



Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Propuesta de rediseño del enfriador rotatorio a escala piloto del Centro de Investigaciones del Níquel CEDINIQ Moa.

Autor: Ángel Mario Leyva Cuenca

Tutores:

Ms. C. Geovany Ruiz Martínez

Ing. Carlos Zalazar Oliva

Ing. Ángel Legrá Legrá

“Año 54 de la Revolución”
Moa 2012



Declaración de autoridad

Yo: Ángel Mario Leyva Cuenca

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: Ángel Mario Leyva Cuenca

Tutor: Ing. Carlos Zalazar Oliva

Firma: _____

Firma: _____

MS.c: Geovany Ruiz Martínez

Ing: Ángel Legra Legra

Firma _____

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 Ing. Carlos Zalazar Oliva, 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 inicie mi trabajo de diploma; al MSc. Geovany Ruiz Martínez por sus incontables ayudas en la realización de este trabajo, sus constantes muestras de afecto y cariño; al Ing. Ángel Legra Legra por su ayudas incondicional en cuanto a la realización de este trabajo.

A mis Padres, Mario y Irma, también a mis hijos Anyelin, Angel Yoni, Angel Yuni y a mi esposa Dayami por su apoyo incondicional, a mis hermanos: Angel Yorgi y Blanca Margelis

A mis amigos: Felipe, Odalis, Rolando, Ibrain, Alexis Arguelles, Jesús Lobaina, Héctor Anache, por la incondicional amistad, el apoyo que siempre me han brindado y por el aliento que siempre me han dado en los momentos más difíciles de la vida, a mis compañeros de estudio Eduardo, Alcides, Alfredo, Niovis, Ariel y muchos mas que contribuyeron de una forma u otra a que este momento se hiciera realidad mediante su consulta en momentos de duda relacionadas con determinados contenidos de la carrera, al resto de mi familiares.

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: Mario, Irma, a mi esposa Dayami y a mis Hijos Anyelín, Angel Yoni, Ángel Yuni y Omar 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 orgullosos de su hijo, esposo y padre.

A mi hermanos Ángel Yorgi y Blanca Margelis para que le sirva de ejemplo y que continúen esforzándose y logren todos sus sueños.

A mis tíos, Yoni, Yuni, Manuel, Evis, Miguel, por su constante preocupación por mis estudios y su consideración.

A mis cuñadas Martha, Miladis y mi sobrinos Yaneysi y Yorgi Gilberto.

A mis primos: Ervito, Erlis, Edurman, Ismanuel, Islaidis, Misael, Reydel, Miguel Ángel, Luis Manuel y muchos otros que no pongo sus nombres pero que también son merecedores de esta dedicatoria por su ayuda y el apoyo que siempre me han brindado.

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

A mis tutores: MS.c Geovany Ruiz Martínez, Ing. Carlos Zalazar Oliva, Ing: Angel Legra Legra por su ayuda y cooperación en el desarrollo de esta tesis.

A mis compañeros de estudios; Alfredo, Ibrain, Ariel, Eduardo, Oclides, Alcides, Nioelvis, Alexis Ducas, por su amistad y su ayuda durante 6 años que hemos pasado juntos a los cuales también les deseo éxito.

A todos les dedico este éxito.

El autor.





Resumen

En el presente trabajo se propone un nuevo diseño para el enfriador de mineral a escala Piloto del Centro de Investigaciones del Níquel CEDINIQ Moa. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica relacionada con la temática del escalado de procesos y equipos de intercambio de calor donde se encontraron algunas bibliografías de gran utilidad para la realización de la investigación, de ella se puede enunciar a Chag (2000) el cual expone los criterios que se deben de tener en cuenta para el proceso de escalado.

También se identificaron las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral, como la temperatura de entrada y salida del mineral, temperatura del agua, flujo de mineral y la velocidad de rotación, con el objetivo de establecer un procedimiento de cálculo para la evaluación térmica de dichas variables que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral en el cilindro horizontal rotatorio.

Se realizó un análisis técnico - económico de los resultados arrojados por el procedimiento de cálculo expuesto en el capítulo 2 y las afectaciones medioambientales provocadas por la instalación.



Abstract

In this paper we propose a new design for the cooling of ore at Pilot Research Center CEDINIQ Moa Nickel. To do a literature search was performed regarding the topic of scaling processes and heat exchange equipment where they found some very useful bibliographies for conducting research; it may be stated to Chag (2000) which exposes the criteria that must be taken into account for the escalation process.

Also been identified the main variables involved in the cooling process of the mineral, such as inlet and outlet temperature of the mineral, water temperature, flow of ore and rotation speed, with the aim of establishing a calculation procedure for thermal evaluation of those variables involved in the process of cooling the mineral in the rotating horizontal cylinder.

We performed a technical - economical analysis of the results obtained by the method of calculation described in Chapter 2 and the damages caused by the installation environment.



INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TEORICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.	5
1.1- Introducción	5
1.2- - Trabajos precedentes	5
1.3- Descripción del proceso tecnológico	10
1.4- Descripción de la instalación	14
1.5- Análisis térmico del proceso de enfriamiento del mineral reducido	16
1.6- Proceso de escalado	19
1.6-1. Objetivos del escalado	21
1.6-2. Criterios y teoremas de la semejanza	22
1.6-3. Teoremas de la semejanza	23
1.7- - Conclusiones del Capítulo I	24
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1- Introducción	25
2.2- Fundamentos teóricos para el escalado del enfriador	26
2.3- Aplicaciones de la teoría de los momentos al cálculo de la potencia	26
2.4- Cálculo de las constantes de semejanza	30
2.4-1. Semejanza de los procesos de intercambio de calor por convección	31
2.4-2. Condiciones de semejanza en el intercambio de calor durante el movimiento forzado del agente portador de calor.	32
2.4-3. Condiciones de semejanza de los procesos de intercambio de calor durante la convección libre	33
2.5- Definición del modelo teórico para el proceso de enfriamiento	35
2.6- Conclusiones del Capítulo II	44
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	45
3.1- Introducción	45
3.2- Semejanza Geométrica	45
3.3- Condiciones de semejanza en el intercambio de calor	47
3.4- Valoración económica	49
3.5- Valoración del impacto ambiental	51
3.6- Conclusiones del Capítulo III	52



CONCLUSIONES	53
Recomendaciones.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	55



INTRODUCCIÓN

El Níquel es una de las esferas de la economía en Cuba que más divisas aporta a nuestro país, es por ello que muchos de los trabajos investigativos y científicos están dirigido a los procesos que intervienen en la obtención de este mineral.

En la zona del noreste oriental, en específico en la Provincia de Holguín se encuentran las mayores reservas de Níquel, en la cual se encuentran tres industrias vinculadas al proceso de extracción del mineral de su estado natural; la empresa “Moa níquel SA” se encarga de realizar el proceso mediante la lixiviación ácida, y las otras dos empresas con características similares la “René Ramos Latour” de Nicaro y la “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa realizan el proceso mediante la lixiviación carbonato - amoniacal o proceso CARON. Esta última se ha desarrollado fundamentalmente a partir de la década pasada, lo cual se refleja en los índices de producción logrados en ella, dando valiosos aportes al sustento de la economía nacional.

Para el estudio de los procesos de obtención del Níquel, en el municipio se han creados centros de estudios que permiten evaluar los procesos 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.

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

El proceso de obtención del Níquel en las industrias basado en la tecnología carbonato amoniacal como La empresa Comandante Ernesto Che Guevara, inicia en la mina donde el mineral es extraído y llevado a la planta de preparación de mineral donde es transportado sobre bandas transportadoras hasta secadero donde es secado y trasladado hacia los molinos donde es triturado. Luego de molerlo es llevado hacia los silos que alimentan a los hornos de reducción a través del



trasporte neumático, después de que el mineral es reducido el mismo es enfriado primero pasando por los transportadores yacoby hasta los enfriadores rotatorios de cilindros horizontales, posteriormente este mineral es depositado en los tanques de contacto allí se le adiciona la solución carbonato – amoniacal pasando a la planta de lixiviación y lavado, en esta planta el níquel de estado sólido pasa a estado líquido, a través de un proceso de lixiviación. El producto que se genera en esta planta, pasa al proceso de recuperación del amoniaco y al enriquecimiento del carbonato de níquel, que finalmente se calcina y se obtiene como producto final el Sinter de Níquel.

Dentro de los procesos de obtención del níquel una de las etapas de gran importancia es el proceso de reducción de mineral, este se realiza haciendo pasar el mineral por altas temperaturas en un horno es por ello que la planta de horno es de granan valor y objetivo de estudios de muchos investigadores, dicha planta presenta las siguientes deficiencias.

1. Inestabilidad en la presión del horno.
2. Inestabilidad en el régimen térmico del horno.
3. Sobre reducción del mineral por alta temperatura.
4. Tupición en la descarga de H-16.

Insuficiencias en el Enfriador:

5. Carros del enfriador pegados.
6. Tupición en la alimentación y descarga del enfriador.
7. Inestabilidad en el suministro de agua de enfriamiento.
8. Descarga del mineral en avalancha.
9. Temperatura del mineral de descarga del enfriador inferior a las concebidas por diseño.
10. Los procedimientos de cálculo existentes para la evaluación térmica del enfriador no reflejan la situación real del proceso.



11. Las limitaciones de los métodos existentes para la selección y cálculos de los parámetros racionales del proceso.
12. La imposibilidad de realizar mediciones de las variables, que limita la capacidad de emitir criterios certeros sobre su funcionamiento.

Fundamento de la investigación

Con el objetivo de mejorar este proceso Góngora (2009) creó un modelo matemático que describe el proceso de enfriamiento para su mejor estudio y toma de decisiones en la planta, además en el 2010 en el ISMM 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.

