEXO 5. A)

Para la determinación de las constantes de semejanzas en el proceso se asumieron las siguientes constante:

$C_{cp} := 1$ Coeficiente de escala para el calor específico del agua

$C_{\mu} := 1$ Coeficiente de escala para velocidad cinemática del agua

$C_{\rho} := 1$ Coeficiente de escala para densidad cinemática

$C_{\lambda} := 1$

Éstas caracterizan las propiedades físicas como, la temperatura del agua en la piscina experimental que debe ser aproximadamente igual a la del proceso industrial, con el objetivo de obtener las demás constantes de semejanzas que describen el comportamiento cinemático y dinámico en el proceso, garantizando las condiciones anteriores.

$C_l := 0.10$ Coeficiente de escala geométrica

Los coeficientes de escala de velocidad se asumen igual a uno, dado a que el proceso de transferencia que se está analizando es convección libre donde el fluido se considera casi estático y el coeficiente de escala geométrica que ya está prefijado por el diseño del enfriador a escala.

De acuerdo con la Teoría de Semejanza (Diomidovski, (1970); Holland and Chagman, (1972); Dobrojtov, (1978)), para que dos procesos sean semejantes primero debe cumplirse que exista semejanza Geométrica y luego semejanza, dinámica y cinemática. Para que esto ocurra debe cumplirse que los números que describen el proceso sean iguales.

$C_v := \frac{C_{\mu}}{C_{\rho}}$ *Constante que determina la viscosidad cinemática*

$C_v = 1$

$C_{g\beta} := \frac{C_{\mu}}{C_{\rho} \cdot C_v \cdot C_l^3}$ *Constante que determina la dilatación del agua, la cual se despeja de la ecuación que garantiza que los números de Gr del escalado y del industrial sean iguales*

$C_{g\beta} = 1 \times 10^3$

$C_{\Delta P} := C_l \cdot C_{g\beta} \cdot C_{\rho} \cdot C_v$ *Constante de semejanza de variación de presión y se despeja de la ecuación que determina la semejanza el Nussell*

$C_{\Delta P} = 100$

$C_{\omega} := \frac{C_{\mu}}{C_{\rho} \cdot C_l}$

$C_{\omega} = 10$

Diomidovski, (1970) garantizando que se cumplan estas condiciones se determinan las contantes de semejanzas para el proceso en la convección libre

Números adimensionales que caracterizan la convección libre

$\frac{C_{cp} \cdot C_{\mu}}{C_{\lambda}} = 1$ *Pranda*

$\frac{C_{\rho}^2 \cdot C_{g\beta} \cdot C_v \cdot C_l^3}{C_{\mu}^2} = 1$ *Grachof*

$$\frac{C\Delta P}{Cl \cdot Cg\beta \cdot Cp \cdot Cv} = 1$$

Nussel que depende de Pr, Gr

Parámetros de operación del enfriador de mineral de la empresa Comandante Ernesto Che Gevara:

$$\rho_a := 800 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1} \quad \text{Peso volumétrico aparente del mineral, (500 y 1000 kg/m}^3)$$

$$\rho_m := 3300 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1} \quad \text{Densidad del mineral; kg/m}^3$$

$$\psi := 0.15 \quad \text{Coeficiente de llenado del enfriador con mineral. (0.08 y 0.15)}$$

$$C_{pm} := 0.934 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Calor específico del mineral; J/kgK .}$$

$$\rho_{\text{agua}} := 977.3 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1} \quad \text{Densidad cinemática del agua}$$

$$\mu := 4.01 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1} \quad \text{Coeficiente de velocidad cinemática del agua}$$

$$\theta_{\text{fagua}} := 343.15 \cdot \text{K} \quad \text{Temperatura del agua en la piscina; K .}$$

$$\lambda_{\text{mate}} := 58 \cdot \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Conductividad térmica del material; W/m K .}$$

