

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

## TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Título:** Diagnóstico térmico del proceso de secado en los tambores cilíndricos rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara.

**Autor:** Gailani Azman Hmeida.

**Tutor:** M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja.

**Moa-2008**

**"Año 50 de la Revolución"**



## RESUMEN

---

En la actualidad los elevados consumos de combustibles en el proceso de secado constituye un problema no resuelto en la empresa Ernesto Che Guevara debido a que se consume el 23% del total de la energía consumida en la empresa. En el presente trabajo se realizó la evaluación térmica del proceso de secado en los cilindros rotatorios de la referida empresa, siendo los rendimientos térmicos para el secador analizado igual a 87,2 y 85,6% para las condiciones actuales de explotación y para un incremento de la productividad hasta 130 t/h.

Los consumos de combustible para 100 y 130 t/h de productividad fueron 2073,48 y 2941,66 kg/h respectivamente. Los gastos económicos asociados a los mismos ascienden a 3462739 y 4912646 USD para los cinco meses y el precio del combustible considerados en el trabajo.

Finalmente se comprobó que las afectaciones medioambientales más importantes en el proceso de secado son las emisiones continuas de polvo, ruido y gases producto de la combustión, las mismas en ocasiones son superiores a las normas internacionales establecidas.



---

## ABSTRACT

---

At the present time the high consumptions of fuels in the drying process constitute a problem no resolved in the company Ernesto Che Guevara because the 23% of the total of the energy consumed in the company is wasted in this process. In the present work we realized the thermal evaluation of the drying process in the rotational cylinders of the company. we find that the thermal efficiency for the analyzed dryer is 87,2 and 85,6% for the current conditions of exploitation and for a rise of the productivity up to 130 t/h.

The consumptions of fuel for 100 and 130 t/h of productivity were 2073,48 and 2941,66 kg/h respectively. The economic expenses generated by this consumptions are 3462739 and 4912646 USD for the five analized months evaluating the fuel at the price considered in this work.

Finally it was proven that the most important environmental affectations asociated with the drying process are the continuous emissions of powder, noise and gases product of the combustion, which ocasionaly exceed the established international norms.



## ÍNDICE

Contenido	Págs.
<i>Introducción</i> .....	<i>1</i>
<b>Capítulo I</b> <b>Marco teórico- metodológico de la investigación</b> .....	<b>5</b>
1.1- <i>Introducción</i> .....	5
1.2- <i>Trabajos precedentes</i> .....	5
1.3- <i>Descripción del flujo tecnológico de la planta</i> .....	9
1.4- <i>Descripción de los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa</i> ..	10
1.5- <i>Conclusiones del capítulo I</i> .....	16
<b>Capítulo II</b> <b>Diagnóstico del secador cilíndrico rotatorio analizado en la empresa Ernesto Che Guevara</b> .....	<b>17</b>
2.1- <i>Introducción</i> .....	17
2.2- <i>Procedimiento de cálculo para la evaluación térmica del secador</i> ...	17
2.3- <i>Balance térmico para un incremento de la productividad</i> .....	35
2.4- <i>Conclusiones del Capítulo II</i> .....	38
<b>Capítulo III</b> <b>Análisis de los resultados, valoración económica e impacto ambiental de la investigación</b> .....	<b>39</b>
3.1- <i>Introducción</i> .....	39
3.2- <i>Análisis de los resultados de la investigación</i> .....	39
3.3- <i>Valoración económica</i> .....	42
3.4- <i>Principales problemas ambientales detectados en la planta</i> .....	43
3.5- <i>Conclusiones del Capítulo III</i> .....	48
<b>Conclusiones</b> .....	<b>49</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>50</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>51</b>
<b>Anexos</b> .....	---



## INTRODUCCIÓN

---

La educación energética de un país es de gran importancia, pues ello significaría no sólo un mejor y más eficiente aprovechamiento de los combustibles fósiles con que cuenta la humanidad, sino además, una garantía en la transición hacia una economía energética sostenible en todo el territorio nacional.

El desarrollo industrial de las tecnologías en la industria del níquel exige disminuir los consumos de portadores energéticos y que cada una de las instalaciones de las empresas sean más eficientes (Retirado, 2007).

Hoy en día la industria niquelífera cubana se encuentra enfrascada en la modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos de producción por tonelada de níquel y trabaja bajo las normativas del perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional. Este último como proceso integral no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica.

La búsqueda de una tecnología adecuada para el control de la variables más influyentes, durante 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).

El proceso CARON es continuo que se desarrolla a presión atmosférica y el equipamiento tecnológico se distingue por su sencillez y amplia utilización de los aparatos conocidos como (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación entre otros). Estas características favorecen la creación de un producto con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniaco admite la elaboración de la mezcla de los minerales lateríticos y serpentiniticos, mientras que el esquema de lixiviación ácida sulfúrica permite la elaboración de la fracción laterítica.



Teniendo en cuenta los precios del petróleo en el mercado internacional, el proceso amoniacal es muy caro, sin embargo, tiene muchas ventajas respecto la tecnología ácida a presión; una de ellas está dada por el gran ahorro de reactivos.

El producto final se obtiene a través de un proceso de sinterización del mineral estable el cual se exporta en el mercado mundial.

El esquema tecnológico está basado en el proceso de lixiviación carbonato - amoniacal del mineral reducido, donde se evidencian las siguientes *plantas de proceso*: Mina, Preparación de Mineral, Hornos de reducción, Lixiviación y Lavado, Recuperación de Amoniaco, Calcinación y Sínter; y *auxiliares*: Central Termoeléctrica, Potabilizadora de agua y planta de Cobalto, entre otras.

### **Fundamento de la investigación**

El secado es la eliminación del agua que contienen los materiales, el mismo se realiza a través de un proceso de transferencia de calor y masa, también puede efectuarse por medios mecánicos (sedimentación, centrifugación y filtración). Sin embargo, la deshidratación más completa se alcanza mediante el secado térmico (Knoule, 1968).

Entre los aspectos más importantes que se han planteado los directivos de esta entidad en función de disminuir el consumo de portadores energéticos está la realización eficiente del proceso de secado en los cilindros rotatorios, aspecto este que en la actualidad no se ha logrado eficientemente debido los grandes volúmenes de producción manejados a partir de la ampliación y modernización de la empresa y el alto contenido de humedad presente en el mineral alimentado a los secadores con una humedad que oscila entre 36 y 38 %, valores estos que se incrementan en los días lluviosos como resultado del intemperismo al que constantemente está sometido el mineral.

En la actualidad los elevados consumos de combustibles en el proceso de secado constituye un problema no resuelto debido a que se consume el 23% del total de la energía



consumida en la empresa (Informe económico anual de la empresa Ernesto Che Guevara, 2006).

La referida empresa ha incrementado paulatinamente su productividad en los últimos años, sin embargo no se han realizados los diagnósticos térmicos a los diferentes equipos que integran el proceso productivo de la fábrica, entre esos equipos están los secaderos cilíndricos rotatorios de los cuales no se conoce la eficiencia térmica actual.

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

***En la actualidad no se ha determinado la eficiencia térmica y el consumo de combustible de los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara, para las condiciones actuales de explotación y considerando un incremento en la productividad de estos equipos.***

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

El **secadero cilíndrico rotatorio 3** de la empresa Ernesto Che Guevara.

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

***Si se realiza un diagnóstico térmico del secadero analizado entonces es posible determinar la eficiencia térmica y el consumo de combustible de la instalación para las condiciones actuales de explotación de la empresa y considerando un incremento de la productividad del equipo.***

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

***Determinar las eficiencia térmica del secador cilíndrico rotatorio 3 para las condiciones actuales de explotación y considerando un incremento de la productividad.***

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

- 1- Realizar una búsqueda bibliográfica que permita el establecimiento del estado del arte de la temática y la situación actual de la misma en la empresa.



- 2- Establecer el procedimiento de cálculo satisfactorio para la evaluación térmica de los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara.
- 3- Obtener la eficiencia térmica y el consumo de combustible del objeto de estudio para las condiciones anteriormente descritas.
- 4- Analizar los resultados del diagnóstico térmico del secador.
- 5- Establecer gráficos de comportamiento de los diferentes parámetros que caracterizan al proceso.
- 6- Valorar el efecto económico que tiene el secador analizado para la empresa y las afectaciones provocadas por este al medio ambiente.



## CAPÍTULO I

---

### MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1- Introducción

En el presente capítulo se realiza un análisis de las diferentes publicaciones relacionadas con la temática de secado, con el fin de disponer de los elementos básicos esenciales para el desarrollo del diagnóstico térmico. Se abordan además temas relacionados con el proceso de secado del mineral laterítico el cual tiene una importancia vital dentro del proceso de obtención del Níquel y en particular los secaderos de mineral, de los cuales depende en gran medida la realización racional del proceso de secado, en tal sentido el **objetivo** del capítulo es: establecer los fundamentos del proceso de secado del mineral mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

#### 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.

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.

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.