El enfriador de mineral que se encuentra ubicado en las instalaciones de la Planta Piloto del Centro de Investigaciones del Níquel en Moa se encuentra sobrediseñado con relación al Enfriador a escala Industrial y para ello es necesario llevar a escala, cumpliendo con los criterios de semejanza, geométrica, dinámica, cinética y térmica los parámetros de operación del mismo. Para garantizar el cumplimiento de esos criterios es necesario tener en cuenta la **situación problemática** que se manifiesta en la instalación:

Variabilidad en los parámetros de funcionamientos del enfriador a escala piloto, lo cual incurre en que tenga un flujo de mineral discontinuo y que el tiempo de retención del mineral sea elevado dando resultados inexactos en la investigación

Teniendo en cuenta la situación problemática planteada se define como **problema** a resolver: La no correspondencia entre la capacidad que posee el enfriador existente en la Planta Piloto del Centro de Investigaciones del Níquel en Moa con respecto al flujo de mineral que se le es suministrado.

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

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**: Con el rediseño del enfriador de mineral a escala piloto del CEDINIQ, teniendo en cuenta las leyes y teoremas para el escalado permitiría la mayor correspondencia de la



capacidad que posee el enfriador existente respecto al mineral que le es suministrado.

Como **objeto de estudio** de la investigación se plantea: La propuesta de rediseño del enfriador cilíndrico rotatorio del CEDINIQ, teniendo en cuenta las leyes y teoremas del escalado.

El objetivo del trabajo Garantizar la explotación del enfriador escala piloto, cumpliendo a su vez con los criterios de semejanza dinámica térmica y geométrica. Está basado en lograr un enfriador que contribuya al ahorro de los portadores energéticos

Objetivos específicos:

1. Identificar las principales deficiencias que presenta el objeto de estudio y posibles soluciones.
2. Establecer los criterios de semejanza geométricos, dinámicos y térmicos que garanticen la similitud del proceso de enfriamiento.

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

1. Realización de una búsqueda bibliográfica sobre la temática en estudio que permita el establecimiento de su estado actual.
2. Identificación de las variables que caracterizan el proceso, los instrumentos y puntos para su medición.
3. Establecimiento del procedimiento de cálculo para la evaluación térmica de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral en el (CEDINIQ).
4. Análisis técnico - económico del proceso y las afectaciones medioambientales asociadas al mismo.



CAPÍTULO I. MARCO TEORICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1- Introducción

Para el desarrollo de cualquier investigación científica es necesario tener en cuenta algunos trabajos, publicaciones realizadas por otros investigadores del tema tratado o similar para una mejor comprensión. 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 tienen en cuenta el proceso de enfriamiento de mineral el cual es muy importante dentro del proceso de obtención del Níquel y en particular los enfriadores de mineral, de lo que depende en gran medida la realización racional del proceso de Lixiviación y Lavado, en tal sentido el **objetivo del capítulo** es:

Establecer los fundamentos teóricos del proceso de enfriamiento del mineral mediante el análisis integral del mismo.

1.2- Trabajos precedentes

En el desarrollo de la investigación se estudiaron diferentes trabajos y estudios, dirigidos hacia dos líneas fundamentales:

La información relacionada con el enfoque teórico-metodológico en los procesos de transferencia de calor y los trabajos relacionados con el tema de la modelación y simulación de procesos térmicos y de flujo desde el punto de vista científico, técnico y práctico que se han efectuado en los últimos años.

Resulta muy útil la revisión de los trabajos de Mesarovich (1996) que aborda la temática relacionada con la teoría general de los sistemas y la metodología de las investigaciones sistémicas. Hurtado (1999) y Guzmán (2001) conceptualizan con claridad los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador su empleo para sustentar teóricamente la investigación. A pesar de que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia se mantiene vigente.



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

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

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

Sverdlik y Gregoreu (1979), establecieron las peculiaridades del paso del movimiento de materiales en un tambor rotatorio.

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

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

Kahkhar y otros colaboradores (1997) dedican la atención a la segregación radial de mezclas granulares en cilindros rotatorios y analizan la formación de costras debido a la densidad del material. El régimen de flujo considerado es en cascada o el régimen de flujo continuo donde una capa delgada de sólido fluye a lo largo de una pequeña



superficie, mientras las restantes partículas rotan como un lecho compacto a lo largo del cilindro. La esencia de la formación de la costra segregada central consiste en el flujo, el mezclado y la segregación en la capa en cascada. Este trabajo incluye los resultados experimentales y su análisis, con la propuesta de un modelo constitutivo para el flujo de segregación en las capas en cascada, el cual es validado para la dinámica de las partículas y con la simulación de Monte Carlo para el flujo estacionario en un plano inclinado hacia abajo. El modelo contiene un único parámetro, la velocidad de segregación adimensional (Beta), que es tratado como un parámetro de ajuste. Se muestran los resultados experimentales para la segregación equilibrada de bolas de acero y de vidrio para diferentes fracciones y grados de llenado, existiendo una gran coincidencia entre las predicciones teóricas y los experimentos cuando el valor de la velocidad de segregación adimensional es igual a dos.

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

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

En general la literatura recoge pocos intentos de estudios experimentales de los cilindros rotatorios al parecer por la dificultad de realizar mediciones en dicho agregado, particularmente en condiciones industriales. Las más relevantes de estas han involucrado a hornos tubulares rotatorios de amplia escala, pero debido a lo mencionado anteriormente carecen de una data de flujo de calor preciso y adecuado. El descubrimiento más significativo en este sentido es la importancia del mezclado del sólido para la transferencia total de calor a la capa, obtenido por Foliot (1955),



quien realizó mediciones del flujo de calor en un horno experimental de cemento de $2,75 \times 24m$ y fue uno de los primeros en enfatizar este hecho. Él estableció que el flujo de calor hacia la capa puede ser visto como un proceso en dos etapas que incluyen la transferencia de calor a una fina capa hacia el interior del mismo.

González *et al.*, (1998), de la Universidad de Oriente propone la instalación de numerosas cadenas en la zona caliente y la garantía de que manipulando 45 t/h reducidas se obtendrá una descarga inferior a los $200^{\circ}C$.

Tunra (1998), encargada a la investigación de las propiedades del mineral concluyó que la conductividad térmica del mineral es deficiente y se reduce con la disminución de la temperatura, de modo que solamente el mineral más próximo al shell es enfriado. Sus recomendaciones son encaminadas a incrementar el área efectiva de los enfriadores o asegurar un buen mezclado de mineral en su interior para obtener $150^{\circ}C$ a 38 t/h reducidas.

Dorokhov y Kileeva (2001), presentan los resultados de un análisis de datos experimentales en el intercambio de calor en los cilindros horizontales girando en un flujo de gas-líquido. Los parámetros hidrodinámicos de una película delgada en una cama centrífuga burbujeante, ha sido determinada basado en el modelo matemático de un flujo pelicular en el caso de una alta-velocidad del flujo de gas-líquido sobre él. Los resultados de la generalización de los datos en el intercambio de calor son dados y el criterio de estabilidad hidrodinámico se evalúa para el flujo cinematográfico en la superficie del cilindro.

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 despreciar 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.

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

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

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

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.

También resulta muy interesante la bibliografía consultada de Kpatrick en la cual quedaron establecidas tutoriales para el análisis térmicos con el empleo del método de elementos finitos en dos y en tres dimensiones.

De todo lo expresado 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, lo cual representará una incursión novedosa en este campo para las industrias cubanas del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

1.3- Descripción del proceso tecnológico

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

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

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

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

Las cuales se representan en la siguiente figura

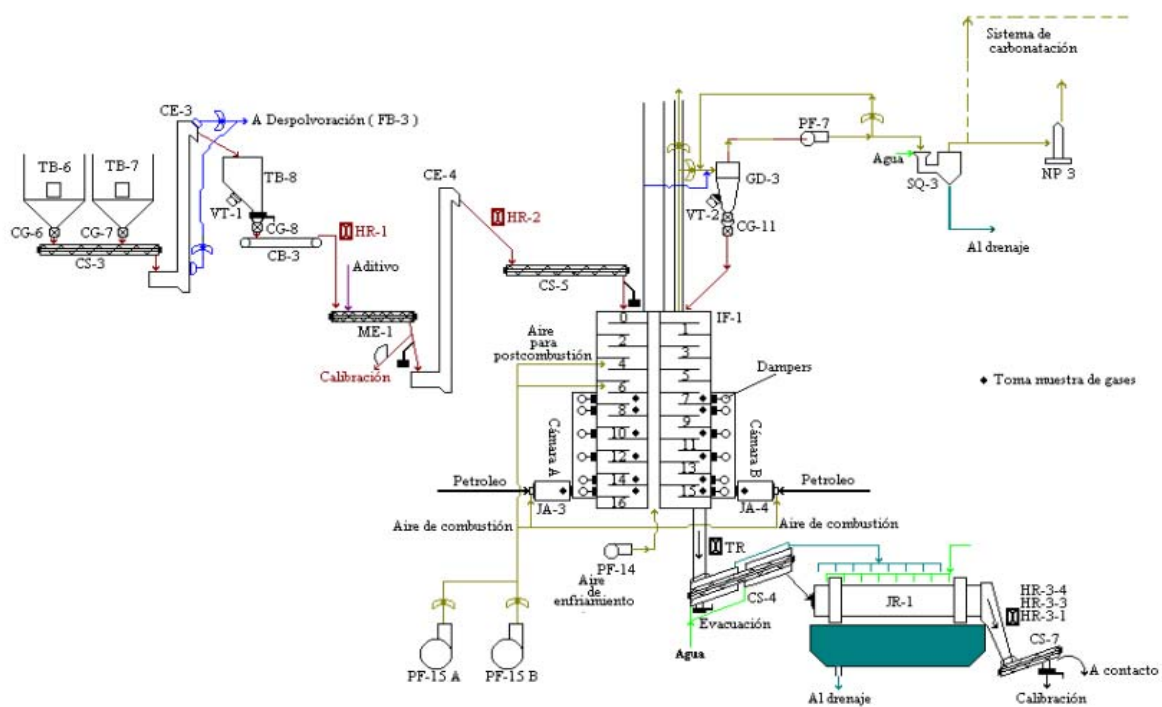


Figura 1.1. Esquema del flujo tecnológico de la planta Hornos de Reducción del CEDINIQ.