$$\theta_m := 873 \cdot \text{K} \quad \text{Temperatura del mineral; K .}$$

$$\nu := \frac{\mu}{\rho_{\text{agua}}} \quad \text{Viscosidad cinemática del agua}$$

$$\nu = 4.103 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Partiendo de la definición general de los procesos semejantes se tiene:

$$C_{pm_e} := C_{cp} \cdot C_{pm} \quad \text{Calor específico del mineral a escala piloto; J/kgK .}$$

$$C_{pm_e} = 934 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\mu_e := C_{\mu} \cdot \mu \quad \text{Coeficiente de velocidad cinemática del agua del modelo a escala}$$

$$\mu_e = 4.01 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

$$\lambda_{\text{mate}_e} := C_{\lambda} \cdot \lambda_{\text{mate}} \quad \text{Conductividad térmica del material para el modelo a escala}$$

$$\lambda_{\text{mate}_e} = 58 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^3 \cdot \text{K}}$$

$$\rho_{\text{agua}_e} := C_{\rho} \cdot \rho_{\text{agua}} \quad \text{Coeficiente densidad cinemática del agua para el modelo a escala}$$

$$\rho_{\text{agua}_e} = 977.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_e := C_v \cdot v$$

Viscosidad cinemática del agua para el modelo a escala

$$v_e = 4.103 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

ANEXO 5 B) Cálculo de la productividad

Diametro exterior del cilindro del real ; m .

Longitud del enfriador real.

Numero de revoluciones del real

$$da_m := 3.072 \text{ m}$$

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

$$\text{rpm}_m := 6.24 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{min}}$$

Diámetro exterior del cilindro del modelo a escala ; m .

Longitud del enfriador del modelo a escala real

$$da_n := 0.30 \text{ m}$$

$$Le_n := 3 \cdot \text{m}$$

Segun Drrojtov (1979) para determinar el número de revoluciones que garantiza la semejanza se expresa de la siguiente manera.

$$\text{rpm}_n := \sqrt{\text{rpm}_m^2 \cdot \left(\frac{da_m}{da_n}\right)} \quad \text{rpm}_n = 19.968 \frac{\text{rad}}{\text{min}} \quad \text{rpm}_n = 0.333 \frac{1}{\text{s}}$$

Velocidad del mineral dentro del enfriador

$$\Omega_1 := 0.4 \text{ deg}$$

Ángulo de inclinación del cilindro.

$$V_{ma_n} := 5.78 da_n \cdot \Omega_1 \cdot \text{rpm}_n$$

Velocidad del mineral dentro del cilindro; m/s

$$V_{ma_n} = 4.029 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Flujo de mineral; t/h .

Tiempo de retención del mineral; s .

$$F_{m_n} := \frac{\psi \cdot \pi \cdot da_n^2 \cdot \rho_a \cdot V_{ma_n}}{4}$$

$$T_{ret_n} := \frac{Le_n}{V_{ma_n}}$$

$$F_{m_n} = 123.023 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$T_{ret_n} = 12.411 \text{ min}$$

Asumiendo los valores de la temperatura iguales tanto para el enfriador modelo a escala piloto como para el industrial se tiene que

$$C_{p_{\text{agua}}} := 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_{\text{agua}} := 975 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\theta_{m_s} := 423 \cdot \text{K}$$

$$\theta_{f_{\text{agua}_e}} := 302 \text{ K}$$

Flujo de agua;

$$Fm_a := \frac{Fm_n \cdot Cpm_e \cdot (\theta_m - \theta_{m_s})}{Cp_{agua} \cdot (\theta_{fagua} - \theta_{fagua_e})}$$

$$Fm_a = 299.89 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$Fm_v := \frac{Fm_a}{\rho_{agua}} \quad Fm_v = 5.126 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

La temperatura dentro del mineral debe de ser igual a la del real debido que a que el proceso de oxidación del mineral debe de ocurrir en en ese rango de temperatura