Todo lo anterior es aplicable al secado de materiales de forma estática con régimen de temperatura constante. En el secado del mineral laterítico estas condiciones no se cumplen debido a que el proceso depende de los parámetros termofísicos del sólido objeto de secado y de los climatológicos de la región que varían aleatoriamente y no pueden ser preestablecidos, debido a esto los mecanismos de transferencia de calor y masa se manifiestan de forma compleja, difícil de predecir a través del secado estático con regímenes de temperatura constante. De los aspectos anteriores se deduce la necesidad de estudiar los principales trabajos científicos referidos al proceso con velocidad de secado decreciente.

### **1.3- Descripción del flujo tecnológico de la planta**

En la Planta de Preparación de Mineral es donde se inicia el proceso productivo de la fábrica según la tecnología carbonato-amoniaca. La misma está formada por las siguientes secciones: Patio de homogenización, Secaderos y Molinos.

Los secaderos cilíndricos rotatorios se dividen en dos tipos, conforme a las direcciones de la corriente de material a ser secado y de los gases de secado. La elección entre un secador rotatorio a contra-corriente o no se efectúa de conformidad con las propiedades del material a secar:

- Grado de secado
- Calor específico
- Capacidad de evaporación de humedad
- Inflamabilidad
- Propiedades de sinterización

El mineral procedente de la mina se transporta hacia a la Planta de Preparación de Mineral a través de las grúas Gantry o directamente por los transportadores de enlace (TR-14 Y TR-15).



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.

El mineral almacenado en el depósito interior se usará cuando, por cualquier tipo de avería, 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 mineral que llega a la planta con una humedad promedio de 40% es secado en los tambores cilíndricos rotatorios hasta valores de 4,5-5,5% de humedad, luego es llevado por transportadores de bandas hacia la sección de molienda donde es sometido a un proceso de molienda en los molinos cilíndricos de bolas hasta valores de granulometría de 200 mesh para el 85-87% de la cantidad de mineral.

#### **1.4- Descripción de los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa**

Para el secado del mineral en esta planta se emplean tambores rotatorios o 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 (secadero) 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 otros elementos llamados 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 secadero 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 con ello 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.

➤ **Secado en tambores rotatorios**

El mineral al entrar al secadero tendrá una humedad de 40 % aproximadamente y saldrá 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 alcanzarán una temperatura de 1500 °C y bajarán 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 de tiro centrífugo 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.

### ➤ **Estructura interna de los secaderos**

En el interior del cilindro se colocan elementos encargados de suspender el mineral y dejarlo caer en forma de cortinas uniformes, durante este recorrido es donde se produce el secado con mayor efectividad. Los gases calientes se ponen en contacto con la superficie de las partículas que caen, una parte se queda en el fondo del cilindro y es sometido a otro procedimiento de intercambio térmico y el resto se esparce en forma de torrentes, el número de torrentes que se forma en el cilindro secador depende del número y forma de las paletas.

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 ellas son: periféricos, sectoriales, sectoriales con anillos interiores y en forma de cruz.

Para los materiales en pedazos o húmedos que no se rompen al caer, se instala un sistema de levantadores periféricos que garantiza la elevación del material y su caída desde una altura próxima a la magnitud del diámetro del tambor.

Para los materiales en pedazos pero quebradizos, se emplean los levantadores sectoriales, en estos la caída se produce desde una altura pequeña y disminuye el peligro de hendidura en los mismos.

Para los materiales granulados sin una gran cantidad de partículas pequeñas y polvo se emplean los levantadores sectoriales con anillos interiores o en forma de cruz. Finalmente, para los materiales tan pequeños como el polvo se utilizan levantadores en forma de volteo que constan de mayas de pequeña sección, aisladas unas de otras, en



las cuales el traspaso del material se efectúa desde una altura pequeña debido a que en las rejillas de volteo está la superficie; con su utilización mejoran las condiciones de sedimentación del polvo.

Durante el secado de los materiales se puede cambiar el tipo de levantadores a lo largo del secador con vista a lograr mejores características del producto obtenido.

En el secado del mineral laterítico en las Empresas del Níquel actualmente se utilizan los levantadores sectoriales, según la literatura 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- Principales variables que caracterizan el secado del mineral laterítico en tambores rotatorios**

##### **Tiempo de retención del mineral**

Este factor determina el tiempo medio necesario de permanencia del mineral dentro del secadero, se determina de forma experimental y es importante conocerlo para garantizar un producto con las características correctas.

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

Donde:

T :tiempo; [h].

L: longitud; [m].



Sd: inclinación; [m/m].

D: diámetro; [m].

N: velocidad de rotación; [rpm].

### **Velocidad del gas**

Esta velocidad es importante y se calcula sobre la base de la capacidad del secadero. 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 además, el consumo de petróleo debe aumentar para dar más calor a estos gases, afectando los costos de operación de la planta. Así, el arrastre de polvo aumenta llevando consigo partículas con alto contenido de humedad que pueden afectar el sistema de limpieza de gases.

Una baja velocidad de los gases (ya sea producto a una avería o mala operación) puede provocar un recalentamiento de la superficie del secadero, un deficiente secado producto a la saturación de estos gases calientes y también el recalentamiento en la cámara de combustión con posible desprendimiento de ladrillos.

Por esto la velocidad de los gases debe ser la adecuada, según cálculos, para garantizar una buena operación de secado, esta puede tomar valores entre 3 y 5 m/s.

### **Temperatura del gas**

La velocidad depende directamente de la temperatura que traerá como resultado lo anteriormente expuesto, además con gases muy calientes se afecta el sistema de colección de polvo en los electrofiltros pues la eficiencia disminuye producto a que los gases arrastran el polvo por tener más velocidad. También pueden dañarse los elementos sensores de este sistema de colección de polvo.

### **Diámetro del secadero**

Con un diámetro pequeño la cortina de mineral que se forma recorre un tramo muy corto lo que no le permite estar mayor tiempo en contacto con los gases. Todo lo contrario ocurre cuando se usa un diámetro grande. El diámetro se calcula en dependencia de la



cantidad de mineral, entre otras cosas y no puede ser infinitamente grande porque el consumo de energía es proporcional al diámetro y a la carga del tambor secador

### **Longitud del secadero**

También se tiene en cuenta la capacidad del secadero; la longitud de este debe permitir el secado del mineral que se alimenta hasta la humedad requerida cuando el equipo está a máxima capacidad. En la primera mitad del tambor la humedad se elimina en mayor cuantía por estar los gases más calientes, utilizando la longitud restante para liquidar una cantidad pequeña de humedad.

### **Pendiente del secadero**

Esta permite que el mineral se vaya arrastrando a la velocidad adecuada hasta la descarga del secadero. Para equipos largos este ángulo oscila entre 2,5 y 3 grados y para los cortos pueden llegar hasta 6 grados.

### **Capacidad de los levantadores del secadero**

Estos son los elementos fundamentales que intervienen en el secado, pues mediante ellos es posible elevar el material y dejarlo caer en forma de cortinas, lo que permite el contacto con el gas caliente. A medida que rota el secadero, las paletas recogen el mineral y lo hacen caer en cascadas en finas corrientes paralelas. El aire caliente fluye a través del cilindro entre las cortinas formadas al caer el mineral.

La capacidad de los levantadores depende de la altura radial de las paletas y el número de cortinas que caen dependen del número y forma de las paletas o levantadores.

### **Velocidad de rotación del secadero**

El mineral recogido por los levantadores debe ser descargado en forma de cortinas uniformes. Para ello se necesita de una velocidad adecuada. Si la velocidad es pequeña, el mineral rodará en forma paralela sin formar cortinas. De igual forma si la



velocidad es muy alta, el mineral seguirá una trayectoria circular, lo que no permitirá la formación de las cortinas y con ello el secado incorrecto.

De aquí que sea necesario trabajar dentro del rango de revoluciones proyectadas para cada tambor secador a fin de garantizar que el producto obtenido posea los valores de humedad deseada.

### **Otras condiciones**

Los secaderos tienen que ser cargados de forma apropiada, ya que si se llenan inadecuadamente de material, el mismo quedará sobre la parte superior y no es expuesto a la corriente de gases calientes y la humedad de salida del mineral será afectada por esta razón.

De igual forma ocurre cuando el equipo se carga por debajo de lo debido. En este caso existe posibilidad de que el material pueda avanzar muy rápidamente por el secadero hacia la descarga y por consiguiente, no se seque.

### **1.5- Conclusiones del capítulo I**

- El desarrollo del marco teórico de la investigación permitió establecer los fundamentos técnicos necesarios para la comprensión y el diagnóstico térmico del proceso de secado en los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara.
- En los secadores se han realizados múltiples trabajos hasta este momento, pero en ninguno de ellos se calcula la eficiencia térmica y el consumo de combustible para las condiciones actuales de explotación.
- Las instalaciones de secado de la empresa Ernesto Che Guevara en la actualidad presentan un grado de automatización primario que contempla la medición y registros de los parámetros fundamentales del proceso por un autómata programable.