Fuente: Manual de operaciones de la planta piloto del CEDINIQ (2011)

A pesar de la planta haber sido diseñada para esas 5 áreas solo cuenta con los 4 primeros

Como resultado de las operaciones que se llevan a cabo, el mineral se transforma obteniéndose un producto de níquel y cobalto, separado del resto de los elementos que conforman el mineral.

Según el manual de operaciones Elaborado por Angel Legrá Legrá (2011) la planta



piloto consta de las siguientes operaciones:

1. Almacenaje del mineral húmedo,
2. Secado y molienda
3. Horno
4. Lixiviación y lavado

Almacenaje del mineral húmedo

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

Luego se traslada a una plazoleta techada para su alimentación al proceso. Utilizando un cargador frontal, la mezcla se deposita en el tolve CF-1 donde se produce un cribado preliminar, se separan del proceso las porciones mayores de 300 mm como rechazo o son reducidas manualmente e incorporadas al mismo.

Secado y molienda

Una vez homogeneizado, el mineral es enviado al proceso de secado mediante el transportador de banda CB-1, reduciéndose en éste la humedad hasta el valor apropiado y enviándose luego a la sección de molienda mediante transportadores de bandas.

El mineral seco es clasificado en la zaranda vibratoria en dos fracciones granulométricas. La más gruesa se reduce y luego se alimenta al molino y la fina va directo a él. El producto seco y fino proveniente del área de molienda se almacena en los silos mediante el elevador de Cangilones CE-2, conjuntamente con el polvo recuperado en el área de secado.

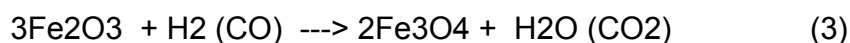
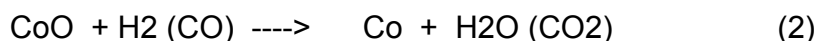
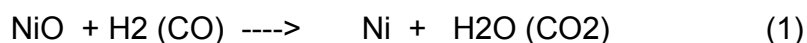
Horno de reducción

El mineral almacenado en los silos es descargado por las Válvulas Rotatorias (CG – 6 ó 7 cap. 1,5 t/h) al Sinfín (CS – 3, cap. 1.45 ton/h), que lo descarga en la tolva (TB – 8, cap. volum. 3 ton). Por medio del sinfín (CS – 8, cap. 1,5 ton/h, regulable) el



mineral se descarga a la Banda transportadora (CB – 3, cap. 1,5 ton/h), donde se contabiliza a través del pesaje y se dosifica hacia la Mezcladora (ME – 1, cap. 1.5 ton/h) para la adición de cualquier tipo de aditivo, (en la prueba que se han realizado se ha utilizado como aditivo el petróleo regular), de la mezcladora cae al Elevador de Cangilones (CE – 4, cap. 1.5 ton/h) de donde pasa al Sinfín Alimentador (CS – 5, cap. 1.5 ton/h) el cual alimenta al hogar cero del Horno de hogares múltiples (IF – 1, cap. 1.5 ton/h).

En los tres primeros hogares ocurre la eliminación de la humedad que trae el mineral; en los siguientes hogares, hasta H-16, transcurre el proceso de eliminación del agua enlazada a la estructura cristalina del mineral y la reducción selectiva del Ni y el Co presentes en el mineral y una pequeña parte del Fe, según las reacciones siguientes:



La reacción de reducción en el horno ocurre con la ayuda del petróleo aditivo y producto de la combustión incompleta del petróleo en los quemadores.

Los gases con polvo, que contienen también producto de la combustión y de reducción, son extraídos por el Ventilador Centrifugo (PF- 7, cap. 3682 m³/h) que los conduce hasta el ciclón (GD-2, cap. 0,2 t/h) donde se recupera el 75 % de polvo. Siendo descargados nuevamente al horno a través de doble Válvula Rotatoria (CG- 11, cap. 0.2 ton/h) El resto pasa por el vénturi scrubber (SQ-3, cap. 1150 m³/h) yendo al drenaje y los gases hasta la chimenea para salir a la atmósfera.

El mineral, con ayuda de los dientes colocados de forma inclinada sobre los brazos, es barrido hacia el centro del horno en los hogares impares o hacia la periferia en los pares. En los hogares desde el 1 hasta el 12, uno de los 4 brazos tiene sus dientes

con inclinación inversa para aumentar el tiempo de retención y lograr una mejor mezcla del mineral.

Una vez que llega el mineral a H-16, es descargado al transportador sinfín (CS-4, cap. 1.3 ton/h) que lo conduce hacia el Enfriador Rotatorio (JR-1, cap. 1.3 ton/h) estos se encargan de reducir la temperatura del mineral hasta 100 o 120 °C, y de ahí, al sinfín (CS-7, cap. 1.3 ton/h) y éste al Tanque de Contacto (TT-1, cap. volum. 0.2 m³) el cual tiene un Mecanismo Agitador (MG-1) para el mezclado del mineral con el licor procedente de las dos primeras etapas de lixiviación.

1.4- Descripción de la instalación

El enfriador de mineral rotatorio de (Cooler 210-SJR-1, en la Figura 1.2 JR-1) tiene como función de enfriar el mineral reducido que sale del horno hasta una temperatura por debajo de 240 a 208 °C para luego enviarlo al proceso de Lixiviación. El enfriador consiste en un cilindro rotatorio dividido en tres secciones en el que el mineral al caer se transporta por las secciones con la ayuda de carros que se encuentran en su interior. Cada sección del enfriador posee un separador circular en todo el diámetro del equipo, que posibilita el tiempo de retención necesario para que el mineral se enfríe adecuadamente. El enfriamiento se produce por el intercambio de calor que se genera al caer el agua en forma de ducha sobre la superficie del enfriador.

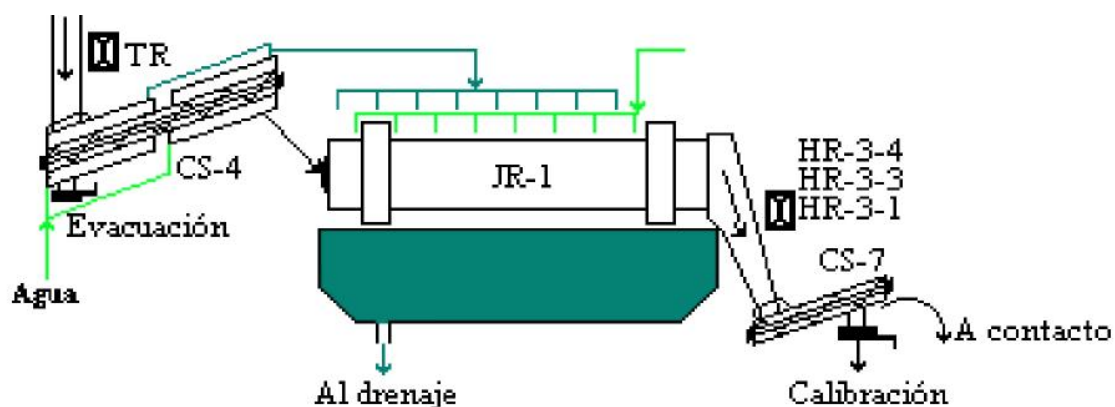


Figura 1.2. Esquema del conjunto transportador-enfriador empleado en el CEDINIQ.

Fuente: Manual de operaciones de la planta piloto del CEDINIQ, 2011.



Para lograr un enfriamiento adecuado del mineral en el interior del cilindro existe una estructura donde cuelgan los rastrillos pendulares que transportan el mineral que se va enfriando, el rastrillo una vez que sigue el movimiento del tambor y alcanza una determinada altura, por su propio peso cae y revuelve la masa caliente a través de superposición de capas, empujando la capa caliente adyacente al cuerpo y transportando la capa fría.

1.2- Condiciones de diseño del proceso

Según el Manual de operaciones de la planta piloto del CEDINIQ (2011) el enfriador de mineral fue diseñado para trabajar con los siguientes parámetros de operación.

Parámetros de trabajo del enfriador	Valores Nominales
Temperatura del mineral a la entrada	600 - 720 °C
Temperatura del mineral a la salida	90 - 120 °C
Presión de trabajo	0,01 - 0,02 kPa
Diámetro exterior	750 mm
Espesor de pared	6 mm
Accionamiento	Motor - Piñón - Catalina
Flujo mineral (Diseño)	1,5 t/h
Flujo mineral (Trabajo)	0,8 t/h
Dimensiones D x L	680 mm D x 6600 mmL (610 mm zona descarga)
Flujo de agua de enfriamiento	3.8 - 7 m ³ /h



El material enfriado es un mineral que contiene una granulometría de 200 mesh (0.074 mm) que pasa al tambor a través de un muñón de tope del enfriador y se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que es bañado por el agua de la ducha.

El mineral que sale del enfriador cae a una de las canales de lixiviación por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal formando una pulpa que va a los tanques de contacto los cuales tienen una capacidad de 0,06 m³. Esta pulpa es bombeada a la planta de lixiviación y lavado.

1.5- Análisis térmico 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 anexos 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 tres a cinco aproximadamente según cálculos de Correa (2000) y lo observado por el personal de mantenimiento de la planta al ser detenido el equipo para su reparación. Este estancamiento de mineral en la parte central de su masa se debe a la existencia de una zona muerta o vana, esta zona provoca una alta resistencia a la transferencia de calor por conducción.