Radio interior del cilindro; m .

$$R_1 := 0.15 \cdot \text{m}$$

Radio exterior del cilindro; m .

$$R_2 := 0.152 \cdot \text{m}$$

Conductividad térmica del Ac Carbono

$$K_{\text{metal}} := 63.9 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Ccp_{\text{paret}} := 434 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Temperatura del mineral

$$T_{\text{min}} := 1053 \text{K}$$

Temperatura del agua

$$T_{\text{agua}} := 343.15 \text{K}$$

Coefficiente de convección del agua

$$h_{\text{agua}} := 200.747 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

$$R_s := \frac{Le_n}{\pi \cdot (2 \cdot R_2)^2 \cdot \psi \cdot \lambda_{\text{mate}_e}} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi \cdot R_2 \cdot K_{\text{metal}}} + \frac{1}{h_{\text{agua}} \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot \pi \cdot (2R_2)^2\right]}$$

$$q_{\text{sed}} := \frac{T_{\text{min}} - T_{\text{agua}}}{R_s}$$

$$q_{\text{sed}} = 143.205 \text{ W}$$

$$R_s = 4.957 \frac{\text{s}^3 \cdot \text{K}}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$$

Temperatura de la pared del enfriador de mineral

$$T_{\text{sup}} := \frac{q_{\text{sed}}}{Fm_n \cdot Ccp_{\text{paret}}} + T_{\text{agua}}$$

$$T_{\text{sup}} = 352.806 \text{ K}$$

$$T_{\text{sup}} = 79.656 \text{ }^\circ\text{C}$$

Anexo 4: Analisis de la convección

Coefficiente de dilatación del agua

$$\beta := 697 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Diámetro del cilindro

$$D := 3.0 \cdot \text{m}$$

Viscosidad cinemática

$$\nu := 4.106 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Temperatura de la superficie del cilindro

$$\theta := 375 \text{ K}$$

Temperatura del agua en la piscina; K.

$$\theta_{\text{fagua}} := 343.15 \cdot \text{K}$$

Densidad del agua a 345 K; kg/m^3 .

$$\rho_{\text{agua}} := 977.3 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$$

Velocidad del fluido

$$V_{\text{agua}} := 0.018 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Coef. dinámico de viscosidad; Ns/m^2 .

$$\mu := 4.01 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$$

Número del Grachof

$$\text{Gr} := \frac{g \cdot \beta \cdot (\theta - \theta_{\text{fagua}}) \cdot D^3}{\nu^2}$$

$$\text{Gr} = 3.486 \times 10^{13}$$

Número de Reynolds

$$\text{Re1} := \frac{\rho_{\text{agua}} \cdot V_{\text{agua}} \cdot D}{\mu}$$

$$\text{Re1} = 1.316 \times 10^5$$

Número de Prandtl.

$$\text{Pr} := 2.45$$

Relación del Gr con el Re

Ranquini

$$\text{Ra} := \text{Gr} \cdot \text{Pr}$$

$$\text{Ra} = 8.542 \times 10^{13}$$

$$\text{RAr} := \frac{\text{Gr}}{\text{Re1}^2}$$

$$\text{RAr} = 2.013 \times 10^3$$

Relación de Gr/Re²

$\text{RAr} > 1$ **se considera convección Libre**

$\text{RAr} < 1$ **se considera convección forzada**

$\text{RAr} = 1$ **La convección es mixta**

Conductividad termica del agua

$$b := \frac{1}{4} \quad z := 0.17$$

$$K_{\text{agua}} := 0.666 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Número del Nussel

