



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA.

Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Título: Determinación de las pérdidas de calor en los secaderos de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Autor: Yunier Moya Aguilar.

Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja.

Moa - 2008

“Año 50 de la Revolución”



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Yunier Moya Aguilar**, autor de este trabajo de diploma y el tutor M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja, declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Yunier Moya Aguilar

M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja



PENSAMIENTOS

Lo más importante de todo es no dejar de hacerse preguntas.

Albert Einstein

Hay muchos que luchan una hora y son buenos, hay otros que luchan un año y son mejores, hay otros que luchan muchos años y son muy buenos, pero poco luchan la vida entera. Esos son los imprescindibles.

Beltrolt Breeff

Emplearse en lo estéril cuando se puede hacer lo útil; ocuparse en lo fácil cuando se tiene bríos para intentar lo difícil, es despojar de su dignidad al talento.

José Martí Pérez
Apóstol Nacional de Cuba

Ver después no vale, lo que vale es ver antes y estar preparado.

José Martí Pérez
Apóstol Nacional de Cuba



AGRADECIMIENTOS

En momentos como este, en el cual debo hacer el resumen de los cinco años de mi carrera universitaria, los cuales he pasado en el ISMM de Moa y que son el resultado de todo lo que he podido vivir junto a tantas personas, temiendo que alguien quede olvidado, doy las gracias de corazón a todas las personas que de una forma u otra han tenido que ver con la realización de este trabajo y a mi formación como profesional.

Agradecimientos especiales a:

- Mi tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja y a el Ing. Yodelkis Delgado Drubey por las ayudas prestadas en todo momento.
- A mis abuelos maternos Jilson Aguilar Blonda y Erenia Salazar del Pino, por haberme dado buena formación desde mi niñez y en forma general a todas mis familia por su incansable dedicación.
- A mis compañeros de aula y en especial a Dionnys Velásquez Planche, Luís Felipe Utria Terrero, Luís Alfonso Fernández Neves, de la República de Cabo Verde y a Ngagne Gueye Mademba de Senegal por servirme siempre cuando más lo necesité.
- En fin a nuestra revolución por haberme dado la oportunidad de estudiar desde mi infancia hasta la actualidad.

A todos “Muchas Gracias”

El autor



DEDICATORIA

Cuando se desea dedicar algo, siempre se piensa en las personas más apegadas a uno, en aquel que siempre te estuvo observando, aconsejando, brindándote momentos que se quedan plasmados para siempre en la memoria. Por esto yo les dedico este trabajo:

A la Revolución Cubana y a nuestro querido Fidel Castro Ruz por haberme dado la oportunidad de superarme.

A mi abuela (Erenia Salazar del Pino), quien ha sido el motor impulsor para que yo siguiera hasta el final.

A mi madre (Aida Aguilar Salazar) por su entrega incondicional en todos estos años.

A mi prima, (Marisleidis Moya Lezcalle) por su inestimable ayuda y comprensión.

A todas aquellas personas que me extendieron su mano y parte de su tiempo.

A todos “les dedico este éxito”

El autor

RESUMEN

En la actualidad existen elevadas pérdidas de calor en los secaderos cilíndricos rotatorios pero no se han realizado hasta el momento trabajos encaminados a la determinación de estas pérdidas en estos equipos para las condiciones de explotación existentes en la instalación.

En el trabajo se determinaron las pérdidas de calor por convección las cuales para los valores promedio fueron: $7,72 \times 10^4$; $2,147 \times 10^7$; $1,605 \times 10^8$ W y por radiación $3,169 \times 10^4$; $6,676 \times 10^4$; $1,435 \times 10^5$ W en la cámara de paso, el tambor secador y la botella respectivamente. Las pérdidas de calor totales por convección obtenidas en el secadero fueron $8,47 \times 10^7$; $1,82 \times 10^8$; $2,788 \times 10^8$ W y por radiación ascendieron a $2,11 \times 10^5$; $2,419 \times 10^5$; $2,552 \times 10^5$ W para los valores mínimos, medios y máximos de los parámetros.

Finalmente se determinó que el gasto económico por concepto de consumo de combustible asociado al secadero analizado es 3723878,4 USD 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 gases producto de la combustión.



ABSTRACT

At the present time high losses of heat exist in the rotational drying cylinder but so far they have not made any study with the purpose to determine them in the actual condition of exploitation of the installation.

In the work the losses of heat by convection were determined which were for the values average: $7,72 \times 10^4$; $2,147 \times 10^7$; $1,605 \times 10^8$ W as for the losses by radiation they were $3,169 \times 10^4$; $6,676 \times 10^4$; $1,435 \times 10^5$ W in the chamber of passing, the drying drum and the bottle respectively. The total losses of heat by convection obtained in the drier were $8,47 \times 10^7$; $1,82 \times 10^8$; $2,788 \times 10^8$ W and by radiation they ascended $2,11 \times 10^5$; $2,419 \times 10^5$; $2,552 \times 10^5$ W for the minimum, average and maximum values of the parameters.

Finally it was determined that the economic expense for concept of consumption of fuel associated to the analyzed drier is 3723878,4 USD for the five considered months.

The environmental analysis showed that the existent more important environmental affectations in the plant are the continuous emissions of powder and gases product of the combustion.

**ÍNDICE**

Contenido	Págs.
Introducción	1
Capítulo I Marco teórico – metodológico de la investigación.....	4
1.1 - <i>Introducción.....</i>	4
1.2 - <i>Trabajo precedente.....</i>	4
1.3 - <i>Descripción del flujo tecnológico de la planta de preparación de mineral.....</i>	9
1.4 - <i>Partes principales del secadero.....</i>	15
1.5 - <i>Conclusiones del capítulo I.....</i>	20
Capítulo II Determinación de las pérdidas de calor en el secador cilíndrico rotatorio analizado en la Empresa Ernesto Che Guevara.....	21
2.1 - <i>Introducción.....</i>	21
2.2 - <i>Instrumentos utilizados en la medición de los parámetros.....</i>	21
2.3 - <i>Procedimiento de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor.....</i>	22
2.4 - <i>Principales parámetros geométricos obtenidos en la instalación para la determinación de las pérdidas de calor.....</i>	27
2.5 - <i>Resultados obtenidos para los valores promedios de los parámetros..</i>	29
2.6 - <i>Principales resultados obtenidos en la determinación de las pérdidas de calor.....</i>	33
2.7 - <i>Conclusiones del capítulo II.....</i>	35
Capítulo III Análisis de los resultados, valoración económica e impacto ambiental.....	36
3.1 - <i>Introducción.....</i>	36
3.2 - <i>Análisis de los resultados de la investigación.....</i>	36
3.3 - <i>Valoración económica.....</i>	39
3.4 - <i>Principales problemas ambientales detectados en la planta.....</i>	41
3.5 - <i>Conclusiones del capítulo III.....</i>	46
Conclusiones.....	47
Recomendaciones.....	48
Referencias Bibliográficas.....	49
Anexos.....	--



INTRODUCCIÓN

El problema de la transmisión del 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 transmisión del calor tienen primordial importancia en el diseño y funcionamiento de múltiples equipos, entre ellos los generadores de vapor, hornos, precalentadores, refrigeradores, evaporadores y condensadores. También tienen diversas aplicaciones para el secado en innumerables industrias.

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 Ernesto Che Guevara.

La referida empresa fue construida entre los años 1973-1985 como fruto de la colaboración bilateral entre los gobiernos de Cuba y la entonces Unión Soviética, la misma se encuentra ubicada al norte del yacimiento mineral de Punta Gorda, en la costa norte aproximadamente a 7km del centro de Moa, provincia Holguín, Cuba.

Desde su puesta en marcha en Enero de 1986 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 secaderos cilíndricos de la planta de preparación de mineral cuya tecnología está basada en el esquema carbonato-amoniaco del mineral reducido (proceso Carón) el cual se desarrolla en condiciones de presión atmosférica y 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.

Fundamento de la investigación

La región de Moa, situada en el noreste de la República de Cuba, constituye desde el punto de vista económico un área de marcado interés por la presencia de uno de los mayores yacimientos de níquel del mundo, representando un elemento esencial que funciona como fuente del desarrollo socioeconómico de todo el territorio nacional (Guzmán, 2001).

Desde el inicio del proceso revolucionario hasta la actualidad, el incremento de la actividad económica ha alcanzado resultados impresionantes con el aumento de las inversiones en nuevas plantas y la modernización de otras por parte del Ministerio de la Industria Básica, lo que unido últimamente a la implementación del Perfeccionamiento Empresarial, ha ocasionado un efecto multiplicador que ha dinamizado la economía y la investigación científica como vía para la obtención e implementación de nuevas tecnologías que minimicen los costos de producción y tengan en cuenta la protección del medio ambiente.

