REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# Trabajo de Diploma

## EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Título: Evaluación de las pérdidas de calor en los secadores cilíndricos rotatorios 4 y 5 de la empresa "Comandante René Ramos Latour" de Nicaro.**

**Autor: Natacha Carmenate López.**

**Tutores: M. Sc. Ing. Geovany Ruiz Martínez.**
**Ing. Juan José Vidal Carmenaty.**

**Moa - 2013**

***"Año del 55 de la Revolución"***

## DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Natacha Carmenate López,** autor de este trabajo de tesis en opción al título de ingeniera mecánica y los tutores; declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y de la empresa productora de níquel "Comandante René Ramos Latour" para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

**Autor: Natacha Carmenate López**

**M.Sc. Geovanys Ruiz Martínez**

**Ing. Juan José Vidal Carmenaty**

## PENSAMIENTO

*"No solo es justo, sino también necesario. No solo es justo que la mujer tenga oportunidad de desarrollar su capacidad en beneficio de la sociedad, sino que también es necesario para la sociedad que la mujer encuentre todas las posibilidades de desarrollar plenamente sus capacidades."*

*Fidel Castro Ruz*

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente doy mi agradecimiento de corazón a aquellas personas que hicieron posible que este sueño de una formación profesional se hiciera realidad.

**Agradecimientos especiales:**

- A la revolución por haberme dado la oportunidad, de luchar para poder realizar mis sueños.
- **A mis tutores:** Ing. Juan José Vidal Carmenaty y el Ms. C. Geovany Ruiz Martínez por las ayudas prestadas en todo momento durante el transcurso de elaboración de mi trabajo de diploma.
- A mi padre Silvio Carmenate Correa, aunque no este ya entre nosotros por ser el motivo de mi inspiración.
- A mi hija Alejandra Jazmín Rodríguez Carmenate y mi esposo Reynier Rodríguez Domínguez por su dedicación y paciencia en todo momento.
- A mi madre Virgen López Leyva por ser ejemplo, amiga y fiel consejera.
- A mi hermano Silvio Carmenate López y mi padrastro Humberto Concepción Domínguez por creer en mí.
- A mis abuelos agradecimiento eterno por sus enseñanzas.
- A mi compañero y amigo Jorge Expósito Seleme por su apoyo incondicional.
- A mis profesores por su dedicación y apoyo en los momentos más difíciles y en especial a la Ing. Marcia Mastrapa Torres.
- A mis compañeros de trabajo que siempre me han apoyado y se han preocupado por mí.

**A todos "Mi más sincero agradecimiento"**

**Natacha Carmenate López**

## DEDICATORIA

*A mi padre, Silvio Carmenate Correa*

*A mi hija y esposo*

*A mi madre y hermano*

## RESUMEN

Hoy en día las elevadas pérdidas de calor en los secadores cilíndricos rotatorios horizontales de la empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro, constituyen uno de los factores principales para que la planta de preparación de minerales esté valorada como una de las mayores consumidoras de combustible de la fábrica. Hasta el momento no se han desarrollado en la entidad trabajos encaminados a la determinación de las pérdidas a partir de los flujos de calor en los equipos de secado, por lo que esta situación constituye un problema en estos equipos, en este contexto resulta vital la evaluación de estas pérdidas.

Para el desarrollo de este trabajo se tuvieron en cuenta expresiones teóricas y empíricas relacionadas con las leyes y principios de transferencia de calor, obtenidas a partir de la consulta realizada en las bibliografías existentes. A partir de la aplicación estas expresiones, las pérdidas de calor promedio por convección obtenidas en los secadores fueron 4,2246 x $10^4$ W y por radiación ascendieron a 8,6156 x $10^4$ W respectivamente.

Las simulaciones realizadas a partir de la implementación del ANSYS 12.1 muestran el comportamiento de la temperatura a lo largo de los secadores cilíndricos rotatorios. Este comportamiento es similar al descrito en el cálculo de las respectivas perdidas de calor. Posteriormente se determinó que el gasto económico por concepto de consumo de combustible asociado al secadero analizado es 5 932 727,184 CUC para los cinco meses considerados. El análisis ambiental arrojó que las afectaciones medioambientales más importantes existentes en la planta son las emisiones continuas de polvo y ruido.

## ABSTRACT

In the present day the high heat loss in the horizontal rotating cylindrical dryers company "Comandante René Ramos Latour" Nicaro are one of the main factors for the mineral preparation plant is rated as one of the largest consumers of fuel the factory. So far there have been developed in the organization work aimed at determining the losses generated from the heat flow in the drying equipment are operating conditions at the facility. Until the moment they have not been developed in the entity works guided to the determination of the losses starting from the flows of heat in the teams you drying, for what this situation constitutes a problem in these teams, in this context the evaluation of these losses is the most important part.

For the development of this work they were had in bill theoretical and empiric expressions related with the laws and principles of heat transfer, obtained starting from the consultation carried out in the existent bibliographies. Starting from the application these expressions, the heat losses average for convection obtained in the dryers were 4,2246 x $10^4$ W and for radiation they ascended 8,6156 x $10^4$ W respectively.

The realized simulations starting from the implementation of the ANSYS 12.1 show the behavior of the temperature along the rotational cylindrical dryers. This behavior is similar to the one described in the lost calculation of the respective ones of heat. Later on it was determined that the economic expense for concept of consumption of fuel associated to the analyzed dry is 5 932 727,184 CUC for the five considered months. The environmental analysis threw that the existent more important environmental affectations in the plant are the powder tap issues and noise.

# ÍNDICE


| Contenido | | Págs. |
|---|---|---|
| | ***Introducción*** | ***1*** |
| ***Capítulo 1*** | ***Marco teórico – metodológico de la investigación……*** | ***5*** |
| *1.1 -* | *Introducción……* | *5* |
| *1.2 -* | *Trabajos precedentes……* | *5* |
| *1.3 -* | *Breve reseña histórica fábrica de níquel "Comandante René Ramos Latour"……* | *11* |
| *1.4 -* | *Descripción del flujo tecnológico de la planta de preparación de mineral ……..* | *14* |
| *1.5-* | *Principios técnicos del secado……..* | *15* |
| *1.5.1-* | *Descripción del proceso de secado en los secadores cilíndricos rotatorios……..* | *17* |
| *1.6.-* | *Factores que determinan la eficiencia del secado en cilindros rotatorios……..* | *18* |
| *1.7-* | *Principios generales del análisis de procesos mediante la simulación.* | *21* |
| *1.7.1-* | *Método de Elementos Finitos aplicados a problemas térmicos……* | *22* |
| *1.8 -* | *Conclusiones del capítulo……* | *23* |
| ***Capítulo 2*** | ***Materiales y métodos utilizados para la investigación……..*** | ***24*** |
| *2.1 -* | *Introducción……* | *24* |
| *2.2 -* | *Instrumentos utilizados en la medición de los parámetros……..* | |
| *2.3 -* | *Procedimiento de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor……..* | *24* |
| *2.3.1-* | *Cálculo de las pérdidas por transferencia de calor……..* | *25* |
| *2.4-* | *Principales parámetros geométricos obtenidos en la instalación para la determinación de las pérdidas de calor……..* | *30* |
| *2.5-* | *Análisis de fenómenos térmicos con el uso del ANSYS……..* | *31* |
| *2.5.1-* | *Modelos térmicos en ANSYS……* | *32* |
| *2.6-* | *Principios de flujo de calor Convección y Radiación……* | *33* |
| *2.7-* | *Condiciones de fronteras a tener en cuenta en el análisis térmico……* | *35* |
| *2.8-* | *Notación del flujo de calor en matrices……..* | *36* |
| *2.9-* | *Método de la matriz en el análisis de la radiación……* | *38* |

| | | |
|---|---|---|
| *2.10 -* | *Conclusiones del capítulo……* | *38* |
| ***Capítulo 3*** | ***Análisis de los resultados, valoración económica e impacto ambiental……*** | ***39*** |
| *3.1 -* | *Introducción……* | *39* |
| *3.2 -* | *Análisis de los resultados de la investigación……* | *39* |
| *3.2.1-* | *Procedimiento de análisis del esquema de secador cilíndrico rotatorio de la empresa "Comandante René Ramos Latour"……..* | *41* |
| *3.2.2-* | *Ventajas y desventajas de la aplicación del método de Elementos Finitos……* | *45* |
| *3.3 -* | *Valoración económica……..* | *46* |
| *3.4-* | *Principales problemas ambientales detectados en la planta……* | *47* |
| *3.5-* | *Otras consideraciones……* | *51* |
| *3.6 -* | *Conclusiones del capítulo……* | *51* |
| | ***Conclusiones generales……..*** | ***52*** |
| | ***Recomendaciones……..*** | ***53*** |
| | ***Referencias Bibliográficas……..*** | ***54*** |
| | ***Anexos……..*** | *--* |

## INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel juega un papel determinante dentro de la economía nacional. Insertada en esta rama, la empresa “Comandante René Ramos Latour” es uno de los pilares que la consolida; por ello la reducción del consumo de portadores energéticos y la optimización de sus procesos inciden considerablemente en la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen.

Las investigaciones abordan aspectos importantes del proceso de secado, pero no analizan la interrelación general que existe entre el rendimiento térmico, productividad específica e índice de consumo de combustible y los restantes parámetros; principalmente la humedad de entrada y el flujo de mineral húmedo que definen el comportamiento termoenergético de los equipos, cuando estos últimos varían de forma frecuente. Lo anterior puede ser atribuido a las siguientes deficiencias:

- El insuficiente conocimiento de los principales parámetros que inciden en la eficiencia del proceso de secado en cilindros rotatorios.
- Las limitaciones de los procedimientos de cálculo existentes para el análisis termoenergético del proceso.

Durante el proceso de secado el problema de la transferencia de calor se presenta, casi sin excepción, en todas las industrias, existiendo incontables diferencias de detalles a causas de la gran diversidad de su campo de aplicación.

Las leyes de transferencia de calor tienen primordial importancia en el diseño y funcionamiento de múltiples equipos, destinados a realizar la operación de secado, entre ellos los generadores de vapor, hornos, precalentadores, refrigeradores, evaporadores y condensadores.

La transferencia de calor, se efectúa de diferentes formas: por conducción, convección y radiación, la misma se puede manifestar en las producciones de vapor en termoeléctricas, el enfriamiento y calentamiento de sustancias en intercambiadores de calor, para este trabajo tiene particular interés el secado de mineral laterítico que se desarrolla en los cilindros rotatorios de la Empresa Comandante René Ramos Latour.

Dicha empresa fue construida entre los años 1942 - 1943, esta se encuentra ubicada al norte del yacimiento mineral de Pinares de Mayarí, en la costa norte, al centro de Nicaro, provincia Holguín, Cuba. Desde su puesta en marcha en Diciembre de 1943 su explotación ha sido muy importante para la economía del país, esto ha permitido el desarrollo de la zona y el progreso económico y social al generar empleos e inversiones, favoreciendo la vida de cada ciudadano cubano.

Los secadores cilíndricos rotatorios de la planta de preparación de mineral cuya tecnología está basada en el esquema carbonato-amoniacal del mineral reducido, es un proceso continuo, utilizado en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico se distingue por su sencillez y amplia utilización en los aparatos conocidos (hornos de soleras múltiples, espesadores y columnas de destilación). Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. Este es llamado proceso Carón.

El complejo minero metalúrgico de níquel de la Empresa Comandante René Ramos Latour comprende las siguientes entidades: Unidad Básica Minera, Planta de Hornos de Reducción, Preparación de Mineral, Lixiviación y Lavado, Recuperación de Amoniaco, Calcinación y Sínter, Planta de Cobalto, Recepción y Suministro, Termo energética, Potabilizadora, Laboratorio Central y otras entidades auxiliares.

**Fundamento de la investigación**

En la actualidad no se ha logrado implementar de forma eficiente el proceso de secado en los cilindros rotatorios de la planta de preparación de mineral debido al alto contenido de humedad presente en el mineral alimentado a los secadores el cual oscila entre 30 y 37%.

En la empresa Comandante René Ramos Latour, la reducción del consumo de portadores energéticos y la optimización de sus procesos inciden considerablemente en la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen. El secado, desde el punto de vista industrial, es un proceso de transferencia de calor y de masa, mediante el cual se hace pasar un producto desde un estado inicial húmedo a otro estado final menos húmedo, lo que implica extraer el líquido que posee este,

obteniendo al final un producto diferente, ya sea como producto final o como intermedio en un proceso de fabricación dado. Este líquido suele ser agua natural o mezclada, también puede tratarse de otro tipo de disolvente orgánico e inorgánico.

Este proceso en la empresa, tiene la finalidad de reducir el contenido de humedad del mineral laterítico hasta valores mínimos, con la mayor eficiencia posible para facilitar la molienda.

A partir de los aspectos antes mencionados se declara como **problema:**

El desconocimiento de las pérdidas de calor en los secadores cilíndricos rotatorios horizontales 4 y 5 de la planta de Preparación de Mineral en la empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro; influyen en el rendimiento de secado del mineral.

**Objeto de estudio de la investigación:**

Los secadores cilíndricos rotatorios 4 y 5 de la planta de preparación de minerales de la Empresa René Ramos Latour.

**Campo de acción:**

Procesos de transferencia de calor en cilindros rotatorios.

**Hipótesis:**

Si se aplican adecuadamente las leyes que rigen la transferencia de calor al objeto de estudio, entonces es posible determinar las pérdidas de calor del mineral en los secadores cilíndricos rotatorio 4 y 5 de la planta de preparación de minerales.

**Objetivo del trabajo:**

Determinar las pérdidas de calor de los secadores cilíndricos rotatorio 4 y 5 de la planta de preparación de minerales, a partir de las leyes que rigen la transferencia de calor.

**Objetivos específicos:**

1. Establecer las características fundamentales del método de transferencia de calor y de masa y su acomodo al objeto de estudio.
2. Evaluar el comportamiento de los parámetros fundamentales del proceso de secado y su influencia en los indicadores de eficiencia.

**Tareas del trabajo:**

**1-** Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el proceso de secado que permita el establecimiento del estado actual de la temática en la empresa.

**2-** Establecer el procedimiento de cálculo para determinar las pérdidas de calor de los secadores.

**4-** Simular con el uso de la herramienta ANSYS 12.1 el comportamiento térmico de los secadores cilíndricos rotatorios.