$$\text{Nu} := z \cdot \text{Ra}^b$$

$$\text{Nu} = 516.818$$

Coefficiente de convección del agua

$$h_{\text{agua}} := \frac{K_{\text{agua}} \cdot \text{Nu}}{D}$$

$$h_{\text{agua}} = 114.734 \frac{\text{kg}}{\text{s}^3 \cdot \text{K}}$$

Anexo 6

Análisis de los números adimensionales para escala industrial

$$n := 0, 1 \dots 4$$

Diámetro del cilindro

$$D := 3.02 \cdot \text{m}$$

Temperatura de la pared

$$\theta_n :=$$

Temperatura del agua

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

Coefficiente de dilatación del agua

$$\beta := 697 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

361.15K
357.15K
355.15·K
349.15K
344.15K

343.15K
342.15K
341.15K
340.15K
339.15K

Densidad del agua

$$\rho_{\text{agua}_n} :=$$

$977.5 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$
$978 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$
$978.5 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$
$979 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$
$979.5 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$

Coefficiente dinámico de viscosidad

$$\mu_n :=$$

$4.05 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
$4.10 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
$4.15 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
$4.20 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
$4.25 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$

Número de Prandtl

$$\text{Pr}_n :=$$

2.53
2.53
2.53
2.53
2.53

Conductividad térmica del agua

$$K_{\text{agua}_n} :=$$

$0.666 \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$

Viscosidad cinemática

$$v_n := \frac{\mu_n}{\rho_{\text{agua}_n}}$$

$$v_n =$$

$4.143 \cdot 10^{-7}$
$4.192 \cdot 10^{-7}$
$4.241 \cdot 10^{-7}$
$4.29 \cdot 10^{-7}$
$4.339 \cdot 10^{-7}$

$$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Número del Grachof

$$\text{Gr}_n := \frac{g \cdot \beta (\theta_n - \theta_{\text{agua}_n}) \cdot D^3}{(v_n)^2}$$

$$\text{Gr}_n =$$

$1.974 \cdot 10^{13}$
$1.607 \cdot 10^{13}$
$1.465 \cdot 10^{13}$
$9.206 \cdot 10^{12}$
$5 \cdot 10^{12}$

Número de Ranquini

$$\text{R}_{\text{AD}_n} := \text{Pr}_n \cdot \text{Gr}_n$$

$$\text{R}_{\text{AD}_n} =$$

$4.994 \cdot 10^{13}$
$4.065 \cdot 10^{13}$
$3.707 \cdot 10^{13}$
$2.329 \cdot 10^{13}$
$1.265 \cdot 10^{13}$

$$b := \frac{1}{4} \quad z := 0.17$$

Número del Nussel

$$Nu_n := z \cdot (RAD_n)^b$$

$$Nu_n =$$

451.93
429.262
419.48
373.465
320.607

Coefficiente de convección del agua

$$h_{agua_n} := \frac{K_{agua_n} \cdot Nu_n}{D}$$

$$h_{agua_n} =$$

99.664
94.665
92.508
82.36
70.703

$$\frac{W}{m^2 \cdot K}$$
Analisis de los números adimensionales para el modelo a escala piloto

$$n := 0, 1 \dots 4$$

Diámetro del cilindro

$$D := 0.30 \cdot m$$

Coefficiente de dilatación del agua

$$\beta := 697 \times 10^{-3} K^{-1}$$

Temperatura de la pared

$$\theta_n :=$$

359.15K
355.15K
350.15·K
345.15K
340.15K

Temperatura del agua

$$\theta_{fagua_n} :=$$

343.15K
342.15K
341.15K
340.15K
339.15K

Densidad del agua

$$\rho_{agua_n} :=$$

$976 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$
$975 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$
$973 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$
$972 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$
$971 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$

Coefficiente dinámico de viscosidad

$$\mu_n :=$$

$4.012 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$
$4.015 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$
$4.02 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$
$4.021 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$
$4.025 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$

