

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO "Dr. Antonio Núñez Jiménez" FACULTAD: METALURGIA - ELECTROMECÁNICA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Influencia del contenido de humedad del mineral laterítico en el consumo de energía y combustible de los secadores cilíndricos rotatorios.

Autor: Arioldis Castillo Urgellés

Tutores: Msc. Yoalbys Retirado Mediaceja

Ing. Marcos Velásquez Vázquez

Moa-2007

"Año 49 de la Revolución"



RESUMEN

Los secaderos rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara han presentado baja eficiencia térmica debido entre otros factores al elevado contenido de humedad presente en el mineral alimentado y al aumento de los flujos másicos de entrada.

El presente trabajo se desarrolla con el propósito de obtener la eficiencia térmica de estos equipos, para ello se obtiene una data experimental que fue debidamente procesada y se obtuvieron los siguientes resultados: el rendimiento térmico para las condiciones actuales de operación es de 86 %, el consumo de combustible oscilo entre 2.123 y 2.18 kg/s para valores de contenido de humedad entre 32 y 42 %.

Finalmente se obtienen los valores de la producción para las dos variantes calculadas (siendo esos 1864977.72 y 3131594.88 USD) y las afectaciones medioambientales asociadas al proceso objeto de estudio.



ABSTRACT

The rotational dry of the company Ernesto Che Guevara has presented due low thermal efficiency among other factors to the high content of present humidity in the fed mineral and to the increase of the driest flows in entrance.

The present work is developed with the purpose of obtaining the thermal efficiency of these teams, for one it is obtained it dates experimental that it was properly processed and the following results were obtained: the thermal yield for the current conditions of operation is of 86%, the consumption of fuel oscillates between 2.123 and 2.18 kg/s for values of content of humidity between 32 and 42%.

Finally the values of the production are obtained for the two calculated variants (being those 1864977.72 and 3131594.88 USD) and the environmental affectations associated to the process study object.



INTRODUCCIÓN

El secado artificial del mineral es una práctica ampliamente difundida, que origina diversos problemas que afectan los costos y la calidad del mismo. El bloqueo económico norteamericano decretado contra la isla desde 1961 y arreciado en los años 90 se muestra particularmente severo con este renglón. En más de una ocasión ha prohibido la entrada en Estados Unidos de maquinarias y equipos fabricados con aleaciones hechas con níquel cubano. Aunque no parece probable que el níquel entre en la pugna que sostiene hoy el turismo por el primer lugar en la economía cubana, es un producto de alto valor en el mercado que garantiza a la isla una fuente segura de moneda libremente convertible. El reto es asumir su desarrollo de manera racional y ello implica abrir la bolsa de las reinversiones para salvar esta industria de la descapitalización que la ha azotado en estos años. En Cuba la industria del Níquel juega un papel importante dentro de la economía nacional, ubicándose como el sexto productor mundial de este importante mineral.

La empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" fue construida entre los años 1973 - 1985 como fruto de la colaboración bilateral entre los gobiernos de Cuba y la antigua Unión Soviética, esta se encuentra ubicada al norte del yacimiento mineral de Punta Gorda, en la costa norte, a 4 Km 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 empleo 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-amoniacal del mineral reducido, es un proceso continuo, utilizado en las 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. Este es llamado proceso Carón.



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

En la industria cubana del níquel se buscan soluciones para disminuir el consumo de combustible y lograr una mayor eficiencia en la obtención del preciado mineral.

Fundamento de la investigación

En la actualidad no se ha logrado implementar de forma eficiente el proceso de secado en los cilindros rotatorios de la planta de preparación de mineral debido al alto contenido de humedad presente en el mineral alimentado a los secaderos el cual oscila entre 36 y 38%.

En la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, la reducción del consumo de portadores energéticos y la optimización de sus procesos inciden considerablemente en la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen. El secado, desde el punto de vista industrial, es un proceso de transferencia de calor y de masa, mediante el cual se hace pasar un producto desde un estado inicial húmedo a otro estado final menos húmedo, lo que implica extraer el líquido que posee este, obteniendo al final un producto diferente, ya sea como producto final o como intermedio en un proceso de fabricación dado. Este líquido suele ser agua natural o mezclada, también puede tratarse de otro tipo de disolvente orgánico e inorgánico.

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

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

Se desconoce la eficiencia térmica de los secaderos cilíndricos rotatorios y el grado de influencia que tiene el contenido de humedad en el consumo de combustible.



Como objeto de estudio de la investigación se plantea: El proceso de secado en los hornos cilíndricos rotatorios.

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

Si se realiza un balance térmico y de masa a los secaderos cilíndricos de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, entonces es posible determinar la eficiencia térmica de las instalaciones de secado y la influencia que tiene el contenido de humedad en el consumo de combustible.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como objetivo del trabajo: Determinar la influencia del contenido de humedad en el consumo de combustible de los secaderos, mediante el balance térmico y de masa de las instalaciones de secado.

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

- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el proceso de secado que permita el establecimiento del estado actual de la temática en la empresa.
- 2- Definir los parámetros más influyentes en el proceso de secado.
- Establecer el procedimiento de cálculo para el balance térmico y de masa de los secaderos.
- 4- Establecer el comportamiento de la eficiencia térmica, y el consumo de combustible para diferentes contenidos de humedad en el mineral de entrada.
- 5- Determinar el impacto económico asociado al proceso y las afectaciones medioambientales que el mismo provoca al medio ambiente.



CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El secado está destinado a eliminar el agua presente en el mineral para poder ser tratado posteriormente de acuerdo a los requerimientos tecnológicos. El proceso de secado está caracterizado simultáneamente por una transferencia de calor y de masa, que se manifiesta de forma compleja cuyo comportamiento físico es difícil de predecir, es por ello que el estudio del proceso requiere de un riguroso análisis teórico.

En tal sentido el objetivo del capítulo es:

Exponer los fundamentos teóricos del proceso de secado térmico en tambores cilíndricos rotatorios que permita realizar el balance térmico del mismo.

1.2 Trabajos precedentes

En relación con el proceso de obtención de níquel, Cuba ha avanzado considerablemente en las investigaciones, este adelanto también involucra a la actividad de preparación del mineral hoy se cuenta con diversas investigaciones relacionadas con el objeto de estudio.

Mesarovich (1996), aborda la temática relacionada con la teoría general de los sistemas y la metodología de las investigaciones sistémicas.

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:

Total masa / energíaTotal masa / energía que saleTotal masa / energíaque entra al volumen - del volumen de control.= acumulada en elde control.volumen de control.



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

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.

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. Baker, 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.

Schofield y Glikin (1978), auxiliándose de esta aproximación, usaron una ecuación teórica para predecir el área de la superficie y una relación empírica para la transferencia de calor en materiales esféricos.

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.

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 gases calientes como aire secundario en el costo de producción. Comprobándose que se reduce el consumo de combustible.



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.

López (2005), realiza dos balances térmicos y de masa uno para determinar el consumo de combustible en ese momento y el otro teniendo en cuenta un incremento de la productividad con el fin de determinar el comportamiento de los diferentes parámetros al aumentar el flujo de mineral húmedo a la entrada del secadero.