## CAPÍTULO II

---

### DIAGNÓSTICO TÉRMICO DEL SECADOR CILÍNDRICO ROTATORIO ANALIZADO EN LA EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA

#### 2.1- Introducción

La evaluación térmica sistemática de los procesos de secado es muy importante en el contexto actual donde los precios del combustible alcanzan record diarios. En la empresa Ernesto Che Guevara se desarrolla el secado en secadores cilíndricos rotatorios que son considerados juntos a los Hornos de Reducción y los Generadores de vapor los equipos más consumidores de combustibles de la fábrica. Saber cual es la eficiencia térmica de estos equipos es de vital importancia para los administrativos, es por ello que el **objetivo** del presente capítulo es:

Obtener la eficiencia térmica y el consumo de combustible del secador estudiado para las condiciones actuales de explotación y para un incremento de la productividad.

#### 2.2- Procedimiento de cálculo para la evaluación térmica del secador

En el presente epígrafe se expone el procedimiento de cálculo y los resultados del diagnóstico térmico, se relacionan juntos porque el método es iterativo y de exponerlos por separado sería muy engorroso su entendimiento. Para resolver las ecuaciones se emplearon los software Mathcad 2001 Professional y Micosoft Excel 2003.

##### 2.2.1- Parámetros de trabajo y descripción de cada una de las corrientes

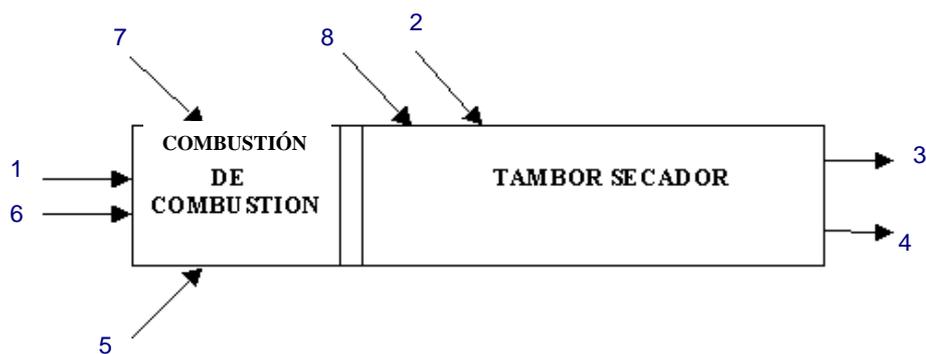
Los valores promedios de los parámetros mostrados en la Tabla 2.1 se obtuvieron de las mediciones realizadas al secador 3. El proceso de medición se desarrolla mediante los diferentes sensores ubicados en el secador, los cuales envía la señal al PCL ubicado en el panel de control.



En la Figura 2.1 se muestra un esquema de las diferentes corrientes que interactúan en el secador analizado, el análisis de estas corrientes es el punto de partida para el balance térmico del equipo.

**Tabla 2.1.** Parámetros de la instalación para las condiciones actuales

Parámetros	Valores
Humedad del mineral alimentado ( $H_e$ )	39 %
Humedad del mineral secado ( $H_s$ )	4,5 %
Consumo de combustible	2150 kg/h
Temperatura de los gases de hornos ( $T_7$ )	277 °C
Temperatura de salida de los gases ( $T_3$ )	77 °C
Temperatura de la cámara de paso	770 °C
Temperatura del mineral a la salida ( $T_4$ )	80 °C
Flujo de gases de hornos ( $F_7$ )	46000 m <sup>3</sup> /h
Mineral húmedo alimentado ( $F_2$ )	100 t/h
Mineral seco a la salida ( $F_4$ )	70 t/h
Flujo de aire de pulverización ( $F_6$ )	11000 m <sup>3</sup> /h



**Figura 2.1.** Esquema ilustrativo de las corrientes que interactúan en el secador



### **Corrientes:**

1. Combustible (fuel - oil)

$T_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$        $VCI = 40470 \text{ kJ/kg}$  (Valor calórico inferior del combustible)

### **Composición química:**

$C = 84,5 \%$ ;  $S = 2 \%$ ;  $A = 0,05 \%$ ;  $H = 10,5 \%$ ;  $W = 2,5 \%$ ;  $N_2 = 0,22 \%$ ;  $O_2 = 0,23 \%$

2. Mineral húmedo

3. Gases más agua evaporada

4. Mineral seco más agua retenida

5. Aire primario o de combustión

6. Aire de pulverización

7. Gases de hornos

### **Composición química:**

$H_2 = 1 \%$ ;  $N_2 = 43,3 \%$ ;  $O_2 = 12 \%$ ;  $CO = 1,7 \%$ ;  $CO_2 = 8 \%$ ;  $H_2O = 33 \%$ ;  $SO_2 = 1 \%$

8. Aire parásito

### **2.2.2- Balance de energía térmica**

$$ECE + ELRQ = ECS + EPTC \quad (2.1)$$

Donde:

ECE: energía de las corrientes entrantes.

ELRQ: energía liberada por reacción química.

ECS: energía de las corrientes salientes.

EPTC: energía perdida por transferencia de calor.

$$Q_1 + Q_2 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 = Q_3 + Q_4 + QP_1 + QP_2 \quad (2.2)$$

Donde:



$Q_1$ : calor sensible y de reacción aportado por el petróleo; [kJ/h].

$Q_2$ : calor sensible aportado por el mineral húmedo; [kJ/h].

$Q_3$ : calor sensible de los gases de salida del secador más calor sensible y latente del agua evaporada; [kJ/h].

$Q_4$ : calor sensible del mineral seco y el agua retenida a la salida del secadero; [kJ/h].

$Q_5$ : calor sensible aportado por el aire de combustión o primario; [kJ/h].

$Q_6$ : calor sensible aportado por el aire de pulverización; [kJ/h].

$Q_7$ : calor sensible y de reacción aportado por los gases de la planta de hornos; [kJ/h].

$Q_8$ : calor sensible aportado por el aire parásito; [kJ/h].

$QP_1 + QP_2$ : calores perdidos por convección y radiación en las diferentes secciones del secador; [kJ/h].

### 2.2.3- Determinación de cada una de las corrientes

#### Corriente 1

El petróleo aporta además de su calor de reacción aporta su calor sensible porque entra a una temperatura de 120 °C.

$$Q_1 = F_1 \cdot \Delta H_1 + F_1 \cdot VCI \quad (2.3)$$

Donde:

$F_1$ : consumo de combustible; [kg/h].

$\Delta H_1$ : variación de entalpía del combustible; [kJ/kg].

Para determinar la variación de entalpía es necesario conocer el calor específico del combustible, según Perry (1984).

$$C_{p1} = \frac{0,383 + 0,00045 \cdot T_1}{g_e} = 0,443 \text{ kcal / } ^\circ\text{C} = 1,855 \text{ kJ / } ^\circ\text{C} \quad (2.4)$$

$g_e = 0,986 \text{ kg/m}^3$ : Gravedad específica a 25 °C.



Luego:

$$\Delta H_1 = \int_{25}^{120} C_{p1} \cdot dT = C_{p1} \cdot (T_1 - T_0) = 176,3 \text{ kJ / kg} \quad (2.5)$$

Sustituyendo el valor del VCI y el resultado de la ecuación 2.5 en 2.3 resulta

$$Q_1 = 40646,3 \cdot F_1 \quad (2.6)$$

### Corrientes 2, 5, 6 y 8

La temperatura de cada una de estas corrientes se iguala a la temperatura ambiental por lo que las diferencias de entalpías se hacen cero. Por tanto para cálculos de ingeniería se puede asumir que los calores asociados a estas corrientes son despreciables.

$$\Delta H_{2,5,6,8} = \int_{25}^{25} C_{pi} \cdot dT = 0 \quad (2.7)$$

Luego:

$$Q_2 = Q_5 = Q_6 = Q_8 = 0 \quad (2.8)$$

### Corriente 3

Esta corriente está compuesta por los gases que salen del secador más el agua evaporada del mineral.

$$Q_3 = Q_{3(G)} + Q_{3(VA)} \quad (2.9)$$

Donde:

$Q_{3(G)}$ : calor aportado por los gases excluyendo el agua evaporada; [kJ/h].

$Q_{3(VA)}$ : calor aportado por el vapor de agua eliminada del mineral; [kJ/h].