La búsqueda de una tecnología adecuada para el proceso de secado del mineral en la planta de preparación de mineral, permitirá el desarrollo acelerado de la empresa, dando respuesta a la misión de esta industria que es: Incrementar y diversificar la producción de níquel y cobalto alcanzando los estándares internacionales de eficiencia metalúrgica, costos de producción y productividad (...) que permita maximizar los aportes al estado (Quintana, 1999).

Recientemente se han realizado trabajos relacionados con el proceso de secado en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” referidos a la eficiencia metalúrgica de la planta, el consumo específico de energía, combustible y el tiempo de retención del mineral en los secaderos pero en ninguno de los casos se ha realizado un estudio de la transferencia de calor en estos equipos con el objetivo de obtener las pérdidas de calor en las condiciones actuales de explotación de los mismos.

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

No se han realizado hasta el momento trabajos encaminados a la determinación de las pérdidas de calor en los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara para las diferentes condiciones de explotación existentes en la instalación.

Como objeto de estudio de la investigación se plantea:

El secador cilíndrico rotatorio #1 de la empresa Ernesto Che Guevara.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente 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 existente en el mismo, para las condiciones actuales de explotación.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como objetivo general:

Obtener las pérdidas de calor en el secadero cilíndrico rotatorio analizado para las condiciones actuales de explotación en la empresa Ernesto Che Guevara.

Para dar cumplimiento al objetivo general se desarrollaron las siguientes tareas del trabajo:

- 1-** Desarrollar el estado del arte sobre la temática y la situación que presenta la empresa a partir del análisis bibliográfico.
- 2-** Establecer el procedimiento de cálculo para el análisis de la transferencia de calor en la instalación objeto de estudio.
- 3-** Determinar las pérdidas de calor para diferentes condiciones de explotación.
- 4-** Analizar los resultados obtenidos para las diferentes pérdidas de calor calculadas.
- 5-** Valorar el impacto económico del estudio realizado y las afectaciones medioambientales asociadas al proceso de secado en los tambores cilíndricos rotatorios.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

El secado, desde el punto de vista industrial, es un proceso de transferencia de calor y de masa no isotérmico que implica la extracción del líquido que lo moja obteniendo un producto diferente al inicial, ya sea como producto final o como intermedio en un proceso de fabricación dado.

En la empresa Comandante Ernesto Che Guevara el secado juega un papel determinante debido a que en este proceso se consume el 23% de la energía total consumida 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 térmica del 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 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).

Philip et al. (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.

Fulford (1969) y Boizán (1991), proporcionan varios modelos matemáticos tomados de la literatura rusa para describir la cinética del secado. Estos modelos reportados por diferentes autores (Filonenko, 1958; Rezchikov et al., 1966; Kuroshkina, 1972) fueron establecidos considerando la velocidad de secado (N) constante. En todos los casos N se expresa en forma de una función empírica de los parámetros fundamentales del proceso. Estas expresiones no pueden ser aplicadas al secado del mineral laterítico porque en este proceso la velocidad de secado varía y no existe fluidización, además, los materiales experimentados (semillas de tomate, granos y partículas de papa, respectivamente) tienen propiedades termofísicas diferentes a la del sólido estudiado en este trabajo.

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.

Baker (1988) aborda los modelos de transferencia de calor y masa para secadores rotatorios en cascada y los clasificó en dos categorías. La interpretación de los datos en un gran número de secadores rotatorios se realiza de forma aproximada en términos del coeficiente global de transferencia de calor, basado en el área efectiva de contacto entre el gas y el sólido y el cociente de esta área con relación al volumen del secador.

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.

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 sorción 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.

Kallel et al. (1993), estudiaron el efecto del contenido de humedad inicial y el coeficiente de transferencia de calor por convección en el secado de ladrillos; emplearon ecuaciones de conservación para líquidos, aire y vapor de agua, similar a las utilizadas por Whitaker (1977). El efecto del flujo capilar en la primera etapa de secado y difusión gaseosa en la última etapa son dados en términos de coeficientes difusivos para los líquidos y vapores. Este aporte no es satisfactorio para predecir el comportamiento del secado del mineral laterítico debido a que las expresiones fueron obtenidas para el proceso continuo y el caso estudiado corresponde al secado periódico.

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 $n \times n$ 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.

En cuanto a la modelación matemática, Smith et al. (1997) plantean que la modelación matemática de un proceso industrial usualmente parte con el balance de una cantidad conservada: masa y energía, por lo que el balance puede ser escrito como:

$$\begin{array}{l} \text{Total masa / energía} \\ \text{que entra al volumen} \\ \text{de control.} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Total masa / energía que sale} \\ \text{del volumen de control.} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Total masa / energía} \\ \text{= acumulada en el} \\ \text{volumen de control.} \end{array}$$

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.

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 las pérdidas de calor 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 procedente de la planta de trituración primaria puede ser suministrado por dos vías.

- a) A través de grúas gantry.
- b) Directamente por los transportadores de enlace (No.14) ó (15).

Una vez descargado en galería es remontado y alimentado por las grúas gantry (215-GR-5, A, B, C). Estas remontan el mineral y lo homogenizan en el depósito exterior que posee una capacidad de 360 000 toneladas húmedas o 28 días de trabajo de la planta.

Estas grúas poseen dos capacidades de trabajo que son: 660 t/h al remontar y 690 t/h al alimentar a las correas.

El mineral suministrado por las grúas o el transportador No. 14 ó 15 es descargado en los transportadores 215 TR-5, 5A y 215 –TR6, 6A cuyas capacidades son 750 t/h cada uno.

El paso del mineral desde las grúas hacia los transportadores 5 y 5A, 6 y 6A se realiza a través de un alimentador que se mueve solidario con las grúas 215- AL –2 A, B, C y que posee para este trabajo (de alimentación) un transportador 215-TR- 8 AB, C y de capacidad 750 t/h.

Los transportadores 5 y 5A, 6 y 6A alimentan a los transportadores 215 TR-7 y 7A los que se encargan de llevar el mineral homogeneizado hasta el edificio de los secaderos. La capacidad de estas correas es de 750 t/h y todo su contenido lo vierten sobre los transportadores 215-TR8 y 8A que tiene cómo función la de alimentar a los secaderos y al depósito de mineral interior o de emergencia.

La alimentación a los secaderos se realiza a través de unos desviadores que se encuentran justamente sobre las tolvas de los secaderos. La alimentación al depósito interior se realiza de la misma forma, o sea, mediante desviadores de mineral que se encuentran situados sobre tres correas colocadas entre los secaderos 2 y 3, 4 y 5 y al final del edificio. Estos transportadores 215- TR-10-1,10-2,10-3 poseen capacidad 750t/h.

El mineral almacenado en el depósito interior se usará cuando, por cualquier tipo de avería surgida en el proceso antes de los secaderos, se interrumpa el suministro de la materia prima a esta sección. La capacidad de este almacén posibilita a la planta trabajar durante 4 días.

Este depósito posee para la manipulación del material, 2 grúas de puente 215- GRL-101 A y B de capacidad igual a 350 t/h cada una. El mineral llegará a los secaderos 215-SC-101-107 pasando a través de alimentadores de esteras 215-AL-101--107 de capacidad variable y los transportadores de bandas 215-TR-9-1... 9-7 de capacidades

igual a 125 t/h cada uno. El tambor secador posee una longitud igual a 4 800 mm y un diámetro de 4 500 mm. El mineral al entrar al secadero lo hará con una humedad aproximadamente igual a 38 % y saldrá del mismo con 4.5 % según está establecido.

Para lograr esto cada secadero posee una cámara de combustión 21-CC-101-107 dotada de un quemador de petróleo. Se suministra aire de combustión, aire de pulverización, aire secundario o gases procedentes de la planta de hornos.

Los gases combustionados dentro de la cámara alcanzan una temperatura de 1500 °C y bajan hasta 800-850 °C al ponerse en contacto con el aire el exceso que se suministra y que sirve para aumentar el volumen de gases necesarios para secar el mineral.

Con esta última temperatura es con la que entran los gases al tambor secador que se realiza en dirección a corriente con el mineral alimentado de forma que, ese contacto gases calientes – mineral permita que este último se vaya secando y se obtenga al final un producto con las características adecuadas. Los gases al salir del secadero tendrán una temperatura de 80-100 °C.

Los gases calientes pueden atravesar el secadero debido a la succión que crea un ventilador 215-VE-108 - 114, de tiro situado a la salida del electrofiltro que posee cada secadero individualmente.

Además, estos gases son capaces de arrastrar con ellos el 36 % del polvo, que entra con el mineral o que se forma durante el proceso de secado y que por lo general poseen una granulometría (-0,074) mm el que será introducido al sistema de colección.