Fulford (1969), proporciona una buena cantidad de modelos de la literatura rusa para describir el comportamiento de la cinética y la humedad de equilibrio durante el secado.

Luikov (1966), propuso que la transferencia de humedad en un material poroso es el resultado del gradiente de contenido de humedad, temperatura y presión.

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

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 y obtuvieron relaciones para la obtención de temperatura y campos de humedad en forma adimensional. Collard et al. (1992), estudiaron las deformaciones inducidas en el secado de una placa arcillosa, para ello utilizaron un par de parámetros del modelo difusivo en las ecuaciones de secado y un modelo reológico con seis parámetros para predecir la deformación inducida en la placa. Se presentan en el trabajo la dependencia de los parámetros del modelo reológico sobre el contenido de humedad a partir de experimentos y la evaluación del contenido de agua y perfiles de tensiones durante el secado.

En estos momentos existe una tendencia al aumento de los trabajos para lograr mejores índices de explotación justificados en los buenos precios que ha alcanzado el Níquel en el mercado internacional, pero hasta la actualidad no se cuenta con un estudio que considere la necesidad de aumentar la productividad y determine el



comportamiento de los diferentes parámetros al aumentar el flujo de mineral húmedo a la entrada del secadero.

Como se puede observar de este análisis, en Cuba 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 la influencia del contenido de humedad en el consumo de combustible y el rendimiento térmico de los secaderos cilíndricos.

1.3 Principios técnicos del secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y transferirla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto y su grado de sequedad) y de las características físico mecánicas del producto (su composición, contenido de humedad y el tamaño de las partículas). El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad de vapor de agua presente en el aire se denomina humedad. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, considerablemente de su temperatura. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decrece y por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata rápidamente. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto a secar (Zazhin, 1984).

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





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

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

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

El periodo de velocidad de secado decreciente, según sea el caso, puede describirse con una de las curvas (1, 2, 3, 4 ó 5) que van desde C hasta D.

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



1.4 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-amoniacal. 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 nó 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 usara 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 para el 85-87% de la cantidad de mineral.



1.5 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.

1.6 Descripción del proceso de secado en los secadores cilíndricos

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.

1.7 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.

$$T = \frac{0.00783 \cdot L}{Sd \cdot D \cdot N} \tag{1.1}$$

Donde:

T = tiempo; h. L = longitud; m. Sd = inclinación; m/m. D = diámetro; m. N = velocidad de rotación; 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 secadero

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 cantidad 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 pude que no se seque.

Para quemar completamente 1 kg de gasoil se requiere un mínimo de 15 kg de aire, 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 la formación de hollín. 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.

Se puede afirmar que el proceso de preparación del mineral, secado del mismo cuesta 23 % del costo general del consumo energético anual (informe económico anual, 2005).

1.8 Conclusiones del capítulo I

- Se han realizado múltiples investigaciones a los secadores cilíndricos rotatorios, pero hasta la actualidad, ninguna de ellas han tenido en cuenta la posibilidad real de modernización del proceso de secado, ni la influencia del contenido de humedad en el consumo de combustible y el rendimiento térmico del secador.
- El nivel de automatización de la planta de Preparación del mineral es elevado pero no se registra el flujo de los gases provenientes de hornos ni el flujo de aire de pulverización, esto genera inexactitud en los diagnósticos térmicos que se realizan a los secaderos de la planta.



CAPÍTULO II

MATERIALES Y METODOS

2.1 Introducción

Según analistas que aluden sobre la temática de la humedad en los minerales se establece un balance de masa en un complejo industrial con el objetivo de realizar una contabilidad exacta de todas las materias que entran, salen, se acumulan o se agotan en un intervalo de tiempo dado. El principio fundamental en que se basan los cálculos de balance de materia es establecer un número de ecuaciones independientes igual al número de incógnitas.

El objetivo del capitulo es: realizar el balance térmico y de masa del proceso de secado en los secadores cilíndricos rotatorios.

2.2 Materiales empleados

Para la toma de los valores de los parámetros que indican el funcionamiento de la instalación, se usaron los recursos puestos a disposición en el panel de control de la planta de preparación del mineral. En dicho panel se tomaron las medidas de temperatura, esto fue posible usándose termopares en los lugares requeridos en el secador rotatorio. El flujo de combustible se registró en un flujómetro al efecto. El resto de los parámetros son registrados por un autómata programable haciendo uso de una instrumentación virtual.

Métodos de cálculos

El método de calculo empleado es el concebido por Torres, Retirado (2004) basado en el análisis de las corrientes que entran y que salen del secador, y a partir de las mismas se establecen un balance de masa y energía que permite determinar el consumo real de combustible y la eficiencia real de la instalación.

Para la realización de los cálculos, se utilizó el programa profesional Mathcad versión 6.0.



2.3 Medición de la instalación

Mediante el diagnostico computarizado de los parámetros de los secadores, se obtuvo los siguientes parámetros:

Parámetros	Valores
Humedad del mineral alimentado (He)	37.50 %
Humedad del mineral secado (Hs)	4,48%
Consumo de combustible	2800 Kg/h
Temperatura de los gases de hornos (T7)	523 K
Temperatura de salida de los gases (T ₃)	360 K
Temperatura de la cámara de paso	1073 K
Temperatura del mineral a la salida (T ₄)	348 K
Flujo de gases de hornos (F7)	45000 m ³ /h
Mineral húmedo alimentado (F ₂)	97 T/h
Mineral seco a la salida (F ₄)	67 T/h (sin arrastre)
Flujo de aire de pulverización (F ₆)	11000 m ³ /h

Tabla 2.1. Parámetros obtenidos en la instalación de secado

Además, después del análisis del combustible que alimenta la cámara de combustión, su composición química según lo resultados del laboratorio central es la siguiente:

Tabla 2.2. Resultados del análisis químico realizado al combustible

Viscosidad a 50°C	541.66 cStok
Viscosidad a 80°C	89.16 cStok
Densidad	11.8 API
Punto de inflamación	393 K
Carbón Conradzon	11.05 %
Ceniza	0.08 %
Agua	0.1 %
Azufre	2.80 %
Temperatura de fluidez crítico	-
Impurezas Mecánicas	0.06 %



Asfáltenos	3.69 %
Valor calórico	10219.37 kcal/Kg.
Sodio	-
Vanadio	-
Densidad	0.9869 g/cm ³

2.4 Metodología de cálculo y sus resultados

Metodología de cálculo

Parámetros de trabajo principal:

CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS DE TRABAJO.

Parámetros de trabajo principal:

He := 37.5; humedad del mineral alimentado en %.

Hs := 4.48; humedad del mineral seco en %.

 ${}^{T_{\mbox{\scriptsize 7}}:=~250\mbox{ K}}$; temperatura de los gases de hornos.

 $\mathsf{T}_3 \coloneqq \mathsf{87}\,\mathsf{K}$; temperatura de salida de los gases.

 $\mathsf{T}_4 \ \coloneqq \ \mathsf{75}\ \mathsf{K}$; temperatura del mineral a la salida.

$$F_7 := 12.5 \frac{m^3}{s}$$
; flujo de gases de hornos.