El calor aportado por los gases se determina a través de la siguiente expresión 2.10:

$$Q_{3(G)} = F_{3(G)} + \Delta H_{3(G)} \quad (2.10)$$



La variación de entalpía se busca teniendo en cuenta el calor específico determinado en la Tabla 2.2 a la temperatura de salida de los gases (Incropera et al., 2003)

**Tabla 2.2.** Propiedades de los gases a 77 °C

Gases	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	SO <sub>2</sub>
Cp (kJ/kg.K)	1,042	0,929	0,899	1,97	1,045	0,982
ρ(kg/m <sup>3</sup> )	0,9625	1,1	1,518	0,974	0,963	1,58

$$\Delta H_{3(N_2)} = \int_{25}^{77} Cp_{N_2} \cdot dT = 54,18 \text{ kJ / kg} \quad (2.11)$$

$$\Delta H_{3(O_2)} = \int_{25}^{77} Cp_{O_2} \cdot dT = 48,30 \text{ kJ / kg} \quad (2.12)$$

$$\Delta H_{3(CO_2)} = \int_{25}^{77} Cp_{CO_2} \cdot dT = 46,75 \text{ kJ / kg} \quad (2.13)$$

$$\Delta H_{3(H_2O)} = \int_{25}^{77} Cp_{H_2O} \cdot dT = 102,44 \text{ kJ / kg} \quad (2.14)$$

$$\Delta H_{3(CO)} = \int_{25}^{77} Cp_{CO} \cdot dT = 54,34 \text{ kJ / kg} \quad (2.15)$$

$$\Delta H_{3(SO_2)} = \int_{25}^{77} Cp_{SO_2} \cdot dT = 51,06 \text{ kJ / kg} \quad (2.16)$$

Sustituyendo en 2.10 queda:

$$Q_{3(G)} = 54,18 \cdot (F_{N_2})_3 + 48,30 \cdot (F_{O_2})_3 + 46,75 \cdot (F_{CO_2})_3 + 102,44 \cdot (F_{H_2O})_3 + 54,34 \cdot (F_{CO})_3 + 51,06 \cdot (F_{SO_2})_3 \quad (2.17)$$

**Calor aportado por el vapor de agua**

$$Q_{3(VA)} = F_{(VA)} \cdot \Delta H_{3(VA)} \quad (2.18)$$



Flujo de vapor de agua:

$$F_{(VA)} = F_2 \cdot \frac{H_e}{100} - \% F_4 \cdot \frac{H_s}{100 \cdot \% F_4} \quad (2.19)$$

Donde:

% F4: Porcentaje de mineral secado.

$$\% F_4 = \frac{100 - H_s}{100} = 0,955 \quad (2.20)$$

Sustituyendo en 2.19

$$F_{(VA)} = 34,7 t/h = 34700 \text{ kg/h}$$

La variación de entalpía del vapor de agua se determina por:

$$\Delta H_{3(VA)} = Cp_a (T_3 - T_0) + (\tau)_{T_3} \quad (2.21)$$

Donde:

$Cp_a = 4,195 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ : calor específico del agua.

$(\tau)_{77^\circ\text{C}} = 2317 \text{ kJ/kg}$ : calor latente de vaporización del agua a la temperatura de salida de los gases.

Evaluyendo:

$$\Delta H_{3(VA)} = 2535 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{3(VA)} = 87964500 \text{ kJ/h}$$

Sustituyendo en 2.9:

$$Q_3 = 54,18 \cdot (F_{N_2})_3 + 48,30 \cdot (F_{O_2})_3 + 46,75 \cdot (F_{CO_2})_3 + 102,44 \cdot (F_{H_2O})_3 + 54,34 \cdot (F_{CO})_3 + 51,06 \cdot (F_{SO_2})_3 + 87964500 \quad (2.22)$$



#### Corriente 4

Esta corriente está compuesta por el mineral seco y el agua retenida en este.

$$Q_4 = (F_{ar} \cdot Cp_a + F_{min} \cdot Cp_{min}) \cdot (T_4 - T_0) \quad (2.23)$$

Donde:

Far = 2880 kg/h: Flujo de agua retenida.

Cpa = 4,195 kJ/kg °C: Capacidad calorífica del agua según Perry (1967)

Fmin = 70000 kg/h: Flujo de mineral seco.

Cpmin = 0,963 kJ/kg °C: Capacidad calorífica del mineral según datos de la planta.

Sustituyendo en 2.23:

$$Q_4 = 4372038 \text{ kJ / h}$$

#### Corriente 7

Los gases provenientes de hornos de reducción aportan su calor sensible más el calor de reacción del CO y H<sub>2</sub>.

$$Q_7 = Q_{sen} + Q_{R(CO)} + Q_{R(H_2)} \quad (2.24)$$

$$Q_7 = F_7 \cdot \Delta H_7 + F_{7(CO)} \cdot \Delta H_{R(CO)} + F_{7(H_2)} \cdot \Delta H_{R(H_2)} \quad (2.25)$$

#### Determinación del calor sensible

El calor específico se busca en el Incropera et al. (2003) a 277 °C, los valores se muestran en la Tabla 2.3

**Tabla 2.3.** Propiedades de los gases a 277°C.

Gases	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Cp (kJ/kg K)	1,065	0,988	1,05	1,997	1,076	1,187	14,53
ρ(kg/m <sup>3</sup> )	0,6124	0,6998	0,9625	0,4005	0,6122	1,113	0,044



La variación de entalpía de los gases de hornos se calcula según la ecuación 2.5.

$$\Delta H_{7(N_2)} = \int_{25}^{277} Cp_{N_2} \cdot dT = 268,38 \text{ kJ / kg} \quad (2.26)$$

$$\Delta H_{7(O_2)} = \int_{25}^{277} Cp_{O_2} \cdot dT = 248,98 \text{ kJ / kg} \quad (2.27)$$

$$\Delta H_{7(CO_2)} = \int_{25}^{277} Cp_{CO_2} \cdot dT = 264,6 \text{ kJ / kg} \quad (2.28)$$

$$\Delta H_{7(H_2O)} = \int_{25}^{277} Cp_{H_2O} \cdot dT = 503,24 \text{ kJ / kg} \quad (2.29)$$

$$\Delta H_{7(CO)} = \int_{25}^{277} Cp_{CO} \cdot dT = 271,15 \text{ kJ / kg} \quad (2.30)$$

$$\Delta H_{7(SO_2)} = \int_{25}^{277} Cp_{SO_2} \cdot dT = 299,12 \text{ kJ / kg} \quad (2.31)$$

$$\Delta H_{7(H_2)} = \int_{25}^{277} Cp_{H_2} \cdot dT = 3661,56 \text{ kJ / kg} \quad (2.32)$$

El flujo de cada componente se calcula multiplicando el porcentaje de cada uno de los elementos por el flujo de los gases provenientes de hornos.

$$F_{7(N_2)} = F_7 \cdot N_2 = 19918 \text{ m}^3 / \text{h} = 13169,78 \text{ kg / h} \quad (2.33)$$

$$F_{7(O_2)} = F_7 \cdot O_2 = 5520 \text{ m}^3 / \text{h} = 3862,89 \text{ kg / h} \quad (2.34)$$

$$F_{7(CO_2)} = F_7 \cdot CO_2 = 3680 \text{ m}^3 / \text{h} = 3542 \text{ kg / h} \quad (2.35)$$

$$F_{7(H_2O)} = F_7 \cdot H_2O = 15180 \text{ m}^3 / \text{h} = 6079,59 \text{ kg / h} \quad (2.36)$$

$$F_{7(CO)} = F_7 \cdot CO = 782 \text{ m}^3 / \text{h} = 478,74 \text{ kg / h} \quad (2.37)$$

$$F_{7(SO_2)} = F_7 \cdot SO_2 = 460 \text{ m}^3 / \text{h} = 511,98 \text{ kg / h} \quad (2.38)$$



$$F_{\gamma(H_2)} = F_{\gamma} \cdot H_2 = 460m^3 / h = 20,24 \text{ kg} / h \quad (2.39)$$

El calor total es igual a la suma de todos los elementos calculados anteriormente

Luego:

$$F_{\gamma} = 27665,22 \text{ kg} / h$$

$$Q_{sen} = \Delta H_{\gamma(N_2)} \cdot F_{\gamma(N_2)} + \Delta H_{\gamma(O_2)} \cdot F_{\gamma(O_2)} + \Delta H_{\gamma(CO)} \cdot F_{\gamma(CO_2)} + \Delta H_{\gamma(H_2O)} \cdot F_{\gamma(H_2O)} + \quad (2.40)$$

$$\Delta H_{\gamma(CO)} \cdot F_{\gamma(CO)} + \Delta H_{\gamma(SO_2)} \cdot F_{\gamma(SO_2)} + \Delta H_{\gamma(H)} \cdot F_{\gamma(H_2)}$$

$$Q_{sen} = 8850057,76 \text{ kJ} / h$$

### Calor de reacción

El calor de reacción del CO y H<sub>2</sub> se busca en la tabla 203, sección 3 de Perry (1967)

$$\Delta H_{R(CO)} = 10097,9 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$\Delta H_{R(H_2)} = 142376,2 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$Q_{R(CO)} = \Delta H_{R(CO)} \cdot F_{\gamma(CO)} = 4834268,64 \text{ kJ} / h \quad (2.41)$$

$$Q_{R(H_2)} = \Delta H_{R(H_2)} \cdot F_{\gamma(H_2)} = 2881694,28 \text{ kJ} / h \quad (2.42)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.24:

$$Q_{\gamma} = 16566020,69 \text{ kJ} / h$$

### Cálculo del flujo de aire parásito

En el sistema existe entrada de aire parásito producto a la depresión existente en la cámara de combustión, este flujo de aire penetra a través de la holgura existente en unión de la cámara de paso con el tambor secador, así como por la tolva de alimentación de mineral. Se calcula por la siguiente expresión:



$$G = \alpha \cdot \varphi \cdot \Delta P \cdot A \cdot \left[ \frac{29}{R \cdot t_1} \right]^{1/2} \quad (2.43)$$

Donde:

G: flujo de aire; [kg/h]

$\alpha$ : eficiencia del orificio.