El mineral después de secado pasa a un proceso de clasificación que se produce en el extremo de descarga del mismo horno de tambor a través de un trómel con mallas de tamaño de orificio igual a 10 mm lo que brinda la posibilidad de obtener dos productos por separado, uno fino (-10 mm) que se descarga en las correas 215-TR-11 y otro grueso (+10 mm) que se descarga a la correa 215-TR-11A.

Estas correas son denominadas comúnmente correas calientes debido a que son las primeras que hacen contacto con el mineral que sale de los secaderos. La capacidad es de 490 t/h. En estas correas se encuentran instaladas las romanas encargadas del pesaje del mineral seco.

El mineral seco con granulometría fina (-10 mm) es llevado desde la correa 215-TR11 hasta la correa 215-TR12 que es la vía de unión entre los secaderos y los molinos. Esta correa transportadora posee una capacidad de 490 t/h y descarga su contenido en 4 tolvas (una para cada molino) 215-TV-201.204 mediante desviadores de mineral colocados sobre las correas y justamente sobre las mencionadas tolvas.

Sobre esta correa se encuentra montado un sistema de adición de petróleo aditivo en forma de ducha que se mezclará conjuntamente con el mineral de forma dosificada mediante un sistema automático que regulará la relación petróleo – mineral instalada en la misma área, siendo utilizado como agente reductor en la planta de hornos de reducción. Desde cada tolva el mineral llegará a los molinos en forma dosificada y este trabajo corresponde hacerlo a los alimentadores de disco 215 AL 201 A y B 215 AL 204 A y B que poseen cada tolva y que pueden entregar 55-120 ton/h a las correas 215-TR -13-1...13-4 las que descargan el mineral en el molino de bolas 215 ML-201... 204, la capacidad de esta correa es de 160 t/h. De esta forma el mineral llega al molino de bolas cuya capacidad es de 120 t/h y tiene como dimensiones 5 700 mm de longitud y 3 200 mm de diámetro.

Estos molinos son de forma cilíndrica y para su proceso de molienda fina poseen una carga de bolas cuyo peso es de 54 toneladas, siendo sus dimensiones (de las bolas.)

100 mm - 10 %	5.5 toneladas (5 500 kg)
70 mm - 10 %	5.5 toneladas (5 500 kg)
60 mm - 15 %	8.0 toneladas (8 000 kg)
40 mm - 25 %	13.5 toneladas (13 500 kg)
32 mm - 40 %	<u>21.5 toneladas (21 500 kg)</u>
	54 toneladas (54 000 kg)

El producto que el molino debe entregar tendrá una humedad de 4,5 - 5,5 % y una granulometría de 85 - 87 % de - 0,074 mm.

Todo lo que entra al molino saldrá del mismo mediante barrido con aire, que es producido por un ventilador de recirculación 215-VE-205.208 de 134 000 m³/h de capacidad situado a la descarga del molino y cerrando un circuito que está formado por el molino, 1 separador 215 - SE-201... 204, 4 ciclones 215-CN-201... 104 A ,B, C ,D y 2 baterías de 6 ciclones 215-CN-205.210 A, B, C, D, E, F. Con este ventilador se barre el mineral molido y se succiona, este doble efecto propicia la obtención del mineral molido.

El mineral barrido y succionado es introducido en un separador neumático de diámetro 4 250 mm donde sufre una clasificación de forma, el que tenga características de producto final pasará al sistema de colección primaria (a los ciclones) y el que no posea estas características transitará al molino (constituyendo el rechazo) para su ulterior tratamiento hasta que alcance la granulometría adecuada.

Este equipo puede realizar este trabajo a merced de dampers que posee y que son regulados para obtener la granulometría del mineral que se quiera.

El sistema de colección primaria formada por ciclones, se encarga de recoger el polvo producido y lo descarga en las tolvas de producto final 215-TV-205 A y B. Lo que no se recoge y que es por lo general, un mineral con granulometría -0,044 mm pasará por un sistema de limpieza de gases electrostáticos o electrofiltros donde se captura la casi totalidad del polvo que entra en él.

De igual forma, todo el polvo recogido es enviado hacia las tolvas de producto final mediante el empleo de bombas en vacío 215-BO-201 A, B, C, D, E y F de 50 t/h de capacidad, todo el mineral molido es transportado hacia los silos de mineral del taller de hornos de reducción mediante el empleo de bombas neumáticas 215 – BO-107...112 colocadas en la descarga de las tolvas.

El mineral seco con granulometría gruesa (+10 mm) es llevado desde la correa 215-TR11A hasta la 215-TR12A que es la vía de unión entre los secaderos y la zaranda de

control 215-ZA-301. Esta correa transportadora posee una capacidad de 490 t/h y descarga su contenido en la zaranda 215-ZA-301 (con malla de 10 mm) con capacidad de 120 t/h, donde se produce la clasificación de control del mineral grueso ocurriendo la separación de dos fracciones una fina (-10 mm) que se descarga a la tolva TV-204, desde donde es posible transportarlo a la TV 203 a través de la correa 215-TR-213 - 4 y 5 y desde ahí al proceso de molienda, la fracción de mineral grueso (+10 mm) se envía a las tolvas de retención 215-TV 302 y 303 de capacidad igual a 120 ton, desde donde es evacuado en camiones de 12 ton/h de capacidad hasta el depósito de mineral de rechazo en la mina o presa de cola.

Sistema de limpieza de los gases de secaderos

El polvo que es barrido por los gases del interior de cada secadero es introducido en un sistema de colección de polvo formado por dos baterías de 4 ciclones cada una 215-CN-101- 107 A,B,C,D, de eficiencia 73 % y diámetro 1 800 mm y por un electrofiltro de 4 polos 215 EF 101 - 107 que trabaja con una tensión de 75 000 - 80 000 volts y eficiencia 99,6 %.

Esto significa que el 36 % del polvo arrastrado por los ventiladores de tiro de cada secadero, el 73 % se quedará colectado con las tolvas de los ciclones y el 27 % restante llegará a los electrofiltros, previo paso por una zona llamada (embudos muertos) donde también se colectará cierta cantidad a merced de la caída brusca de presión.

Estos embudos muertos y el electrofiltro poseen tolvas de almacenamiento de mineral, el que es descargado en transportadores de paletas hundidas 215-TRP-101... 106 Y 215 TRP-107...114 de capacidad 20 t/h cada uno de los que llevará su carga a otros transportadores similares, pero mayores 215 TRP-117 y 118, 215 TRP-115 A y B, 215 TRP-116 A y B de capacidad 50 t/h.

Estos últimos descargarán su contenido en las tolvas de mineral 215-TV-108 A y B los que alimentarán a las bombas de transporte neumático 215- BO-13-16, que son las encargadas de conducir este polvo hacia las tolvas de producto final (215-TV-205 A y B) de los molinos. La capacidad de estas bombas es 120 t/h cada una.

Los gases una vez limpios de polvo son enviados a la atmósfera debido a la succión que crea un ventilador (215-VE-108-114) colocado al final de cada filtro eléctrico atravesando una chimenea (215-CH-101) de 120 m de altura. La capacidad del ventilador es 279 000 - 249 000 m³/h. La concentración de polvo que debe salir a la atmósfera debe ser de 200 mg/m³.

1.4- Partes principales del secadero

Para el secado del mineral en esta planta se emplean los tambores rotatorios. Los secaderos 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 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 secadero 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 secadero, 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.

1.4.1- Descripción del proceso de secado en los secadores cilíndricos rotatorios

El mineral al entrar al secadero tiene una humedad de 40 % aproximadamente y debe salir del mismo con 4,5 - 5,5%. Para lograr esto cada secadero 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 1500 °C que disminuye hasta 800-850 °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 (800-850 °C) y salen del mismo a una temperatura de 80 -100 °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 secadero un producto con las características adecuadas.

Estos gases calientes pueden atravesar el secadero 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 secadero 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.

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 secadero, capacidad de los levantadores del secadero, velocidad de rotación del secador, número de levantadores, y otros factores.

Características del mineral alimentado

Aquí se tiene en cuenta entre otros casos la granulometría y la humedad. La alimentación del mineral muy fino dificulta el proceso de secado debido fundamentalmente a que se elimina solo el agua superficial, quedándose solo el agua reticular o interna que provoca la aglomeración del mineral, provocando un aumento de la humedad del producto secador. Con este mineral alimentado aumenta considerablemente el consumo de petróleo y disminuye la eficiencia operativa de los equipos ya que es necesario disminuir la alimentación para poder obtener el parámetro deseado en el producto.

Tiempo de retención del mineral

Este factor determina el tiempo medio necesario de permanencia del mineral dentro del secadero para que sea tratado de forma adecuada. Este tiempo se determina de forma experimental.