 $F_2 := 26.9 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$; mineral húmedo alimentado.

 $F_4 := 18.61 \frac{kg}{s}$; mineral seco a la salida. $F_6 := 3.05 \frac{m^3}{s}$; flujo de aire de pulverización.

1. BALANCE DE ENERGÍA TERMICA ECE+ELRQ=ECS+EPTC



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

Q₁+Q₂+Q₅+Q₇+Q₈=Q₃+Q₄+Q_{p1}+Q_{p2} ECUACIÓN 1

^Q¹: calor sensible y de reacción aportado por el petróleo; [kJ/h].

^Q₂ : calor sensible aportado por el mineral húmedo; [kJ/h].

^Q₃: calor sensible de los gases de salida del secador mas calor sensible y latente del agua evaporada; [kJ/h].

^Q₄: calor sensible del mineral seco y el agua retenido a la salida del secadero; [kJ/h].

^Q₅ : calor sensible aportado por el aire de combustión o primario; [kJ/h].

^Q₆: calor sensible aportado por el aire de pulverización; [kJ/h].

^Q₇: calor sensible y de reacción aportado por los gases de la planta de hornos; [kJ/h].

^Q₈ : calor sensible aportado por el aire parásito; [kJ/h].

Qp1+Qp2: calor perdido por convección y radiación en las diferentes secciones del secador; [kJ/h].

1.1. Determinación de cada una de las corrientes

a. Determinación de la corriente 1

El petróleo aporta además de su calor de reacción aporta su calor sensible porque entra a una temperatura de 100.

ge := 0.986

 $T_0 := 298 \text{ K}$

VCI := 9733000 $\frac{J}{kg}$; valor acalórico inferior del combustible



$$T_{11} := 373 \cdot K$$

$$F_{1} := 2.507 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_{1} := 373 \cdot K$$

$$Cp := \frac{0.383 + 0.00045 \cdot T_{1}}{\text{ge}}$$

$$Cp = 0.434$$

$$Cp1 := Cp \cdot 4.18 \cdot 10^{3} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$Cp1 = 1.814 \times 10^{3} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$\Delta H_{1} = 1.361 \times 10^{5} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$Q_{1} := F_{1} \cdot \Delta H_{1} + F_{1} \cdot \text{VCI}$$

 $Q_1 = 2.474 \times 10^7 \, W$

b. Determinación de la corriente 2, 5, 6 y 8

La temperatura de cada una de estas corrientes se iguala a la temperatura ambiental por que las diferencias de entalpías se hacen cero.

 $T_{2} := 298 \text{ K}$ $\Delta H_{2} := \text{Cp1} \cdot (T_{2} - T_{0})$ $\Delta H_{2} := 0$ $Q_{2} := 0 \qquad Q_{6} := 0 \qquad Q_{5} := 0 \qquad Q_{8} := 0$ Por tanto: $Q_{2} = Q_{5} = Q_{6} = Q_{8} = 0$

c. Determinación de la corriente 3

1. Cálculo de la energía aportada por los gases excluyendo el agua evaporada: Q3 (G)

1.1 Cálculo de la variación de entalpía ΔH donde esta nombrada A, B, C así sucesivamente

La variación de entalpía se busca teniendo en cuenta la temperatura de salida de los gases (Incropera).



Composición química de la temperatura de salida de los gases:

$$CpN_{2} := 1042 \frac{J}{kg \cdot K} \qquad CpH_{2O} := 1970 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$A_{N2} := CpN_{2} \cdot (T_{11} - T_{0}) \qquad F_{HO2} := CpH_{2O} \cdot (T_{11} - T_{0})$$

$$A_{N2} = 7.815 \times 10^{4} \frac{J}{kg} \qquad F_{HO2} = 1.478 \times 10^{5} \frac{J}{kg}$$

$$CpS0_{2} := 982 \frac{J}{kg \cdot K} \qquad CpC0_{2} := 901 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$E_{SO2} := CpS0_{2} \cdot (T_{11} - T_{0}) \qquad C_{CO2} := CpC0_{2} \cdot (T_{11} - T_{0})$$

$$E_{SO2} = 7.365 \times 10^{4} \frac{J}{kg} \qquad C_{CO2} = 6.758 \times 10^{4} \frac{J}{kg}$$

CpC0 :=
$$1045 \frac{J}{kg \cdot K}$$
 Cp02 := $929 \frac{J}{kg \cdot K}$

 D_{CO} := CpC0·(T₁₁ - T₀)
 B_{O2} := Cp02·(T₁₁ - T₀)

 D_{CO} = 7.838 × $10^4 \frac{J}{kg}$
 B_{O2} = 6.968 × $10^4 \frac{J}{kg}$

1.2. Sustitución en la formula principal para calcular Q3 (G)

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

$$F_{3H20} := 0.46 \frac{J}{kg} \cdot F_1 + 6896.32 \frac{J}{s}$$

$$F_{3N2} := 9.63 \frac{J}{kg} F_1 + 24065.9 \frac{J}{s}$$

$$F_{3O2} := 0.38 \frac{J}{kg} \cdot F_1 + 6765.76 \frac{J}{s}$$

$$F_{3S02} := 0.014 \frac{J}{kg} F_1 + 500.85 \frac{J}{s}$$

$$Q_{3.G} := 1.04 \cdot F_{3N2} + 1.97 \cdot F_{3H20} + 0.98 \cdot F_{3S02} + 0.93 \cdot F_{3O2}$$

$$Q_{3.G} = 4.543 \times 10^4 \frac{J}{s}$$



Q3 (VA)

2.1. Calculo del porciento de mineral secado

Hs := 4.48

 $\%F4 := \frac{100 - Hs}{100}$

Donde: %F4 es el porciento de mineral secado

%F4 = 0.955

2.2. Cálculo del flujo de vapor de agua: VA

$$VA := \left(F_2 \cdot \frac{He}{100}\right) - \left(F_4 \cdot \frac{Hs}{100 \cdot \% F4}\right)$$
$$VA = 9.215 \frac{kg}{s}$$

2.3. La variación de entalpía del vapor de agua: $\Delta H(VA)$

 $Cpa := 4190 \frac{J}{kg \cdot K}$; calor específico del agua

 $(\tau) := 2283000 \frac{J}{kg}$; calor latente de vaporización del agua a la temperatura de salida de los

gases a la temperatura de 87 grado Celsius

$$\Delta H(VA) := Cpa \cdot (T_3 - T_0) + (\tau)$$
$$\Delta H(VA) = 2.543 \times 10^6 \frac{J}{kg}$$