Número de Prandtl

$$Pr_n :=$$

2.53
2.53
2.53
2.53

Conductividad térmica del agua

$$K_{agua_n} :=$$

$0.666 W \cdot (m \cdot K)^{-1}$

Viscosidad cinemática

$$v_n := \frac{\mu_n}{\rho_{\text{agua}_n}}$$

$$v_n = \begin{array}{|c|} \hline 4.111 \cdot 10^{-7} \\ \hline 4.118 \cdot 10^{-7} \\ \hline 4.132 \cdot 10^{-7} \\ \hline 4.137 \cdot 10^{-7} \\ \hline 4.145 \cdot 10^{-7} \\ \hline \end{array} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$b := \frac{1}{4} \quad z := 0.17$$

Número del Grachof

$$Gr_n := \frac{g \cdot \beta (\theta_n - \theta_{\text{agua}_n}) \cdot D^3}{(v_n)^2}$$

$$Gr_n = \begin{array}{|c|} \hline 1.747 \cdot 10^{13} \\ \hline 1.415 \cdot 10^{13} \\ \hline 9.73 \cdot 10^{12} \\ \hline 5.392 \cdot 10^{12} \\ \hline 1.074 \cdot 10^{12} \\ \hline \end{array}$$

Número de Ranquini

$$RAD_n := Pr_n \cdot Gr_n$$

$$RAD_n = \begin{array}{|c|} \hline 4.421 \cdot 10^{13} \\ \hline 3.579 \cdot 10^{13} \\ \hline 2.462 \cdot 10^{13} \\ \hline 1.364 \cdot 10^{13} \\ \hline 2.717 \cdot 10^{12} \\ \hline \end{array}$$

Número del Nussel

$$Nu_n := z \cdot (RAD_n)^b$$

$$Nu_n = \begin{array}{|c|} \hline 438.362 \\ \hline 415.818 \\ \hline 378.671 \\ \hline 326.713 \\ \hline 218.265 \\ \hline \end{array}$$

Coefficiente de convección del agua

$$h_{\text{agua}_n} := \frac{K_{\text{agua}_n} \cdot Nu_n}{D}$$

$$h_{\text{agua}_n} = \begin{array}{|c|} \hline 973.163 \\ \hline 923.117 \\ \hline 840.65 \\ \hline 725.304 \\ \hline 484.549 \\ \hline \end{array} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Anexo # 7:

Equipos e instrumentos

a)



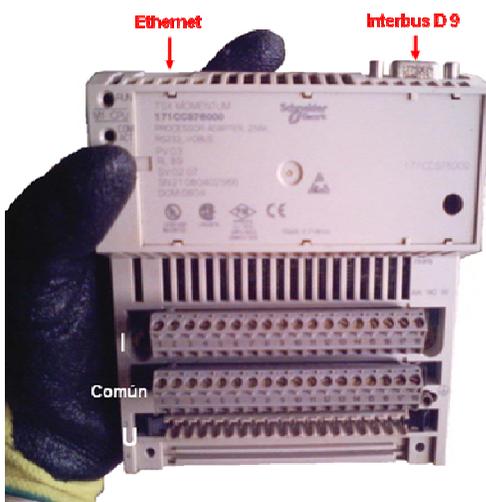
a) Termoresistencia Pt 100 con convertidor en el cabezal, Rango de medición 0 a 300°C., Longitud de inmersión: 100 mm, Toma de proceso 1/2 npt, con racor deslizante y termopozo de 10 mm de diámetro incorporado. Salida: 4-20mA.

b)



b) Transmisor de presión diferencial SIEMENS SITRANS P, Modelo DS III, Tipo: 7MF-4432-1DA00-1AA1-Z, Alcance de medida: 0- 200 mbar; Salida 4-20mA.