**4-**Valorar el impacto económico del estudio realizado y las afectaciones medioambientales asociadas al proceso de secado en los secadores cilíndricos rotatorios.

Los **métodos de investigación** empleados en el trabajo son los siguientes:

- Método histórico-lógico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso objeto de estudio.
- Método inductivo-deductivo para el establecimiento de las teorías y el estado actual de la temática tratada.
- Método de investigación experimental para describir y caracterizar el proceso estudiado y sus principales regularidades.
- Técnicas computacionales para el procesamiento de los datos experimentales y la obtención del comportamiento del objeto de estudio.

**Aseguramientos**

1. Material de oficina
2. Datos de las mediciones
3. Equipos de computo

# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1- Introducción

La importancia de los procesos de secado se puede apreciar a través de los estudios realizados por Franzen *et al*. (1987) quienes estimaron que a nivel mundial se consumen más de $2x10^5$ MJ de energía en el secado de alimentos cada año y por otro lado, Strumillo *et al*. (1995) determinaron que 12 % del consumo mundial de energía a nivel industrial es destinado a los procesos de secado.

A pesar de que los datos anteriores señalan al secado como uno de los procesos más empleado a nivel industrial, todavía se desconocen muchos aspectos relacionados con las etapas y los mecanismos de movimiento de la humedad implicados en el mismo. Esto se debe a la complejidad de la estructura de los materiales sometidos a secado, porque a nivel microscópico son complejos (Hernández y Quinto, 2005).

En la empresa “Comandante René Ramos Latour”, el secado juega un papel determinante debido a que en este proceso se consume un elevado por ciento de la energía total empleada en la entidad, es por ello que la reducción del consumo de portadores energéticos y la optimización de sus procesos inciden considerablemente en la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen.

En este sentido el **objetivo** del capítulo es:

Exponer los fundamentos teóricos del proceso de secado térmico en tambores cilíndricos rotatorios que permita la evaluación del comportamiento de los parámetros de trabajo en el objeto de estudio.

### 1.2- Trabajos precedentes

El secado con el empleo de la energía térmica se ha desarrollado vertiginosamente en el mundo, de acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas (Krisher, 1961; Strumillo, 1975) se destacan dos tendencias fundamentales: el secado bajo parámetros

controlados y el secado bajo parámetros no controlado (el solar). A este trabajo ofrece particular interés la primera de ellas.

Respecto al primer elemento se encontraron numerosos trabajos experimentales encaminados a describir el comportamiento de la transferencia de calor y masa en el secador y caracterizar la cinética del proceso de secado y la humedad de equilibrio. Los trabajos más pertinentes se analizan a continuación.

Likov (1954), demostró experimentalmente que el proceso de secado depende del mecanismo de transporte de la humedad en el interior del sólido bajo la acción de un gradiente térmico, de la energía de vaporización y de la difusión del vapor desde la superficie del material hacia los alrededores a través de la capa límite. Este descubrimiento es válido para el secado de los materiales capilaroporosos, grupo al que corresponde el mineral laterítico según la clasificación dada por Kasatkin (1987).

Philip y De Vries (1957), estudian las fuerzas capilares que causan el transporte del líquido, en términos de gradientes del contenido de humedad y temperatura resultante en una ecuación de difusión. Aunque el trabajo se realizó para diferentes condiciones de experimentación, el mismo indica los elementos a considerar en el estudio experimental del proceso.

Relacionado con la modelación matemática del proceso de secado, es importante destacar el trabajo desarrollado por Myklestd (1963b). El autor obtiene un modelo estático de un secadero a contra corriente, donde trabaja con un coeficiente volumétrico global de transferencia de calor y considera la temperatura del sólido invariable en la zona de velocidad de secado constante.

Otras investigaciones en este campo son las efectuadas por Sharples *et al.* (1964) quienes plantean un modelo con cuatro ecuaciones diferenciales que describen los procesos de transferencia de masa y energía, aunque el modelo se obtiene para el secado de fertilizante.

Whitaker (1977), obtuvo ecuaciones aproximadas para el secado continuo de diferentes materiales; Huang (1979), usó un sistema de ecuaciones para la etapa del secado en el cual el movimiento del líquido debido al flujo capilar es dominante y un sistema diferente

de ecuaciones para el estado, donde el movimiento de la humedad ocurre a través de la difusión del vapor.

Thomas et al. (1980), resolvieron las ecuaciones expuestas por Lykov (1954) usando el método de elementos finitos, ellos resolvieron las ecuaciones diferenciales parciales no lineales para los casos donde es posible variar las propiedades de los materiales y también ecuaciones lineales con propiedades constantes de los materiales; compararon los resultados de ambos casos con los de un análisis lineal del secado de una sección de madera y constataron que no había diferencia con los resultados no lineales, de ahí que asumir las propiedades del material constante se justifique en algunos casos. De los resultados obtenidos por estos investigadores se deduce que es posible simplificar el estudio del proceso al asumir constantes las propiedades del material, siempre que el rango de error no exceda las especificaciones propias del proceso estudiado.

Dinulescu et al. (1985), presentan una solución analítica para la migración unidireccional de humedad bajo gradientes de contenido de humedad y temperatura asumiendo propiedades de transporte constante, obtuvieron relaciones para la temperatura y campos de humedad en forma adimensional. Estos resultados no tienen aplicación práctica para el caso estudiado debido a las simplificaciones realizadas por los autores.

Plumb et al. (1985), desarrollaron sistemas de ecuaciones que describen tanto el transporte capilar como difusivo de humedad y calor para el secado de madera, sus predicciones numéricas se basaron en funciones empíricas para predecir la transferencia de calor por convección en la superficie como una función del contenido de humedad de dicha superficie. A pesar de que los resultados obtenidos son satisfactorios para el secado de madera, los mismos no pueden ser generalizados al mineral laterítico por las diferencias notables que existe entre las propiedades térmicas de ambos sólidos.

Huang (1979), usó un sistema de ecuaciones para la etapa del secado en el cual el movimiento del líquido debido al flujo capilar es dominante y un sistema diferente de ecuaciones para el estado, donde el movimiento de la humedad ocurre a través de la difusión del vapor.

Las relaciones empíricas que se obtienen de esta aproximación son generalmente insatisfactorias, el autor realizó para ello el diseño de un secador industrial operando con una velocidad del aire de 3 m/s. Las ecuaciones se obtienen con el fin de determinar la cantidad de calor transferido usando un coeficiente de transferencia de calor pelicular, pero en este caso se hace más dudosa el área en que se estima la ocurrencia de la transferencia de calor.

El secado con el empleo de la energía térmica se ha desarrollado vertiginosamente en el mundo, de acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas (Krisher, 1961; Strumillo, 1975) se destacan dos tendencias fundamentales: el secado bajo parámetros controlados y el secado solar. A este trabajo ofrece particular interés la primera de ellas.

Respecto al primer elemento se encontraron numerosos trabajos experimentales encaminados a describir el comportamiento de la transferencia de calor y masa en el secador y caracterizar la cinética del proceso de secado y la humedad de equilibrio. Los trabajos más pertinentes se analizan a continuación:

Lykov (1954), demostró experimentalmente que el proceso de secado depende del mecanismo de transporte de la humedad en el interior del sólido bajo la acción de un gradiente térmico, de la energía de vaporización y de la difusión del vapor desde la superficie del material hacia los alrededores, a través de la capa límite. Este descubrimiento es válido para el secado de los materiales capilaroporosos, grupo al que corresponde el mineral laterítico según la clasificación dada por Kasatkin (1987).

Peishi et al. (1989), usaron diferentes formulaciones matemáticas para la región húmeda, en estas el mecanismo de transferencia es el flujo capilar de agua libre y la región de absorción en la que el transporte de humedad es debido al movimiento del agua no estructural y la transferencia de vapor, usando el modelo desarrollado estudiaron el comportamiento del secado de ladrillos, madera y granos de maíz, haciendo predicciones en cuanto a la temperatura y distribución del contenido de humedad para esos materiales. Ilic et al. (1989), utilizaron la forma integral de las ecuaciones de conservación de la masa y energía considerando un elemento de

volumen promedio, el que consta del sólido poroso, agua y vapor de agua para describir el secado del material en las regiones húmedas y secas.

Papadakis et al. (1994) para estimar el coeficiente de transferencia de calor pelicular usaron las relaciones propuestas por Langrish et al. (1988), sus aproximaciones son básicamente las mismas que las de Schofield y Glikin, pero realizan gran cantidad de experimentos para eliminar las debilidades del método.

Ferguson et al. (1995), derivaron las ecuaciones de conservación para líquido y aire haciendo aproximaciones continuas para el secado de madera por debajo del punto de ebullición del agua; utilizando la técnica del volumen de control como un punto de referencia validaron los resultados obtenidos con el empleo del método de elementos finitos; encontraron ligera diferencia en los resultados de ambos métodos durante la última etapa de secado.

Haciendo uso de los coeficientes de difusividad obtenidos experimentalmente por Perrin et al. (1987); Muregesan et al. (1996), realizan predicciones numéricas a partir de un modelo unidireccional para estudiar la variación de la humedad y la temperatura dentro de materiales sólidos durante el secado convectivo asumiendo propiedades de transporte constantes, en este trabajo se omiten los términos de disipación viscosa y convectiva en las ecuaciones de energía, también se asume que existe equilibrio térmico local entre la matriz del sólido, líquido puro y mezcla gaseosa de aire y vapor. Las simplificaciones realizadas no permiten la generalización de los resultados.

En Cuba se han desarrollado diferentes investigaciones relacionadas con el secado de materiales y productos alimenticios tales como: café, cacao, cebolla, madera, cemento, zeolita, entre otros, todos con resultados satisfactorios para cada uno de estos materiales. Dentro de ellos se puede destacar el trabajo desarrollado por Novoa et al. (1995) para el secado de zeolita a escala de laboratorio, en este se obtienen ecuaciones empíricas que describen el comportamiento de la cinética del secado del producto siguiendo el modelo propuesto por Hall (1983), obteniendo además, los valores de humedad de equilibrio para diferentes temperaturas y humedad inicial; finalmente con todos los resultados alcanzados realizaron un software para simular el proceso y predecir su comportamiento bajo determinadas condiciones de operación.

Por otra parte Fitt (1996), afirma que muchos modelos matemáticos de procesos industriales pueden ser escritos como sistemas n x n de leyes de conservación en términos de n variables independientes.

Toirac et al. (1997) obtiene el tonelaje de combustible por mineral secado y agua evaporada para un flujo de mineral alimentado de 140 t/h.

Eich-Soellner et al. (1997) señalan que la modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas químicas, ofreciendo un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones derivados de la modelación de una planta de producción.

Mora (1999) realiza un balance térmico y de masa de los secadores de mineral considerando los gases de hornos y el aire frío como aire secundario o de disolución. También se realizó una valoración económica del proceso para demostrar como influye el empleo de gases calientes como aire secundario en el costo de producción y calculó el consumo de combustible en estas condiciones.

También Bachir (2001) realiza un balance térmico y de masa para determinar el consumo de combustible tomando el aire frío y los gases de hornos como aire secundario.

Varios trabajos investigativos se han llevado a cabo en los secadores de la empresa productora de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, Moya (2008) realiza un análisis de las pérdidas y su influencia en el gasto económico por concepto de consumo de combustible en dicha empresa. Dichos secadores son similares para ambas empresas.

Como se puede observar de este análisis, en nuestro país la literatura recoge pocos intentos de estudios experimentales de los secadores rotatorios al parecer por la dificultad de hacer mediciones en dicho agregado, particularmente en condiciones industriales, ya que carecen de una data precisa y adecuada de la transferencia de calor, masa y del movimiento de la partícula por el interior del equipo, todos estos aspectos son los que han motivado la realización de esta investigación con vista a profundizar en los parámetros de explotación y funcionamiento en los tambores cilíndricos rotatorios.

## 1.3- Descripción del flujo tecnológico de la planta de preparación de mineral

En la planta de preparación de mineral es donde se inicia el proceso de preparación del material de la fábrica, según la tecnología carbonato amoniacal. El mineral llega al depósito desde la mina de pinares de Mayarí. Por medio de las cuatro grúas indias el mineral es arrojado a los alimentadores móviles. De los alimentadores móviles es transportado por medio de las correas A y B hasta la trituradora. Luego por medio de las correas A2 y correas B2 pasa a los machetes que son alimentados por la correas A3 y correas B3 hasta los alimentadores. Por medio de las correas A4 y correas B4 se alimenta el depósito interior. Los alimentadores alistan a los secadores, que está formado por cámara de paso de combustión, botella y tambor secador. La misma descarga a las correas calientes 1 y 2, por medio de los elevadores C y D se alimenta la tolva inicial. La tolva inicial descarga a la cinta dosificadora y esta a la cinta alimentadora del molino, El mineral penetra al molino de bolas a través de la boquilla de alimentación y se reduce su tamaño por la acción de la carga de bolas y el revestimiento. El mineral molido sale por el dispositivo de descarga incorporado con este fin, ayudado por la acción del barrido de aire que acelera el paso de las partículas molidas a través del molino.

La molienda se produce de forma combinada por percusión y aplastamiento en régimen de catarata y por fricción y aplastamiento en régimen de cascada. Los molinos descargan en el depósito desde donde sale a los silos.

**Planta de Preparación de Mineral.**

Para el secado del mineral en esta planta se emplean los tambores rotatorios. Los secadores son cilindros alargados formados por una cámara de combustión (donde se producen los gases calientes que secan el mineral), y un cilindro (donde el mineral recibirá el proceso de secado).

El mineral es recepcionado en el depósito donde es homogeneizado y posteriormente dosificado al proceso de secado para lo cual se cuenta con 4 grúas indias y 3 alimentadores móviles. El mineral es llevado por transportadores de banda hasta la sección de secado después de pasar una etapa de trituración gruesa hasta < 100 mm en 2 trituradoras de rodillos dentados.

En la sección de secado hay instalados 7 secadores de tambor rotatorio. Los gases para el secado son suministrados por la combustión del petróleo en la cámara de combustión de cada uno de ellos. El mineral secado es llevado por medio de transportadores de bandas y elevadores de cubos a la tolva de recepción de la sección de molienda.

La molienda se efectúa en 2 molinos de bolas de doble cámara de molienda, y un molino cilíndrico de extremos cónicos con una etapa inicial de trituración primaria en molino de martillos. El producto final de la molienda y el polvo de colección primaria y secundaria es enviado a los silos de planta de hornos por medio de bombas neumáticas.