Evaluando calculamos el valor de Q3 (VA)

kg

$$Q3(VA) := VA \cdot \Delta H(VA)$$

$$Q3(VA) = 2.343 \times 10^7 \frac{J}{s}$$

Sustituyendo calculamos el valor de Q3

$$Q_3 := Q_{3.G} + Q_3(VA)$$

$$Q_3 = 2.348 \times 10^7 \frac{J}{s}$$

d. Determinación de la corriente 4

Esta corriente esta compuesta por el mineral seco y el agua retenida en este:



$$F_{ar} := 0.83 \frac{kg}{s} ; \text{ flujo de agua retenida}$$

$$Cpa = 4.19 \times 10^{3} \frac{m^{2}}{s^{2} \text{K}} ; \text{ capacidad calorífica del agua según Perry (1967)}$$

$$F_{min} := 17.77 \frac{kg}{s} ; \text{ flujo de mineral seco}$$

$$\begin{split} & Cp_{min} \coloneqq 963 \frac{m^2}{s^2 K}; \text{ capacidad calorífica del mineral según datos de la planta.} \\ & Q_4 \coloneqq \left(F_{ar} \cdot Cpa + F_{min} \cdot Cp_{min}\right) \cdot \left(T_4 - T_0\right) \\ & Q_4 = 1.03 \times 10^6 \frac{J}{s} \end{split}$$

e. Determinación de la corriente 7

Los gases provenientes de hornos de reducción aportan su calor sensible más el calor sensible, más el calor de reacción del CO y H_2

Calor sensible: La capacidad calorífica se busca en el Incropera a 250 °C

e.1-Cálculo de la variación de entalpía de los gases de hornos.

 $T_5 := 523 \cdot K$

$$CpN_{22} := 1056 \frac{J}{kg \cdot K} \qquad CpH_{202} := 1985 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$A_{N22} := CpN_{22} \cdot (T_5 - T_0) \qquad F_{HO22} := CpH_{202} \cdot (T_5 - T_0)$$

$$A_{N22} = 2.376 \times 10^5 \frac{J}{kg} \qquad F_{HO22} = 4.466 \times 10^5 \frac{J}{kg}$$

CpS0₂₂ := 1187
$$\frac{J}{kg \cdot K}$$
 CpC0₂₂ := 1020 $\frac{J}{kg \cdot K}$

 E_{SO22} := CpS0₂₂ · (T₅ - T₀)
 D_{CO22} := CpC0 · (T₅ - T₀)

 E_{SO22} = 2.671 × 10⁵ $\frac{J}{kg}$
 D_{CO22} = 2.351 × 10⁵ $\frac{J}{kg}$



CpC02 :=
$$1065 \frac{J}{kg \cdot K}$$
 Cp022 := $972 \frac{J}{kg \cdot K}$

 C_{C022} := CpC02 \cdot (T_5 - T_0)
 B_{O22} := Cp022 \cdot (T_5 - T_0)

 C_{C022} = 2.027 \times 10^5 \frac{J}{kg}
 B_{O22} = 2.187 \times 10^5 \frac{J}{kg}

 $CpH_{22} := 14520 \frac{J}{kg \cdot K}$ $G_{H22} := CpH_{22} \cdot (T_5 - T_0)$ $G_{H22} = 3.267 \times 10^6 \frac{J}{kg}$

El flujo de cada componente se calcula multiplicando el porciento de cada uno de los elementos por el flujo de los gases de hornos. La composición química de los gases del horno es la siguiente:

$$\begin{split} & \mathsf{N}_2 \coloneqq 0.433 \qquad \mathsf{H}_2 \coloneqq 0.01 \qquad \mathsf{CO} \coloneqq 0.017 \qquad \mathsf{O}_2 \coloneqq 0.12 \\ & \rho_{\mathsf{N}_2} \coloneqq 0.6739 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{m}^3} \qquad \rho_{\mathsf{H}_2} \coloneqq 0.0484 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{m}^3} \qquad \rho_{\mathsf{CO}} \coloneqq 0.674 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{m}^3} \qquad \rho_{\mathsf{O}_2} \coloneqq 0.7698 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{m}^3} \\ & \mathsf{H}_{\mathsf{2O}} \coloneqq 0.33 \qquad \mathsf{SO}_2 \coloneqq 0.01 \qquad \mathsf{CO}_2 \coloneqq 0.08 \\ & \rho_{\mathsf{H}_2\mathsf{O}} \coloneqq 0.4405 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{m}^3} \qquad \rho_{\mathsf{SO}_2} \coloneqq 1.113 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{m}^3} \qquad \rho_{\mathsf{CO}_2} \coloneqq 1.0594 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{m}^3} \\ & \mathsf{A}_1 \coloneqq \mathsf{F}_7 \cdot \mathsf{N}_2 \cdot \rho_{\mathsf{N}_2} \qquad \mathsf{A}_2 \coloneqq \mathsf{F}_7 \cdot \mathsf{O}_2 \cdot \rho_{\mathsf{O}_2} \qquad \mathsf{A}_3 \coloneqq \mathsf{F}_7 \cdot \mathsf{CO}_2 \cdot \rho_{\mathsf{CO}_2} \qquad \mathsf{A}_4 \coloneqq \mathsf{F}_7 \cdot \mathsf{H}_2\mathsf{O} \cdot \rho_{\mathsf{H}_2\mathsf{O}} \\ & \mathsf{A}_1 \coloneqq \mathsf{A}_7 \cdot \mathsf{N}_2 \cdot \mathsf{P}_{\mathsf{N}_2} \qquad \mathsf{A}_2 \coloneqq \mathsf{F}_7 \cdot \mathsf{O}_2 \cdot \rho_{\mathsf{O}_2} \qquad \mathsf{A}_3 \coloneqq \mathsf{F}_7 \cdot \mathsf{CO}_2 \cdot \rho_{\mathsf{CO}_2} \qquad \mathsf{A}_4 \coloneqq \mathsf{F}_7 \cdot \mathsf{H}_2\mathsf{O} \cdot \rho_{\mathsf{H}_2\mathsf{O}} \\ & \mathsf{A}_1 \coloneqq \mathsf{A}_5 \coloneqq \mathsf{F}_7 \cdot \mathsf{CO} \cdot \rho_{\mathsf{CO}} \qquad \mathsf{A}_6 \coloneqq \mathsf{F}_7 \cdot \mathsf{SO}_2 \cdot \rho_{\mathsf{SO}_2} \qquad \mathsf{A}_7 \coloneqq \mathsf{F}_1 \cdot \mathsf{H}_2 \cdot \rho_{\mathsf{H}_2} \\ & \mathsf{A}_5 \coloneqq \mathsf{O}_143 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{s}} \qquad \mathsf{A}_6 \equiv \mathsf{O}_139 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{s}} \qquad \mathsf{A}_7 \coloneqq \mathsf{1}_213 \times 10^{-3} \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{m}^3} \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{s}} \\ & \mathsf{A}_{77} \coloneqq \mathsf{A}_7 \cdot \frac{\mathsf{m}^3}{\mathsf{kg}} \\ & \mathsf{A}_{77} \coloneqq \mathsf{1}_213 \times 10^{-3} \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{s}} \end{aligned}$$



$$Q_{s} := A_{N22} \cdot A_{1} + B_{O22} \cdot A_{2} + C_{CO22} \cdot A_{3} + D_{CO22} \cdot A_{5} + E_{SO22} \cdot A_{6} + F_{HO22} \cdot A_{4} + G_{H22} \cdot A_{77}$$
$$Q_{s} = 2.22 \times 10^{6} \text{ W}$$

Calor de reacción:

El calor de reacción del CO y H₂ se busca en la tabla 203, sección 3 de Perry (1967)

$$A_{rCO} := 10097900 \frac{J}{kg} \qquad A_{rH2} := 142376200 \frac{J}{kg}$$

$$Q_{RCO} := A_{rCO} \cdot A_5 \qquad Q_{RH2} := A_{rH2} \cdot A_7$$

$$Q_{RCO} = 1.446 \times 10^6 \frac{J}{s} \qquad Q_{RH2} = 1.728 \times 10^5 \frac{kg}{m^3} \frac{J}{s}$$

$$Q_7 \coloneqq Q_8 + A_5 \cdot D_{CO22} + A_{77} \cdot G_{H22}$$

 $Q_7 = 2.258 \times 10^6 \frac{3}{s}$

3. 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 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.