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

Donde:

T: tiempo; h.

L: longitud del secadero; m.

Sd: inclinación del equipo; m/m.

D: diámetro del tambor; m.

N: velocidad de rotación del secadero; rpm.

Velocidad del gas

Una velocidad alta de los gases calientes provoca poco contacto entre las fases (gases y mineral) lo que conlleva a un secado deficiente del mineral y aumenta el consumo de petróleo. Una baja velocidad de los gases puede provocar un calentamiento de la superficie del secadero, un deficiente secado debido a la saturación de estos gases y al recalentamiento de la cámara de combustión con posible desprendimiento de ladrillos. Por esto la velocidad del secado debe ser moderada para garantizar una operación de secado adecuada.

Temperatura del aire o gas

La temperatura influye directamente en la velocidad, además con gases muy calientes se afecta el sistema de colección de polvo en los electrofiltros.

Longitud del secado

Esta longitud debe ser tal que permita el secado del mineral que se alimenta hasta la humedad requerida a la máxima capacidad. En la primera mitad del tambor se elimina en mayor cuantía porque los gases están más calientes, la longitud restante para eliminar una cantidad pequeña de humedad.

Pendiente del secadero

Esto permite que el mineral se vaya arrastrando a la velocidad adecuada hasta la descarga del secadero.

Capacidad de los levantadores del secadero

Son los elementos fundamentales que interviene en el secado, mediante ellos es posible elevar el material y dejarlo caer en forma de cortinas, lo que permite el contacto con el gas caliente.

Velocidad de rotación del secado

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.

Número de levantadores

Se tiene presente el mineral alimentado, su humedad y el diámetro del tambor. Para aumentar la capacidad de un secadero de diámetro grande con un mineral húmedo y quebradizo se debe aumentar el número de levantadores.

Otras condiciones

Los secaderos 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 secadero 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 puede 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.

1.5- Conclusiones del capítulo I

- Se han realizado múltiples investigaciones relacionadas con los procesos de secado, pero en ninguno de ellos se ha tenido en cuenta las pérdidas de calor al medio ambiente para diferentes condiciones de explotación existente en los secaderos de la empresa Ernesto Che Guevara.
- El nivel de automatización de la planta de preparación del mineral es primario ya que cuenta con un autómata programable que mide algunos de los parámetros del proceso. El flujo de los gases provenientes de hornos y del aire de pulverización no se registran con la exactitud requerida por el proceso.

CAPÍTULO II

DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN EL SECADOR CILÍNDRICO ROTATORIO ANALIZADO EN LA EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA

2.1- Introducción

Los secaderos constituyen junto a los molinos de bolas los equipos más consumidores de portadores energéticos y energía en la planta de preparación de mineral, en los primeros 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 secadero, 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, en tal sentido el **objetivo** del presente capítulo es: obtener las pérdidas de calor hacia el medio ambiente para diferentes condiciones de trabajo en la instalación.

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. En dicho panel se registran las mediciones de temperatura, medidas con termoresistencias en los distintos puntos requeridos en el secador rotatorio. En el caso de la temperatura de la superficie del aislante se utilizó un pirómetro infrarrojo. El flujo de combustible se registró con un flujómetro ultrasónico instalado al efecto.

Las mediciones de los parámetros climatológicos se realizaron en la estación meteorológica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, se empleó el equipo Davis EZ-Mount Groweather. El mismo presenta un sistema de adquisición de datos, haciendo uso de la instrumentación virtual, utilizando un conjunto básico de sensores meteorológicos, el cual incluye la medición, adquisición, procesamiento y registro de

datos en PC para las variables: temperatura del aire ambiente, velocidad y dirección del viento.

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

En el presente epígrafe se expone el procedimiento de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor. El mismo se fundamenta en las leyes que rigen la transferencia de calor en cilindros horizontales.

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.

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:

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

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

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/m² K.

A: área de transferencia de calor; m².

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

T₀: temperatura del medio ambiente; K.

ε: emisividad de la superficie del material aislante; adimensional.

σ: constante de Stefan-Boltzman; (5,67 x 10⁻⁸ W/m² K⁴).

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.

$$A_0 = 2 \cdot (a \cdot h + a \cdot L + h \cdot L) \quad (2.3)$$

$$A_1 = \pi \cdot d_1^2 \quad (2.4)$$

$$A_2 = \pi \cdot d_2^2 \quad (2.5)$$

$$A = A_0 - (A_1 + A_2) \quad (2.6)$$

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.

d₁: diámetro del orificio 1; m

d₂: diámetro del orificio 2; m.

A₀: área total de la cámara de paso; m².

A₁: área del orificio del diámetro 1; m².

A₂: área del orificio del diámetro 2; m².

A: área de transferencia de calor en la cámara de paso; m².

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.

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

Donde:

G_r: número de Grashof; adimensional.

P_r: número de Prandls; adimensional.

g: aceleración de la gravedad; (9,81 m/s²)

β: coeficiente de dilatación volumétrica; K⁻¹.

ν: viscosidad cinemática del aire; m²/s.

α: coeficiente de difusividad térmica; m²/s.

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

$$T_p = \frac{T_s + T_0}{2} \quad (2.8)$$

$$R_{al} = G_r \cdot P_r \quad (2.9)$$

El número de Nusselt (N_{UL}) se calcula por la expresión 2.10:

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

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

$$h = \frac{N_{UL} \cdot k}{L} \quad (2.11)$$

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.

$$A = \pi \cdot D \cdot L \quad (2.12)$$

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; Pr_s (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 (Re) se obtiene mediante la expresión:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.13)$$

Donde

V: velocidad del aire ambiente; m/s.

El número de Nusselt (N_{UL}) para esta sección del secadero 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.

$$N_{UD} = C \cdot Re^m \cdot Pr_r^n \cdot \left(\frac{Pr_0}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (2.14)$$

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

$$h = \frac{N_{UD} \cdot k}{D} \quad (2.15)$$

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:

$$A = \pi \cdot S \cdot D_m \quad (2.16)$$

Donde:

A: área de transferencia de calor en la botella; m².

S: generatriz del cono; m.

d₁: diámetro mayor; m.

d₂: 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 secadero 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

$$Q_{Tp\ Convección} = Q_{PC(Cámara\ de\ paso)} + Q_{PC(Tambor\ sec\ ador)} + Q_{PC(Botella)} \quad (2.17)$$

Pérdidas de calor total por radiación

$$Q_{Tp\ Radiación} = Q_{PR(Cámara\ de\ paso)} + Q_{PR(Tambor\ sec\ ador)} + Q_{PR(Botella)} \quad (2.18)$$

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 del secadero	Valor	Unidad
Sección: cámara de paso		
Ancho de la cámara de paso; a.	6.83	m
Altura de la cámara de paso; h.	9.065	m
Longitud de la cámara de paso; L.	3.496	m
Diámetro del orificio 1; d_1 .	3.132	m
Diámetro del orificio 2; d_2 .	4.252	m
Sección: tambor secador		
Longitud del tambor secador, L.	40	m
Diámetro del tambor secador, D.	4,8	m
Sección: botella		
Generatriz del cono; S.	8	m
Diámetro mayor; d_1 .	5,222	m
Diámetro menor; d_2 .	4,8	m
Diámetro medio; d_m .	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. Valores de los parámetros medidos en la instalación

No. Cuenta	Velocidad del aire (m/s)	Temperatura del aislante térmico en:			Temperatura del aire (°C)
		La cámara de paso (°C)	El tambor secador (°C)	La botella (°C)	
1	1,8	120	90	290	24
2	1,8	123	86	288	23
3	1,8	122	93	292	30
4	2,2	128	91	291	32
5	2,2	125	94	297	35
6	3,1	130	89	288	31
7	2,2	132	87	291	25
8	2,7	125	91	283	24
9	1,3	123	87	287	34
10	1,8	129	92	290	33
11	1,8	127	93	293	29
12	3,1	133	90	279	28
13	3,1	134	89	281	31
14	3,6	128	85	294	30
15	4,9	119	87	279	32
16	4,9	116	91	289	28
17	4,9	129	94	295	29
18	3,1	131	92	293	31
19	1,8	135	82	288	28
20	0,9	128	80	287	27

A los valores mostrados en la Tabla 2.2 se le realizó un análisis estadístico descriptivo con el objetivo de obtener los intervalos de variación de cada parámetro, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.3, que a continuación se muestra.

Tabla 2.3. Resultados del análisis estadístico descriptivo realizado.