**Productos intermedios de cada área.**

**Depósito exterior**

En el área del Depósito exterior las grúas deben suministrar un producto homogeneizado en las proporciones antes especificadas con una humedad < 37 %. A la salida de los alimentadores móviles el mineral debe tener una granulometría < 400 mm. Después de las trituradoras de rodillos el mineral debe tener una granulometría < 100 mm. Este es el mineral que se suministra a secadores.

**Secadores**

En los secadores se reduce la humedad del mineral desde 30 - 37 % a < 4,5 % y se suministra a molienda. El polvo fino de la colección de polvo y limpieza de gases se deposita en la tolva de producto final con granulometría < 0,074 mm.

El tambor secador posee un sistema motriz, acoplado al cuerpo de este, que le permite rotar alrededor de su eje. El mismo se apoya exteriormente en dos llantas que posee sobre dos pares de rodillo. Internamente el secador está formado, cerca de la cámara de combustión, por unas guías o deflectores soldados al cuerpo del tambor que son los que dirigen el mineral hacia el interior de la parte cilíndrica.

En esta parte cilíndrica existen levantadores de mineral, estos están soldados al cuerpo del tambor y son los encargados de permitir la transferencia de calor entre el gas caliente y el mineral y con ello el proceso de secado.

Estos levantadores dividen al tambor en 6 partes, lo que favorece el proceso de secado porque:

Permite que la carga alimentada al tambor sea repartida uniformemente en el interior del mismo.

Evita sobrecargar un levantador más que otros, provocando la formación de cortinas de mineral uniformes durante la caída del mismo, debido a la rotación del tambor. Posibilita un mayor contacto entre los gases calientes - mineral y una mayor evaporación de la humedad que trae el mineral. Permite que el motor trabaje más establemente y se requiera de menor potencia para mover el secador, debido a la uniformidad de la carga. En la construcción de las instalaciones internas de los secadores cilíndricos se tiene en cuenta el grosor, la densidad y las propiedades de dispersión del material sometido al secado, además de garantizar la distribución uniforme de este en la sección transversal del cilindro.

Existen diferentes formas de construir los elementos interiores del secador.

- Sectoriales.
- Periféricos.
- En forma de cruz.
- Sectoriales con anillos interiores.

En el secado del mineral laterítico en las Empresas del Níquel actualmente se utilizan los levantadores sectoriales, estos se emplean fundamentalmente cuando el material tratado no puede caer desde una altura muy elevada y pueda quebrarse, además de dividir en varias porciones el producto alimentado para facilitar la transferencia de calor entre las partículas. Para el tratamiento del mineral laterítico se recomienda utilizar levantadores periféricos, la laterita puede dejarse caer desde una altura elevada sin que se produzcan hendiduras en los granos, además mientras mayor es la altura de vuelo de las partículas se favorece el proceso de transferencia de calor y masa y ayuda a romper los pelets que se forman debido a que en la medida en que se va secando el producto se incrementa la fuerza de atracción entre las partículas sólidas y se produce la aglutinación de estas.

**Molinos**

En los molinos se recibe el mineral con tamaños máximos de 100 mm y lo reduce a más de 83 % de la clase < 0,074 mm. Este proceso se efectúe directamente en los molinos de bolas de doble cámara de molienda con un circuito cerrado que devuelve al molino el material fuera de especificación. En la Unidad Nro. 7 existe una trituración primaria en molino de martillos que reduce las partículas que entran al molino de bolas a < 3 mm. El molino de bolas da el tamaño final a las partículas en un circuito cerrado de molienda. El producto final de molienda captado en los ciclones y en el sistema de limpieza de gases es entregado a la tolva de recepción del producto final, listo para ser bombeado a los silos de la Planta de Hornos.

**Características del producto final.**

Humedad: De 4 a 6%.

Fineza: > 83 % de la clase < 0,074 mm.

5 % de la clase > 0,149 mm.

Clase < 0,149 > 0,074 mm el resto.

La composición química es la misma que a la entrada del proceso de preparación.

**1.4- Breve reseña histórica fábrica de níquel "Comandante René Ramos Latour"**

En Marzo de 1942 comenzó la construcción en Nicaro de la primera planta de obtención de Níquel a partir de las lateritas. El motivo de la construcción de la fábrica fue el aumento de la demanda del Níquel como metal estratégico para la Segunda Guerra Mundial (S.G.M). La puesta en marcha y la primera producción de óxido de Níquel se produjo en diciembre de 1943.

Al terminar la S.G.M., al bajar el precio del Níquel, la planta fue cerrada en marzo de 1947. Al producirse la guerra en Corea en 1951, se rehabilitó la planta y reinició su operación en 1952. En los años 1955 a 1956, la planta fue ampliada un 75 % la capacidad inicial de diseño, para hacer la operación económicamente atractiva. En Septiembre de 1960 la planta es nacionalizada, pasando a manos del estado cubano a partir de 1976 se inició un proceso de rehabilitación tecnológico general de la planta,

con el objetivo de efectuar la reparación y modernización total de los equipos fundamentales.

En el año 1977 se efectúan una serie de estudios en laboratorios de un centro de investigaciones en La Habana, para definir una tecnología para la separación del Cobalto. Los resultados se aplicaron en pruebas a escala piloto en Nicaro para construir luego una planta demostrativa y construir una planta de separación a escala industrial. En 1981 se adquiere una nueva unidad de molienda (la Nro. 7). En 1982 la planta alcanza la mayor producción de su historia. A partir de 1983 se comienza la separación del Cobalto con una instalación provisional diseñada y construida en Nicaro.

En 1996 se comienza a aplicar petróleo aditivo al mineral en la Planta de Preparación de Mineral, posterior al secado y antes de la molienda, con lo cual se hace posible eliminar la Planta de Gas para el gas reductor de los hornos de reducción. También en 1996 se moderniza completamente la Planta de Hornos quedando sólo 11 hornos de los 22 que existían, a los cuales se les aplica la tecnología de avanzada PRIOR. Paralelamente se le moderniza el sistema de transporte neumático desde Silos a las tolvas de los hornos. En junio de 1988 entra en operación una Nueva Planta de Molienda que sustituye totalmente a la antigua planta, quedando de ella en operación sólo. La Unidad Nro. 7, junto a las 2 nuevas unidades de tecnología de doble cámara de molienda. Como se evidencia en lo anteriormente descrito, a lo largo de la historia de la fábrica, se ha efectuado un trabajo de ampliación, rehabilitación y modernización, introduciéndose en ella los logros de la ciencia y la técnica.

## 1.5- Principios técnicos del secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y transferirla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto y su grado de sequedad) y de las características físico mecánicas del producto (su composición, contenido de humedad y el tamaño de las partículas). El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad de vapor de agua presente en el aire se denomina humedad. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, considerablemente de su temperatura. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decrece y por

tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata rápidamente. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto a secar (Zazhin, 1984).

De acuerdo con Boizán (1991) una de las formas más eficiente de describir el proceso de secado es mediante las curvas de velocidad de secado contra humedad promedio en un sistema de coordenada $(du/d\tau) = f(u)$. En la figura 1.1 se representan de forma general las etapas de secado por lo que transita un sólido objeto sometido al proceso.

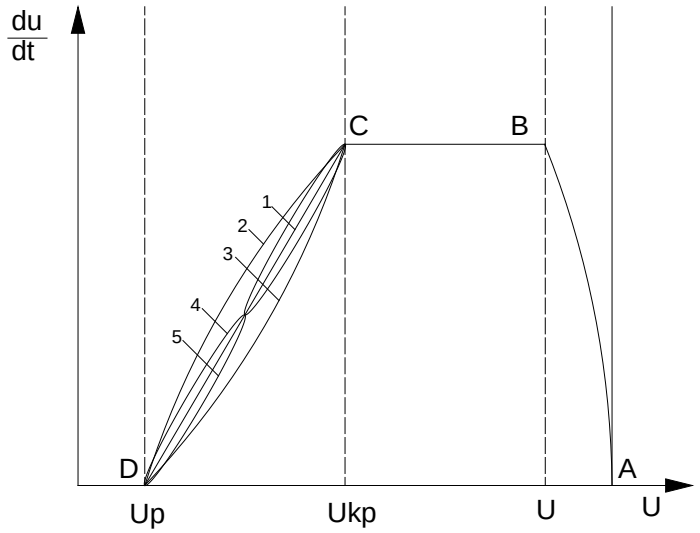



**Figura 1.1.** Curva de velocidad de secado
Fuente: Boizán, 1991.

El tramo AB corresponde al periodo de calentamiento. En esta la temperatura del material se eleva hasta la temperatura a bulbo húmedo y su humedad baja muy poco. La velocidad de secado crece y en B alcanza su máximo valor.

El periodo de velocidad de secado constante corresponde a la recta BC. En esta etapa tiene lugar una intensa evaporación de la humedad libre. La velocidad del proceso es máxima y depende fundamentalmente de la resistencia externa a la difusión y en menor cuantía de la resistencia interior del sólido a la difusión.

El periodo de velocidad de secado decreciente, según sea el caso, puede describirse con una de las curvas (1, 2, 3, 4 ó 5) que van desde C hasta D. A pesar de que en sentido general este es el comportamiento de los sólidos, en ocasiones durante el

secado de algunos materiales (los cereales y algunos vegetales como la papa, remolacha y la zanahoria) en el primer periodo su temperatura no se mantiene constante, sino que sigue creciendo hasta alcanzar valores superiores a la del bulbo húmedo. Este comportamiento permite concluir que la proposición realizada por Lykov (1968) de llamar a esta etapa periodo de temperatura constante no es satisfactoria. Es más acertado llamarlo periodo de velocidad de secado constante ya que se cumple para cualquier material.

### 1.5.1- Descripción del proceso de secado en los secadores cilíndricos rotatorios

El mineral al entrar al secador tiene una humedad de 30 - 37 % aproximadamente y debe salir del mismo con 4 - 5%. Para lograr esto cada secador posee una cámara de combustión dotada de un quemador de petróleo, a la cual se le suministra aire de combustión, aire de pulverización, aire secundario o gases procedentes de la planta de hornos.

Los gases quemados dentro de la cámara de combustión alcanzan una temperatura de 1480 °C que disminuye hasta 750-700 °C al entrar en contacto con el aire en exceso que se suministra y que sirve para aumentar el volumen de gases necesarios para secar el mineral. Los gases entran al tambor secador con esta última temperatura (750-700 °C) y salen del mismo a una temperatura de 75 -140 $^{o}$C.

La entrada de los gases al tambor secador se realiza en dirección a corriente con el mineral alimentado, de forma que el contacto entre los gases calientes y el mineral permita que este último se vaya secando para obtener al final del secador un producto con las características adecuadas.

Estos gases calientes pueden atravesar el secador debido a la succión que crea un ventilador centrífugo de tiro inducido de doble entrada (BM-20), situado a la salida del electrofiltro que posee cada secador individualmente.

Además, estos gases son capaces de arrastrar con ellos el 28 % del polvo que entra con el mineral o que se forma durante el proceso de secado, y que por lo general posee una granulometría de –0,074 mm, el cual será introducido al sistema de colección.

## 1.6.- Factores que determinan la eficiencia del secado en cilindros rotatorios

La eficiencia del proceso de secado depende de los siguientes factores: Características del mineral alimentado, tiempo de retención del mineral, velocidad del gas, temperatura del aire o gas, longitud del secador, pendiente del secador, capacidad de los levantadores del secador, velocidad de rotación del secador, número de levantadores, y otros factores.

**a)** Características del mineral alimentado

Aquí se consideran fundamentalmente la granulometría y la humedad, las cuales están íntimamente relacionados. Cuando se suministra un mineral muy fino, es mayor el contenido de humedad en la masa mineral por la amplia superficie de contacto superficial en la misma. Al ser una humedad elevada esto favorece la formación de "pelets", por lo que solamente se elimina la humedad superficial, por este motivo aumenta el consumo específico de petróleo y obliga a disminuir la cantidad de mineral alimentado al secador para obtener la humedad final deseada.

Un aumento de la granulometría en el mineral favorece el proceso de secado por ser generalmente menor la humedad interna de las rocas (11 a 12,5 %), además de existir un proceso de auto molienda que evita la formación de "pelets".

**b)** Tiempo de retención del mineral

Este factor determina el tiempo necesario de permanencia del mineral dentro del secador. Depende de 4 factores fundamentales: Longitud del secador (m); Inclinación del secador (m/m); Diámetro (m); Velocidad de rotación (rpm.); tipo de mineral y velocidad de los gases.

$$T = \frac{0.00783 \cdot L}{Sd \cdot D \cdot N} \qquad (1.1)$$

Donde:

*T*: tiempo; h.

*L*: longitud del secador; m.

*Sd*: inclinación del equipo; m/m.

*D*: diámetro del tambor; m.

*N*: velocidad de rotación del secador; rpm.

En este caso de estudio, el mineral permanece de 54 a 63 min, en el interior del tambor.

**c)** Velocidad de los gases

Este parámetro es de gran importancia y se calcula en base a la capacidad del secador.

Una velocidad muy alta provoca un alto consumo de petróleo para calentar suficientemente los mismos, un tiempo de residencia muy bajo dentro del secador, un insuficiente contacto entre gases y mineral y arrastre de partículas de mineral insuficientemente secadas.

Una velocidad muy baja de los gases produce recalentamiento de la cámara de combustión y del tambor secador y un secado insuficiente por sobresaturación de los gases con humedad.

La velocidad debe ser adecuada según cálculos y depende de la capacidad de evacuación de los gases (ventilación y abertura de los “dampers”).

**d)** Temperatura de los gases

Este parámetro se relaciona con la velocidad de ellos.

Gases muy calientes afectan los ventiladores y el sistema de colección de polvo.

Gases con baja temperatura producen un secado insuficiente, puede provocar condensación y deposición de humedad y mineral en conductos y colectores de polvo (filtros).

**e)** Diámetro del secador

El diámetro debe ser suficiente para que se forme una cortina de mineral que garantice un adecuado contacto entre los gases y el mineral y no tan grande para evitar exceso de consumo de energía para girar el secador.

**f)** Longitud del secador

El secador debe ser suficientemente largo para dar el tiempo de residencia necesario para obtener el grado de secado requerido.

En la primera mitad del secador la temperatura de los gases baja bruscamente al ponerse en contacto con el mineral frío y húmedo y se produce la evaporación de la mayor parte de la humedad. El resto del secador debe tener suficiente longitud para eliminar la humedad restante.