3.1. Unión de la cámara de paso con el tambor secador.

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

Datos: $\alpha := 0.9$; eficiencia del orificio $R_1 := 287.1 \frac{J}{kg \cdot K}$; constante real de los gases en [J/kgK] $P_1 := 103300 Pa$; mayor presión



P₂ := 103170.6 Pa ; menor presión

 $r_1 := 2.626 \text{ m}$; mayor radio

 $^{r}2 \coloneqq 2.576 \mbox{ m}$; menor radio

 $t_1 \mathrel{:=} 298 \mbox{ K}$; temperatura del medio ambiente

 $\psi := 0.0004$; coeficiente de flujo

El área se calcula según:

$$A_1 := \pi \cdot \left(r_1^2 - r_2^2 \right)$$
 $\Delta P := P_1 - P_2$
 $A_1 = 0.817 m^2$ $\Delta P = 129.4 Pa$

Sustituyendo se obtiene:

$$G_{1} := \alpha \cdot \psi \cdot \Delta P \cdot A_{1} \cdot \left(\frac{29}{R_{1} \cdot t_{1}}\right)^{\frac{1}{2}}$$
$$G_{1} = 7.008 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

3.2. Sección de entrada del mineral

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

Datos:

A3 := 0.96 m^2

El flujo de aire se determina del mismo modo que en el caso anterior.

$$G_{2} := \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha \cdot \psi \cdot \Delta P \cdot A3} \cdot \left(\frac{29}{R_{1} \cdot t_{1}}\right)^{2} \\ G_{2} = 8.233 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \end{bmatrix}$$

Luego:
$$G := G_{1} + G_{2}$$

$$G = 1.524 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$



4. Cálculo de las pérdidas por transferencia de calor.

En el secador existe perdida de calor por convección y por radiación

Cámara de paso En esta sección la convección es libre. L₁ := 3.496 m Longitud d₁ := 3.132 m; Diámetro del orificio 1 a := 6.83 m; Ancho d₂ := 4.252 m; Diámetro del orificio 2 h := 9.065 m Altura A₀ := $2 \cdot (a \cdot h + a \cdot L_1 + h \cdot L_1)$ A₀ = 234.966 m^2 A₁₁ := $\pi \cdot d_1^2$ A₂₂ := $\pi \cdot d_2^2$ A₁₃ := A₀ - (A₁₁ + A₂₂) A₁₃ = 147.35 m²

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

Donde: Ts=393K es la temperatura de la superficie.

Los parámetros del fluido se buscan en la tabla A6 del Incropera a la temperatura pelicular.

$$Ts := 393 K$$

$$T_{f} := \frac{Ts + T_{0}}{2}$$

$$T_{f} = 209 K$$

$$K_{2} := 0.03 \frac{W}{W}$$

m·K ; coeficiente de conductividad térmico



 $P_{r} := 0.7 ; número de Prandtl$ $v := 20.92 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s} ; viscosidad cinemática del fluido.$ $Cp := 1000 \frac{J}{kg \cdot K} ; capacidad calorífica$ $\alpha_{1} := 29.9 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s} ; coeficiente de difusividad térmica$ $\beta := 0.0029 K^{-1} ; coeficiente de dilatación volumétrica$ $\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^{2} \cdot K^{4}} ; constante de Stefan Boltzman$ $H_{1} := 9.065 m$ $\varepsilon 1 := 0.9 ; Para aceros$ $Ral := \frac{g \cdot \beta \cdot (Ts - T_{0}) \cdot H_{1}^{-3}}{v \cdot \alpha_{1}}$

Ral = 1.246 × 10¹³

Como Ral> 10⁹, la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt es la siguiente:

Nul :=
$$\begin{bmatrix} 0.825 + \frac{0.387 \cdot \text{Ral}^{6}}{\left[\frac{9}{1 + \left(\frac{0.492}{P_{r}} \right)^{16}} \right]^{27}} \end{bmatrix}^{2}$$

$$Nul = 2.517 \times 10^3$$

Luego:

$$h_1 := \text{Nul} \cdot \frac{\text{K}_2}{\text{H}_1}$$
$$h_1 = 8.33 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$



Sustituyendo en (8) y (9)

$$q_{conv} \coloneqq h_1 \cdot A_{13} \cdot (Ts - T_0) \qquad q_{rad} \coloneqq \varepsilon 1 \cdot \sigma \cdot A_{13} \cdot (Ts^4 - T_0^4)$$
$$q_{conv} \equiv 4.517 \times 10^5 \text{ W} \qquad q_{rad} \equiv 1.794 \times 10^5 \text{ W}$$

Tambor secador:

La convección en esta sección es forzada

 $L_2 := 40 \text{ m}$ D := 4.8 m

 $A_2 := \pi \cdot D \cdot L_2$

$$A_2 = 603.186 m^2$$

Las propiedades del fluido se buscan en la tabla A6 del Incropera a la temperatura pelicular.

$$\begin{split} & {}^{T}s \coloneqq 358 \ \text{K} \ \text{; temperatura de la superficie.} \\ & {}^{T}_{f1} \coloneqq 328 \ \text{K} \\ & {}^{\text{k} \coloneqq 28.08 \cdot 10^{-3}} \frac{W}{m \cdot \text{K}} \ \text{; coeficiente de conductividad térmica.} \\ & {}^{v}1 \coloneqq 18.3 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s} \ \text{; coeficiente cinemática de viscosidad.} \\ & {}^{\epsilon}1 \coloneqq 0.22 \ \text{; coeficiente para el aluminio (revestimiento).} \\ & {}^{v} \coloneqq 3.5 \frac{m}{s} \ \text{; velocidad del aire.} \\ & {}^{P}r_{0} \coloneqq 0.704 \\ & {}^{P}r_{s} \coloneqq 0.7 \\ & \text{El número de Reynolds:} \\ & {}^{R}e_{1} \coloneqq \frac{v \cdot D}{v_{1}} \\ & {}^{R}e_{1} = 9.18 \times 10^{5} \\ & \text{Como}^{Re}1 \ \text{es} > 200000 \ \text{entonces el régimen es turbulento} \end{split}$$