No.	Velocidad del aire (m/s)	Temperatura del aislante térmico en:			Temperatura del aire (°C)
		La cámara de paso (°C)	El tambor secador (°C)	La botella (°C)	
Mínimo	0,9	116	80	279	23
Medio	2,65	126,85	89,15	288,75	29,2
Máximo	4,9	135	94	297	35
Cuenta	20	20	20	20	20

2.5- Resultados obtenidos para los valores promedios de los parámetros

En el secador existen pérdidas de calor por convección y por radiación al medio ambiente. Para resolver las ecuaciones se emplearon los software Mathcad Professional 2001 y Microsoft Excel 2003.

Cámara de paso

En esta sección la convección es libre.

$$L_1 := 3.496\text{m} \quad d_1 := 3.132\text{m} \quad a := 6.83\text{m} \quad d_2 := 4.252\text{m} \quad h := 9.065\text{m}$$

$$A_0 := 2 \cdot (a \cdot h + a \cdot L_1 + h \cdot L_1) \quad A_1 := \pi \cdot d_1^2 \quad A_2 := \pi \cdot d_2^2$$

$$A_0 = 234.966\text{m}^2 \quad A_1 = 30.817\text{m}^2 \quad A_2 = 56.798\text{m}^2$$

$$A_{cp} := A_0 - (A_1 + A_2) \quad A_{cp} = 147.35\text{m}^2$$

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

$T_s = 126.85\text{ °C}$ es la temperatura de la superficie.

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

$$T_{\text{scp}} := (126.85 + 273.15)\text{K} \quad T_{\text{scp}} = 400\text{K}$$

$$T_0 := (29.2 + 273.15)\text{K} \quad T_0 = 302.35\text{K}$$

$$T_f := \frac{T_{\text{scp}} + T_0}{2} \quad T_f = 351.175\text{K}$$

$$k := 30.0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\text{Pr} := 0.70 \quad \nu := 20.92 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad g := 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \beta := \frac{1}{T_f} \quad \sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad L := h \quad \varepsilon := 0.22$$

$$\alpha := 29.9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$R_{\text{al}} := \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{\text{scp}} - T_0) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad R_{\text{al}} = 3.249 \times 10^{12}$$

Como $R_{\text{al}} > 10^9$, la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt es la siguiente:

$$N_{\text{ul}} := \left[0.825 + \frac{0.387 R_{\text{al}}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad N_{\text{ul}} = 1.621 \times 10^3$$

Luego

$$h := N_{\text{ul}} \cdot \frac{k}{L} \quad h = 5.365 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Pérdidas de calor por convección y radiación

Por convección

$$Q_{\text{CCP}} := h \cdot A_{\text{cp}} \cdot (T_{\text{scp}} - T_0)$$

$$Q_{\text{CCP}} = 7.72 \times 10^4 \text{ W}$$

Por radiación

$$Q_{\text{RCP}} := \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{\text{cp}} \cdot (T_{\text{scp}}^4 - T_0^4)$$

$$Q_{\text{RCP}} = 3.169 \times 10^4 \text{ W}$$

Tambor secador

La convección en esta sección es forzada, todas las propiedades se buscan a la temperatura del fluido, excepto Pr_s , que se determina a T_s .

$$L := 40 \text{ m} \quad D := 4.8 \text{ m} \quad T_0 = 302.35 \text{ K} \quad A_{ts} := \pi \cdot D \cdot L \quad A_{ts} = 603.186 \text{ m}^2$$

$$T_{sts} := (89.15 + 273.15) \text{ K} \quad T_{sts} = 362.3 \text{ K}$$

$$T_f := \frac{T_{sts} + T_0}{2} \quad T_f = 332.325 \text{ K}$$

$$k := 26.44 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$v := 16.09 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \varepsilon := 0.22 \quad V := 2.65 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad P_{r0} := 0.706 \quad P_{rs} := 0.697$$

El número de Reynolds:

$$Re_{ts} := \frac{V \cdot D}{v} \quad Re_{ts} = 7.906 \times 10^5$$

Como $Re > 2 \times 10^5$ entonces el régimen es turbulento

$$C := 0.076 \quad m := 0.7 \quad \text{Tabla 7.4 (Incropera et al., 2003)}$$

$$n := 0.37 \quad \text{para } Pr < 10 \quad (\text{Incropera et al., 2003})$$

$$Nu := C \cdot Re_{ts}^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{P_{r0}}{P_{rs}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad Nu = 898.348$$

$$h_{ts} := Nu \cdot \frac{k}{L} \quad h_{ts} = 593.808 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Pérdidas de calor por convección y radiación

Por convección

$$Q_{CTS} := h_{ts} \cdot A_{ts} \cdot (T_{sts} - T_0)$$

$$Q_{CTS} = 2.147 \times 10^7 \text{ W}$$

Por radiación

$$Q_{RTS} := \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{ts} \cdot (T_{sts}^4 - T_0^4)$$

$$Q_{RTS} = 6.676 \times 10^4 \text{ W}$$

Botella

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

$$S_2 := 8\text{ m} \quad d_1 := 5.222\text{ m} \quad d_2 := 4.8\text{ m} \quad d_m := 5.011\text{ m}$$

$$A_b := \pi \cdot S_2 \cdot d_m \quad A_b = 125.94\text{ m}^2$$

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

$$T_{sb} := (288.75 + 273.15)\text{K}$$

$$T_0 = 302.35\text{K}$$

$$V_a := 2.65 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad P_{rs} := 0.683 \quad T_{sb} = 561.9\text{K} \quad v := 16.09 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad k := 26.44 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

El número de Reynolds:

$$Re_b := \frac{V_a \cdot d_m}{v} \quad Re_b = 8.253 \times 10^5$$

Como $Re > 200000$ entonces el régimen es turbulento

$$Nu := C \cdot Re_b^m \cdot Pr^{0.37} \cdot \left(\frac{Pr_0}{Pr_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad Nu = 930.52$$

$$h_b := \frac{Nu \cdot k}{d_m} \quad h_b = 4.91 \times 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Pérdidas de calor por convección y radiación

Por convección

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

$$Q_{CB} = 1.605 \times 10^8 \text{ W}$$

Por radiación

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

$$Q_{RB} = 1.435 \times 10^5 \text{ W}$$

Pérdidas de calor totales por convección y radiación

Por convección

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

$$Q_{TC} = 1.82 \times 10^8 \text{ W}$$

Por radiación

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

$$Q_{TR} = 2.419 \times 10^5 \text{ W}$$

2.6- Principales resultados obtenidos en la determinación de las pérdidas de calor

En este epígrafe se expone un resumen de los principales resultados obtenidos en la determinación de las pérdidas de calor (Tabla 2.4), para ello se empleó el procedimiento de cálculo establecido en este capítulo (epígrafe 2.3), los parámetros antes expuestos (Tablas 2.1 y 2.3) y las propiedades termofísicas del aislante térmico y del aire (Epígrafe 2.5; Anexos 1 y 2).

Tabla 2.4. Resumen de los principales parámetros calculados en la determinación de las pérdidas de calor en las diferentes secciones del secadero.

Parámetros calculados	Sección: cámara de paso			Unidad	Ec.
	Variantes calculadas				
	Mínimo	Medio	Máximo		
Área total de la cámara de paso; A_0	234,94			m^2	2.3
Área del orificio del diámetro 1; A_1	30,81			m^2	2.4
Área del orificio del diámetro 2; A_2	56,79			m^2	2.5
Área de transferencia de calor en la cámara de paso; A .	147,35			m^2	2.6
Número de Rayleigh; R_{al} .	$3,435 \times 10^{12}$	$3,249 \times 10^{12}$	$2,997 \times 10^{12}$	----	2.7
Número de Nusselt; N_{UL} .	$1,651 \times 10^3$	$1,621 \times 10^3$	$1,579 \times 10^3$	----	2.10
Coeficiente de transferencia de calor por convección; h .	5,356	5,365	5,328	$W/m^2 K$	2.11
Flujo (pérdida) de calor por convección; q_{conv} .	$7,34 \times 10^4$	$7,72 \times 10^4$	$7,851 \times 10^4$	W	2.1
Flujo (pérdida) de calor por Radiación; q_{rad} .	$2,801 \times 10^4$	$3,169 \times 10^4$	$3,443 \times 10^4$	W	2.2
	Sección: tambor secador				
Área de transferencia de calor en el tambor secador; A .	603,18			m^2	2.12
Número de Reynolds; R_e	$2,782 \times 10^5$	$7,906 \times 10^5$	$1,409 \times 10^6$	----	2.13
Número de Nusselt; N_{UL} .	432,65	898,34	$1,345 \times 10^3$	----	2.14
Coeficiente de transferencia de calor por convección; h .	281,00	593,80	904,17	$W/m^2 K$	2.15