**g)** Pendiente del secador

Este factor se relaciona con la longitud. Es el que permite que el mineral avance en el interior del secador sin otros aditamentos.

En este caso de estudio secadores la inclinación es de 1/24 m/m (4,17 % ó 2º23').

**h)** Cantidad de levantadores del secador

Los levantadores garantizan un amplio contacto entre el mineral y los gases, al permitir la formación de cortinas de mineral en toda la sección del secador. Estos se proyectan en dependencia del tipo de mineral alimentado, su humedad y el diámetro del tambor. Para aumentar la capacidad de un secador de diámetro grande con un mineral húmedo y quebradizo se debe aumentar el número de levantadores.

**i)** Velocidad de rotación del secador

El mineral recogido por los levantadores debe ser descargado en forma de cortinas uniformes, para esto se necesita de una velocidad adecuada. Si la velocidad es pequeña el mineral rodará en forma paralela, no formándose cortinas. De igual forma si la velocidad es muy alta el mineral seguirá una trayectoria circular, lo que tampoco permitirá la formación de cortinas y traerá consigo un secado inadecuado.

**j)** Otras condiciones

Los secadores tienen que ser cargados de forma apropiada, ya que si se recarga de mineral este quedará sobre la parte superior y no será expuesto a las corrientes de gases calientes y la humedad de salida aumentará. De igual manera ocurre cuando el secador se carga por debajo de lo establecido, en este caso existe la posibilidad de que el material avance muy rápidamente hacia la descarga y por tanto pude que no se seque. Como en un quemador no se puede mezclar bien el aire con el combustible, es necesario aumentar la cantidad de aire, esto aumenta el volumen de gases de la

combustión, los cuales, por estar a una temperatura determinada, aumentan las pérdidas de calor, proporcionales al exceso de aire.

Para medir el exceso de aire, se debe obtener una muestra de los gases y medir en ellos el contenido de anhídrido carbónico ($CO_2$). En una combustión perfecta el contenido de $CO_2$ debe ser el 15,2% en volumen. El exceso de aire será por tanto más elevado cuando el porcentaje de $CO_2$ es menor.

Si la cantidad de aire es insuficiente, parte del carbono será parcialmente quemado, lo que se traducirá en pérdida por incombustión química, entonces existe la tendencia a aumentar la cantidad de aire al quemador para asegurar una combustión lo más completa posible, pero un exceso de aire produce, en general, una llama de color amarillo claro. La presencia de hollín se puede comprobar haciendo pasar cierta cantidad de los gases de la combustión, extraídos por una bomba, a través de un filtro de papel.

### 1.7- Principios generales del análisis de procesos mediante la simulación

La combinación de la computadora y los software profesionales conforman la simulación digital, que es una herramienta capaz de solucionar sistemas compuestos por numerosas variables, ecuaciones y parámetros de equipos. Actualmente se han obtenido experiencias útiles en la aplicación de estas técnicas con programas tales como: ANSYS, COSMOS DESIGN y MATLAB. La simulación presupone el conocimiento del comportamiento de los elementos del sistema y se utiliza cuando no es posible, o al menos no es económico, estudiar el sistema real directamente.

**Simulación:** es el estudio de un sistema mediante un modelo. Si se refiere a un modelo matemático se tendrá la simulación matemática, en general, es el estudio de un sistema, o parte de dicho sistema, mediante el trabajo del modelo matemático o del modelo físico.

**Modelo matemático**: es una representación simplificada de los aspectos del proceso real que está siendo investigado en términos de ecuaciones matemáticas u otras formulaciones de esta naturaleza que permiten llegar a resultados cuantitativos precisos.

Para construir un modelo matemático que represente el proceso bajo estudio se hace uso de los principios físicos y químicos así como de otras relaciones no fundamentales basadas en la experimentación para obtener las ecuaciones que constituyen el modelo. Estas ecuaciones son luego trabajadas para predecir qué efecto se logrará sobre el proceso al tomar los valores deseados en las variables de interés.

Para obtener el modelo matemático que represente el proceso que está siendo investigado es necesario seguir una trayectoria bien definida y desglosada en diferentes pasos adecuadamente ordenados los cuales constituyan un enfoque lógico y consistente. El tipo de estructura matemática se utilizará acorde al nivel de detalles del proceso que se representa, y debe ser el resultado de un compromiso entre la complejidad que tenga dicha descripción matemática al abarcar numerosos detalles del proceso y la simplicidad matemática requerida para un fácil y adecuado trabajo del modelo en su aplicación.

### 1.7.1- Método de Elementos Finitos aplicados a problemas térmicos

#### Antecedentes históricos

El desarrollo y éxito del método de Elementos Finitos se expande con el creciente desempeño de las computadoras digitales. En la antigüedad ya se habían empleado los “Elementos Finitos” para determinar un valor aproximado de $\pi$. Arquímedes usó ideas similares para determinar el área de figuras planas. Este hecho dio una premisa para el desarrollo del cálculo integral por Newton y Leibniz dos mil años después.

Walter Ritz (1878–1909), físico suizo fue el primero en formalizar el método de Elementos Finitos. Él propuso que las frecuencias de las líneas espectrales de los átomos podían ser expresadas por diferencias entre un relativamente pequeño número de “elementos”. Ritz desarrolló la formulación matemática del método de Elementos Finitos, con base en el cálculo variacional. El método de Ritz es también conocido como variacional o formulación clásica.

La incorporación del cálculo matricial al método de Elementos Finitos fue propuesta por el ingeniero ruso Boris G. Gallerkin (1871-1945). Gallerkin publicó sus primeros trabajos en base al método clásico durante su prisión en 1906 por orden del zar en la

Rusia prerrevolucionaria. En muchos textos rusos el método de Elementos Finitos de Gallerkin se conoce como método de Bubnov-Gallerkin. Él publicó un trabajo usando esta idea en 1915. El método también fue atribuido a Bubnov en 1913.

La aplicabilidad del método de Elementos Finitos fue detenida por lo extenso de los cálculos necesarios para resolver un sistema de un considerable número de elementos finitos. El desarrollo de los ordenadores digitales durante la década de 1950, permitió la aplicación del método de elementos finitos a la solución de ecuaciones diferenciales.

## 1.8- Conclusión del capítulo

- La literatura científica recoge numerosas investigaciones relacionadas con el secado convencional en cilindros rotatorios horizontales. En ellas se abordan, la modelación matemática.
- Se han desarrollado diversas investigaciones del proceso de secado del mineral laterítico, pero aún es insuficiente el número de trabajo que se destinan al estudio y la integración de los principales parámetros de trabajo de los secadores en las condiciones de explotación actuales de las empresas cubanas productoras de níquel.

# CAPÍTULO 2

## MATERIALES Y MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA INVESTIGACIÓN

### 2.1- Introducción

Hoy en dia el secado de mineral es un proceso mediante el cual se consume un elevado porciento de portadores energéticos y energía, en los secadores se seca todo el mineral extraído de la mina para reducirle el contenido de humedad con que llega. En este proceso industrial existen excesivas pérdidas de calor al medio ambiente a través de las paredes del secador, calcular estas pérdidas e incidir sobre los factores que permiten mitigarlas es unas de las tareas priorizadas de los operarios y administrativos de la planta.
Por lo tanto el **objetivo** del presente capitulo es:

Fundamentar las propiedades a investigar, establecer la metodología para determinar las pérdidas de calor en los secadores y definir la instrumentación adecuada para la obtención de los datos.

### 2.2- Instrumentos utilizados en la medición de los parámetros

Para la toma de los valores de los parámetros que indican el funcionamiento de la instalación, se emplearon los recursos puestos a disposición en el panel de control de la planta de preparación del mineral de la Empresa “Comandante René Ramos Latour”. En dicho panel se registran las mediciones de temperatura de los gases, presión de la cámara, temperatura de la superficie la cámara, la botella y el tambor rotatorio, así como otros valores referentes a los secadores. Además del empleo del panel de control se utilizo un pirómetro infrarrojo en los distintos puntos requeridos en los secadores rotatorios. En el caso de la temperatura de la superficie, que es la de mayor influencia a la hora de analizar las pérdidas de calor de los secadores, se empleo un termómetro de contacto.

### 2.3- Procedimiento de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor

Mediante el siguiente epígrafe se expone el procedimiento de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor por convección y radiación respectivamente. El

mismo se fundamenta en las leyes que rigen la transferencia de calor en cilindros rotatorios horizontales. Se debe hacer énfasis en que para este estudio no se realizaron los cálculos correspondientes a la transferencia de calor por conducción, debido a que no se cuenta en la industria con un instrumento capaz de medir las temperaturas del interior de los secadores; por lo que en el trabajo solo se analizan las pérdidas de calor desde las paredes de los cilindros hacia el exterior de los mismos.

### 2.3.1- Cálculo de las pérdidas por transferencia de calor

En la instalación de secado existen pérdidas de calor por convección y radiación, los flujos de calor deben determinarse para las diferentes secciones del equipo (cámara de paso, tambor secador y la botella), a continuación se relacionan las expresiones de cálculo fundamentales para el análisis de la transferencia de calor por convección y radiación.

**Cámara de paso**

En esta sección la convección es libre y el flujo de calor se determina por la ecuación 2.1, mientras que el calor por radiación se determina por la expresión 2.2.

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_0) \qquad (2.1)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_0^4) \qquad (2.2)$$

Donde:

$q_{conv}$ : flujo de calor por convección; W.

$q_{rad}$ : flujo de calor por radiación; W.

h: coeficiente de transferencia de calor por convección; $W/m^2$ K.

A: área de transferencia de calor; $m^2$.

$T_s$: temperatura de la superficie exterior del aislante térmico; K.

$T_0$: temperatura del medio ambiente; K.

$\varepsilon$: emisividad de la superficie del material aislante; adimensional.

$\sigma$: constante de Stefan-Bolztman; ($5{,}67 \times 10^{-8}$ $W/m^2$ $K^4$).

Luego las diferentes áreas que intervienen en el proceso de transferencia de calor en esta sección se calculan por las ecuaciones (2.3-2.6) mostradas a continuación.

$$A_0 = 2 \cdot (a \cdot h + a \cdot L + h \cdot L) \tag{2.3}$$

$$A_1 = \pi \cdot d_1^2 \tag{2.4}$$

$$A_2 = \pi \cdot d_2^2 \tag{2.5}$$

$$A = A_0 - (A_1 + A_2) \tag{2.6}$$

Donde:

a: ancho de la cámara de paso; m.

h: altura de la cámara de paso; m.

L: longitud de la cámara de paso; m.

$d_1$: diámetro del orificio 1; m

$d_2$: diámetro del orificio 2; m.

$A_0$: área total de la cámara de paso; $m^2$.

$A_1$: área del orificio del diámetro 1; $m^2$.

$A_2$: área del orificio del diámetro 2; $m^2$.

A: área de transferencia de calor en la cámara de paso; $m^2$.

El coeficiente de transferencia de calor por convección se calcula teniendo en cuenta el número de Rayleigh ($R_{al}$), el cual se determina por la ecuación 2.7.

$$R_{al} = G_r \cdot P_r = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_0) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \tag{2.7}$$

Donde:

$G_r$: número de Grashof; adimensional.

$P_r$: número de Prandls; adimensional.

g: aceleración de la gravedad; (9,81 $m/s^2$)

$\beta$: coeficiente de dilatación volumétrica; $K^{-1}$.

$\nu$: viscosidad cinemática del aire; $m^2/s$.

$\alpha$: coeficiente de difusividad térmica; $m^2/s$.

Los parámetros del fluido se buscan a la temperatura pelicular ($T_p$) en la Tabla A-4 del Incropera et al. (2003).

$$T_p = \frac{T_s + T_0}{2} \tag{2.8}$$

$$R_{al} = G_r \cdot P_r \tag{2.9}$$

El número de Nusselt ($N_{UL}$) se calcula por la expresión si $R_{al} > 10^9$

$$N_{UL} = \left[ 0{,}825 + \frac{0{,}387 \cdot R_{al}^{1/6}}{\left[ 1 + \left( 0{,}492 / P_r \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \tag{2.10}$$

Luego el coeficiente de transferencia por convección se determina por la ecuación 2.11:

$$h = \frac{N_{UL} \cdot k}{L} \tag{2.11}$$

Donde:

*k:* conductividad térmica del aire; W/m K.

Luego sustituyendo h, las respectivas áreas de transferencia de calor y los restantes parámetros en las ecuaciones 2.1 y 2.2 se obtiene el flujo de calor transferido por convección y radiación en la cámara de paso.

**Tambor secador**

La convección en esta sección es forzada, el área se calcula por la ecuación 2.12.

$$A = \pi \cdot D \cdot L \tag{2.12}$$

Donde:

A: área de transferencia de calor en el tambor secador; $m^2$.

D: diámetro del secador; m.

L: longitud del secador; m.

Excepto el número de Prandls; Prs (que se determina a la temperatura de la superficie), todas las propiedades se buscan a la temperatura del fluido en la Tabla A-4 del Incropera et al. (2003).

El número de Reynolds ($R_e$) se obtiene mediante la expresión:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} \tag{2.13}$$

Donde

V: velocidad del aire ambiente; m/s.

El número de Nusselt ($N_{UL}$) para esta sección del secador se determina por la expresión 2.14.

Se seleccionan los valores de los coeficientes C y m en la Tabla 7.4 del Incropera et al. (2003) en correspondencia con el número de Reynolds calculado.

$$N_{UD} = C \cdot R_e^m \cdot P_r^n \cdot \left( \frac{P_{r0}}{P_{rs}} \right)^{1/4} \tag{2.14}$$

Luego, al sustituir la ecuación 2.14 en la 2.15 se determina el coeficiente de transferencia por convección.

$$h = \frac{N_{UD} \cdot k}{D} \tag{2.15}$$

Sustituyendo la ecuación 2.15 y los parámetros físicos relacionados con el tambor secador en las ecuaciones 2.1 y 2.2 se obtiene el flujo de calor transferido por convección y radiación en esta sección.

**Botella**

Las pérdidas de calor y el coeficiente de transferencia de calor por convección en esta sección se calculan como en el tambor secador, pero el área de transferencia se diferencia, la misma se determina por:

$$A = \pi \cdot S \cdot D_m \tag{2.16}$$

Donde:

A: área de transferencia de calor en la botella; $m^2$.

S: generatriz del cono; m.

$d_1$: diámetro mayor; m.

$d_2$: diámetro menor; m.