Debido a los grandes volúmenes a manejar en la actualidad, es muy poco probable que los dispositivos mecánicos internos puedan mover al mineral debido a su peso, y actuarán como dispositivos estáticos o aproximadamente estáticos. Teóricamente los carros deberían mantenerse a una altura constante en la cual equilibrará su peso con

las fuerzas tendientes a elevarlo, debido a que la masa de mineral no es totalmente homogénea, este en realidad debe oscilar alrededor de la posición de equilibrio. La posición del dispositivo dependerá de su peso, de la distancia al eje del enfriador, de su geometría, de la velocidad del tambor y de los volúmenes de producción.

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

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

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

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

En la superficie no sumergida del tambor el calor se transfiere al medio ambiente por ebullición y evaporación de la película de agua y para este caso teniendo en cuenta que la variación de la temperatura en los extremos de la superficie de ebullición es

de aproximadamente 1°C se puede considerar con bastante aproximación que la evaporación de la película de agua ocurre a temperatura constante en el sentido radial del cilindro y solo se considera en el sentido longitudinal.

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

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

En la Figura 1.3 se muestra el esquema estructural de la interacción de los parámetros principales del proceso de enfriamiento del mineral reducido.

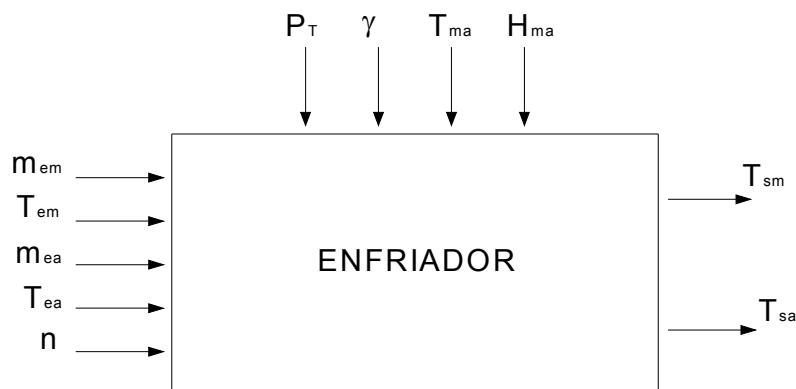


Figura 1.3 Esquema estructural del proceso de enfriamiento del mineral.

Los parámetros de entrada del proceso son:

- ✓ $m_{em} \Rightarrow$ Flujo de mineral a la entrada del enfriador,
- ✓ $T_{em} \Rightarrow$ Temperatura del mineral a la entrada del enfriador,
- ✓ $m_{ea} \Rightarrow$ Flujo de agua de entrada a la piscina,
- ✓ $T_{ea} \Rightarrow$ Temperatura del agua a la entrada de la piscina,



- ✓ $n \Rightarrow$ Número de revoluciones del tambor.

Como parámetros de salida se destacan los siguientes:

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

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

- ✓ $n \Rightarrow$ Número de revoluciones del tambor,
- ✓ $P_T \Rightarrow$ 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- Proceso de escalado

Tradicionalmente las escalas de investigación aceptadas son las de laboratorio, banco, planta piloto (miniplanta o semi – industrial) e industrial. La principal dificultad en un entendimiento global radica en el tamaño o productividad de los equipos a partir del banco. Esto hace que el límite numérico que se establezca más abajo entre las escalas de laboratorio y banco se fundamente en la mayor probabilidad de reproducción de los resultados experimentales a nivel industrial, constituyendo un valor mínimo de seguridad para que la escala de banco cumpla su objetivo con eficacia, y a su vez no quiere decir que esté prohibido experimentar con menores valores en determinados casos y alcanzar los mismos resultados.

En cuanto al término planta piloto, se refiere al concepto de continuidad de trabajo de la instalación (ejemplo, por turno las 24 h del día, 8 fundiciones al día, etc) durante un tiempo determinado. Por tanto, el tamaño o la productividad no tienen definido un



valor, sobre todo en la mini-planta, pero cuantitativamente es baja en relación con la semi-industrial, cuya productividad llamaremos alta.

Los equipos de laboratorio modelados físicamente para producir un semi-producto o producto son difíciles de automatizar integralmente, existiendo un control parcial de los parámetros del proceso en relación con todos los que se controlan en la realidad industrial. Esto obliga a que dicha escala se especialice en estudiar por parte los diferentes fenómenos y variables de un proceso sin la necesidad de hacerlo en un equipo semejante al de la industria, lo que determina la posibilidad de crear modelos transparentes o no, que permitan alcanzar los objetivos de la investigación. La escala de banco es exigente en relación con la semejanza geométrica de los equipos principales y un razonable control de los parámetros principales.

LABORATORIO: Instalaciones de trabajo periódico fundamentalmente con volúmenes útiles menores a: 25 dm^3 de líquido o pulpa y 5 kg de sólido a procesar. Permite libertad creativa en modelos físicos y sustancias modeladoras (patrones).

BANCO: Instalaciones de trabajo periódico fundamentalmente con volúmenes útiles mayores o iguales a: 25 dm^3 de líquido o pulpa y 5 kg de sólido a procesar, fundamentado, entre otros por Dobrojtov (1979), Beloglazov (1985 y 1988). En la mayoría de los casos se exige la semejanza geométrica de los equipos principales en relación con el de la industria y un buen control de los parámetros de operación.

La escala de Planta Piloto es dónde se acoplan por primera vez los Procesos Unitarios para trabajar en sistema. Las variantes de tamaño son la miniplanta y la semi-industrial.

MINIPLANTA: Instalaciones de trabajo continuo o periódico con bajas productividades de materiales a procesar, las que se manipulan sin ayuda de equipos especializados. Posee un alto nivel de control y automatización e informatización en línea.

SEMI-INDUSTRIAL: Instalaciones de trabajo continuo o periódico con altas productividades por materiales a procesar, las cuales solo pueden manipularse con equipos especializados (grúas, camiones, transportadores, etc). Posee un alto nivel



de control y automatización e informatización en línea, contando con las facilidades de los servicios de abastecimiento de reactivos y energía propias o externas.

INDUSTRIAL: Instalaciones de trabajo continuo o periódico con capacidad de producción comercial, las cuales se evalúan durante un período determinado en una unidad demostrativa de producción relativa al tipo de proceso con todos los servicios de abastecimiento de energía, reactivos e insumos materiales.

SISTEMAS MATERIALES

En toda investigación es necesario elegir correctamente los materiales y reactivos, además de la fuente de energía que participará en la misma para cumplir sus objetivos.

Para las escalas: industrial y planta piloto es obligatorio el uso del sistema material real y adicionalmente se pueden usar sustancias trazadoras, catalizadoras, y otras, como parte de las pruebas experimentales, pero sin afectar la calidad del producto final.

Para el resto de las escalas, los sistemas materiales se seleccionan en dependencia de los objetivos específicos de la investigación, los que pueden ser;

SISTEMAS PUROS formados por reactivos químicamente puros en aire o agua.

SISTEMAS DE BASE PURA MEZCLADAS CON OTROS que no son químicamente puros para el análisis. Por ejemplo, polvo de metal, ácido sulfúrico y carbón activado.

MATERIA PRIMA a procesar industrialmente mezclada con reactivos de base pura alterada con otras sustancias.

1.6-1. Objetivos del escalado

El escalado de procesos o equipos se realiza con el objetivo de 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 semi-producto o producto final comercializable.



Poner en marcha la inversión dentro de un período de tiempo razonable. Los costos de un escalado incorrecto son muy grandes en términos de dilación de la arrancada de la planta.

El secado, por ejemplo, es una de esas operaciones que incluye separación Líquido/Sólido, clasificación, molienda, mezclado, transportación y almacenaje. Según Genskow (1994), cada mes de dilación de la puesta en marcha en una planta de secado promedio ha sido estimado conservadoramente la adición de \$350,000 al costo capital de dicha planta. El tiempo promedio de arrancada es de 9-18 meses, dependiendo sobre cuál de los materiales sean sólidos refinados o sólidos crudos respectivamente. Dicha demora en la puesta en marcha puede también ser muy costosa en términos de la dilación en alcanzar un espacio de mercado, porque esto representa una oportunidad para la competencia.

1.6-2. Criterios y teoremas de la semejanza

Para lograr los objetivos que se persigue con el escalado es necesario tener en cuenta algunas consideraciones, leyes y teoremas, de acuerdo con la Teoría de Semejanza (Diomidovski, (1970); Holland and Chagman, (1972); Dobrojotov, (1978)), la reproducibilidad de los resultados de la investigación se garantiza, respetando las semejanzas siguientes:

a) Semejanza Geométrica del modelo físico respecto al industrial (la proporcionalidad de sus dimensiones lineales, radios de esferas y ángulos de encuentros).

b) La proporcionalidad entre las magnitudes de los parámetros del flujo de materiales como :

1. Semejanza dinámica (entre las fuerzas actuantes);
2. Semejanza cinemática o cinética (de frecuencia de contacto, velocidades de las partículas en el flujo, la transferencia de masa y de calor);
3. Semejanza del consumo energético del sistema material (de Potencia suministrada por unidad de volumen o masa);



4. Semejanza entre los parámetros físicos del sistema material (densidad, viscosidad y temperatura).

Según Chan (2000) 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 cualquiera 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 semejante 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.

1.6-3. Teoremas de la semejanza

Además de los postulados para el escalado es necesario que se cumplan algunos teoremas de las semejanzas los cuales plantean los siguientes



1. El primer teorema establece la relación entre las constantes de semejanza y permite hallar los números de semejanza. En su forma general este teorema se enuncia así: los procesos semejantes tienen igual números de semejanza.
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 semejanza, 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 semejanza, compuesto por las magnitudes que forman parte de las condiciones de univocidad tienen idéntico valor numérico.

1.7- - Conclusiones del Capítulo I

El estudio bibliográfico demostró que hasta la fecha solo se ha realizado el escalado del proceso de enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto y que este no cuenta con los criterios de semejanza geométrica.



CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1- Introducción

En el estado actual de la ciencia y la técnica es muy probable cometer errores de apreciación, ya que para no hacerlo sería necesario alcanzar la idealidad de dar seguimiento visual a los cambios cualitativos y cuantitativos que sufren los componentes materiales identificables continuamente en cada punto del espacio, donde ocurren sus transformaciones físico-químicas, lo que es incosteable en algunos casos, e imposible en otros.

Cuando no es posible visualizar o describir los fenómenos que ocurren en las instalaciones industriales con los materiales reales, entonces no queda otra alternativa que modelarlo físicamente (al equipo y al medio material). Para lograr un acercamiento a lo imposible, se simula lo que se desea ver, pero virtualmente por computación, comprendiendo que es suficiente para alcanzar el fin económico que la realidad actual exige, pero insuficiente para satisfacer la mencionada idealidad que garantizará el aprovechamiento integral y racional de los recursos minerales y otras materias primas con la máxima productividad posible de los equipos de forma sostenida en el tiempo.

Los resultados de las investigaciones se encaminan a la simulación reproducible en la industria, pero solamente la práctica industrial dará el veredicto final sobre cuál resultado de los obtenidos a una escala menor es correcto, y es en este momento que se puede medir la efectividad del proyecto.

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

Establecer el procedimiento de cálculo adecuado para la determinación de los criterios de semejanza para el escalado del enfriador de mineral cilíndrico rotatorio de la planta piloto del "Centro de Investigaciones del Níquel".



2.2- Fundamentos teóricos para el escalado del enfriador

Para construir el modelo bastaría usar los dibujos de la ingeniería de detalles del enfriador, dividiendo por 10 todas sus medidas lineales y conservando los ángulos de inclinación con lo cual se garantiza la semejanza geométrica, conciliada con la representatividad de las muestras del sistema material, no siendo así para garantizar los demás criterios de semejanza.

Para la determinación de la potencia de accionamiento del motor del enfriador se utilizaron ecuaciones de cálculos basadas en la aplicación de la teoría de los momentos, cuyas variables principales son las siguientes:

- ✓ Coeficiente de llenado promedio del enfriador con el mineral,
- ✓ Angulo de elevación del mineral durante el movimiento de rotación del enfriador,
- ✓ Peso volumétrico promedio del mineral reducido dentro del enfriador,
- ✓ Coeficiente fricción de los carros con la pared cilíndrica.

2.3- Aplicaciones de la teoría de los momentos al cálculo de la potencia

Se acepta que el mineral, se desplaza como un método y no desprende partículas desde el área ADBC, Anexo 1, sino que ellas se mueven en trayectoria circular junto con el enfriador y después ruedan lentamente por la capa superior del mineral y que los carros en su movimiento pendular, se elevan en un ángulo suficientemente como para equilibrar las fuerzas de rozamiento y normales Anexo 2.

Durante la rotación, el motor de accionamiento debe vencer la resistencia total producto de la sumatoria de los diferentes momentos, que incluye, la propia resistencia que produce la asimetría de la carga del mineral y de los carros durante el movimiento de rotación (1), y la de fricción en las chumaceras, de manera que el cálculo del consumo de la potencia puede realizarse utilizando la ecuación 2.1.

$$N = \frac{M_T \cdot n}{975 \cdot \eta} \quad (2.1)$$

donde:



N - Consumo de potencia del enfriador, (kW).

M_T - Suma total de los momentos que intervienen en la potencia del motor, (N·m)

n - Revoluciones por minuto del enfriador, (rev/min).

η - Coeficiente de rendimiento de la instalación.

Para calcular la potencia del motor, el momento a que está sometido el enfriador durante la rotación se descompone de la forma siguiente:

$$M_T = M_1 + M_2 + M_3 \quad (2.2)$$

donde:

M_T - Momento total, (N·m).

M_1 - Momento producido por el desplazamiento de los carros, (N·m).

M_2 - Momento producido por el desplazamiento del mineral dentro del enfriador, (N·m).

M_3 - Momento producido por la rotación del enfriador de sus chumaceras, (N·m).

Momento producido por el desplazamiento de los carros, M_1 .

Es una función del número y peso de los carros, del diámetro del enfriador y del coeficiente de fricción que existe combinadamente entre el acero del carro-acero del enfriador. Figura 2. Anexo 2.

El cálculo del momento de los carros se determina a través de la ecuación 2.3.

$$M_1 = P \cdot L_o \quad (2.3)$$

$$L_o = R_c \cdot \text{Sen } \beta \quad (2.4)$$

donde: la masa no produce ningún par, se debe trabajar con el peso

M_1 - momentos de los carros del enfriador, (N·m).

L_o - brazo del momento de los carros, (m).

P - peso de todos los carros, (N).



R_c - radio del centro de gravedad de los carros, (m).

β - ángulo del centro de gravedad de los carros, ($^\circ$).

$$\beta = \arctan \cdot \mu_1 \quad (2.5)$$

donde:

μ_1 - coeficiente de rozamiento entre los carros, el enfriador y el cuerpo cilíndrico.

Momento producido por el desplazamiento del mineral dentro de enfriador M_2 .

Son magnitudes fijas para el enfriador, la longitud y el diámetro, de los cuales depende M_2 .

Son magnitudes variables el coeficiente de llenado del enfriador, el peso volumétrico y el ángulo del talud o elevación del mineral, que fueron estudiadas en el siguiente entorno:

✓ Coeficiente de llenado	0,08 – 0,15
✓ Ángulo de elevación del mineral	8,0 – 25,0
✓ Peso volumétrico	0,5 – 1,0 t/m ³

El cálculo del momento de la masa de mineral se determina por la ecuación 2.6.

$$M_2 = Q_2 \cdot \rho_x \cdot L_2 \quad (2.6)$$

donde:

$$Q_2 = \pi \cdot R^2 \cdot L_2 \cdot \rho_x \cdot x \quad (2.7)$$

donde:

Q_2 - masa del mineral contenido dentro del enfriador, (kg).

L_2 - brazo del momento del mineral, (m).

R - radio interno del enfriador, (m).

x - coeficiente de llenado del enfriador con mineral.

ρ_x - peso volumétrico aparente del mineral, (kg/m³).



donde:

$$L_2 = Y_o \cdot \cos(90 - J) \quad (2.8)$$

$$Y_o = \frac{2 R^3 \cdot \text{Sen}^3(\alpha / 2)}{3 A^o} \quad (2.9)$$

$$A^o = \pi \cdot R^2 \cdot x \quad (2.10)$$

donde:

Y_o - Distancia desde el centro de rotación del cilindro hasta el centro de gravedad del segmento de circunferencia ocupado por el mineral dentro del enfriador,

$J \rightarrow$ ángulo de elevación del mineral, ($^\circ$)

$\alpha \rightarrow$ ángulo que depende del coeficiente de llenado x del enfriador,

$A^o \rightarrow$ área del segmento que ocupa el mineral para el coeficiente de llenado del enfriador figura, (m^2).

Mediante la ecuación 2.10 en 2.9, se obtiene la 2.11.

$$Y_o = \frac{2 \cdot R \cdot \text{sen}^3 \frac{\alpha}{2}}{3 \cdot \pi \cdot x} \quad (2.11)$$

Para un determinado valor del coeficiente de llenado x , se calcula el valor de A^o por la ecuación 2.10, con ese valor se busca en el Perry (1979) en la tabla 3-3^a, página 1.19 el valor del ángulo α correspondiente.

Sustituyendo en la ecuación 2.11, se calcula el valor de Y_o .

Dándole valores a las variables α , x y J en los rangos anteriores expuestos se pueden calcular diferentes M_2 .

Momento producido por la rotación del enfriador en su chumacera M_3

Depende del peso total del enfriador (Mineral+Carros+Cuerpos), del volumen del tambor cilíndrico sumergido en el estanque del coeficiente de fricción en las chumaceras.



El cálculo del momento M_3 producido en los cojinetes por la rotación del enfriador se realiza por la fórmula siguiente:

$$M_3 = Q_t \cdot R_m \cdot \mu_2 \quad (2.12)$$

donde:

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_{enf} \quad (2.13)$$

Q_1 - masa de los carros, (kg).

Q_2 - masa del mineral dentro del enfriador, (kg).

Q_3 - masa del enfriador sin mineral, (kg).

R_m - radio del muñón del enfriador, (m).

μ_2 - coeficiente de rozamiento en las chumaceras.

Q_{enfr} - función de la fuerza de desplazamiento del enfriador sumergido en el agua, (kg).

$$Q_{enf} = A_s \cdot \rho_{H_2O} \cdot L \quad (2.13)$$

donde:

A_s - área del enfriador sumergido en la piscina, (m²).

ρ_{H_2O} - densidad del agua de enfriamiento, (kg/m³).

L - longitud del enfriador, (m).

2.4- Cálculo de las constantes de semejanza

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 cuyas coordenadas satisfacen la siguiente ecuación:

$$\frac{I_1''}{I_1'} \cdot \frac{I_2''}{I_2'} \cdot \frac{I_3''}{I_3'} = C_1 \quad (2.14)$$

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.

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:

$$\varphi'' = C_\varphi \cdot \varphi^1 \quad (2.15)$$

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 frecuente 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.

2.4-1. Semejanza de los procesos de intercambio de calor por convección.

Para que exista semejanza en el proceso que se desea escalar también deben existir semejanzas en los procesos que intervienen en el equipo que se escala, dado a que el objeto de estudio es un enfriador de mineral cilíndrico rotatorio, los procesos que

intervienen de mayor importancia son los de intercambio de calor los cuales se describen en el capítulo anterior.

Dado que los materiales que se utilizaron para la construcción del enfriador de mineral a escala es el mismo que el industrial y el mismo mineral a enfriar solo en este epígrafe se estudia el proceso de escalado en el intercambio de calor en el exterior del enfriador, los procesos que se manifiestan en el exterior están determinado por la convección.