 $C_{1} := 0.076$ $m_{1} := 0.7 \text{ en la tabla 7.4 de Incropera}$ n := 0.37 para Pr <10 según Incropera $N_{UD} := C_{1} \cdot Re_{1}^{m_{1}} \cdot P_{r}^{n} \cdot \left(\frac{P_{r0}}{P_{rs}}\right)^{\frac{1}{4}}$ $N_{UD} = 995.679$ $h_{1} := \frac{N_{UD} \cdot k}{D}$ $h_{1} = 5.825 \frac{W}{m^{2}K}$ Sustituyendo en (7) y (8): $q_{conv1} := h_{1} \cdot A_{2} \cdot (Ts - T_{0})$ $q_{conv1} = 1.293 \times 10^{6} \text{ W}$

 $q_{rad1} := \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot A_2 \cdot \left(Ts^4 - T_0^4\right)$ $q_{rad1} = 1.795 \times 10^5 W$

Botella

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

 $S_2 := 8m$; generatriz del cono. $d_1 := 5.222m$; diámetro mayor. $d_2 := 4.8m$; diámetro menor. $d_m := 5.011m$; diámetro medio. $A_2 := \pi \cdot S_2 \cdot d_m$ $A_2 = 125.94m^2$

Las propiedades del fluido se buscan en la tabla A-6 del Incropera a la temperatura pelicular

 $\mathsf{T}_{s1} \coloneqq \mathsf{558K}$; temperatura de la superficie.

T_{f3} := 428K



$$v_2 := 30 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$
; coeficiente cinemática de viscosidad.
 $k_1 := 35.8 \cdot 10^{-3} \frac{W}{m \cdot K}$; coeficiente de conductividad térmico.

 $P_{r01} := 0.689$

 $P_{rs1} := 0.683$

El número de Reynolds:

$$\mathsf{R}_{\mathsf{e}} \coloneqq \frac{v \cdot \mathsf{d}_{\mathsf{m}}}{v_2}$$

 $R_e = 5.846 \times 10^5$

Como Re₁ > 200000 entonces el régimen es turbulento

$$N_{UD1} := C_1 \cdot R_e^{m_1} \cdot P_r^{0.37} \cdot \left(\frac{P_{r01}}{P_{rs1}}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$N_{UD1} = 726.54$$

$$h_2 := \frac{N_{UD1} \cdot k_1}{d_m}$$

$$h_2 = 5.191 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$
Sustituyendo en (7) y (8):

$$q_{conv2} := h_2 \cdot A_2 \cdot (Ts - T_0)$$

$$q_{conv2} = 2.406 \times 10^5 W$$
Luegc
$$Q_{p1} := q_{conv} + q_{conv1} + q_{conv2}$$

$$Q_{p1} = 1.985 \times 10^6 W$$

$$q_{rad2} := \varepsilon 1 \cdot \sigma \cdot A_2 \cdot \left(Ts^4 - T_0^4 \right)$$
$$q_{rad2} = 1.533 \times 10^5 W$$

$$Q_{p2} := q_{rad} + q_{rad1} + q_{rad2}$$

 $Q_{p2} = 5.122 \times 10^5 W$



2. BALANCE DE MASA

2.1 Cálculo del oxígeno estequiométrico y los productos de la combustión.

$S_2 := 2.19 \frac{J}{kg} \cdot F_1 + 297.68 \frac{J}{s}$	0 ₂
$S_3 := 1.55 \frac{J}{kg} \cdot F_1 + 374.85 \frac{J}{s}$	co ₂
S ₄ := 1.207·F ₁	Н ₂₀
$S_5 := 0.014 \cdot F_1$	so ₂

2.2 Cálculo del flujo de los componentes de cada una de las corrientes.

Corriente 5.

Conocemos:

- $\lambda := 12.5$: Relación aire combustible.
- $Wa_1 := 0.025$: Porciento de humedad en el aire:
- As 1 = 0.975: Porciento de aire seco.
- ^Oa ^{:= 0.21} : Porciento de oxígeno en el aire seco.

 $N_a := 0.79$: Porciento de nitrógeno en el aire seco.

$$\mathsf{F}_5 \coloneqq \lambda \cdot \mathsf{F}_1 \qquad \qquad \mathsf{F}_{\mathsf{AS5}} \coloneqq \mathsf{As}_1 \cdot \mathsf{F}_5$$

- $F_5 = 31.338 \frac{kg}{s}$ $F_{As5} = 276.973 \frac{m}{s} \frac{kg}{h}$
- $F_{H205} := Wa_1 \cdot F_5$ $F_{025} := O_a \cdot 12.19 \cdot F_1$ $F_{1205} := 7.102 \frac{m}{m} \frac{kg}{kg}$ $F_{125} := 0_a \cdot 12.19 \cdot F_1$

$$F_{H205} = 7.102 \frac{m}{s} \frac{kg}{h}$$
 $F_{025} = 6.418 \frac{m}{s}$

$$\mathsf{F}_{\mathsf{N25}} := \mathsf{N}_{\mathsf{a}} \cdot \mathsf{12.19} \cdot \mathsf{F}_{\mathsf{1}}$$

$$\mathsf{F}_{N25} = 24.143 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{s}}$$

Corriente 6

 $\mathsf{F}_6 := 14190 \frac{\mathsf{kg}}{\mathsf{h}}$

$$F_{As6} := As_1 \cdot F_6$$
 $F_{H2O6} := Wa_1 \cdot F_6$
 $F_{As6} = 1.384 \times 10^4 \frac{kg}{h}$
 $F_{H2O6} = 354.75 \frac{kg}{h}$
 $F_{O26} := O_a \cdot F_{As6}$
 $F_{N26} := N_a \cdot F_{As6}$

$$F_{O26} = 2.905 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$
 $F_{N26} = 1.093 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$

Corriente 8

 $F_{8} := 5.48 \frac{kg}{h}$ $F_{H2O8} := Wa_{1} \cdot F_{8}$ $F_{As8} := As_{1} \cdot F_{8}$ $F_{H2O8} = 0.137 \frac{kg}{h}$ $F_{As8} = 5.343 \frac{kg}{h}$

$$F_{N28} := N_a \cdot F_{A88}$$

 $F_{O28} := O_a \cdot F_{A88}$
 $F_{N28} = 4.221 \frac{kg}{h}$
 $F_{O28} = 1.122 \frac{kg}{h}$