Flujo (pérdida) de calor por convección; q_{conv} .	$9,661 \times 10^6$	$2,147 \times 10^7$	$3,218 \times 10^7$	W	2.1
Flujo (pérdida) de calor por Radiación; q_{rad} .	$5,915 \times 10^4$	$6,676 \times 10^4$	$6,888 \times 10^4$	W	2.2
Sección: botella					
Área de transferencia de calor en la botella; A.	125,94			m ²	2.16
Número de Reynolds; R_e	$2,904 \times 10^5$	$8,253 \times 10^5$	$1,471 \times 10^6$	----	2.13
Número de Nusselt; N_{UL} .	448,46	930,52	$1,393 \times 10^3$	----	2.14
Coeficiente de transferencia de calor por convección; h .	$2,325 \times 10^3$	$4,91 \times 10^3$	$7,473 \times 10^3$	W/m ² K	2.15
Flujo (pérdida) de calor por convección; q_{conv} .	$7,496 \times 10^7$	$1,605 \times 10^8$	$2,466 \times 10^8$	W	2.1
Flujo (pérdida) de calor por Radiación; q_{rad} .	$1,339 \times 10^5$	$1,435 \times 10^5$	$1,518 \times 10^5$	W	2.2
Resumen de los cálculos	Pérdidas de calor totales en el secadero				
Pérdidas de calor	Mínimo	Medio	Máximo	Unidad	Ec.
Por convección	$8,47 \times 10^7$	$1,82 \times 10^8$	$2,788 \times 10^8$	W	2.17
Por radiación	$2,211 \times 10^5$	$2,419 \times 10^5$	$2,552 \times 10^5$	W	2.18

Como se observa en los resultados mostrados en la Tabla 2.4 las pérdidas de calor son elevadas, siendo la menor igual a $2,11 \times 10^5$ y la mayor a $2,788 \times 10^8$. Al incidir adecuadamente sobre los factores que la determinan, las mismas se pueden reducir y con ello aumentar la eficiencia térmica de la instalación.

2.7- Conclusiones del capítulo II

- Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor en los secadores de la empresa Ernesto Che Guevara, el mismo se fundamenta en las leyes que rigen la transferencia de calor por convección y radiación por el exterior de cilindros horizontales.
- Las pérdidas de calor por convección obtenidas para los valores promedio fueron: $7,72 \times 10^4$; $2,147 \times 10^7$; $1,605 \times 10^8$ W y por radiación $3,169 \times 10^4$; $6,676 \times 10^4$; $1,435 \times 10^5$ W en la cámara de paso, el tambor secador y la botella respectivamente.
- Las pérdidas de calor totales por convección y radiación obtenidas en el secadero para los valores promedio fueron $1,82 \times 10^8$ y $2,419 \times 10^5$ W.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

3.1- Introducción

En la actualidad las investigaciones que se desarrollan en Cuba deben considerar tres aspectos esenciales, 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 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 para las variantes calculadas muestran la existencia de elevadas pérdidas de energía en forma de calor, en general este comportamiento se debe al mal estado del aislamiento térmico presente 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 seco (humedad final) aspecto que no ocurre con los restantes factores que influyen sobre el proceso de secado y en general sobre la eficiencia térmica del secadero.

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 del secadero 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:

- Sustituir el aislamiento del secador por otro más eficiente, esto haría posible un mayor aprovechamiento del calor en el interior del secadero y reduciría las pérdidas de calor por convección y radiación al medio ambiente.
- Lograr el tiempo de retención adecuado para la productividad presente en el secador, esto garantiza 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 secadero
- 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.

Las pérdidas de calor calculadas muestran comportamientos muy variados y varían en amplios rangos para las diferentes secciones del secadero y entre las variantes analizadas

3.2.1- Comportamiento de las diferentes pérdidas de calor obtenidas

Al valorar el comportamiento de las pérdidas de calor por convección en la cámara de paso (Figura 3.1), se observa un crecimiento lógico y esperado, pero se destaca un incremento brusco entre 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 (Figura 3.2) 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. De los aspectos antes mencionados se infiere la necesidad de reforzar y mejorar constantemente el aislamiento térmico en esta sección de la instalación, con el objetivo de reducir las pérdidas de calor y con ello contribuir al ahorro de energía y combustible.

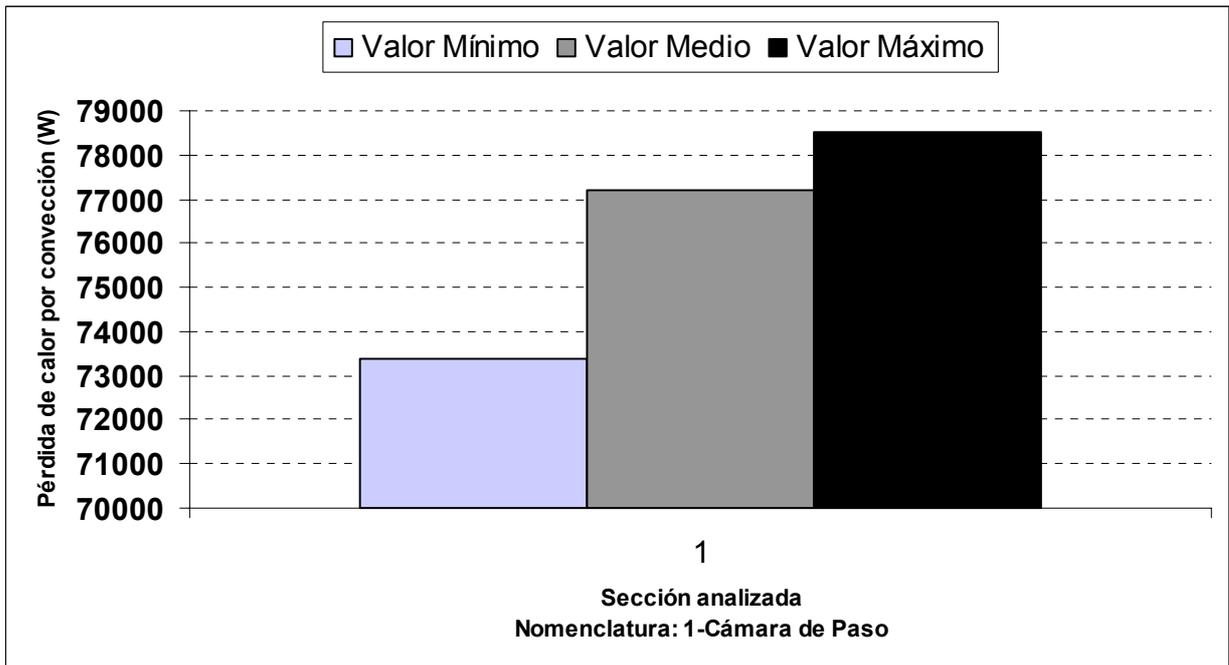


Figura 3.1. Comportamiento de las pérdidas de calor por convección en la cámara de paso para las tres variantes calculadas.

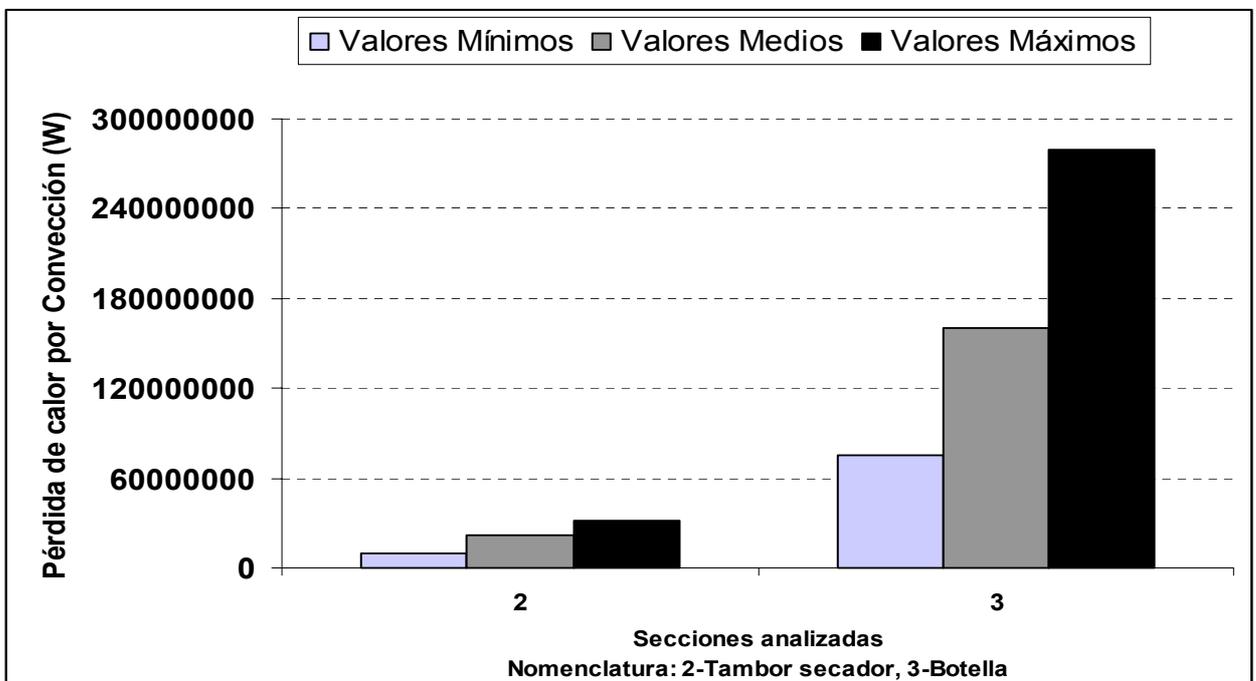


Figura 3.2. Comportamiento de las pérdidas de calor por convección en el Tambor secador y la Botella para las tres variantes calculadas.