La convección esta determinado por algunas magnitudes como la velocidad del fluido, en dependencia de esta magnitud física la forma de transferencia de la convección puede variar a convección forzada, libre o mixta.

2.4-2. Condiciones de semejanza en el intercambio de calor durante el movimiento forzado del agente portador de calor.

Para que exista semejanza en el proceso de intercambio de calor cuando el movimiento del fluido es forzado, convección forzada, es necesario tener en cuenta:

- ✓ **Primera condición:** Pueden ser semejantes solo 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:

$$R_e = \text{iden}, P_r = \text{iden}$$

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 2.16.

$$R_e = \frac{W_o \cdot l}{\nu} \quad (2.16)$$

donde:

W_o - es la velocidad característica 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, (m^2/s).

El número de Prandtl es la característica termofísica del agente portador de calor. Cuando son iguales los números de $Re = Pr$ aseguran la semejanza térmica. Es decir la similitud de los campos de diferencia 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 2.17.

$$N_u = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (2.17)$$

donde:

α - coeficiente de traspaso de calor, ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

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:

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

2.4-3. 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 2.18.

$$\rho = \rho_{F1} [1 - \beta(t - t_{F1})] \quad (2.18)$$

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 2.19.

$$Gr = g \cdot \beta \cdot \Delta t \frac{L^3}{\nu^2} \quad (2.19)$$

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 cinemático de viscosidad, (m^2/s).

El número de Pr es la característica termo física del agente portador de calor, determinándose por la ecuación 2.20.

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (2.20)$$



El número de Nusselt, se determina a través de la ecuación 2.17, 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.

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

$Nu = f(Re, Gr, Pr)$ esta es la ecuación de semejanza para la emisión calorífica cuando existe movimiento simultaneo 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).

2.5- Definición del modelo teórico para el proceso de enfriamiento

Para garantizar las condiciones de semejanza de los procesos de intercambio de calor se toman las ecuaciones planteadas por Góngora (2004), y las mismas deben cumplir con los criterios de semejanzas planteados en los epígrafes anteriores.

Para calcular el coeficiente superficial de transferencia de calor del sólido a la pared por unidad de longitud del cilindro se emplea la ecuación (2.21) y las ecuaciones (2.22, 2.23) para las respectivas áreas de transferencia de calor según (Columbié, 2001).

$$K_1 = \alpha_{\text{pcs}} \cdot A_{\text{pcs}} + \alpha_{\text{pds}} \cdot A_{\text{pds}} \quad (2.21)$$

donde:

K_1 - Coeficiente superficial de transferencia de calor del sólido a la pared por unidad de longitud, (W/mK).

A_{pcs} - Área de la pared cubierta por el sólido, (m²).

A_{pds} - Área de la pared descubierta por el sólido, (m²).

α_{pcs} - Coeficiente de transferencia de calor del sólido a la pared cubierta por el mineral, (W/m²K).

α_{pds} - Coeficiente de transferencia de calor del sólido a la pared no cubierta por el mineral, (W/m²K).

$$A_{\text{pcs}} = \frac{2\pi D_i \cdot \beta}{360^\circ} \quad (2.22)$$

$$A_{\text{pds}} = \pi \cdot D_i \cdot \left(1 - \frac{2\beta}{360^\circ}\right) \quad (2.23)$$

donde:

D_i - Diámetro interior del enfriador, (m).

Para ello es necesario determinar el ángulo (β), mostrado en la Figura 2.3, según la ecuación (2.24).

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{3\dot{m}}{2 \cdot R_i^2 \cdot \rho \cdot V_m}} \quad (2.24)$$

donde:

ρ - Densidad del mineral, (kg/m³).

V_m - Velocidad del sólido, (m/s).

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

Se considera que toda la materia que entra al sistema es igual a la que sale. Por lo tanto el flujo de mineral dentro del sistema es constante.

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

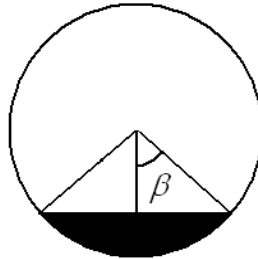


Figura 2.3 Representación del ángulo β , con respecto al diámetro vertical y al área que ocupa el mineral dentro del cilindro.

La velocidad del sólido según expresión desarrollada por Diomidovskiy D.A. en el Instituto de Minas de Leningrado, se calcula a través de la ecuación (2.25), referenciada por (Chang, 1997).

$$V_m = 5,78 D_i \cdot \varphi \cdot n \quad (2.25)$$

donde:

φ - Ángulo de inclinación del cilindro.

n - Velocidad de rotación, (1/s).

Para determinar el área de la sección transversal del sólido según la expresión 2.26, desarrollada por Columbié (2001).

$$A = \frac{2}{3} R_i^2 \cdot \beta^3 \quad (2.26)$$

donde:

R_i - Radio interior del cilindro, (m).

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

El calor del sólido a la pared se transmite por las tres vías, conducción, y radiación del sólido a la pared cubierta y del sólido a la pared descubierta por convección y radiación. Para el primer caso el coeficiente de transferencia de calor α_{pcs} , puede definirse por la ecuación (2.27).

$$\alpha_{pcs} = k\sqrt{C \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot n} + \sigma \cdot \frac{\xi_s \cdot \xi_p}{\frac{1}{\xi_s} + \frac{1}{\xi_p} - 1} \cdot \frac{(\theta^4 - \theta_p^4)}{(\theta - \theta_p)} \quad (2.27)$$

donde:

σ - Constante de Stefan - Boltzman, ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$).

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

λ - Conductividad térmica del mineral, ($\text{W/m}^2\text{K}$).

n - Velocidad de rotación del enfriador, (1/s).

γ - Masa (a granel) del mineral, (kg/m^3).

ξ_p - Emisividad de la pared.

ξ_s - Emisividad del sólido.

θ, θ_p - Temperatura del mineral y de la pared, (K).

C - Calor específico del mineral, (kJ/kgK).

Para el segundo caso el coeficiente de transferencia de calor α_{pds} , puede definirse por la ecuación (2.28)

$$\alpha_{pds} = h_g + \sigma \cdot 10^{-8} \cdot \xi_s \cdot \xi_p \cdot \frac{[\theta^4 - \theta_p^4]}{\theta - \theta_p} \quad (2.28)$$

donde:



h_g - Coeficiente de transferencia de calor por convección del sólido al gas, (W/m²K).
Para el cálculo del coeficiente h_g , se recomienda la ecuación 2.29 para cuando se tiene un tubo circular caracterizado por el flujo de calor uniforme a través de la superficie, laminar y completamente desarrollado, para este caso el número de Nusselt es una constante, independiente del número de Reynolds, de Prandtl y una situación axial según Incropera (2003).

$$N_{uD} = \frac{h_g \cdot D_i}{\lambda_g} = 4,36 \quad (2.29)$$

Donde:

N_{uD} - Número de Nusselt.

λ_g - Conductividad térmica del fluido, (W/mK).

Posteriormente se despeja (h_g) de la ecuación (2.30), el mismo queda expresado de la manera siguiente.

$$h_g = 4,36 \cdot \frac{\lambda_g}{D_i} \quad (2.30)$$

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor K_2 , se tienen en cuenta los modos de transferencia de calor por conducción y convección, resolviéndose a través de la ecuación (2.31).

$$K_2 = \frac{1}{\frac{\ln \frac{R_i}{R_e}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{mat}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot \alpha_{c.agua} \cdot D_e}} \quad (2.31)$$

donde:

$\alpha_{c.agua}$ - Coeficiente de transferencia de calor por convección de la pared sumergida en la piscina al agua, (W/m²K).

K_{mat} - Conductividad térmica del material del enfriador, (W/m K).

R_e - Radio exterior del cilindro, (m).



D_e - Diámetro exterior del enfriador, (m).

K_2 - Coeficiente de transferencia de calor a través de la pared del horno por unidad de longitud al agua de la piscina, (W/mK).

Para la solución de la ecuación (2.31) se debe calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección al agua $\alpha_{c.agua}$, y para ello lo primero que se debe calcular es el número de Reynolds. En este caso considerando que el enfriador se mueve a baja velocidad y que es éste quien le transmite el movimiento al fluido, se asume que la velocidad del fluido es aproximadamente igual a la del enfriador lo cual está en correspondencia con la conclusión más importante referida a la velocidad para la convección en flujo de Couette. (Incropera et al., 2003).

El número de Reynolds (R_{eD}) se obtiene por la expresión (2.32):

$$R_{eD} = \frac{\pi \cdot n \cdot D_e^2}{60 \cdot \nu} = \frac{\pi \cdot n \cdot \rho_{agua} \cdot D_e^2}{60 \cdot \mu} \quad (2.32)$$

donde:

ρ_{agua} - Densidad del fluido, (kg/m³).

ν_{agua} - Velocidad del fluido, (m/s).

μ_{agua} - Coeficiente dinámico de viscosidad, (N s/m²).

ν_{agua} - Coeficiente cinemático de viscosidad, (m²/s).

Esta expresión del Reynolds se combina con la correspondiente al número de Nusselt a través de la ecuación (2.33).

$$N_{uD} = \frac{\alpha_{c.agua} \cdot D_e}{\lambda_{agua}} = C \cdot (R_{eD})^m \cdot (P_r)^{\frac{1}{3}} \quad (2.33)$$

donde:

N_{uD} - Número de Nusselt.

λ_{agua} - Conductividad térmica del fluido, (W/mK).

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



P_r - Número de Prandtl.

Las constantes C y m correspondientes a la ecuación (2.33) se buscan en la Tabla 2.1 en correspondencia con el valor del número de Reynolds calculado utilizando la expresión (2.32).

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

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

Fuente: Incropera *et al.*, 2003.