Para determinar el flujo de los componentes se realiza un balance en cada uno de ellos. 2.4.3. Flujo de composición de los gases a la salida del secadero incluyendo el agua evaporada

$$a_{1} := 0.37 \frac{J}{kg} \cdot F_{1} + 6765.76 \frac{J}{s}; \text{ flujo del dioxígeno}$$

$$a_{1} = 6.767 \times 10^{3} \text{ W}$$

$$a_{2} := 9.63 \frac{J}{kg} \cdot F_{1} + 23975.9 \frac{J}{s}; \text{ flujo del dinitrógeno}$$

$$a_{2} = 2.4 \times 10^{4} \text{ W}$$

$$a_{3} := 0.46 \frac{J}{kg} \cdot F_{1} + 6896.62 \frac{J}{s}; \text{ flujo del agua}$$

$$a_{3} = 6.898 \times 10^{3} \text{ W}; \text{ flujo para el SO}_{2}$$



$$\begin{aligned} a_4 &:= 0.014 \frac{J}{kg} \cdot F_1 + 500.85 \frac{J}{s} \\ a_4 &= 500.885W \\ a_5 &:= 1.577 \frac{J}{kg} \cdot F_1 + 4188.84 \frac{J}{s} \\ ; \ flujo \ para \ el \ CO2 \\ a_5 &= 4.193 \times 10^3 W \\ F_3 &:= 70047.14 \frac{kg}{h} \\ Q_{33} &:= 83170722.44 \cdot 10^3 \frac{J}{h} \\ La \ composición \ química \ de \ los \ gases \\ O_{22} &:= 0.107 \qquad SO \ _{22} &:= 0.0076 \qquad N_{22} &:= 0.633 \qquad CO \ _2 &:= 0.107 \qquad H_{2O} &:= 0.144 \\ \textbf{2.4.4. Rendimiento \ de \ la \ instalación.} \\ \eta &:= \frac{Q3(VA)}{Q_1 + Q_7} \end{aligned}$$

 $\eta\,=0.868$

$$\mathsf{F_{111}} \coloneqq \frac{\mathsf{Q}_3 + \mathsf{Q}_4 + \mathsf{Q}_{p1} + \mathsf{Q}_{p2} - \mathsf{Q}_7}{9869500 \frac{\mathsf{J}}{\mathsf{kg}}}$$

$$F_{111} = 2.507 \frac{kg}{s}$$

2.5. Balance térmico y de masa para un incremento de la productividad.

1. BALANCE TERMICO

Para alcanzar una productividad de 1314000T/año es necesario que el tonelaje de mineral secado aumente a 97T/h.

Mineral alimentado: 150T/h

Mineral seco a la salida: 97T/h

Las corrientes 1, 2, 5,6 y 7 al igual que las pérdidas mantienen el mismo valor que en cálculo anterior.



1. a-Corriente 3

 $F_{22} = 30.55 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$; este valor sale del aumento de mineral alimentado de 150T/h

 $F_{44} := 26.94 \frac{kg}{s}$; este valor sale del aumento de mineral secado a la salida de 97T/h La variación de entalpía se determina por la misma ecuación anterior, pero como no depende del flujo de mineral que entra o sale del secador, no varían respecto al cálculo anterior.

$$Q3_q := 3.856 \cdot 10^4 \frac{J}{s}$$

Cálculo del flujo de vapor de agua: VA2

$$VA_{2} := \left(F_{22} \cdot \frac{He}{100}\right) - \left(F_{44} \cdot \frac{Hs}{100 \cdot \%F4}\right)$$
$$VA_{2} = 10.193 \frac{kg}{s}$$

La variación de entalpía del vapor de agua: $\Delta H(VA)$

 $Cpa_2 := 4190 \frac{J}{kg \cdot K}$; calor específico del agua $\chi := 2283000 \frac{J}{kg}$ $\Delta H(VA) := Cpa_2 \cdot \left(T_3 - T_0\right) + \chi$ $\Delta H(VA) = 2.543 \times 10^6 \frac{J}{ka}$ $\Delta H_1 := 2534400 \frac{J}{ka}$ Evaluando calculamos el valor de Q3 (VA) $Q3_1 := VA_2 \cdot \Delta H(VA)$ $Q3_1 = 2.592 \times 10^7 W$

Sustituyendo calculamos el valor de Q3

$$Q_{32} := Q_{3q}^3 + Q_{3}^3(VA)$$

$$Q_{32} = 2.347 \times 10^7 \frac{J}{s}$$



1. b- Corriente 4

Esta corriente esta compuesta por el mineral seco y el agua detenida en este.

 $F_{ar1} := 1.1875 \frac{kg}{s}$; flujo de agua retenida $Cp_{a1} := 4190 \frac{J}{kg \cdot K}$; capacidad calorífica del agua $F_{min1} \approx 26.94 \frac{kg}{s}$; flujo de mineral seco $Cp_{min1} := 963 \frac{J}{kg \cdot K}$; capacidad calorífica del mineral

$$\begin{aligned} & \mathsf{Q}_{44} \coloneqq \left(\mathsf{F}_{ar1} \cdot \mathsf{Cp}_{a1} + \mathsf{F}_{min1} \cdot \mathsf{Cp}_{min1}\right) \cdot \left(\mathsf{T}_4 - \mathsf{T}_0\right) \\ & \mathsf{Q}_{44} = 1.546 \times \ 10^6 \ \mathsf{W} \end{aligned}$$

2. BALANCE DE MASA

,

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

$$F_{Comb} := \frac{10.22 \frac{J}{s}}{13.23 \frac{J}{kg}}$$

$$F_{Comb} = 0.772 \frac{kg}{s}$$

$$Q_{11} := 40886.5 \frac{J}{kg} \cdot F_{Comb}$$

$$Q_{11} = 3.158 \times 10^{4} W$$

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

$$a_{12} := 0.37 \frac{J}{kg} \cdot F_{Comb} + 6765.76 \frac{J}{s}$$
; flujo del dioxígeno
 $a_{12} = 6.766 \times 10^3 W$



$$a_{22} := 9.63 \frac{J}{kg} \cdot F_{Comb} + 23975.9 \frac{J}{s}; \text{ flujo del dinitrógeno}$$

$$a_{22} = 2.398 \times 10^{4} \text{ W}$$

$$a_{32} := 1.52 \frac{J}{kg} \cdot F_{Comb} + 6896.62 \frac{J}{s}; \text{ flujo del agua}$$

$$a_{32} = 6.898 \times 10^{3} \text{ W}; \text{ es el flujo para el SO}_{2}$$

$$a_{42} := 0.014 \frac{J}{kg} \cdot F_{Comb} + 500.85 \frac{J}{s}$$

$$a_{42} = 500.861 \text{ W}$$

$$a_{52} := 1.577 \frac{J}{kg} \cdot F_{Comb} + 4188.84 \frac{J}{s}; \text{ flujo para el CO}_{2}$$

$$a_{52} = 4.19 \times 10^{3} \text{ W}$$

$$F_{3} := 70047.14 \frac{kg}{h}$$

La composición volumétrica de los gases

 $O_{23} := 0.09$ $SO_{23} := 0.0063$ $N_{23} := 0.65$ $CO_{23} := 0.11$ $H_{2O3} := 0.138$

Rendimiento de la instalación

$$\eta_1 := \frac{Q3_1}{Q_1 + Q_7}$$

 $\eta_1 = 0.96$



2.6 Resultados

Humedad (%)	Consumo de combustible (kg/s)
32	2.123
33	2.192
34	2.261
35	2.331
36.5	2.435
37.5	2.507
39	2.608
41	2.747
42	2.814

Tabla 2.3 Comportamiento de la humedad respecto al consumo de combustible.

2.7. Conclusiones del capítulo II

- El balance térmico y de masa de los secaderos permitió determinar el consumo de combustible actual lo cual es de 2.07 kg/s.
- El rendimiento actual de los secaderos obtenido del balance térmico y de masa es del 86 %.