$\varphi$ : coeficiente de flujo.

$\Delta P$ : diferencia de presión; [Pa]

R: constante real de los gases; [J/kg.K]

A: área del orificio; [m<sup>2</sup>]

### Unión de la cámara de paso con el tambor secador

En esta sección se calculará la cantidad de aire parásito que penetra por el espacio anular existente entre el tambor secador y la cámara de paso.

Datos:

$$\alpha = 0,9$$

$$R = 287,1 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

$$P_1 = 103400 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 103270,6 \text{ Pa}$$

$$\varphi = 0,0004$$

$$r_1 = 2,626 \text{ m}$$

$$r_2 = 2,576 \text{ m}$$

El área se calcula según la ecuación 2.44.

$$A = \pi \cdot (r_1^2 - r_2^2) = 0,817 \text{ m}^2 \quad (2.44)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.43 se obtiene:

$$G_1 = 2,523 \text{ kg} / \text{h}$$



### Sección de entrada de mineral

Esta sección es la que corresponde a la sección de la tolva de alimentación al secadero.

Datos:

$$A = 0,96 \text{ m}^2$$

El flujo de aire se determina del mismo modo que en el caso anterior (ecuación 2.43).

$$G_2 = 2,964 \text{ kg / h}$$

Luego:

$$G = G_1 + G_2 = 5,487 \text{ kg / h} \quad (2.45)$$

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

En el secador existen pérdidas de calor por convección y radiación.

#### Cámara de paso

En esta sección la convección es libre.

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.46)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_0^4) \quad (2.47)$$

Donde:

L = 3,496 m: longitud

a = 6,83 m: ancho

h = 9,065 m: altura

d<sub>1</sub> = 3,132 m: diámetro del orificio 1

d<sub>2</sub> = 4,252 m: diámetro del orificio 2

$$A_0 = 2 \cdot (a \cdot h + a \cdot L + h \cdot L) = 235,96 \text{ m}^2 \quad (2.48)$$



$$A_1 = \pi \cdot d_1^2 = 30,81 \text{ m}^2 \quad (2.49)$$

$$A_2 = \pi \cdot d_2^2 = 56,79 \text{ m}^2 \quad (2.50)$$

$$A = A_0 - (A_1 + A_2) = 147,35 \text{ m}^2 \quad (2.51)$$

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

$$R_{al} = G_r \cdot P_r = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_0) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (2.52)$$

Donde:

$T_s = 129 \text{ °C} = 402 \text{ K}$ : temperatura de la superficie.

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

$$T_f = \frac{T_s + T_0}{2} = 350 \text{ K} \quad (2.53)$$

$K = 30 \times 10^{-3} \text{ W/m.K}$ : coeficiente de conductividad térmica.

$Pr = 0,7$ : número de Prandtl.

$\nu = 20,92 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ : viscosidad cinemática del fluido.

$C_p = 1,009 \text{ kJ/kg.K}$ : capacidad calorífica.

$\alpha = 29,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ : coeficiente de difusividad térmica.

$\beta = 0,0029 \text{ K}^{-1}$ : coeficiente de dilatación volumétrica.

$L = 9,065 \text{ m}$ .

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$ : constante de Stefan Boltzman

$\varepsilon = 0,9$  para acero

$$R_{al} = G_r \cdot P_r = 3,522 \cdot 10^{12} \quad (2.54)$$



Como

$R_{al} = G_r \cdot P_r = 3,522 \cdot 10^{12} > 10^9$  la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt es la siguiente:

$$N_{UL} = \left[ 0,825 + \frac{0,387 \cdot R_{al}^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{P_r} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 = 1665 \quad (2.55)$$

Luego:

$$h = \frac{N_{UL} \cdot k}{L} = 5,509 \quad (2.56)$$

Sustituyendo en las ecuaciones 2.46 y 2.47 se obtiene:

$$q_{conv} = 84420,41 \text{ W}$$

$$q_{rad} = 137074,14 \text{ W}$$

### Tambor secador

La convección en esta sección es forzada.

$$A = \pi \cdot D \cdot L = 603,18 \text{ m}^2 \quad (2.57)$$

Donde:

$$L = 40 \text{ m}$$

$$D = 4,8 \text{ m}$$

Las propiedades del fluido se buscan a la temperatura pelicular en la tabla A-4 del Incropera et al. (2003).



$T_s = 85\text{ }^\circ\text{C} = 358\text{ K}$ : temperatura de la superficie.

$$T_f = 55\text{ }^\circ\text{C} = 328\text{ K}$$

$k = 28,37 \times 10^{-3}\text{ W/m K}$ : coeficiente de conductividad térmica.

$\nu = 18,70 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ : coeficiente cinemático de viscosidad.

$\varepsilon = 0,25$  para aluminio (revestimiento)

$$Pr_0 = 0,703$$

$$Pr_s = 0,7$$

$V = 3,5\text{ m/s}$ : velocidad del aire.

Número de Reynolds:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} = 8,984 \cdot 10^5 \quad (2.58)$$

Como  $Re > 2 \times 10^5$  régimen turbulento.

$C = 0,076$ ;  $m = 0,7$ : tabla 7.4 de Incropera et al. (2003).

$n = 0,37$  para  $Pr < 10$

$$N_{UD} = C \cdot R_e^m \cdot Pr^n \cdot \left( \frac{Pr_0}{Pr_s} \right)^{1/4} = 980,373 \quad (2.59)$$

$$h = \frac{N_{UD} \cdot k}{D} = 5,794\text{ W / m}^2\text{ K} \quad (2.60)$$

Sustituyendo en las ecuaciones 2.46 y 2.47 se obtiene:

$$q_{conv} = 363491,36\text{ W}$$

$$q_{rad} = 155866\text{ W}$$

**Botella**



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

$$A = \pi \cdot S \cdot D_m = 125,88m^2 \quad (2.61)$$

Donde:

S = 8 m: generatriz del cono.

$d_1 = 5,222$  m: diámetro mayor.

$d_2 = 4,8$  m: diámetro menor.

$d_m = 5,011$  m: diámetro medio.

Las propiedades del fluido se buscan a la temperatura pelicular en la tabla A-4 del Incropera et al. (2003)

$T_s = 285^\circ C = 558 K$ : temperatura de la superficie.

$T_f = 155^\circ C = 428 K$

$\nu = 37,89 \times 10^{-6} m^2/s$ : coeficiente cinemático de viscosidad.

$k = 40,22 \times 10^{-3} W/m.K$ : coeficiente de conductividad térmica.

$Pr_0 = 0,689$

$Pr_s = 0,683$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \cdot d_m}{\nu} = 4,629 \cdot 10^5 \quad (2.62)$$

Como  $Re > 2 \times 10^5$  régimen turbulento.

$$N_{UD} = C \cdot Re^m \cdot Pr^{0,37} \cdot \left( \frac{Pr_0}{Pr_s} \right)^{1/4} = 616,98 \quad (2.63)$$

$$h = \frac{N_{UD} \cdot k}{d_m} = 4,952 W / m^2 K \quad (2.64)$$



Sustituyendo las ecuaciones 2.46 y 2.47 se obtiene:

$$q_{conv} = 81077,85 \text{ W}$$

$$q_{rad} = 407397,67 \text{ W}$$

Luego:

$$QP_1 = \Sigma q_{conv} = 528989,63 \text{ W} = 1904362,69 \text{ kJ/h}$$

$$QP_2 = \Sigma q_{rad} = 700338,66 \text{ W} = 2521219,20 \text{ kJ/h} \quad (2.65)$$

Sustituyendo los valores de los calores conocidos en la ecuación 2.2 se transforma en:

$$\begin{aligned} 40646,3 \cdot F_1 + 16566020,69 &= 54,18 \cdot (F_{N_2})_3 + 48,30 \cdot (F_{O_2})_3 + 46,75 \cdot (F_{CO_2})_3 + \\ &+ 102,44 \cdot (F_{H_2O})_3 + 54,34 \cdot (F_{CO})_3 + 51,06 \cdot (F_{SO_2})_3 + 87964500 + 4372038 + \\ &+ 1904362,69 + 2521219,20 \end{aligned} \quad (2.66)$$