Posteriormente se despeja ($\alpha_{c.agua}$) de la ecuación (2.33), el mismo queda expresado de la manera siguiente en la ecuación (2.34).

$$\alpha_{c.agua} = \frac{\lambda_{agua} \cdot \left(C \cdot R_{eD}^m \cdot P_r^{\frac{1}{3}} \right)}{D_e} \quad (2.34)$$

El $\alpha_{c.agua}$ obtenido se sustituye en la ecuación (2.31) para calcular el coeficiente de transferencia de calor a través de la pared del cilindro por unidad de longitud al agua de la piscina.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio K_4 , es necesario tener en cuenta la cantidad de calor que se transfiere por evaporación del agua.

Entonces el coeficiente de transferencia de calor a través del agua por unidad de longitud al medio se determina por la ecuación (2.35).



$$K_4 = \alpha_{\text{agua}} \cdot A_{\text{agua}} \quad (2.35)$$

donde:

K_4 - Coeficiente superficial de transferencia de calor del agua al medio por unidad de longitud (W/mK).

La energía exigida para la evaporación proviene de la energía interior del líquido que entonces trae consigo reducciones en la temperatura del mismo.

El flujo de agua que se evapora se determina según la ecuación (2.36).

$$n''_A = h_m (\rho_{A,\text{sat}} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.36)$$

donde:

h_m - Coeficiente de transferencia de masa, (m/s).

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

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

El número de Sherwood es igual al gradiente de concentración adimensional de la superficie, y proporciona una medida de la transferencia de masa por convección de la superficie y se obtiene a través de la ecuación (2.37).

$$Sh = 0.0296 \cdot R_e^{\frac{4}{5}} \cdot S_c^{\frac{1}{3}} \quad (2.37)$$

donde:

S_c - Número de Schmidt.

El número de Reynolds se determina a través de la ecuación (2.38).

$$R_{eD} = \frac{v_{\text{aire}} \cdot D_e}{\nu_{\text{aire}}} \quad (2.38)$$

donde:

ν_{aire} - Velocidad del aire; m/s.



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

Para calcular el número de Schmidt se emplea la ecuación (2.39).

$$S_c = \frac{\nu_{\text{aire}}}{D_{AB}} \quad (2.39)$$

donde:

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

Mediante las ecuaciones (2.38), (2.39) y a través de la ecuación (2.40) se puede determinar el coeficiente de transferencia de masa.

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} \quad (2.40)$$

donde:

D_{AB} - Coeficiente de difusión de masa, (m²/s).

Sh : - número de Sherwood.

El calor transmitido por convección del agua al aire se determina a través del coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire α_{agua} , según la ecuación (2.41).

$$\alpha_{\text{agua}} = \frac{h_{fg} \cdot h_m (\rho_{A,\text{sat}} - \rho_{A,\infty})}{(\theta_{\text{agua}} - \theta_{\text{aire}})} \quad (2.41)$$

α_{agua} - Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio, (W/m²K).



2.6- Conclusiones del Capítulo II

1. Quedó establecido el procedimiento de cálculo que describe con mayor exactitud el objeto de estudio, conformado por un total de 41 ecuaciones.
2. El procedimiento de cálculo propuesto en este capítulo es un acercamiento a las ecuaciones que sirven de base al escalado del proceso de enfriamiento en cilindros horizontales rotatorios.



CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1- Introducción

Para la realización de toda investigación es necesario 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.

El **objetivo** del capítulo es:

Evaluar el comportamiento de los criterios de semejanzas entre el proceso de enfriamiento a escala industrial y de laboratorio.

3.2- Semejanza Geométrica

Una vez establecido el estado del arte acerca de la investigación, y los materiales y métodos empleados para garantizar el cumplimiento del objetivo propuesto, se procedió al estudio de los planos de diseño y montaje del enfriador de mineral a escala industrial. Verificando que la escala de reducción que se establezca no implique que desaparezcan dimensiones de elementos del sistema. Se comprobó que la escala más pequeña que se podría usar es 1:2, ya que la misma garantiza la condición anterior. Manteniendo siempre las dimensiones de los ángulos.

Se decidió fraccionar el cilindro en tres secciones, unidas por bridas, para garantizar el montaje y mantenimiento de los rastrillos, siendo éste el único elemento que difiere desde el punto de vista geométrico de los enfriadores actuales, pero en su diseño original los mismos eran seccionados y unidos por bridas. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros de diseño del enfriador de mineral industrial, piloto y el propuesto



Tabla 3.1: Comparación de los parámetros de diseño del enfriador de mineral industrial, Piloto y propuestos

Comparación de los parámetros de diseños			
Parámetros	Industrial	Piloto	Propuesto
Diámetros exterior	3,072 m	0,60 m	0,30 m
Diámetro interior	2,652 m	0,44 m	0,14 m
Longitud	30 m	6 m	3 m
Masa de los carros	6 kg	6 kg	6 kg

Para el diseño y construcción del equipo es necesaria la selección del material de los demás componentes para la construcción de la instalación a escala piloto.

Tipo de material.

AISI 570

- ✓ Cilindros,
- ✓ Carros raspadores,
- ✓ Tolva de entrada,
- ✓ Mesa, Banco,
- ✓ Sello de empaquetadura,
- ✓ Tapa de entrada y salida,
- ✓ Soporte de los carros Piscina.

AISI 1045

- ✓ Chumaceras

Otro aspecto importante es la selección del motor a instalar ya que el mismo debe garantizar el torque necesario para la rotación del cilindro, para lo cual se tuvo en cuenta lo siguiente:

Peso de los elementos que componen la instalación.

- ✓ Masa de todos los carros 6 kg
- ✓ Masa de mineral dentro del enfriador 105 kg
- ✓ Masa del enfriador sin mineral 100 kg

Propiedades del mineral laterítico

- ✓ Densidad del mineral 330 kg/m³
- ✓ Peso volumétrico aparente del mineral 800 kg/m³.

Con estos elementos y otros que aparecen resumidos en la hoja de cálculo de Mathcad en el Anexo 3 se determinó el momento torsor que debe vencer el motor de 30 N.m para una potencia requerida de 105 W. La figura 3.1 muestra como se distribuyen los momentos que contribuyen al momento total que debe vencer el motor.

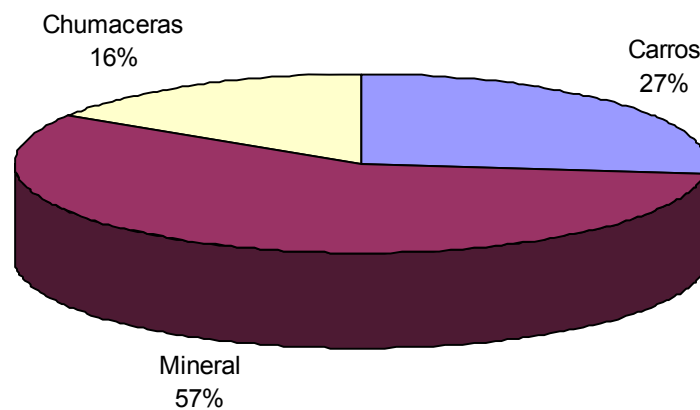


Figura 3.3. Comportamiento de los parámetros geométricos del enfriador.

Para la selección del sistema de transmisión se tuvo en cuenta que fuera un sistema sencillo, de fácil montaje y mantenimiento, por tal motivo se escogió la transmisión por cadena. Para variar la relación de transmisión se utilizaran engranajes con diferentes diámetros.

En los Anexos 5 y 6 aparece información sobre los elementos que componen la instalación y los pasos a seguir para la puesta en marcha y el mantenimiento del equipo.

3.3- Condiciones de semejanza en el intercambio de calor

Luego de haberse cumplido con el criterio de semejanza geométrica y confirmando la condición de que solo pueden ser semejantes los procesos de intercambio de calor que son geoméricamente semejantes, se procede a evaluar el comportamiento de

aquellos números adimensionales, Re , Pr , Nu , por solo resaltar algunos, en el Epígrafe 2.5 aparecen las ecuaciones en las cuales tienen gran influencia los números de semejanza. Además en el Anexo 4 aparecen programadas dichas ecuaciones en una hoja de cálculo del Software Mathcad Profesional.

Con el fin de establecer los parámetros de operación de la instalación a escala de piloto, se asumió que el coeficiente de llenado sería el mismo para ambas instalaciones y de esa manera se pudo determinar la cantidad de mineral que debe haber dentro del cilindro. Luego teniendo en cuenta que el horno de soleras múltiples de la Planta Piloto del CEDINIQ opero con un flujo de mineral de 625 kg/h , se determinó la velocidad del mineral dentro del enfriador, el tiempo de retención y la velocidad de rotación del cilindro para garantizar el correcto funcionamiento de la instalación. La tabla 3.1 muestra los valores obtenidos para el proceso industria y a escala piloto.

Tabla 3.2: parámetros de funcionamiento del enfriador de mineral a escala industrial y piloto.

Parámetros	Industrial	Piloto	U/M
Flujo de mineral	42	0,625	t/h
Velocidad del mineral	0,012	0,019	m/s
Tiempo de retención	40,4	2,6	min
Velocidad de rotación	6,3	99	rev/m

Para establecer la temperatura de entrada del mineral al enfriador se tiene en cuenta que la temperatura a la salida del horno se considera elevada para la instalación de laboratorio. Además como se tiene prevista la instalación del enfriador en Planta Piloto del CEDINIQ, se asume que la temperatura de entrada del mineral al enfriador estará alrededor de los 350 ° C debido a que esa instalaciones cuentan con un transportador de mineral (Yacoby) que da la posibilidad de regular la temperatura del mineral a la entrada del enfriador, esto se hace regulando el flujo de agua que se le suministra para su enfriamiento. Esto posibilita hacer pruebas al enfriador para diferentes temperaturas de entrada y evaluar su comportamiento hasta ajustar los parámetros para su explotación. Para la temperatura de salida para la condiciones de



laboratorio se tomaran alrededor de los 100 °C que es lo que está establecido en el CEDINIQ como temperatura a la que debe llegar el mineral al tanque de contacto.