$D_m$: diámetro medio; m.

El número de Reynolds se determina utilizando la expresión 2.13, pero considerando el diámetro asociado a esta sección, los coeficientes C y m se determinan de forma análoga a la sección anterior a partir del valor del número de Reynolds obtenido. El número de Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor por convección se calculan por las expresiones 2.14 y 2.15 respectivamente.

Luego las pérdidas de calor totales por transferencia de calor en el secador se obtienen sumando las pérdidas locales por convección y radiación en todas las secciones (cámara de paso, tambor secador y la botella) como se muestra en las ecuaciones 2.17 y 2.18.

**Pérdidas de calor total por convección**

$$Q_{Tp\ Convección} = Q_{PC\,(Cámara\ de\ paso)} + Q_{PC\,(Tambor\ secador)} + Q_{PC\,(Botella)} \tag{2.17}$$

**Pérdidas de calor total por radiación**

$$Q_{Tp\ Radiación} = Q_{PR\,(Cámara\ de\ paso)} + Q_{PR\,(Tambor\ secador)} + Q_{PR\,(Botella)} \tag{2.18}$$

El procedimiento de cálculo establecido en este epígrafe se resuelve para diferentes condiciones de explotación (representadas por los valores mínimos, medios y máximos

de los parámetros). Los resultados fundamentales de los cálculos realizados se exponen en el epígrafe 2.6, el análisis detallado para el valor promedio se refleja en el epígrafe 2.5, los restantes para los valores mínimos y máximos se exponen en los anexos 1 y 2 del trabajo.

## 2.4- Principales parámetros geométricos obtenidos en la instalación para la determinación de las pérdidas de calor

En la Tabla 2.1 se muestran los parámetros geométricos fundamentales que se emplearon en la determinación de las pérdidas de calor, los parámetros físicos del aislante térmico, así como los del aire, se relacionan en los anexos 1 y 2 en la misma medida en que se desarrollaron los cálculos.

**Tabla 2.1.** Parámetros geométricos fundamentales de las diferentes secciones

| **Parámetros de las diferentes secciones de los secadores** | **Sec.4** | **Sec.5** | **UM** |
|---|---|---|---|
| **Sección:** cámara de paso | | | |
| Ancho de la cámara de paso; a. | 6.53 | 6,614 | m |
| Altura de la cámara de paso; h. | 8.965 | 9.065 | m |
| Longitud de la cámara de paso; L. | 3.337 | 3,270 | m |
| Diámetro del orificio 1; $d_1$. | 3.038 | 3,030 | m |
| Diámetro del orificio 2; $d_2$. | 4.165 | 3,950 | m |
| **Sección:** tambor secador | | | |
| Longitud del tambor secador, L. | 40 | 40 | m |
| Diámetro del tambor secador, D. | 4,8 | 4,8 | m |
| **Sección:** botella | | | |
| Generatriz del cono; S. | 8 | 8 | m |
| Diámetro mayor; $d_{1.}$ | 5,222 | 5,222 | m |
| Diámetro menor; $d_{2.}$ | 4,8 | 4,8 | m |
| Diámetro medio; $d_{m.}$ | 5,01 | 5,011 | m |

Para la determinación de las pérdidas además de los datos anteriormente expuestos (Tabla 2.1), también se emplearon los valores correspondientes a la temperatura de la superficie exterior del aislante en la cámara de paso, el tambor secador y la botella, además de la temperatura del aire ambiente y su velocidad. Los valores utilizados en el cálculo se exponen en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Resultados del análisis estadístico descriptivo realizado.

| | | **Temperatura del aislante térmico en:** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **SEC.4** | **Velocidad del aire (m/s)** | **La cámara de paso (ºC)** | **El tambor secador (ºC)** | **La botella (ºC)** | **Temperatura del aire (ºC)** |
| **Mínimo** | 2,65 | 105 | 80 | 95 | 32 |
| **Medio** | 2,65 | 115 | 85 | 100 | 32 |
| **Máximo** | 2,65 | 125 | 90 | 105 | 32 |
| **SEC.5** | | | | | |
| **Mínimo** | 2,65 | 115 | 75 | 85 | 32 |
| **Medio** | 2,65 | 120 | 80 | 90 | 32 |
| **Máximo** | 2,65 | 125 | 85 | 95 | 32 |

## 2.5- Análisis de fenómenos térmicos con el uso del ANSYS

En los análisis térmicos se calcula la distribución de temperatura y las cantidades térmicas relacionada en un sistema o componente. Las cantidades térmicas típicas de interés son:

- Las distribuciones de temperaturas.
- La cantidad de calor pérdida o ganada.
- Los gradientes térmicos.
- Los flujos térmicos.

Las simulaciones térmicas juegan un papel importante en el diseño de muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo la combustión interna en motores, turbinas,

intercambiadores de calor, sistemas de tuberías y componentes electrónicos. En muchos casos los ingenieros siguen un análisis térmico con un análisis de tensiones para calcular las tensiones térmicas (es decir, tensiones causadas por expansiones térmicas o contracciones).

### 2.5.1- Modelos térmicos en ANSYS

Sólo los programas ANSYS: Multi-físico, Mecánico, Profesional y Fortran soportan los análisis térmicos.

La base para el análisis térmico en ANSYS es una ecuación de balance de calor obtenida a partir de los principios de conservación de la energía. La solución se obtiene aplicando el método de Elementos Finitos para calcular las temperaturas nodales y obtener otros parámetros térmicos.

El programa ANSYS contiene los tres modos primarios de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

**Convección**

Se especifica la convección como una carga superficial aplicada sobre un elemento sólido o elementos de coraza. Para el cálculo es necesario especificar el coeficiente de convección pelicular y la temperatura en la superficie, entonces ANSYS calcula la transferencia de calor a través de esa superficie. Si el coeficiente pelicular depende de la temperatura, se especifica una tabla de temperaturas junto con los valores correspondientes del coeficiente pelicular.

Para el uso del método de Elementos Finitos en la convección con elementos de conducción o en el caso en que no se conoce la temperatura del fluido, ANSYS ofrece un elemento de convección nombrado PLANE55 y LINK34. Además se puede usar el FLOTRAN CFD para simular detalles del proceso de convección, tales como las velocidades del fluido, valores locales del coeficiente pelicular y el flujo de calor, y las distribuciones de temperaturas tanto en fluidos como en las regiones sólidas.

**Radiación**

ANSYS puede resolver problemas de radiación, que son no lineales, de cuatro maneras:

- Usando el elemento, LINK31.
- Usando efecto de superficie SURF151 para los modelos en 2D ó SURF152 para los modelos 3D).
- Generando una matriz de radiación con AUX12 y usándolo como un súper elemento en un análisis térmico.
- Usando el método solver para la Radiosidad.

Además de los tres modos de transferencia de calor con el empleo del ANSYS se pueden tratar otros problemas térmicos relacionados con el cambio de fase.

## 2.6- Principios de flujo de calor Convección y Radiación

La ley de Fourier en el análisis térmico se usa para relacionar el vector flujo de calor a los gradientes térmicos.

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \tag{2.19}$$

Donde:

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & K_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & K_{ZZ} \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

$[D]$: Matriz de conductividad

{q}: El vector flujo de calor

$K_{XX}$, $K_{YY}$, $K_{ZZ}$: conductividad térmica del elemento en las direcciones **x, y, z,** respectivamente (W/m·K)

T: temperatura, T(x,y,z,t)

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix}$$ Vector operador (2.21)

Combinando la ley de Fourier con la primera ley de la termodinámica se obtiene:

$$\rho \cdot c\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{V\}^T \{L\}T\right) = \{L\}^T \left([D]\{L\}T\right) + \ddot{q}$$ (2.22)

Donde:

P: densidad, kg/m$^3$

C: calor específico, kJ/kg·K

t: tiempo, s

$$\{V\} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix}$$ : Vector velocidad para el transporte (2.23)

$\dddot{q}$ : Vector flujo de calor generado por unidad de volumen

Expresando la ecuación 2.22 en su forma más común se obtiene:

$$\rho \cdot c\left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_X \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) =$$

$$\ddot{q} + \frac{\partial}{\partial_x}\left(K_X \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_Z \frac{\partial T}{\partial_Z}\right)$$ (2.24)

**Radiación**

El intercambio de energía radiante entre las superficies vecinas de una región o entre una región y los alrededores pueden producir grandes efectos en el análisis general de la transferencia de calor. Aunque los efectos de la radiación en la transferencia de calor

generalmente influyen a través de las condiciones límites, la interrelación se hace más fuerte debido a la dependencia no lineal de la radiación de la temperatura de la superficie.

Para un sistema de dos superficies la transferencia de calor se expresa por la siguiente expresión:

$$Q_i = \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot F_{ij} \cdot A_i \left( T_i^4 - T_j^4 \right) \qquad (2.25)$$

Donde:

σ: constante de Stefan-Boltzman, $W/m^2 \cdot K^4$

$\varepsilon_i$: emisividad efectiva, adimensional

$F_{ij}$: factor de visión por radiación, adimensional

$A_i$: área de la superficie i, $m^2$

$Q_i$: pérdida de energía de la superficie i, W

$T_i$, $T_j$: temperatura absoluta en la superficie i y j, respectivamente, K

## 2.7- Condiciones de fronteras a tener en cuenta en el análisis térmico

**1. Se conoce la temperatura que actúa sobre la superficie $S_1$.**

T = T *

Donde T * es la temperatura superficial, K

**2. Se conoce el flujo de calor que actúa sobre la superficie $S_2$.**

$$[q]^T \{\eta\} = -q^* \qquad (2.26)$$

Donde:

{η}: vector normal externo unitario

q*: flujo de calor conocido, W

**3. Se conoce la transferencia de calor por convección superficial actuando sobre la superficie $S_3$ (Ley de Newton de enfriamiento):**

$$\{q\}^T \{\eta\} = h_f (T_S - T_{B)} \tag{2.27}$$

Donde:

hf: Coeficiente pelicular, W/m2·K. Evaluado a (TB + TS)/2 a menos que se especifique otra condición para el elemento.

TB: Temperatura del fluido adyacente, K

TS: Temperatura en la superficie del modelo, K

**2.8- Notación del flujo de calor en matrices**

Como se planteó anteriormente la variable T varía en el espacio y el tiempo. Esta dependencia está expresada como:

$$T = \{N\}^T \{T_e\} \tag{2.28}$$

Donde:

T = T(x,y,z,t): temperatura, K

{N} = {N(x,y,z)}: funciones de forma del elemento

{Te} = {Te(t)}: vector de temperatura nodal del elemento

Así la derivada del tiempo pueden escribirse como:

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^T \{T_e\} \tag{2.29}$$

En esta última ecuación tiene la misma forma de T:

$$\delta T = \{\delta T_e\}^T \{N\} \tag{2.30}$$

La combinación {L} T se define como:

$$\{L\}T = [B]\{T_e\} \tag{2.31}$$

Donde:[B]={L}{N}T

Ahora, el estado variacional y la notación del flujo de calor en matrices puede expresarse por la ecuación:

$$\left[C_e^t\right]\left\{\dot{T}_e\right\}+\left(\left[K_e^{tm}\right]+\left[K_e^{\ tm}\right]+\left[K_e^{tc}\right]\right)\left\{T_e\right\}=\left\{Q_e\right\}+\left\{Q_e^c\right\}+\left\{Q_e^g\right\} \quad (2.32)$$

Donde:

$\left[C_e^t\right]=\rho\int_{vol} c\{N\}\{N\}^T d(vol)$: Matriz del calor específico del elemento

$\left[K_e^{tm}\right]=\rho\int_{vol} c\{N\}\{V\}^T[B]d(vol)$: Matriz de transporte de masa del elemento

$\left[K_e^{tb}\right]=\int_{vol}[B]^T[D][B]d(vol)$: Matriz de difusión en el elemento

$\left[K_e^{tc}\right]=\int_{S_3} h_f\{N\}\{N\}^T d(S_3)$: Matriz de convección superficial en el elemento

$\left\{Q_e^f\right\}=\int_{S_2}\{N\}\cdot q^* \cdot d(S_2)$: Vector de flujo másico en el elemento

$\left\{Q_e^c\right\}=\int_{S_3} T_B\cdot h_f\{N\}\cdot d(S_3)$: Vector flujo de calor para la convección superficial del elemento

$\left\{Q_e^g\right\}=\int_{vol}\ddot{q}\{N\}d(vol)$: Generación de calor en el elemento

Comentarios sobre las modificaciones anteriores:

**1.** $\left[K_e^{tm}\right]$ no es simétrico

**2.** $\left[K_e^{tc}\right]$ Se calcula como se definió anteriormente, sólo para SOLID90. Todos los otros elementos usan una matriz diagonal, con las condiciones diagonales definidas por el vector $\int_{S_3} h_f\{N\}\cdot d(S_3)$.

**3.** $\left[C_e^t\right]$ es frecuentemente en la diagonal.

Evaluación de flujo de calor

El flujo de calor por convección como variable de salida puede calcularse por la expresión:

$$q^C = h_f\left(T_S - T_B\right) \quad (2.33)$$

Donde:

$q^c$: flujo de calor por unidad de área debido a la convección, $W/m^2$

$h_f$: coeficiente pelicular, $W/m^{2\cdot}K$

$T_S$: temperatura en la superficie del modelo, K

$T_B$ : temperatura media del fluido adyacente, K

**2.9- Método de la matriz en el análisis de la radiación**

El método de la matriz en la radiación para un sistema de dos superficies radiando puede expresarse como:

$$Q_i = \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot F_{ij} \cdot A_i \left(T_i^2 + T_j^2\right)\left(T_i + T_j\right)\left(T_i - T_j\right) \qquad (2.34)$$

También se puede emplear la ecuación 2.31.

$$Q_i = K^{'}\left(T_i + T_j\right) \qquad (2.35)$$

Donde:

$$K^1 = \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot F_{ij} \cdot A_i \left(T_i^2 + T_j^2\right)\left(T_i + T_j\right)$$

$K^1$ no puede calcularse directamente ya que es una función de las variables desconocidas Ti y Tj. Las temperaturas a partir de iteraciones previas se usan para calcular $K^1$ y la solución se obtiene varias veces.

**2.10- Conclusiones del capítulo**

- Mediante este capítulo quedó establecido el procedimiento de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor en los secadores de la empresa “Comandante René Ramos Latour”, el mismo se fundamenta en las leyes que rigen la transferencia de calor por convección y radiación por el exterior de cilindros horizontales.
- Se establecieron los fundamentos teóricos más importantes para la simulación numérica con el empleo del método de Elementos Finitos de procesos térmicos.