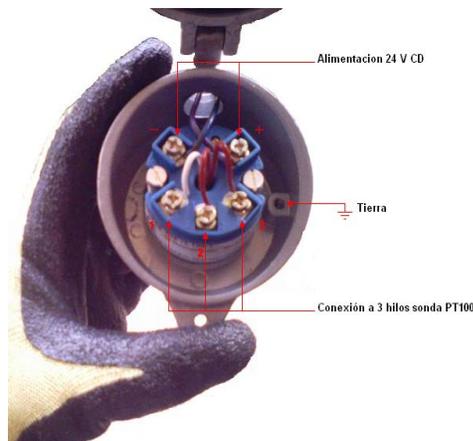
c)



c) Módulos adaptadores de comunicación Interbus para PLC Modicon TSX Momentum M1, Modelo: 170 INT 110 00.

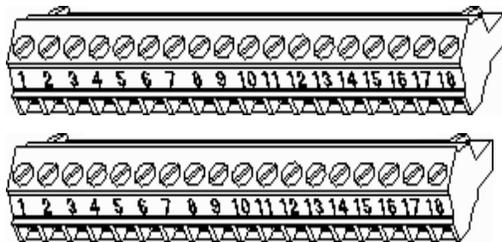
Continuación del anexo # 7

d)



d) Transmisor de presión relativa. SIEMENS SITRANS P, Modelo DS III, Tipo: 7MF-4433-1DA00-1AA1-Z, Rango -1- 15 bar.

e)



e) Conectores plásticos transparentes RJ45

f)



f) Microprocesador Pentium III o superior
 Memoria RAM 128 MB (256 Mb o mayor Recomendado).
 Adaptador de vídeo SVGA
 Espacio Disco Duro depende de la cantidad de información histórica que se quiera guardar en él (> 1 Gb recomendado).
 Mouse PS/2, USB.
 Torre de CD o Puertos USB para la instalación
 Sistema Operativo: Windows NT/2000/XP/Vista (2000/XP recomendado).

Anexo # 8**Manual de Arrancada y mantenimiento.**

Para la puesta en marcha del enfriador es necesario:

1. Lubricar los puntos de apoyo.
2. Asegurar que la piscina este llena y circulando el agua por ella.
3. Teniendo los dos pasos anteriores realizados y el equipo lleve tiempo sin funcionar, podemos probar en vacío para asegurar que todo este en buen estado.
4. Depositar el mineral en la tolva antes de la puesta en marcha.
5. Terminado el ensayo, asegurarse que no quede mineral dentro del enfriador, para evitar que el mismo se endurezca y entorpezca próximos experimentos. Esto se logra dejando trabajar el enfriador hasta que salga toda la cantidad que se hecho.

Cuando estas condiciones estén creadas, entonces se puede presionar el botón de arranque.

Mantenimiento.

Al concluir el análisis en el enfriador se debe:

1. Lubricar los puntos de apoyo para que no halla corrosión.
2. Lubricar la cadena, para conservar y que en un próximo experimento este lista para el funcionamiento.
3. Si en el transcurso del experimento se nota que el sello esta hasta el tope y esta derramando, sustituir la empaquetadura por nuevas cuando pare el equipo.
4. Concluido el experimento medir el motor (temperatura, amperaje), si hay alguna anormalidad, darle revisión en el taller.
5. Al contar con el agua como agente refrigerante, se esta expuesto a una gran corrosión por lo que es necesario mantener bien pintado el equipo y de notar alguna muestra de oxido limpiar y pintar nuevamente.

Anexo 4: Analisis de la convección

Coefficiente de dilatación del agua

$$\beta := 697 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Diámetro del cilindro

$$D := 3.0 \cdot \text{m}$$

Viscosidad cinemática

$$\nu := 4.106 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Temperatura de la superficie del cilindro

$$\theta := 375 \text{ K}$$

Temperatura del agua en la piscina; K.

$$\theta_{\text{fagua}} := 343.15 \cdot \text{K}$$

Densidad del agua a 345 K; kg/m^3 .

$$\rho_{\text{agua}} := 977.3 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$$

Velocidad del fluido

$$V_{\text{agua}} := 0.018 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Coef. dinámico de viscosidad; Ns/m^2 .