## 2.2.5- Balance de masa

### 2.4.1- Cálculo del oxígeno estequiométrico y los productos de la combustión

$$(F_{O_2})_y = 22,4 \cdot F_1 \cdot \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) + F_7 \cdot \left( \frac{CO}{2} + \frac{H_2}{2} \right) = 2,181 \cdot F_1 + 373,48 \quad (2.67)$$

$$(F_{CO_2})_p = 22,4 \cdot F_1 \cdot \left( \frac{C}{12} \right) + F_7 \cdot CO = 1,577 \cdot F_1 + 470,30 \quad (2.68)$$

$$(F_{H_2O})_p = 22,4 \cdot F_1 \cdot \left( \frac{H_2}{2} + \frac{W}{18} \right) = 1,207 \cdot F_1 \quad (2.69)$$

$$(F_{SO_2})_p = 22,4 \cdot F_1 \cdot \frac{S}{32} = 0,014 \cdot F_1 \quad (2.70)$$

### Cálculo del flujo de los componentes de cada una de las corrientes

#### Corriente 5

Se conoce:

Relación aire combustible:  $\lambda = 12,5$

Porcentaje de humedad en el aire:  $W_a = 0.025$

Porcentaje de aire seco:  $A_s = 0,975$



Porcentaje de oxígeno en el aire seco:  $O_a = 0,21$

Porcentaje de nitrógeno en el aire seco:  $N_a = 0,79$

$$\begin{aligned}
 F_5 &= \lambda \cdot F_1 = 12,5 \cdot F_1 \\
 F_{(H_2O)5} &= W_a \cdot F_5 = 0,025 \cdot 12,5 \cdot F_1 = 0,3125 \cdot F_1 \\
 F_{(As)5} &= A_s \cdot F_5 = 0,975 \cdot 12,5 \cdot F_1 = 12,1875 \cdot F_1 \\
 F_{(O_2)5} &= O_A \cdot F_{(As)5} = 0,21 \cdot 12,19 \cdot F_1 = 2,55593 \cdot F_1 \\
 F_{(N_2)5} &= N_A \cdot F_{(As)5} = 0,79 \cdot 12,19 \cdot F_1 = 9,6281 \cdot F_1
 \end{aligned} \tag{2.71}$$

### Corriente 6

$$\begin{aligned}
 F_6 &= 11000 m^3 / h = 14190 kg / h \\
 F_{(H_2O)6} &= W_a \cdot F_6 = 354,75 kg / h \\
 F_{(As)6} &= A_s \cdot F_6 = 13835,25 kg / h \\
 F_{(O_2)6} &= O_A \cdot F_{(As)6} = 2905,4 kg / h \\
 F_{(N_2)6} &= N_A \cdot F_{(As)6} = 10929,84 kg / h
 \end{aligned} \tag{2.72}$$

### Corriente 8

$$\begin{aligned}
 F_8 &= 5,50 kg / h \\
 F_{(H_2O)8} &= W_a \cdot F_8 = 0,1375 kg / h \\
 F_{(As)8} &= A_s \cdot F_8 = 5,3625 kg / h \\
 F_{(O_2)8} &= O_A \cdot F_{(As)8} = 1,155 kg / h \\
 F_{(N_2)8} &= N_A \cdot F_{(As)8} = 4,345 kg / h
 \end{aligned} \tag{2.73}$$

Para determinar el flujo de los componentes se realiza un balance para cada uno de ellos.

Balance de oxígeno:

$$\begin{aligned}
 F_{(O_2)3} &= (F_{(O_2)5} + F_{(O_2)6} + F_{(O_2)7} + F_{(O_2)8}) - F_{(O_2)7} \\
 F_{(O_2)3} &= (2,55593 \cdot F_1 + 2905,4 + 3862,89 + 1,155) - (2,181 \cdot F_1 + 373,48) \\
 F_{(O_2)3} &= 0,3749 \cdot F_1 + 6395,96
 \end{aligned} \tag{2.74}$$



### Balance del nitrógeno

$$F_{(N_2)3} = F_{(N_2)5} + F_{(N_2)6} + F_{(N_2)7} + F_{(N_2)8}$$

$$F_{(N_2)3} = 9,6281 \cdot F_1 + 24103,965 \quad (2.75)$$

### Balance del vapor de agua excluyendo el agua evaporada del mineral

$$F_{(H_2O)3} = F_{(H_2O)5} + F_{(H_2O)6} + F_{(H_2O)7} + F_{(H_2O)8} + F_{(H_2O)P}$$

$$F_{(H_2O)3} = 1,5159 \cdot F_1 + 6434,4775 \quad (2.76)$$

### Balance del Dióxido de Azufre

$$F_{(SO_2)3} = F_{(SO_2)7} + F_{(SO_2)P} = 0,014 \cdot F_1 + 511,98 \quad (2.77)$$

### Balance de Dióxido de Carbono

$$F_{(CO_2)3} = F_{(CO_2)7} + F_{(CO_2)P} = 1,577 \cdot F_1 + 4012,3 \quad (2.78)$$

Debido a que la combustión es completa

$$F_{(CO)3} = F_{(H_2)3} = 0$$

Sustituyendo en la ecuación 2.66 desde 2.74 hasta 2.78 se obtiene:

$$40646,3 \cdot F_1 + 1656602069 = 54,18 \cdot (9,6281 \cdot F_1 + 24103,965) + 48,30 \cdot (0,3749 \cdot F_1 + 6395,96) + \\ + 46,75 \cdot (1,577 \cdot F_1 + 4012,3) + 102,44 \cdot (1,5159 \cdot F_1 + 6434,4775) + 51,06 \cdot (0,014 \cdot F_1 + 511,98) + \\ + 87964500 + 4372038 + 190436269 + 252121920 \quad (2.79)$$

Agrupando y despejando a F1:

$$39876,81616 \cdot F_1 = 82683841,4897$$

$$F_1 = 2073,481 \text{ kg / h} \quad (2.80)$$

Sustituyendo F<sub>1</sub> en la ecuación 2.6 se obtiene:

$$Q_1 = 84279330,77 \text{ kg / h}$$



## Flujo de composición de los gases a la salida del secadero incluyendo el agua evaporada

Sustituyendo el valor de  $F_1$  en las ecuaciones (2.74-2.78) se obtiene:

$$F_{(O_2)_3} = 0,3749 \cdot F_1 + 6395,96 = 7173,31 \text{ kg / h}$$

$$F_{(N_2)_3} = 9,6281 \cdot F_1 + 24103,965 = 44067,64 \text{ kg / h}$$

$$F_{(H_2O)_3} = 1,5159 \cdot F_1 + 6434,4775 = 9577,66 \text{ kg / h}$$

$$F_{(SO_2)_3} = 0,014 \cdot F_1 + 511,98 = 541 \text{ kg / h}$$

$$F_{(CO_2)_3} = 1,577 \cdot F_1 + 4012,3 = 7282,17 \text{ kg / h}$$

$$F_3 = 68641,79 \text{ kg / h}$$

Sustituyendo en la ecuación 2.22 se obtiene:

$$Q_3 = 92047756,0061 \text{ kJ / h}$$

Luego se sustituyen los valores que a continuación se muestran y se determina el rendimiento térmico

$$Q_{3(VA)} = 87964500 \text{ kJ / h} \quad Q_1 = 84279330,77 \text{ kg / h} \quad Q_7 = 16566020,69 \text{ kJ / h}$$

### 2.2.6- Rendimiento térmico del secadero cilíndrico rotatorio

$$\eta = \frac{Q_{(VA)_3}}{Q_1 + Q_7} \approx 0,872 \approx 87,2 \% \quad (2.81)$$

### 2.3- Balance térmico para un incremento de la productividad

El cálculo que a continuación se muestra se desarrolló para un aumento de la productividad del secador, los valores de los parámetros correspondientes se muestran a continuación:



Mineral húmedo alimentado ( $F_2$ ) ...130 t/h

Mineral seco a la salida ( $F_4$ ) ...100 t/h

Las corrientes 1, 2, 5, 6 y 7 al igual que las pérdidas mantienen el mismo valor que en cálculo anterior y se obtiene el comportamiento térmico del objeto de estudio.

### Corriente 3

$$Q_3 = Q_{3(G)} + Q_{3(VA)} \quad (2.82)$$

$$Q_{3(G)} = F_{3(G)} + \Delta H_{3(VA)} \quad (2.83)$$

La variación de entalpía se determina por la ecuación 2.5, como no depende del flujo de mineral que entra o sale del secador no varían los valores respecto al cálculo anterior

$$Q_{3(G)} = 54,18 \cdot (F_{N_2})_3 + 48,30 \cdot (F_{O_2})_3 + 46,75 \cdot (F_{CO_2})_3 + 102,44 \cdot (F_{H_2O})_3 + 54,34 \cdot (F_{CO})_3 + 51,06 \cdot (F_{SO_2})_3 \quad (2.84)$$

$$Q_{3(VA)} = F_{(VA)} \cdot \Delta H_{3(VA)} \quad (2.85)$$

Flujo de vapor de agua:

$$F_{(VA)} = F_2 \cdot \frac{H_e}{100} - \% F_4 \cdot \frac{H_s}{100 \cdot \% F_4} \quad (2.86)$$

Sustituyendo:

$$F_{(VA)} = 45,98 \text{ t/h} = 45987,95 \text{ kg/h} \quad \text{y} \quad \Delta H_{3(VA)} = 2535 \text{ kJ/kg}$$

La ecuación 2.82 se transforma de la manera siguiente:

$$Q_3 = 54,18 \cdot (F_{N_2})_3 + 48,30 \cdot (F_{O_2})_3 + 46,75 \cdot (F_{CO_2})_3 + 102,44 \cdot (F_{H_2O})_3 + 54,34 \cdot (F_{CO})_3 + 51,06 \cdot (F_{SO_2})_3 + 116579473,82 \quad (2.87)$$



Luego

$$Q_3 = 120662729,8261 \text{ kJ / h}$$

#### Corriente 4

Esta corriente está compuesta por el mineral seco y el agua retenida en este.

$$Q_4 = (F_{ar} \cdot Cp_a + F_{min} \cdot Cp_{min}) \cdot (T_4 - T_0) \quad (2.88)$$

Donde:

Far = 4325 kg/h: flujo de agua retenida.