CONCLUSIONES GENERALES

- Existen pocos trabajos referidos al balance térmico y de masa de los secaderos de mineral laterítico, en general los aportes de los diferentes científicos están orientados a la descripción de la cinética del proceso de secado de material de diferentes propiedades termofísicas y a la caracterización de la transferencia de calor.
- El rendimiento térmico de la instalación obtenido para las condiciones actuales de operación es de 86 %. El aumento de la productividad en el proceso de secado manteniendo estable el consumo de combustible garantiza un aumento de la eficiencia del proceso. Para el caso analizado fue del 10 %.
- Existe un alto grado de dependencia entre el contenido de humedad del mineral y el consumo de combustible en el proceso de secado. Al variar la primera de 32 a 42 % el segundo oscila entre 2.123 y 2.814 kg/s.
- Las variables medioambientales que más afectan a los trabajadores y el entorno en general son las emanaciones de polvo, ruido y gases producto de la combustión del petróleo. A pesar de que en ocasiones los valores son superiores a los establecidos por las normas internacionales, no se controlan rigurosamente.



RECOMENDACIONES

- Continuar con el estudio de la temática considerando nuevos elementos no abordados en este trabajo debido a la importancia que tiene para la empresa Ernesto Che Guevara.
- Modelar matemáticamente el proceso de manera que permita el control de los parámetros fundamentales.
- Capacitar a los operarios en cuanto a la importancia que tienen las instalaciones de secado desde el punto de vista económico y medioambiental.
- Convertir el trabajo en material de consulta de la asignatura transferencia de calor por la profundidad que presenta este caso de estudio.

BIBLIOGRAFIA

- 1. BACHIR H. Balance térmico y de masa del secador # 3 en la empresa CMDTE Ernesto Guevara. Proyecto de curso. ISMMANJ, Moa. 2001. 36p.
- Baker, C. G. J.: The design of flights in cascading rotary dryiers, <u>Drying Technology</u>, 6 (4): 631 653, 1988.
- 3. Collard, J. M.; Arnaud, G.; Fohr, J. P.: The drying induced deformations of a clay plate. Int. J. Heat Mass Transfer. 35: 102 115, 1992.
- Dinulescu, H. A.; Eckert, E.R.G.: Analysis of the one dimensional moisture migration caused temperature gradients in porous medium. <u>Int. J. Heat Mass Transfer</u>. 28 (9): 1069 – 1077, 1985.

5. Ferguson, W. J.; Turner, I. W.: A comparison of the finite element and control volume numerical solution techniques applied to timber driing problems below the boiling point. Int. J. Num. Methods Eng. 38: 451 – 467, 1995.

- 6. Fortes, M.; Okos, M. R.: Heat and Mass transfer in hygroscopic capillary extruded products. <u>A.I. Ch.E. J</u>. 27 (2): 255 262, 1981.
- 7. Friedman, S. J. and Marshall, W. R.: Studies in Rotary Drying. Part 1. Holdup and Dusting, <u>Chem. Eng. Progr</u>. 45 (8): 482, 1949.
- Fulford, G,D.: A suvey of recent soviet research on the drying of solids. <u>Can. J Chem.</u> <u>Eng</u>. 47: 378 – 491, 1969.
- 9. Huang, C. L.: Multi Phase moisture transfer in porous media subjected to temperature gradient. Int. J. Heat Mass Transfer. 22: 295 307, 1979.
- Ilic, M.; Turner, I. W.: Convective drying of a consolidated slab of wet porous materials. <u>Int. J. Heat Mass Transfer</u>. 32 (12): 215 – 262, 1989.
- 11. Kallel, F.; ... et al: Effects of moisture on temperature during drying of consolidated porous materials. J. Heat Transfer, ASME Trans. 115: 724 733, 1993.

12. Kelly, J. J. and Donnell, P.: Residence Time Model for Rotary Drums. <u>Trans. Instn.</u> <u>Chem. Engrs.</u> . 55 (4): 243, 1977. 13. Kelly, J. J.: Analysis of Design and Operating Conditions for Rotary Dryers and Coolers. Part II. Introductory Análysis of Residence Time Relationships, <u>Tecnhol.</u> <u>Ireland</u>: 15, 1969.

 Luikov, A.V.: Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies. Pergamon Press, New York, 1966.

15. Matchett, A. J. and Baker, C. G. J.: Particle residence time in cascading rotary dryiers part 2 – Aplication of the two – stream model to experimental and industrial data, <u>J. Separ. Proc. Technol.</u>: 5 - 13, 1988.

16. Matchett, A. J. and Baker, C. G. J.: Particle residence times in cascading rotary dryers part 1- Derivation of the two – stream model. <u>J. Separ. Proc. Technol.</u>. 8: 11 – 17, 1987.

17. Matchett, A. J. and Sheikh, M. S.: An Improved Model of Particle Motion in Cascading Rotary Dryers. <u>Trans. Instn. Chem. Engrs.</u> . 68, Part A, March: 139 – 148, 1990.

 Miranda, J. L. y otros. Comparación y conjugación de métodos de determinación de humedad en la Industria del Níquel. <u>Revista Minería y Geología</u>. Moa. 13 (2): 42 – 47, 1996.

19. Mora, E.: Evaluación de los gases residuales en el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios. Trabajo de Diploma. ISMM Moa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 1999.

20. Papadakis, S. E.: Scale – up of cascading rotatory dryers. <u>Drying Technology</u>. 12: 259 – 279, 1994.

21. Peishi, C.; and Pei, D. C.: A mathematical model of drying processes. <u>Int. J. Heat</u> <u>Mass Transfer</u>. 32 (2): 297 – 310, 1989

22. Perrin, B.; Javelas, D. A.: Transferts couples de chaleur et de Masse Dans des Materiaux Consolides Utilises en Genie Civil. <u>Int. J. Heat Mass Transfer</u>. 30: 297 – 309, 1987

23. Piet, J. A.: The role of theoretical and mathematical modelling inscale – up. <u>Drying</u> <u>Technology</u>. 12: 1 – 46, 1994.

24. Plilip, J.; De Vries, D. A.: Moisture movement in porous materials under temperature gradients. <u>Trans. Am. Geophys. unión</u>. 18: 222 – 232, 1957.

25. Plumb, O, A.; Spolek, G. A.; Olmstead, B.A.: Heat and Mass trnsfer in Wood during drying. Int. J. Heat Mass Transfer. 28 (9): 169 – 178, 1985.

26. Saeman , W. C. and Mitchell, T. R.: Analysis of Rotary Dryer and Cooler Performance, <u>Chem. Eng. Progr.</u> 50 (9): 476, 1954.

27. Sanches, M. P. y otros: Simulación de secadores de bagazo del tipo tambor rotatorio. CDRom de las memorias del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana, 1997.

28. Schofield, F. R. and Glikin, P. G.: Rotary Dryers and Coolers for Granular Fertilizers, <u>Trans. Instn. Chem. Engrs.</u> 40: 183, 1962.