$$\mu := 4.01 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$$

Número del Grachof

$$\text{Gr} := \frac{g \cdot \beta \cdot (\theta - \theta_{\text{fagua}}) \cdot D^3}{\nu^2}$$

$$\text{Gr} = 3.486 \times 10^{13}$$

Número de Reynolds

$$\text{Re1} := \frac{\rho_{\text{agua}} \cdot V_{\text{agua}} \cdot D}{\mu}$$

$$\text{Re1} = 1.316 \times 10^5$$

Número de Prandtl.

$$\text{Pr} := 2.45$$

Relación del Gr con el Re

Ranquini

$$\text{Ra} := \text{Gr} \cdot \text{Pr}$$

$$\text{Ra} = 8.542 \times 10^{13}$$

$$\text{RAr} := \frac{\text{Gr}}{\text{Re1}^2}$$

$$\text{RAr} = 2.013 \times 10^3$$

Relación de Gr/Re²

$\text{RAr} > 1$ **se considera convección Libre**

$\text{RAr} < 1$ **se considera convección forzada**

$\text{RAr} = 1$ **La convección es mixta**

Conductividad termica del agua

$$b := \frac{1}{4} \quad z := 0.17$$

$$K_{\text{agua}} := 0.666 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Número del Nussel

$$\text{Nu} := z \cdot \text{Ra}^b$$

$$\text{Nu} = 516.818$$

Coefficiente de convección del agua

$$h_{\text{agua}} := \frac{K_{\text{agua}} \cdot \text{Nu}}{D}$$

$$h_{\text{agua}} = 114.734 \frac{\text{kg}}{\text{s}^3 \cdot \text{K}}$$

Anexo 6

Análisis de los números adimensionales para escala industrial

$$n := 0, 1 \dots 4$$

Diámetro del cilindro

$$D := 3.02 \cdot \text{m}$$

Temperatura de la pared

$$\theta_n :=$$

Temperatura del agua

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

Coefficiente de dilatación del agua

$$\beta := 697 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

361.15K
357.15K
355.15·K
349.15K
344.15K

343.15K
342.15K
341.15K
340.15K
339.15K

Densidad del agua

$$\rho_{\text{agua}_n} :=$$

$977.5 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$
$978 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$
$978.5 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$
$979 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$
$979.5 \cdot \text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$

Coefficiente dinámico de viscosidad

$$\mu_n :=$$

$4.05 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
$4.10 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
$4.15 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
$4.20 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
$4.25 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$

Número de Prandtl

$$\text{Pr}_n :=$$

2.53
2.53
2.53
2.53
2.53

Conductividad térmica del agua

$$K_{\text{agua}_n} :=$$

$0.666 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
$0.666 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
$0.666 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
$0.666 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
$0.666 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$

Viscosidad cinemática

$$v_n := \frac{\mu_n}{\rho_{\text{agua}_n}}$$

$$v_n =$$

$4.143 \cdot 10^{-7}$
$4.192 \cdot 10^{-7}$
$4.241 \cdot 10^{-7}$
$4.29 \cdot 10^{-7}$
$4.339 \cdot 10^{-7}$

$$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Número del Grachof

$$\text{Gr}_n := \frac{g \cdot \beta (\theta_n - \theta_{\text{agua}_n}) \cdot D^3}{(v_n)^2}$$

$$\text{Gr}_n =$$

$1.974 \cdot 10^{13}$
$1.607 \cdot 10^{13}$
$1.465 \cdot 10^{13}$
$9.206 \cdot 10^{12}$
$5 \cdot 10^{12}$