En la Figura 3.3 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.

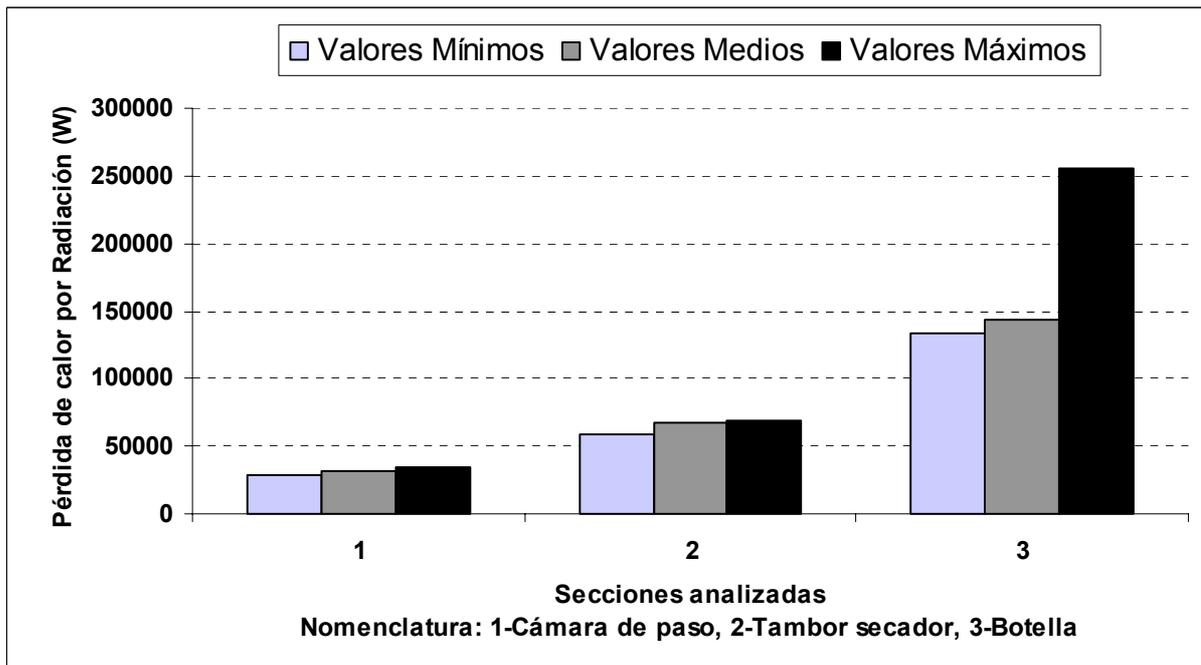


Figura 3.3. Comportamiento de las pérdidas de calor por radiación en la Cámara de paso, el Tambor secador y la Botella para las tres variantes calculadas.

3.3- Valoración económica

En la Tabla 3.1 se expone el calor total ingresado por el combustible al secador considerando fijo el valor calórico inferior y el consumo de combustible para las tres condiciones de explotación analizadas. El precio (464 USD/t) utilizado en el cálculo fue el reportado por el departamento de Economía energética de la empresa Ernesto Che Guevara referido al mes de Mayo de 2008.

Tabla 3.1. Calor total ingresado por el combustible al secadero.

Equipo analizado	Consumo de combustible (kg/h)	Valor calórico del combustible (kJ/kg)	Calor ingresado (kJ/h)
Secadero 1	2200	40470	89034000
Gasto económico por consumo de combustible (USD/h)			1020,8

Como se puede apreciar en la Tabla 3.1 el consumo de combustible horario del secadero es 2200 kg, el gasto económico asociado al mismo asciende a 1020,8 USD. 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. En la Tabla 3.2 se exponen los resultados del análisis.

Tabla 3.2. Análisis económico para el secadero analizado

Equipo analizado	Consumo de combustible (t/h)	Consumo de combustible (t/día)	Consumo de combustible (t/mes)	Consumo de combustible (t/5meses)
Secadero 1	2,200	52,8	1584	8025,6
Importe	(USD/h)	(USD/día)	(USD/mes)	(USD/5meses)
	1020,8	24499,2	734976	3723878,4

Los resultados mostrados en la Tabla 3.2 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 secaderos (5) 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 18 619 392 USD.

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 3.3.

Tabla 3.3. Análisis económico para una disminución del consumo de combustible en 0,1t/h

Equipo analizado	Consumo de combustible (t/h)	Consumo de combustible (t/día)	Consumo de combustible (t/mes)	Consumo de combustible (t/5meses)
Secadero 1	2,100	50,4	1512	7660,8
Importe	(USD/h)	(USD/día)	(USD/mes)	(USD/5meses)
	974,4	23385,6	701568	3554611,2
Diferencia entre los gastos	46,4	1113,6	33408	169267,2

Al generalizar los resultados del análisis anterior a los 5 secaderos que trabajan de forma continua en la empresa el gasto económico por consumo de combustible para los meses analizados en las nuevas condiciones sería de 17 77 3056 USD y la diferencia entre los gastos económicos totales sería de 846 336 USD en cinco meses de trabajo.

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.
- El drenaje en el depósito exterior es insuficiente (hay dos canales que están secos).
- Los gases que salen de los electrofiltros de cada secador contienen CO (0,4%) y SO₂ y aunque cumplen las normas deben ser controlados en ese nivel como máximo mediante un monitoreo periódico.

- 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 (correa caliente y transportadores por donde se añade petróleo) 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 los secadores se queman los gases calientes de los hornos de reducción, en ocasiones suceden los salideros en la zona de alimentación a la cámara de combustión. Estas pérdidas son provocadas por problemas mecánicos y eléctricos, violándose las normas de $0,2 \text{ g/m}^3$ de polvo.
- En ocasiones se supera la norma de concentración de polvo (de 1 a 4 mg de polvo/ m^3), por esto se deben realizar determinaciones de polvo en la atmósfera en el área de trabajo.

3.4.1- 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 $1 \mu\text{m}$. 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.

Las partículas pueden tener efecto tóxico de las maneras siguientes:

- Pueden ser intrínsecamente tóxicas por las características químicas inherentes.
- Pueden interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
- Puede actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida en su superficie.

Los polvos se clasifican según la forma de acción biológica sobre el organismo humano en:

Polvos inherentes: son aquellos que no provocan reacción aparente en los depósitos linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.

Polvos tóxicos: ocasionan en uno o varios órganos y sistemas específicos del organismo humano.

Polvos energéticos: son los causantes de afecciones alérgicas, sus efectos dependen en gran medida de la susceptibilidad del individuo.

Polvos fibrógenos: ocasionan fibrosis pulmonar característica de la neumoconiosis.

3.4.2- 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 laboral. 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 uno 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.

3.4.3- 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 electrostático (ciclones y electrofiltros). Los gases que se expulsan a la atmósfera contienen CO₂, SO₂, N₂, O₂, 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 secadero.
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 (mantenimiento del ducto de gases).
6. Instalación de un nuevo sistema de combustión para el secado de mineral (cámara Voltón).
7. Instalación para la dosificación y mezclado del petróleo en los alimentadores de los molinos.
8. Instalación de tarjetas de control automatizado en los electrofiltros, mejorando la eficiencia de estos.
9. Proyecto para el tratamiento de los residuales líquidos y restablecimiento del sistema por proyecto original.



3.5- Conclusiones del capítulo III

- Quedó establecida la interrelación existente entre las diferentes pérdidas de calor en las tres secciones de la instalación a través de los gráficos de comportamiento.
- El gasto económico por concepto de consumo de combustible asociado al secador analizado asciende a 3723878,4 USD para los cinco meses considerados.