Cpa = 4,19 kJ/kg °C: capacidad calorífica del agua.

Fmin = 100000 kg/h: flujo de mineral seco.

Cpmin = 0,963 kJ/kg °C: capacidad calorífica del mineral.

Sustituyendo:

$$Q_4 = 6294385,625 \text{ kJ / h}$$

#### Balance de masa

Debido a que los cálculos se realizan para iguales condiciones de flujo de gases provenientes de secadero y aire de pulverización oxígeno estequiométrico y los productos de la combustión coinciden con el cálculo anterior, así como el flujo de cada una de las corrientes.

Sustituyendo en la ecuación 2.66 desde 2.74 hasta 2.78 y cambiando los valores correspondientes a  $Q_3$  y  $Q_4$  se obtiene:

$$40646,3 \cdot F_1 + 1656602069 = 54,18 \cdot (9,6281 \cdot F_1 + 24103,963) + 48,30 \cdot (0,3749 \cdot F_1 + 6395,96) + 46,75 \cdot (1,577 \cdot F_1 + 4012,3) + 102,44 \cdot (1,5159 \cdot F_1 + 6434,4773) + 51,06 \cdot (0,014 \cdot F_1 + 511,98) + 12066272982 + 6294385625 + 190436269 + 252121920 \quad (2.89)$$



Agrupando:

$$39876,81616 \cdot F_1 = 117304418,9347$$

$$F_1 = 2941,66 \text{ kg / h} \quad (2.90)$$

$$Q_1 = 119567986,17 \text{ kJ / h}$$

**Flujo de composición de los gases a la salida del secadero incluyendo el agua evaporada.**

Sustituyendo el valor de F1 en las ecuaciones (2.74-2.78) se obtiene:

$$F_{(O_2)_3} = 0,3749 \cdot F_1 + 6395,96 = 7498,79 \text{ kg / h}$$

$$F_{(N_2)_3} = 9,6281 \cdot F_1 + 24103,965 = 52426,56 \text{ kg / h}$$

$$F_{(H_2O)_3} = 1,5159 \cdot F_1 + 6434,4775 = 10893,74 \text{ kg / h}$$

$$F_{(SO_2)_3} = 0,014 \cdot F_1 + 511,98 = 553,16 \text{ kg / h}$$

$$F_{(CO_2)_3} = 1,577 \cdot F_1 + 4012,3 = 8651,29 \text{ kg / h}$$

$$F_3 = 80023,54 \text{ kg / h}$$

Luego con los valores que se muestran a continuación se determina el rendimiento térmico del secadero.

$$Q_{3(VA)} = 116579453,25 \text{ kJ / h} \quad Q_1 = 119567986,17 \text{ kJ / h} \quad Q_7 = 16566020,69 \text{ kJ / h}$$

### 2.3.1- Rendimiento térmico del secadero para el aumento de la productividad

$$\eta = \frac{Q_{(VA)_3}}{Q_1 + Q_7} \approx 0,856 \approx 85,6 \%$$



#### **2-4- Conclusiones del capítulo II**

- Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la evaluación térmica de los secadores cilíndricos rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara, de la solución del sistema de ecuaciones se obtiene el rendimiento térmico del secador analizado el cual para las condiciones actuales de explotación es de 87,2%.
- Para un incremento de la productividad del secador y los restantes parámetros que caracterizan el proceso constante, la eficiencia térmica decrece en 1,6%.
- Los consumos de combustible para las variantes calculadas fueron de 2073,48 y 2941,66 kg/h respectivamente.



---

## CAPÍTULO III

---

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

#### 3.1- Introducción

La protección al medio ambiente se ha convertido en los últimos años en una de las cuestiones que más inquietan a la humanidad. El grandioso desarrollo tecnológico que ha alcanzado el hombre para explotar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población ha dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad tales como: el agotamiento de los recursos naturales y la contaminación ambiental y el calentamiento global del planeta. Es por ello que las organizaciones políticas, sociales, científicas, los estados y gobiernos de diferentes partes del mundo se han preocupado por tomar medidas que de una forma u otra, están dirigidas a garantizar un uso racional de los recursos naturales y a la protección del medio ambiente.

El secado tiene una gran influencia en el cómputo energético final de una determinada estructura económica industrial. En la empresa Ernesto Che Guevara este proceso constituye uno de los de mayor consumo de combustible, esta situación lógicamente incide en los índices económicos y medioambientales de la planta y la empresa, es por ello que el **objetivo** del capítulo es: valorar los resultados de la investigación considerando los aspectos económicos y medioambientales relacionados con el proceso de secado.

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

Los resultados del diagnóstico térmico para las variantes calculadas muestran un elevado grado de aprovechamiento de la energía térmica en el secador, lo que se refleja en los rendimientos térmicos calculados los cuales son superiores al 85%.



Para las condiciones actuales de explotación se obtuvo un consumo de combustible igual a 2073,48 kg/h, al comparar este valor con el medido por el flujómetro ubicado en el secador (Tabla 2.1) se observa un error relativo del 3,55%. Esta desviación obtenida al aplicar el procedimiento es satisfactoria para el diagnóstico de procesos térmicos donde los parámetros son dinámicos y varían aleatoriamente.

Los valores obtenidos para el incremento de la productividad indican un decrecimiento del rendimiento térmico en 1,6%, este comportamiento (obtenido para los restantes parámetros del proceso constantes) sugiere que al aumentar la productividad del secador se debe incidir sobre los parámetros más influyentes en la eficiencia térmica del secador, algunas de las acciones que se pueden realizar se describen a continuación:

- Utilizar un combustible con mayor valor calórico inferior lo que generaría una cantidad de calor superior a la que existe en la actualidad en la instalación.
- Reducir la humedad del mineral a la entrada del secador, esto aumenta el gradiente de humedad por lo que la transferencia de masa durante el secado se intensifica.
- Aumentar (siempre que sea posible) la temperatura de los gases de hornos, lo que generaría un perfil térmico superior en la cámara de combustión y con ello se aumenta el gradiente de temperatura y el flujo de calor en el interior del cilindro.
- 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 el coeficiente de llenado del tambor.
- Regular los flujos de aire y gases, con ello se mejora la combustión dentro de la cámara de secador y se reduce el arrastre de las partículas más finas con las consiguientes pérdidas metalúrgicas.

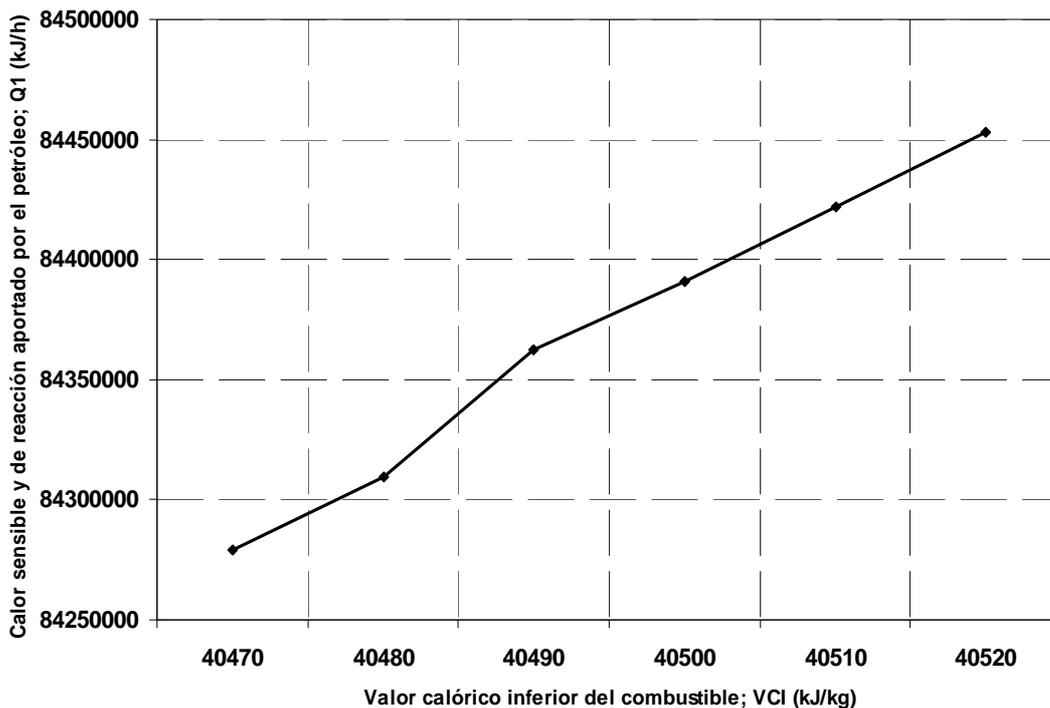
También puede mejorarse la eficiencia metalúrgica en el proceso de secado mejorando la eficiencia del sistema de ciclones y electrofiltros, los cuales son los encargados de



recolectar el polvo que es arrastrado por el flujo de gases creado por la succión del ventilador.