# CAPÍTULO 3

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

### 3.1- Introducción

El secado tiene gran influencia en el cómputo energético final de una determinada estructura económica industrial. Ellas deben ser técnicamente racionales, económicamente factibles y ambientalmente viables, es por ello que todos los trabajos investigativos ejecutados deben considerar el análisis de los resultados fundamentales basados en estos criterios. En este caso se analiza el secado empleando la metodología contenida en el texto de transferencia de calor Incropera (2003) y el Software ANSYS 12.1.

En tal sentido el **objetivo** del presente capítulo es:

Valorar los resultados obtenidos en la investigación considerando los criterios técnicos, económicos y ambientales más importantes relacionados con el estudio realizado.

### 3.2- Análisis de los resultados de la investigación

Los resultados del diagnóstico térmico muestran la existencia de elevadas pérdidas de energía en forma de calor, en general este comportamiento se debe a la inexistencia de aislamiento térmico en el secador, el cual no impide el paso del flujo de calor desde el interior del tambor al medio ambiente.

Otro aspecto importante que se debe destacar es el hecho de que los operarios en la planta dediquen toda su atención a las especificaciones de calidad del mineral secado (humedad final) aspecto que no ocurre con los restantes factores que influyen sobre el proceso de secado y en general sobre la eficiencia térmica de los secadores.

#### Comportamiento de las diferentes pérdidas de calor obtenidas

En este epígrafe se expone un resumen de los principales resultados obtenidos en la determinación de las pérdidas de calor (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1.** Resultados más importantes en las secciones de los secadores.

| **Parámetros calculados** | **Variantes calculadas** | | | **UM** | **Ec.** |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Mínimo** | **Medio** | **Máximo** | | |
| | **Sección:** cámara de paso | | | | |
| Flujo (pérdida) de calor por convección; $q_{conv}$ . | 0,079 | 0,08 | 0,146 | *W* | *2.1* |
| Flujo (pérdida) de calor por Radiación; $q_{rad}$ . | 2,526 x $10^4$ | 2.741 x $10^4$ | 2,965 x $10^4$ | *W* | *2.2* |
| | **Sección:** tambor secador | | | | |
| Flujo (pérdida) de calor por convección; $q_{conv}$ . | 0,109 | 0.12 | 0,176 | *W* | *2.1* |
| Flujo (pérdida) de calor por Radiación; $q_{rad}$ . | 4,513 x $10^4$ | 5.162 x $10^4$ | 5,839 x $10^4$ | *W* | *2.2* |
| | **Sección:** botella | | | | |
| Flujo (pérdida) de calor por convección; $q_{conv}$ . | 3,674 | 4,022 | 4,928 | *W* | *2.1* |
| Flujo (pérdida) de calor por Radiación; $q_{rad}$ . | 1,219 x $10^4$ | 1,366 x $10^4$ | 1,52 x $10^4$ | *W* | *2.2* |
| | **Pérdidas de calor totales en los secadores** | | | | |
| Pérdidas de calor | **Mínimo** | **Medio** | **Máximo** | **UM** | **Ec.** |
| Por convección | 3,674 x $10^4$ | 4,022 x $10^4$ | 4,928 x $10^4$ | *W* | *2.17* |
| Por radiación | 8,258 x $10^4$ | 9,269 x $10^4$ | 1,032 x $10^5$ | *W* | *2.18* |

Al valorar el comportamiento de las pérdidas de calor por convección en la cámara de paso (tabla 3.1), se observa un crecimiento lógico y esperado, pero se destaca un incremento brusco ente los valores obtenidos para los parámetros mínimos y medios, el mismo puede estar dado por las variaciones que experimentan los parámetros considerados, para el cálculo de las pérdidas de calor.

Las pérdidas de calor por convección en el tambor secador y la botella (tabla 3.1) muestran valores muy diferentes, en todos los casos en la botella son mayores debido al perfil térmico que se genera producto de la combustión del combustible, en esta zona los gradientes de temperatura son superiores, lo cual generan pérdidas de calor elevadas.

En la tabla 3.1 también se observa que las pérdidas de calor por radiación muestran comportamientos estables para los diferentes valores analizados en las diferentes secciones, excepto en la botella que se produce un aumento brusco para los valores máximos. En general el valor perdido por radiación es inferior que el perdido por convección, debido a que el último depende significativamente de la velocidad del aire.

El desarrollo del procedimiento de cálculo íntegramente esta en el anexo 1, siguiendo los pasos establecido es dicho anexo se determinan las pérdidas de calor para el resto de las variantes calculadas.

### 3.2.1- Procedimiento de análisis del esquema de secador cilíndrico rotatorio de la empresa “Comandante René Ramos Latour”

#### Modelo geométrico

El modelo geométrico, con una configuración básica se muestra en la figura 3.1, en el referido modelo se simplifican varios aspectos como son los levantadores y flujo de mineral, debido principalmente a que la situación problemática que se evalúa es la transferencia de calor desde la superficie al ambiente.

#### Mallado

Para definir la distribución de los nodos y elementos se establece como material patrón del paquete de Ansys 12.1; Thermal Mass; Grupo: Solid; tipo definido Brick 8 node 70 (ver figura 3.2)

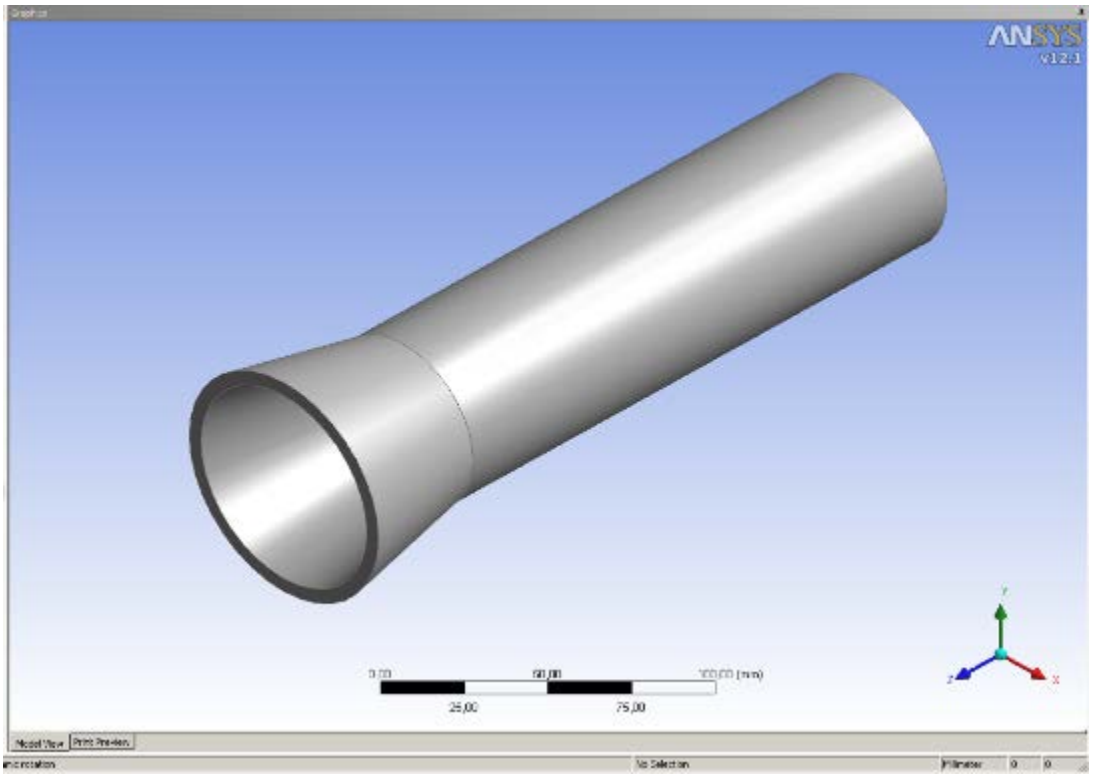



**Figura 3.1.** Modelo geometrico básico del secador cilíndrico rotatorio.

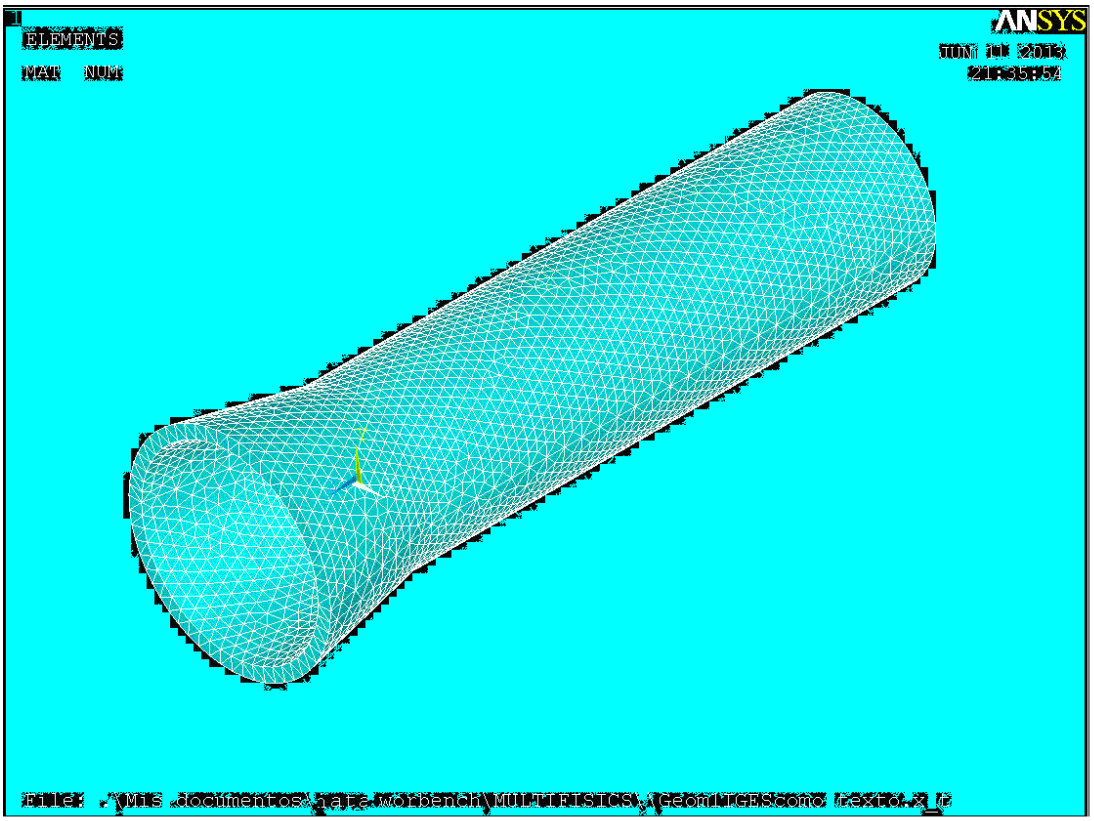



**Figura 3.2.** Mayado del secador cilíndrico rotatorio.

**Análisis de los resultados de la simulación por el método de Elementos Finitos utilizando Ansys 12.1**

En esta investigación se llevaron a cabo simulaciones de un enfriador de mineral en tres dimensiones. Los datos que se utilizaron para efectuar las mismas son los actuales de operación en dicha planta, los mismos aparecen reflejados a continuación en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Datos que se utilizaron en la simulación

| | |
|---|---|
| Longitud del enfriador (botella, tambor) | 49 m |
| Espesor del secador cilíndrico | 6 mm |
| Densidad del material del secador cilíndrico | 7620 kg/m$^3$ |
| Emisividad del material del secador cilíndrico | 0,22 |
| Coeficiente de transferencia de calor por convección para la sección de la botella | 7,556 W/m$^2$*K |
| Coeficiente de transferencia de calor por convección para la sección del tambor | 5,878 W/m$^2$*K |
| Conductividad térmica de del material de la sección de la botella | 27,3 W/m*K |
| Conductividad térmica de del material de la sección del tambor | 16,7 W/m*K |

**Interpretación de los resultados**

La figura 3.3 representa la simulación en tres dimensiones del proceso de transferencia de calor que ocurre en los secadores cilíndricos de mineral laterítico de la empresa “Comandante René Ramos Latour”. Observándose como el secador experimenta variación de su temperatura en aproximadamente 700 ºC, entrando al secador 850 ºC aproximadamente y saliendo a 150 ºC. Se perciben también las isotermas que describen el proceso de transferencia de calor desde la entrada del mineral a la botella del secador, hasta la salida, toda esta distribución nodal de temperatura está definida

fundamentalmente por el mecanismo de transmisión de calor por conducción que se manifiesta entre la entrada y salida del mineral laterítico.