Número de Ranquini

$$\text{R}_{\text{AD}_n} := \text{Pr}_n \cdot \text{Gr}_n$$

$$\text{R}_{\text{AD}_n} =$$

$4.994 \cdot 10^{13}$
$4.065 \cdot 10^{13}$
$3.707 \cdot 10^{13}$
$2.329 \cdot 10^{13}$
$1.265 \cdot 10^{13}$

$$b := \frac{1}{4} \quad z := 0.17$$

Número del Nussel

$$Nu_n := z \cdot (RAD_n)^b$$

$$Nu_n =$$

451.93
429.262
419.48
373.465
320.607

Coefficiente de convección del agua

$$h_{agua_n} := \frac{K_{agua_n} \cdot Nu_n}{D}$$

$$h_{agua_n} =$$

99.664
94.665
92.508
82.36
70.703

$$\frac{W}{m^2 \cdot K}$$
Analisis de los números adimensionales para el modelo a escala piloto

$$n := 0, 1 \dots 4$$

Diámetro del cilindro

$$D := 0.30 \cdot m$$

Coefficiente de dilatación del agua

$$\beta := 697 \times 10^{-3} K^{-1}$$

Temperatura de la pared

$$\theta_n :=$$

359.15K
355.15K
350.15·K
345.15K
340.15K

Temperatura del agua

$$\theta_{fagua_n} :=$$

343.15K
342.15K
341.15K
340.15K
339.15K

Densidad del agua

$$\rho_{agua_n} :=$$

$976 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$
$975 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$
$973 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$
$972 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$
$971 \cdot kg \cdot (m^3)^{-1}$

Coefficiente dinámico de viscosidad

$$\mu_n :=$$

$4.012 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$
$4.015 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$
$4.02 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$
$4.021 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$
$4.025 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$

Número de Prandtl

$$Pr_n :=$$

2.53
2.53
2.53
2.53

Conductividad térmica del agua

$$K_{agua_n} :=$$

$0.666 W \cdot (m \cdot K)^{-1}$

Viscosidad cinemática

$$v_n := \frac{\mu_n}{\rho_{agua_n}}$$

$$v_n = \begin{array}{|c|} \hline 4.111 \cdot 10^{-7} \\ \hline 4.118 \cdot 10^{-7} \\ \hline 4.132 \cdot 10^{-7} \\ \hline 4.137 \cdot 10^{-7} \\ \hline 4.145 \cdot 10^{-7} \\ \hline \end{array} \frac{m^2}{s}$$

$$b := \frac{1}{4} \quad z := 0.17$$

Número del Grachof

$$Gr_n := \frac{g \cdot \beta (\theta_n - \theta_{fagua_n}) \cdot D^3}{(v_n)^2}$$

$$Gr_n = \begin{array}{|c|} \hline 1.747 \cdot 10^{13} \\ \hline 1.415 \cdot 10^{13} \\ \hline 9.73 \cdot 10^{12} \\ \hline 5.392 \cdot 10^{12} \\ \hline 1.074 \cdot 10^{12} \\ \hline \end{array}$$

Número de Ranquini

$$RAD_n := Pr_n \cdot Gr_n$$

$$RAD_n = \begin{array}{|c|} \hline 4.421 \cdot 10^{13} \\ \hline 3.579 \cdot 10^{13} \\ \hline 2.462 \cdot 10^{13} \\ \hline 1.364 \cdot 10^{13} \\ \hline 2.717 \cdot 10^{12} \\ \hline \end{array}$$

Número del Nussel

$$Nu_n := z \cdot (RAD_n)^b$$

$$Nu_n = \begin{array}{|c|} \hline 438.362 \\ \hline 415.818 \\ \hline 378.671 \\ \hline 326.713 \\ \hline 218.265 \\ \hline \end{array}$$

Coefficiente de convección del agua

$$h_{agua_n} := \frac{K_{agua_n} \cdot Nu_n}{D}$$

$$h_{agua_n} = \begin{array}{|c|} \hline 973.163 \\ \hline 923.117 \\ \hline 840.65 \\ \hline 725.304 \\ \hline 484.549 \\ \hline \end{array} \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