### 3.2.1- Comportamiento de los diferentes parámetros del proceso

Al analizar la Figura 3.1 se observa un incremento del calor sensible y de reacción aportado por el petróleo cuando crece el valor calórico del mismo, esto se debe a que al mejorar las propiedades del combustible (composición química) mejora el proceso de combustión y por tanto la cantidad de calor desprendida por unidad de masa aumenta, este proceso incide positivamente en el funcionamiento del secadero si en la instalación existe un aprovechamiento racional de la energía útil máxima que tiene el sistema.

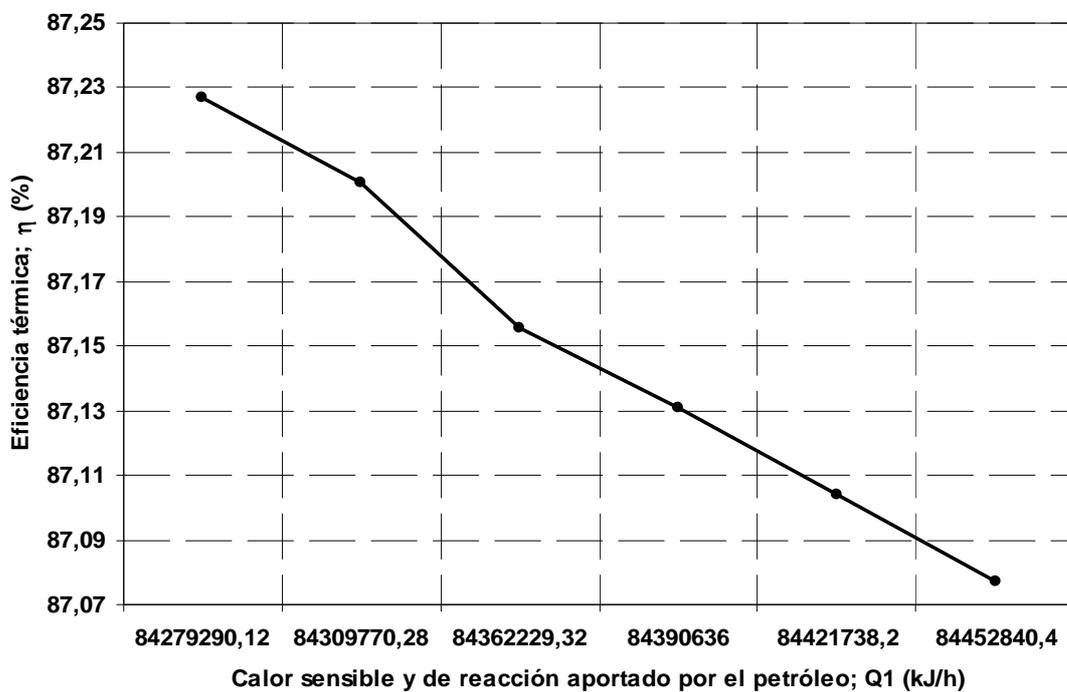


**Figura 3.1.** Comportamiento del calor sensible y de reacción aportado por el petróleo respecto al valor calórico inferior (condiciones actuales).

La Figura 3.2 refleja un decrecimiento (aunque poco acentuado) del rendimiento térmico de la instalación con el incremento de calor sensible y de reacción aportado por el



combustible, es bueno destacar que estas figuras se obtuvieron para diferentes valores de temperaturas del combustible, sin embargo no pudo variarse los valores de  $Q_{3(VA)}$  y  $Q_7$  como se aprecia en la ecuación 2.81 estos parámetros también definen la eficiencia térmica, es por ello que tiene un comportamiento lineal. En general la mayor parte del calor disponible para el secado es el que se produce durante la combustión del combustible.



**Figura 3.2.** Comportamiento de la eficiencia térmica respecto al calor sensible y de reacción aportado por el petróleo (condiciones actuales).

### 3.3- Valoración económica

Los valores expuestos en las Tabla 3.1 muestran la valoración económica referida al consumo de combustible para las condiciones actuales de explotación. 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.** Análisis económico para el secador para las dos condiciones analizadas.

Equipo	Rendimiento térmico del Secador 3 (%)	Consumo de Combustible (t/h)	Precio del Combustible (USD/t)	Importe (USD/h)
Secador 3	Rendimiento actual = 87,2	2,073	464	961,872
Secador 3	Rendimiento futuro = 85,6	2,941	464	1364,624
<b>Diferencia entre los gastos horarios por concepto de consumo de combustible</b>		<b>0,868</b>	<b>464</b>	<b>402,752</b>

Como se puede apreciar en la Tabla 3.1 la diferencia entre los gastos por concepto de consumo de combustible asociados a las variantes analizadas asciende a **402,752 USD**.

La diferencia entre estos gastos referida a los cinco meses (Enero-Mayo) en que se desarrolló la tesis considerando el mismo precio se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Análisis económico del secador para los 5 meses analizados.

Equipo	Rendimiento térmico del Secador 3 (%)	Consumo de Combustible (t/día)	Consumo de Combustible (t/5 meses)	Importe (USD)
Secador 3	Rendimiento actual = 87,2	49,752	7462,8	3462739
Secador 3	Rendimiento futuro = 85,6	70,584	10587,6	4912646
<b>Diferencia entre los gastos por concepto de consumo de combustible</b>		<b>20,832</b>	<b>3124,8</b>	<b>1 449 907</b>

Los resultados mostrados en las Tablas 3.1 y 3.2 demuestran la importancia que tiene para la planta aumentar la eficiencia térmica conforme al aumento de la productividad, de lo contrario la empresa tendría que erogar 1 449 907 USD cada cinco meses para cada secador que esté en explotación.



### **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 SO<sub>2</sub> 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 g/m<sup>3</sup> de polvo.
- En ocasiones de supera la norma de concentración de polvo (de 1 a 4 mg de polvo/m<sup>3</sup>), 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  $\mu\text{m}$  de diámetro quedan retenidas en los vellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0,5 y 5  $\mu\text{m}$  son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

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

#### **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 CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, 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**

- Los gastos por concepto de consumo de combustible en el periodo analizado (Enero-Mayo) fueron 3462739 y 4912646 USD para las condiciones actuales de explotación y para un aumento de la productividad respectivamente.
- En la planta se han adoptado varias medidas que contribuyen a mitigar las afectaciones ambientales provocadas por las emisiones continuas de polvo, ruido y gases producto de la combustión.



---

## CONCLUSIONES

---

- De las visitas efectuadas a la empresa Ernesto Che Guevara y el análisis bibliográfico realizado se comprobó el nivel primario de automatización que tienen los secaderos y la existencia de varios trabajos dedicados al diagnóstico térmico de estos equipos, pero ninguno de los consultados considera las condiciones actuales de explotación existente en la empresa.
- Se estableció el procedimiento de cálculo para el diagnóstico térmico de los secaderos de la empresa Ernesto Che Guevara. Los resultados obtenidos demuestran que el secador analizado tiene rendimientos térmicos igual a 87,2 y 85,6% para las condiciones actuales de explotación y para un incremento de la productividad hasta 130 t/h.
- Para las variantes calculadas (100 y 130 t/h) se obtuvieron consumos de combustible igual a 2073,48 y 2941,66 kg/h respectivamente. Los gastos económicos asociados a los mismos fueron 3462739 y 4912646 USD para los cinco meses y el precio del combustible considerados en el trabajo.
- Las afectaciones medioambientales más importantes en el proceso de secado son las emisiones continuas de polvo, ruido y gases producto de la combustión, las mismas son en ocasiones superiores a las normas internacionales establecidas.



---

## RECOMENDACIONES

---

- Realizar sistemáticamente evaluaciones térmicas a los secaderos para ajustar los parámetros y facilitar la toma de decisiones de los operarios y el personal administrativo.
- Crear un software que permita el diagnóstico térmico de los secaderos e incorpore el análisis exergético del proceso.
- Automatizar los secaderos para lograr no solo la medición y registro de los parámetros fundamentales del proceso, sino además el control de los mismos.



---

## 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. Moscu, 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.