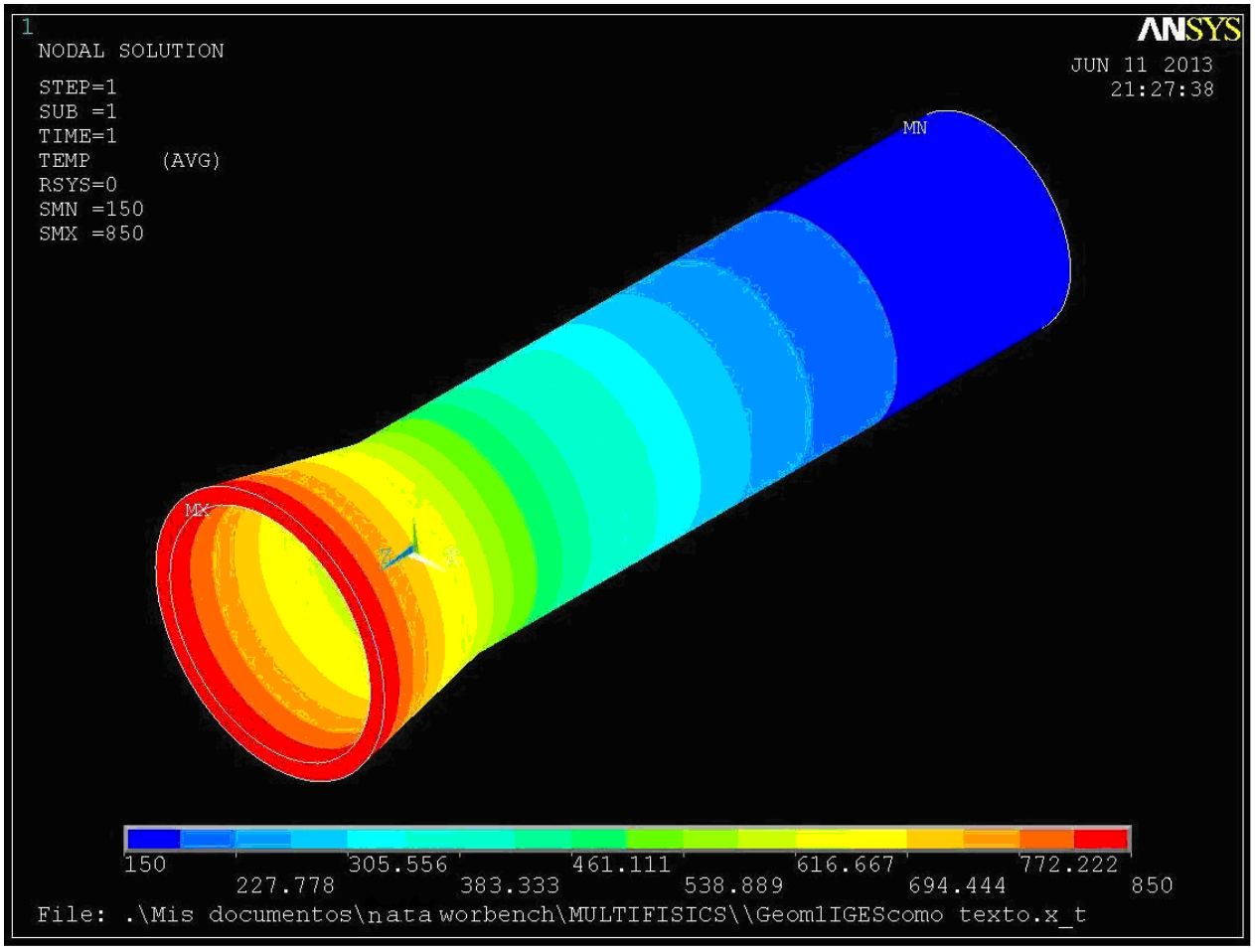
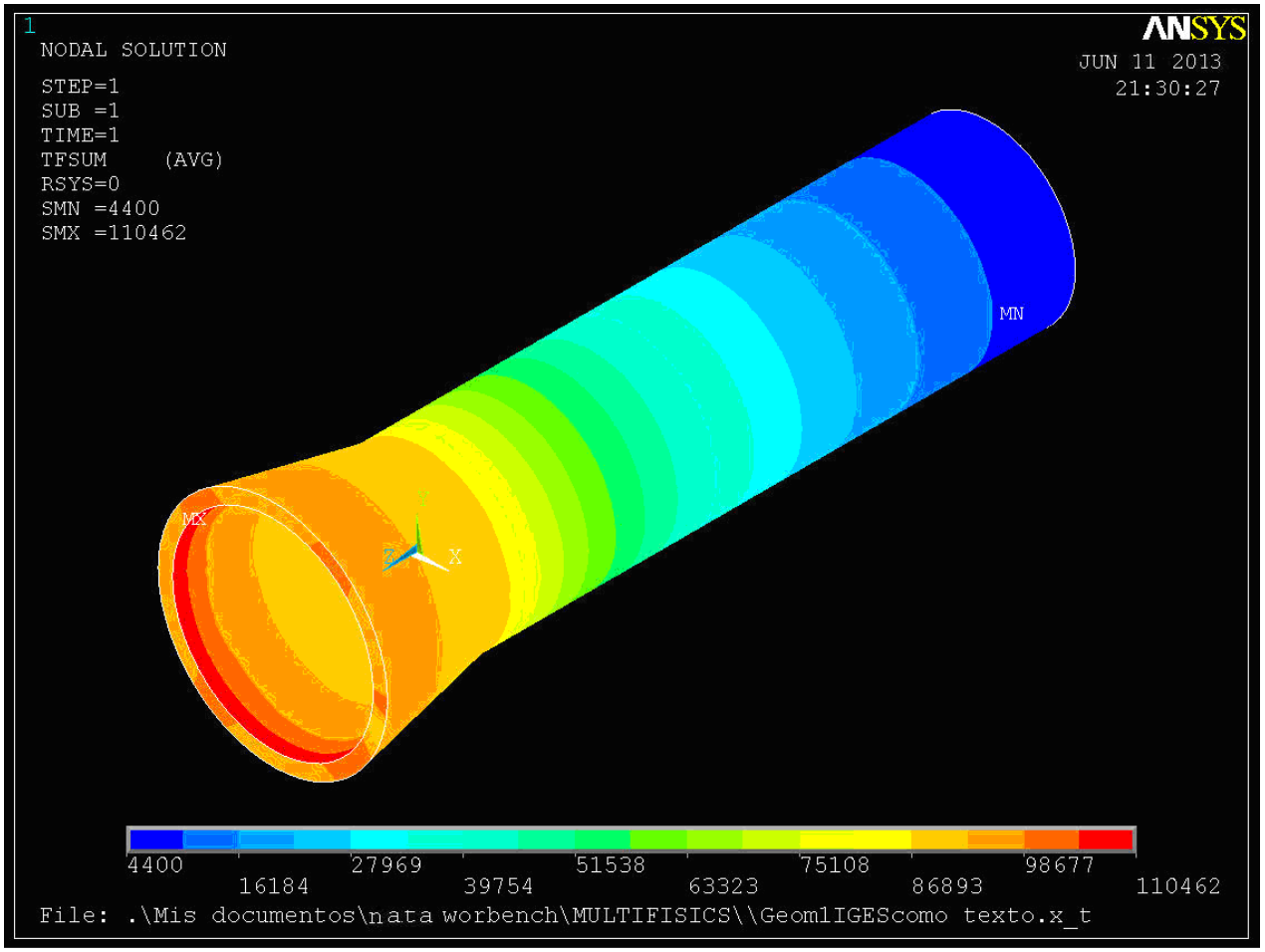



**Figura 3.3.** Distribución de la temperatura durante el proceso de secado en tambores cilíndricos

### Análisis del flujo de calor

Para el análisis del flujo de calor se realizó en 3D, siguiendo la misma tendencia de la distribución de temperaturas, el flujo de calor se comporta de manera descendente a medida que se avanza longitudinalmente hacia la descarga del mineral. En este caso se ponen de manifiesto dos modos de transmisión de calor por convección y por radiación.

**Figura 3.4**. Flujo de calor en el secador cilíndrico rotatorio




### 3.2.2- Ventajas y desventajas de la aplicación del método de Elementos Finitos

El método de Elementos Finitos permite a los ingenieros obtener información de objetos de formas complicadas bajo casi cualquier carga inimaginable (cargas puntuales, de presión, térmicas, fuerzas inerciales, cargas dependientes del tiempo, entre otras). Permite resolver problemas en estado estacionario o dependientes del tiempo, lineales o no lineales: Se pueden manejar materiales especiales: no homogéneos ortotrópicos, anisotrópicos. Se pueden además considerar efectos especiales sobre los materiales: plasticidad, propiedades dependientes de la temperatura. A nivel empresarial las ventajas del método son notorias: la etapa de desarrollo de un producto se acorta, se pueden identificar problemas de diseño antes de fabricar un producto, se reducen las etapas de prueba y error en el diseño de un nuevo producto, entre otras.

La principal limitación del método de Elementos Finitos radica en que la precisión de los resultados depende de la densidad de elementos utilizados. En análisis estructurales, cualquier región con alta concentración de esfuerzos debe ser cuidadosamente analizada mediante un enmallado suficientemente fino para obtener resultados confiables.

### 3.3 -Valoración económica

Como se puede apreciar en la Tabla 3.3 el consumo de combustible horario del secador es 1,600 y 1,800 respectivamente, el gasto económico asociado al mismo asciende a 481,49 CUC.

Para ilustrar con mayor claridad las cuantiosas sumas que el país debe erogar para la compra de combustible el análisis se hace extensivo al período Enero - Mayo, se escogen estos meses porque fue el tiempo en que se desarrolló la investigación.

Los resultados mostrados en la Tabla 3.3 indican la importancia que tienen estos equipos en la empresa, debido a que los mismos son considerados puestos clave para el ahorro de combustible. Al extender el mismo análisis a todos los secadores (4) que trabajan de forma continua en la empresa y considerando que consumen una cantidad de combustible equivalente, entonces el gasto económico por consumo de combustible para los meses analizados sería de 5 932 727,184 CUC.

**Tabla 3.3.** Calor total ingresado por el combustible al secador.

| No. | Indicadores | Secador 4 | Secador 5 |
|---|---|---|---|
| 1 | Consumo de combustible (t/h) | 1,600 | 1,800 |
| 2 | Importe (CUC/h) | 770,384 | 866,682 |
| 3 | Consumo de combustible (t/día) | 38,4 | 43,2 |
| 4 | Importe (CUC/día ) | 18489,216 | 20800,368 |
| 5 | Consumo de combustible (t/mes) | 1152 | 1296 |
| 6 | (CUC/mes) | 554676,48 | 624011,04 |
| 7 | Consumo de combustible (t/5 meses) | 5798,4 | 6523,2 |
| 8 | Importe (CUC/5 meses ) | 2791871,616 | 3140855,568 |

Estos elevados consumos de combustibles se pueden mitigar disminuyendo las pérdidas de calor al medio ambiente, para ellos sería necesario implementar algunas de las acciones que se describen en este trabajo u otras que al efecto resulten,

considerando que con la aplicación de estas solo se reduce el consumo de combustible en 0,1t/h los beneficios serían alentadores. El análisis económico para la referida disminución en el consumo de combustible se refleja en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Análisis económico para una disminución del consumo de combustible en 0,1t/h

| No. | Indicadores | Secadero 4 | Secadero 5 |
|---|---|---|---|
| 1 | Consumo de combustible (t/h) | 1,500 | 1,700 |
| 2 | Importe (CUC/h) | 722,235 | 818,533 |
| 3 | Consumo de combustible (t/día) | 36 | 40,8 |
| 4 | Importe (CUC/día ) | 17333,64 | 19644,792 |
| 5 | Consumo de combustible (t/mes) | 1080 | 1224 |
| 6 | (CUC/mes) | 520009,2 | 589343,76 |
| 7 | Consumo de combustible (t/5 meses) | 5436 | 6160,8 |
| 8 | Importe (CUC/5 meses ) | 2617379,64 | 2965978,4 |

## 3.4- Principales problemas ambientales detectados en la planta

- La zona de preparación de mineral (depósito de homogenización, transportadores de banda, hasta la sección de molinos), constituyen áreas de contaminación por polvo.
- Los gases que salen de los electrofiltros de cada secador contienen CO (0,4%) y $SO_2$ y aunque cumplen las normas deben ser controlados en ese nivel como máximo mediante un monitoreo periódico. En estos momentos están presentado fallas y los secadores están directamente a la atmósfera.
- El agua en los pisos de los secadores es enviada a la canalización (contienen sólidos y grasas).
- En el área de dosificación y mezclado de petróleo existe una fuente de contaminación por derrame y vaporización.
- El sistema de transporte traslada el mineral secado caliente y posee un sistema de aspiración en la descarga de una correa a otra, pero no es eficiente. La recogida de polvo derramado se realiza manualmente (hay gran cantidad de polvo en suspensión).

- En ocasiones se supera la norma de concentración de polvo (30 mg de polvo/$m^3$), por esto se deben realizar determinaciones de polvo en la atmósfera en el área de trabajo.

**Influencia del polvo en el medio ambiente**

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. Entre los efectos que pueden tener sobre los materiales están:

**Abrasión:** realizadas por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).

**Ataque químico:** puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente, tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

Los efectos que produce sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas en grandes cantidades. Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro notable para la salud.

Sin embargo cuando se habla del organismo humano, la situación se torna aún más preocupante, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por dos vía:

- Inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias.
- Absorción de polvos a través de la piel.

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 µm 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 µm 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 al las partículas menores de 0,5 µm, ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas de 0,01 a 0,1 µm 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.

**Influencia del ruido en el medio ambiente**

Las emisiones continuas de ruido es uno de los impactos directos que afecta al hombre en su medio laborar. El origen del mismo es el funcionamiento continuo de equipos de grandes dimensiones, que como resultado de su operación emiten determinados niveles de ruido que alcanzan valores muy intensos en algunas zonas de la instalación.

La presencia del ruido es unos de los elementos que más afectan las condiciones de trabajo en el ambiente laboral incidiendo directamente sobre la salud física y mental de los trabajadores y tributa a la aparición de las enfermedades profesionales asociadas a este fenómeno fundamentalmente cuando no se cuenta con los medios de protección individuales.

La afectación directa de este impacto produce lesiones en el oído interno destruyendo las células ciliadas del órgano de corti, dando lugar a la hipoacusia neurosensorial pura de percepción, con la disminución de los niveles de audición tanto por vía ósea como

aérea, la cual además es una lesión irreversible y progresiva dependiendo especialmente de la intensidad y el tiempo de exposición.

Estas afectaciones producen efectos indirecto y negativos como el incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo cardiaco, la contracción de los capilares de la piel, el incremento del metabolismo, la lentitud de la digestión, las afectaciones al sueño y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental fundamentalmente.

**Medidas para la protección del medio ambiente durante el secado del mineral**

En la planta de preparación de mineral se expulsa a la atmósfera polvo de mineral proveniente de la limpieza de gases. A la chimenea de 140 m de altura y 6 m de diámetro se descargan los gases provenientes de los secadores, después de pasar por el sistema de purificación mecánico y electroestático (ciclones y electrofiltros). Los gases que se expulsan a la atmósfera contienen $CO_2$, $SO_2$, $N_2$, $O_2$, y vapor de agua, el contaminante principal es el polvo a razón de 40,55 a 74,4 g/seg. Para eliminar los problemas ambientales se proponen las siguientes medidas:

1. Construcción de transportadores de enlace entre recepción y trituración y la planta de secador.
2. Techado y reparación de los electrofiltros según proyecto de mantenimiento.
3. Limpieza de los canales de drenaje.
4. Limpieza de la canalización fluvial.
5. Aprovechamiento de los gases calientes de horno a la cámara de combustión, tal como se realiza en la Rene Ramos Latour.
6. Instalación de un nuevo sistema de combustión para el secado de mineral (cámara Voltón).
7. Instalación de tarjetas de control automatizado en los electrofiltros, mejorando la eficiencia de estos.
8. Proyecto para el tratamiento de los residuales líquidos y restablecimiento del sistema por proyecto original.