Con respecto a ese grupo de números de semejanzas se puede destacar que los mismos dependen en gran medida de las dimensiones geométricas del equipo y de los valores de las variables que caracterizan el proceso. Por lo que resulta difícil establecer cuales deben ser los rangos de explotación de la instalación a escala de laboratorio.

Existen parámetros como la velocidad de rotación del cilindro que se incrementa considerablemente teniendo en cuenta que el tiempo de retención del mineral debe ser 5,4 min este valor incrementa en gran medida el valor del coeficiente de transferencia de calor por unidad de longitud K_1 a tal punto que para valores pequeños de temperatura a la entrada, el valor para la escala de laboratorio sigue siendo mucho mayor que para el industrial, con una diferencia de $154 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

De otra manera también influyen en los números de semejanzas la temperatura del agua de la piscina, del mineral a la entrada del enfriador, de la pared del cilindro y el flujo de mineral, las mismas no se pueden establecer en un rango fijo de explotación debido a que ellas en el proceso a escala industrial tienen un comportamiento aleatorio, es decir para iguales condiciones de explotación muestran valores diferentes. Esto se puede apreciar en los trabajos de tesis que se han desarrollado en los últimos años.

No obstante a lo antes expuesto se comprobó que el proceso de enfriamiento de mineral a escala de laboratorio debe trabajar con un volumen de mineral entre 0.017 y 0.032 m^3 que se corresponden con los valores del coeficiente de llenado entre 0.08 y 0.015, según documentación de la planta, estos valores se corresponden con una masa de mineral que oscila entre 56 y 105 kg, para una productividad del equipo entre 10 y 20 kg/min de mineral.

3.4- Valoración económica

Toda investigación debe llevar a 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, garantizando el uso racional de los recursos energéticos.

En este epígrafe se hace una valoración de los costos de la construcción de la instalación a escala de laboratorio.

Tabla 3.3 Costo de materiales.

Materiales.	Precio		Cantidad usada		Total.	
Plancha AC 1.6 mm	27,34	CUC/m	3	m	82,02	CUC
Plancha AC 6.3 mm	148,81	CUC/m	3	m	446,43	CUC
Angular AC 62 mm	8,76	CUC/m	24	m	210,43	CUC
Barra AC 200 mm	1515,72	CUC/m	0,5	m	757,86	CUC
Electrodo 7018	5,91	CUC/kg	4,2	kg	24,822	CUC
Varilla (Argón)	175,83	CUC/kg	0,46	kg	80,88	CUC
Motor eléctrico	282,32	CUC	1		282,32	CUC
					<u>1884,76</u>	CUC

En la tabla 3.3 se muestran los precios de los diferentes insumos propuesto a utilizar en la instalación conjunto con la cantidad utilizada, para un costo total por concepto de materiales de 1884, 76 CUC.

Tabla 3.4 Costo por mano de obra.

Obreros.	Salario (CUP/h)	Horas Trabajadas (h)	Total (CUP)
Pailero	10,27	24	246,48
Mecánico	10,66	40	426,40
Soldador	11,57	32	370,24
Tornero	10,35	16	165,6
Eléctrico	10,73	8	85,84
			<u>1294.56</u>

En la tabla 3.4 aparecen los salarios de los obreros que intervendrán en la fabricación y montaje de la instalación, generando un costo por mano de obra de 1116,72 CUP.



Tendiendo en cuenta los costos desglosados en las tablas 3.1 y 3.2 se puede afirmar que el costo total de la instalación es de 1936.54 CUC.

Se debe destacar que además del costo por mano de obra y materiales, la construcción de la instalación representa un mayor impacto económico ya que permitirá la evaluación del proceso de enfriamiento de mineral, sin poner en riesgo la producción en la industria.

3.5- Valoración del impacto ambiental

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues es en este medio donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentra el polvo industrial y ruido por solo citar algunos.

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad; además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetro comprendido entre 0,1 a 1 μm .

La instalación que se propone 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 provocan 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. Ver Anexos 5 y 6.

Las partículas entran al cuerpo humano a través del sistema respiratorio y el efecto que se produce depende de su tamaño, la composición química y mineralógica, densidad, superficie específica y otras.



Las partículas de tamaño superior a $5\ \mu\text{m}$ de diámetro quedan retenidas en los bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre $0,5$ y $5\ \mu\text{m}$ son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

La situación más preocupante corresponde a las partículas menores de $0,5\ \mu\text{m}$, ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas de $0,01$ a $0,1\ \mu\text{m}$ que penetran en los alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosas, pudiendo permanecer durante meses e incluso durante años degradando la salud del hombre.

3.6- Conclusiones del Capítulo III

- ✓ A pesar de que existen dificultades para establecer los criterios de semejanzas, la instalación cumple con la semejanza geométrica, que es considerada como la más importante dentro de los procesos de intercambio de calor.
- ✓ La instalación que se propone con la realización de este trabajo, genera mínimas afectaciones al medioambiente, producto de que la misma está diseñada para garantizar que no se arroje mineral al medio.



CONCLUSIONES

1. Se estableció el procedimiento de cálculo para la selección del motor y la evaluación de los criterios de semejanza para el escalado del enfriador cilíndrico rotatorio para el cual se estableció una escala de 1:2.
2. Se determinó que la velocidad de rotación del enfriador debe ser 1.047 s^{-1} , para un tiempo de residencia del mineral dentro del cilindro 5,4 minutos y la productividad del equipo debe oscilar entre 10 y 20 kg/min de mineral.
3. El costo total de la instalación es de 1936,54 CUC, además de considerar que tiene un mayor impacto económico por lo que representa desde el punto de vista experimental.



RECOMENDACIONES

1. Continuar con el estudio de la temática para garantizar la calidad en la investigación a escala de laboratorio.
2. 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.
3. Antes de poner en marcha la instalación leer los documentos de los Anexos 5 y 6 conservar y dar mantenimiento a la instalación siempre que el equipo se detenga por un periodo largo.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. Beloglazov, I. N.; Muraviov, A. I, (1988): Intensificación e incremento de la efectividad de los procesos químico - tecnológicos. Ed. Jimia, St. Petersburg, 208 p.
- [2]. Boateng, A. A; Barr, P.V. Modelling of particle mixing and segregation in the transverse plane of a rotary klin. Chemical Engineering Science, September 1996 vol. 51 pp. 4167-4181.
- [3]. Boateng, A. A; Barr, P.V. Granular flow behaviour in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder. Journal of Fluid Mechanics, January 10, 1997 vol. 330 pp. 233-249.
- [4]. Bui, R. T. Computational modelling of thermophysical processes in the light metals industry. Reveu Generale de Termique, Septiembre 1997 vol. 36 pp. 575-591.
- [5]. 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.
- [6]. Columbié, A. Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2001. 98p.
- [7]. Correa, N. Balance energético en el enfriador de mineral en la planta de Hornos de reducción de la Empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara". Ramón, Gonzáles Marrero. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2000. 43p.
- [8]. Dobrojtov, G. N., Procesos y Aparatos de la producción hidrometalúrgica. Ed. Instituto de Minas de St. Petersburg, 1978. 85 p.
- [9]. Diomidovski, D. A, Hornos de la metalurgia no ferrosa. Ed. Metalurgia, Moscú, 1970. 704 p.
- [10]. Folliot: Publication technique No.70. centre d'estudet de Recherche de l'Industries des Liants Hydrauliques, Paris, 1955.



- [11]. Genskow Genskow, L. R, "Dryer Scale up methodology for the process industries". Drying Technology, (Special Issue on Scale – up of Dryers), Vol. 12 (No. 1 & 2): 1994. pp. 47-58.
- [12]. Góngora, E. Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la Planta Hornos de Reducción de la Empresa Cde. Ernesto Che Guevara. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2004. 83p.
- [13]. 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.
- [14]. Holland Holland, F.A. and Chadman, F.S, Liquid Mixing and Processing in Stirred tanks. Ed. Jimia, Moscú, 1974. 207 p.
- [15]. Houge, O; M, Watson; R. A. Ragatz. Principios de los procesos químicos. T.I. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1978.
- [16]. Hurtado, F. G. Estudio de la Influencia en el Medio Ambiente del Sistema de Generación de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara y el Sistema de Transmisión Eléctrico Adyacente. Tesis doctoral. ISMM, Moa. 1999. 120p.
- [17]. Incropera, F. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II. III.
- [18]. Khakhar, D. V.; McCarthy, J. J.; Ottino, J. M. Radial segregation of granular mixtures in rotating cylinders. Physics of Fluid, December 1997 vol. 9 pp.3600-3614.
- [19]. Manual de Operaciones de la planta Hornos de Reducción de la empresa Cmdte. "Ernesto Che Guevara", 1985. 219 p.
- [20]. Mesarovich, M. Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas. Editorial MIR. URSS, pp. 422-436, 1996.
- [21]. Perron, J. and R. T. Bui, "Fours rotatifs: Modele dynamique du mouvement du lit", Can. J. Chem. Eng. 72, 16-25. 1994.
- [22]. Perry J. H. Chemical Engineering Handbook. 6ta Edición. Mc Graw Hill, New York ./pág 7-20. 1979



- [23]. Rabell González, D., Morales Morales Y. Evaluación de los enfriadores de mineral de la Empresa Cmdte. "Ernesto Che Guevara". Manuel Valle Matos. Trabajo de Diploma. Santiago de Cuba: UO, 1998. 65p.
- [24]. Retirado, Y. 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 grado. ISMMANJ. Moa. 2004.
- [25]. 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.
- [26]. Sverdlik G. I. Gregoreu G. G. Peculiaridades del paso del movimiento de materials en un tambor rotatorio a un régimen de cataratas. Revista Ts.M.1979. No.1pp.9-12.
- [27]. Torres, E. Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2003. 105p.
- [28]. TUNRA. Ore Cooler Evaluation. The Uniersity Of New Castle Research Associates Limited. 1998. 18p.