CONCLUSIONES

- Se comprobó la existencia de múltiples investigaciones relacionadas con los procesos de secado en cilindros rotatorios, pero en ninguno de ellos determinan las pérdidas de calor al medio ambiente para diferentes condiciones de explotación existente en los secaderos de la empresa Ernesto Che Guevara.
- Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor en los secadores de la empresa Ernesto Che Guevara. Las pérdidas de calor por convección obtenidas para los valores promedio fueron: $7,72 \times 10^4$; $2,147 \times 10^7$; $1,605 \times 10^8$ W y por radiación $3,169 \times 10^4$; $6,676 \times 10^4$; $1,435 \times 10^5$ W en la cámara de paso, el tambor secador y la botella respectivamente.
- Las pérdidas de calor totales por convección obtenidas en el secadero fueron $8,47 \times 10^7$; $1,82 \times 10^8$; $2,788 \times 10^8$ W y por radiación ascendieron a $2,11 \times 10^5$; $2,419 \times 10^5$; $2,552 \times 10^5$ W para los valores mínimos, medios y máximos.
- El gasto económico por concepto de consumo de combustible asociado al secador analizado asciende a 3723878,4 USD para los cinco meses considerados.
- Se comprobó que las afectaciones medioambientales más importantes existentes en la planta son las emisiones continuas de polvo y gases producto de la combustión, las mismas son mitigadas a partir de la implementación de medidas para la protección del medio ambiente.



RECOMENDACIONES

- Estudiar el comportamiento de las pérdidas de calor para otro tipo de aislante térmico con la finalidad de encontrar el más racional para las condiciones de explotación de los secaderos de la Empresa Ernesto Che Guevara.
- Impartir curso de capacitación en transferencia de calor a los operarios y personal administrativos, lo que permitirá elevar su preparación técnica y le facilitará la toma de decisiones respecto al proceso.
- Incorporar a los secaderos los equipos correspondientes para la medición del flujo de gases provenientes de la planta Hornos de Reducción.

RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Boizan, M. Macrocinética del secado de Bagazo. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1991.145p.
2. Dinulescu, H; E. Eckert. Analysis of the one dimensional moisture migration caused temperature gradients in porous medium. Institute Heat Mass Transfer 28 (9): 1069-1077.1985.
3. Ferguson, W.; J. Turner. A comparison of the finite element and control volume numerical solution techniques applied to timber drying problems below the boiling point. Int. J. Num. Methods Eng.38: 451-467. 1995.
4. Filonenko, G. Secado de semillas de tomate. Conferencia nacional de secado- Sección de energética.Editorial Profizdat, Moscú, 1958.
5. Fulford, G. A suvey of recent soviet research on the drying of solids. Can. J Chem. Eng. 47: 378-491.1969.
6. Hall, C. Drying technollogy An International Journal. New York, 1983.
7. Huang, C. Multi-Phase moisture transfer in porous media subjected to temperature gradient Int .J.Heat Mass Transfer 22: 295-307.1979.
8. Incropera, F.; D. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II y III. 723p.
9. Ilic, M.; I. Turner. Convective drying of a consolidated slab of wet porous materials. Int .J. Heat Mass Transfer 32(12): 215-262.1989.
10. Informe económico anual de la empresa Ernesto Che Guevara. Moa, 2006.
11. 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.
12. Kasatkin, A. Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. /pág 262-366.
13. Knoule, F. El secado. Bilbao. Ediciones Urno. 1968./pág 50-150.
14. Krisher, O. Fundamentos científicos de la técnica del secado. Editorial Izdatinlit. Moscú, 1961.
15. Kuroshkina, M. La fluidización en la industria Editorial XIMIA. Leningrado, 1972.

16. Lykov, A. Fenómenos del transporte en cuerpos capilaroporosos. Editorial gostejizdat. Moscú, 1954.
17. Lykov, A. Teoría del secado. Editorial Energía, 2da edición, Moscú, 1968.
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. Comportamiento 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 1

DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR PARA LAS DIFERENTES SECCIONES DEL SECADOR Y LAS DIFERENTES VARIANTES CONSIDERADAS

CÁLCULO PARA LOS VALORES MÍNIMOS

En el secador existen pérdidas de calor por convección y por radiación al medio ambiente

Cámara de paso

En esta sección la convección es libre.

$$L_1 := 3.496\text{m} \quad d_1 := 3.132\text{m}$$

$$a := 6.83\text{m} \quad d_2 := 4.252\text{m}$$

$$h := 9.065\text{m}$$

$$A_0 := 2 \cdot (a \cdot h + a \cdot L_1 + h \cdot L_1) \quad A_1 := \pi \cdot d_1^2 \quad A_2 := \pi \cdot d_2^2$$
$$A_0 = 234.966 \text{ m}^2 \quad A_1 = 30.817 \text{ m}^2 \quad A_2 = 56.798 \text{ m}^2$$

$$A_{cp} := A_0 - (A_1 + A_2) \quad A_{cp} = 147.35 \text{ m}^2$$

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

Donde:

$T_s = 116 \text{ }^\circ\text{C}$ es la temperatura de la superficie.

Para el aislante Fibra de vidrio

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

$$T_{scp} := (116 + 273.15)\text{K} \quad T_0 := (23 + 273.15)\text{K}$$
$$T_{scp} = 389.15 \text{ K} \quad T_0 = 296.15 \text{ K} \quad T_{pelicular} := \frac{T_{scp} + T_0}{2} \quad T_{pelicular} = 342.65 \text{ K}$$

$$k := 29.4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad Pr := 0.701 \quad \nu := 20.11 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad g := 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \beta := \frac{1}{T_{pelicular}}$$

$$\alpha := 28.71 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad L := h \quad \varepsilon := 0.22$$

$$R_{al} := \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{scp} - T_0) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

$$R_{al} = 3.435 \times 10^{12}$$

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

$$N_{ul} := \left[0.825 + \frac{0.387 \cdot R_{al}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad N_{ul} = 1.651 \times 10^3$$

$$\text{Luego } h := N_{ul} \cdot \frac{k}{L} \quad h = 5.356 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Pérdidas de calor por convección y radiación

Por convección

$$Q_{CCP} := h \cdot A_{cp} \cdot (T_{scp} - T_0)$$

$$Q_{CCP} = 7.34 \times 10^4 \text{ W}$$

Por radiación

$$Q_{RCP} := \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{cp} \cdot (T_{scp}^4 - T_0^4)$$

$$Q_{RCP} = 2.801 \times 10^4 \text{ W}$$

Tambor secador

La convección en esta sección es forzada, todas las propiedades se buscan a la temperatura del fluido, excepto Pr_s , que se determina a T_s .

$$L := 40 \text{ m} \quad D := 4.8 \text{ m} \quad A_{ts} := \pi \cdot D \cdot L \quad A_{ts} = 603.186 \text{ m}^2$$

$$T_{sts} := (80 + 273.15) \text{ K}$$

$$T_{sts} = 353.15 \text{ K}$$

$$T_0 = 296.15 \text{ K}$$

$$T_f := \frac{T_{sts} + T_0}{2}$$

$$T_f = 324.65 \text{ K}$$

$$k := 25.98 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\nu := 15.53 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$\varepsilon := 0.22$$

$$V := 0.9 \frac{m}{s}$$

$$Pr_0 := 0.708$$

$$Pr_s := 0.699$$

El número de Reynolds:

$$Re_{ets} := \frac{V \cdot D}{\nu}$$

$$Re_{ets} = 2.782 \times 10^5$$

Como $Re > 2 \times 10^5$ entonces el régimen es turbulento

$$C := 0.076 \quad m := 0.7 \quad \text{en la tabla 7.4 (Incropera et al., 2003)}$$

$$n := 0.37 \quad \text{para } Pr < 10 \quad (\text{Incropera et al., 2003})$$

$$Nu_u := C \cdot Re_{ets}^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{Pr_0}{Pr_s} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_u = 432.65$$

$$h_{ts} := Nu_u \cdot \frac{k}{L}$$

$$h_{ts} = 281.006 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Pérdidas de calor por convección y radiación

Por convección

$$Q_{CTS} := h_{ts} \cdot A_{ts} \cdot (T_{sts} - T_0)$$

$$Q_{CTS} = 9.661 \times 10^6 \text{ W}$$

Por radiación

$$Q_{RTS} := \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{ts} \cdot (T_{sts}^4 - T_0^4)$$

$$Q_{RTS} = 5.915 \times 10^4 \text{ W}$$

Botella

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

$$S_2 := 8 \text{ m} \quad d_1 := 5.222 \text{ m} \quad d_2 := 4.8 \text{ m} \quad d_m := 5.011 \text{ m}$$

$$A_b := \pi \cdot S_2 \cdot d_m \quad A_b = 125.94 \text{ m}^2$$