### 3.5- Otras consideraciones

Teniendo en cuenta que la productividad de la planta debe seguir incrementándose y que la misma incidirá significativamente en los parámetros fundamentales que determinan la eficiencia térmica de los secadores se relacionan algunas de las acciones que se pueden realizar con el fin de mejorar la eficiencia térmica y con ello disminuir las pérdidas de calor, las mismas se exponen a continuación:

- Implementar un aislamiento para los secadores, esto haría posible un mayor aprovechamiento del calor en el interior de los secadores y reduciría las pérdidas de calor por convección y radiación al medio ambiente.
- Garantizar un tiempo de retención adecuado para la productividad presente en el secador, esto posibilita el intercambio de calor entre los gases y el mineral de forma racional, ya que el tiempo de exposición sería el apropiado de acuerdo con la cantidad de mineral contenida en el secador.
- Regular los flujos de aire y gases, con ello se mejora la eficiencia de la combustión dentro de la cámara del secador lo que permite un mayor tiempo de permanencia de los gases creando un perfil térmico apropiado en el equipo y con ello se intensifica la transferencia de calor hacia el mineral.

### 3.6- Conclusiones del capítulo

- El gasto económico por concepto de consumo de combustible asociado a los secadores analizados asciende a 5 932 727,184 CUC para los cinco meses considerados.
- Las simulaciones muestran el comportamiento de la temperatura a lo largo de los secadores cilíndricos rotatorios. El secador experimenta una variación de su temperatura, entrando a la botella a unos 850 ºC y saliendo del tambor rotatorio a una temperatura de 150 ºC aproximadamente.

## CONCLUSIONES GENERALES

- El gasto económico por concepto de consumo de combustible asociado a los secadores analizados asciende a 5 932 727,184 USD para los cuatro meses considerados.
- Se han desarrollado diversas investigaciones del proceso de secado del mineral laterítico bajo parámetros controlados a nivel mundial enfocados, fundamentalmente, a la modelación matemática de materiales con características diferentes al mineral laterítico. En el caso de Cuba aún es insuficiente el número de trabajo que se destinan al estudio y la integración de los principales parámetros de trabajo de los secadores en las condiciones de explotación actuales de las empresas cubanas productoras de níquel.
- Las simulaciones muestran el comportamiento de la temperatura a lo largo de los secadores cilíndricos rotatorios. El secador experimenta una variación de su temperatura, entrando a la botella a unos 850 ºC y saliendo del tambor rotatorio a una temperatura de 150 ºC aproximadamente.

## RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


**1.** Boizan, M. *Macrocinética del secado de Bagazo*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1991.145p.

**2.** Hernández, J.; P. Quinto. *Aplicación del modelo de Kowalski al secado de Madera de Abeto.* En: VII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. México DF. Noviembre, 2003a.

**3.** Hernández, J.; P. Quinto. *Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso*. *Científica,* 2005, 9(2): 63-71.

**4.** Huang, C. *Multi–Phase moisture transfer in porous media subjected to temperature gradient*. Int .J.Heat Mass Transfer 22: 295-307.1979.

**5.** Iglesias, M. *Termotecnia. Principios de Termodinámica*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1990. 2 t.

**6.** Incropera, F.; D. De Witt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003. 3 t.

**7.** Informe económico anual de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Moa, 2006.

**8.** Kallel, F.; N. Galanis; B. Perrin; R. Javelas. *Effects of Moisture on temperature during drying of consolidated porous materials*. J. Heat Transfer, ASME Trans, 1993.

**9.** Kasatkin, A. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1987. 2 t.

**10.** Mora, E. *Establecimiento de las normas de consume de combustible mediante un balance térmico y de masa de la planta de preparación de mineral*. Trabajo de Diploma. ISMMM, Moa. 1999. 41p.

**11.** Moya, Y. *Determinación de las pérdidas de calor en los secaderos convencionales de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Tesis de Ingeniería. ISMMM. 2008. 75 h.

**12.** Muregesan, K.; N. Seetharamu. *A one dimensional analysis of convective drying of porous materials*. Heat and Mass Transfer 32: 81-88. Springer – Velag .1996.

**13.** Myklestad, O. *Theory in the Design of Dryers*. Chem Eng Progress Symp Series, 59):138-144, 1963b.

**14.** Novoa, R.; M. Boizán. *Secado de Zeolita a escala de laboratorio (II)*. *Revista Tecnología Química*. Santiago de Cuba, No.1: 37-32, 1995.

**15.** Oliveira, S.; C. Partiti; J. Enzweiler. *Ocherous laterite: a nickel ore from Punta Gorda*, Cuba. *Journal of South American Earth Sciences*, 2001, 1(14): 307-317.

**16.** Page, N.; D. Bisset; G. Daly; E. Kisi. *Ore cooler evaluation. A report for Prior Industries Asutralia Pty. Ltd. The University of Newcastle research associates limited*. Department of Mechanical Engineering at the University of Newcastle, Autralia, 1998. 17p.

**17.** Papadakis, S.: *Scale–up of cascading rotatory dryers*. Drying Technology, 12: 259–279, 1997.

**18.** Muregesan, K.; N. Seetharamu. *A one dimensional analysis of convective drying of porous materials*. Heat and Mass Transfer 32: 81-88. Springer – Velag .1996.

**19.** Novoa, R.; M. Boizán. *Secado de Zeolita a escala de laboratorio (III)*. Revista Tecnología Química. Santiago de Cuba, No.1: 24-29, 1995.

**20.** Peishi, C.; D. Pei. *A Mathematical model of drying processes.* Int.J.Heat Mass Transfer 32(2): 297-310. 1989.

**21.** Perrin, B.; Javelas, D. *Transferts couples de chaleur et de masse dans les materiaux consolides utilises en Genie Civil*. Int. J.Heat Mass Transfer 30: 297-309. 1987.

**22.** Perry, J. *Chemical Engineering Handbook*. 4ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1967.

**23.** Perry, J. *Chemical Engineering Handbook*. 6ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1984.

**24.** Philip, J.; De Vries, D.; *Moisture movement in porous materials under temperature gradients*. Trans. Am. Geophys. Union 18: 222-232. 1957.

**25.** Plumb, O.; G. Spolek; B. Olmstead. *Heat and Mass Transfer in Wood during drying*. Int.J. Heat Mass Transfer 28(9): 169-178.1985.

**26.** Quintana, R. *Conferencia Sobre la Industria Cubana del Níquel*. II Seminario de Perfeccionamiento de Cuadros, ISMM, Octubre 1999.

**27.** Retirado, M. Y. C*omportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico*. Tesis de Maestría. Moa: ISMM, 2007. 60p.

**28.** Rezchikov, V.; A. Guinsburg. *Secado de productos alimenticios en cama fluidizante*. Editorial Pischevaya Promyshlennost, Moscú, 1966.

**29.** Strumillo, C. *Fundamentos de la teoría y práctica del secado*. Editorial W.N.T. Varsovia, 1975.

**30.** Thomas, H; K. Morgan; R. Lewis. *A Fully nonlinear analysis of heat and mass transfer problems in porous bodies*. Int. J. Num. Methods Eng.15: 381-393.1980.

**31.** Whitaker, S. *Simultaneous heat, mass and momentum transfer and theory of drying*. Adv.Heat Transfer 13: 119-203.1977.

# Anexo

Determinacion de la pérdidas 5

## Cámara de paso

En esta sección la convección es libre

$L_1 := 3.270m$ $d_1 := 3.030m$

$a := 6.614m$ $d_2 := 3.950m$

$h := 9.065m$

$A_0 := 2\left(a \cdot h + a \cdot L_1 + h \cdot L_1\right)$ $A_1 := \pi \cdot d_1^{\,2}$ $A_2 := \pi \cdot d_2^{\,2}$

$A_0 = 222.452\,m^2$ $A_1 = 28.843\,m^2$ $A_2 = 49.017\,m^2$

$Acp := A_0 - \left(A_1 + A_2\right)$ $Acp = 144.593\,m^2$

El coeficiente de transferencia de calor se calcula teniendo en cuenta el número de Rayleigh

**Donde:**

Ts=120 es la temperatura de la superficie

$T_{scp} := (120 + 273.15)K$ $T_0 := (32.2 + 273.15) \cdot K$

$T_{scp} = 393.15\,K$ $T_0 = 305.35\,K$ $T_{pelicular} := \frac{T_{scp} + T_0}{2}$

$T_{pelicular} = 349.25\,K$

$k := \left[(29.852 \cdot 10)^{-3}\right] \frac{W}{m \cdot K}$ $Pr := 0.70014$ $v := 22.7794 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ $g = 9.807 \frac{m}{s^2}$

$\beta := \frac{1}{T_{pelicular}}$

$\beta = 2.863 \times 10^{-3} \frac{1}{K}$

$\alpha := 29.752 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ $\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ L=h $\varepsilon m := 0.22$

$$R_{al} := \frac{g \cdot \beta \cdot \left(T_{scp} - T_0\right) \cdot h^3}{v \cdot \alpha}$$

$$R_{al} = 2.71 \times 10^{12}$$

Como $R_{al} > 10^9$ , la expresión adecuada para el cálculo del número de Nusselt es la sigueinte:

$$N_{ul} := \left[ 0.825 + \frac{0.387 \cdot R_{al}^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$N_{ul} = 1.528 \times 10^3$$

Luego

$$hc := N_{ul} \cdot \frac{k}{h} \qquad hc = 6.337 \times 10^{-6} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Pérdidas de calor por covección y radiación**

**Por convección**

$$Q_{CCP} := hc \cdot \left(T_{scp} - T_0\right) \cdot Acp$$

$$Q_{CCP} = 0.08\,W$$

**Por radiación**

$$Q_{RCP} := \varepsilon m \cdot \sigma \cdot Acp \cdot \left( {T_{scp}}^4 - {T_0}^4 \right)$$

$$Q_{RCP} = 2.741 \times 10^4\,W$$

**Tambor secador**

La convección en esta sección es forzada. todas las porpiedades se buscan a temperatura del fluido, excepto Prs, que se determina a la Ts

$$Lt := 40m \qquad D := 4.8m \qquad Ats := \pi \cdot D \cdot Lt \qquad Ats = 603.186\,m^2$$

$$Tsts := (80 + 273.15) \cdot K \qquad Tsts = 353.15\,K \qquad T_0 = 305.35\,K$$

$$T_f := \frac{Tsts + T_0}{2} \qquad T_f = 329.25\,K$$

$k1 := 26.67 \cdot 10^{-3} \frac{W}{m \cdot K}$ $v1 := 23.24 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ $\varepsilon m = 0.22$ $V1 := 2.65 \frac{m}{s}$

$Pr_0 := 3.15$ $P_{rs} := 0.70294$

El número de Reynolds:

$$R_{ets} := \frac{V1 \cdot D}{v1}$$

$R_{ets} = 5.473 \times 10^5$

Como $Re > 2x10^5$ entonces el regimen es turbulento

$C1 := 0.076$ $m1 := 0.7$ en la tabla 7.4 (Incropera et al., 2003)

$n := 0.37$ Para Pr <10 (Incropera et al., 2003 pag. 370 Tomo 2)

$$N_u := C1 \cdot R_{ets}^{m1} \cdot Pr^n \left( \frac{Pr_0}{P_{rs}} \right)^{\frac{1}{4}} \qquad N_u = 1.007 \times 10^3$$

$$hts := N_u \cdot \frac{k}{h}$$

$$hts = 4.177 \times 10^{-6} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Pérdidas de calor por convección y radiación**

**Por convección**

$$Q_{CTS} := hts \cdot Ats \cdot (Tsts - T_0)$$

$Q_{CTS} = 0.12\,W$

**Por radiación**

$$Q_{RTS} := \varepsilon m \cdot \sigma \cdot Ats \cdot \left( Tsts^4 - T_0^4 \right)$$

$Q_{RTS} = 5.162 \times 10^4\,W$

**Botella**

Las pérdidas y el coeficiente de transferencia de calor de esta sección se calculan como en tambor del secador.

$S_2 := 8m \qquad d_m := 4.8m \qquad d_{ma} := 5.222m \qquad d_{me} := 5.011m$

$A_b := \pi \cdot S_2 \cdot d_{me} \qquad A_b = 125.94\,m^2$

Las propiedades del fluido se buscan de forma análoga a como se realizó en el tambor secador

$T_{sb} := (90 + 273.15)\cdot K \qquad T_0 = 305.35\,K \qquad Prs := 0.70266 \qquad V1 = 2.65\,\frac{m}{s}$

$T_{sb} = 363.15\,K \qquad v2 := 23.24\cdot 10^{-6}\,\frac{m^2}{s} \qquad k2 := 26.67\cdot 10^{-3}\,\frac{W}{m\cdot K}$

El número de Reynolds:

$R_{eb} := \frac{V1\cdot d_{me}}{v2} \qquad R_{eb} = 5.714 \times 10^5$

Como $R_{eb} > 200000$ entonces el regimen es turbulento

$N_{ub} := C1\cdot {R_{eb}}^{m1}\cdot Pr^{0.37}\cdot\left(\frac{Pr_0}{P_{rs}}\right)^{\frac{1}{4}}$

$N_{ub} = 1.038 \times 10^3 \qquad \sigma = 5.67 \times 10^{-8}\cdot\frac{W}{m^2\cdot K^4}$

$h_b := N_{ub}\cdot\frac{k2}{d_{me}} \qquad h_b = 5.525\cdot\frac{W}{m^2\cdot K}$

**Pérdidas de calor por convección y radiación**

**Por convección**

$Q_{CB} := h_b\cdot A_b\cdot\left(T_{sb} - T_0\right)$

$Q_{CB} = 4.022 \times 10^4\,W$

**Por radiación**

$Q_{RB} := \varepsilon m\cdot\sigma\cdot A_b\cdot\left({T_{sb}}^4 - {T_0}^4\right)$

$Q_{RB} = 1.366 \times 10^4\,W$

**Pérdidas de calor totales por convección y radiación**

**Por convección**

$Q_{TC} := Q_{CCP} + Q_{CTS} + Q_{CB}$

$Q_{TC} = 4.022 \times 10^{4}\,W$

**Por radiación**

$Q_{TR} := Q_{RCP} + Q_{RTS} + Q_{RB}$

$Q_{TR} = 9.269 \times 10^{4}\,W$