



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

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

**TÍTULO: Balance térmico y de masa para la
evaluación del proceso de secado en los hornos
rotatorios horizontales.**

Autor: Jorge Enrique García Peña

Profesor: Ms.C. Rodney Martínez Rojas

Dr.C. Ever Góngora Leyva

“Moa, 2016”
“Año 58 de la Revolución”



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Jorge Enrique García Peña**, autor de este trabajo de tesis en opción al título de ingeniero en Electromecánica y los tutores; declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y de la empresa productora de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

Autor: Jorge Enrique García Peña

Dr.C. Ever Góngora Leyva

Ms.C. Rodney Martínez Rojas



PENSAMIENTOS

El hombre que va adelante impulsa a los demás a que lo alcancen, atrae a los demás hacia su nivel mucho más que aquel que desde atrás empuja con la palabra solamente.

Ernesto Che Guevara.

“Quien de verdad sabe de qué habla, no encuentra razones para levantar la voz”

Leonardo Da Vinci

“Una teoría es tanto más grandiosa cuando mayor es la simplicidad de sus premisas, más diferentes los tipos de cosas que relaciona y más extenso es su rango de aplicabilidad; por ello, la Termodinámica Clásica me ha impresionado profundamente y estoy convencido de que es la única teoría física de contenido universal que, dentro del marco de aplicación de sus conceptos básicos, nunca será derrotada”

Albert Einstein



DEDICATORIA

*A mis padres:
Jorge Enrique García Hernández y Odalis Peña Casa*

A toda mi familia.



Agradecimientos

Antes de un pequeño resumen de los cinco años de mi carrera universitaria, los cuales he pasado en el ISMM de Moa y que son el resultado de todo lo que he podido vivir junto a tantas personas, que le doy las gracias de corazón a todas aquellas que me dieron ánimo para poder llegar a donde he llegado.

Agradecimientos especiales a:

En primer lugar a mis padres Jorge Enrique García Hernández y Odalis Peña Casa que supieron guiarme y educarme con mucha dedicación.

- ✓ *Mi tutor: Ms.C. Rodney Martínez Rojas y Dr.C. Ever Góngora Leyva por las ayudas prestadas en todo momento.*
- ✓ *A mi hermana Rita Maris García Peña y mis abuelos Bitalina Casa y Rafael Quiala, por haberme dado su apoyo en los momentos mas difíciles de mi vida.*
- ✓ *Todos mi tíos y tías principalmente Odelqui Quiala por su apoyo y alegría que despierta en mi.*
- ✓ *A mi novia Yeline Rigñack Rodríguez por su paciencia y dedicacion.*

En general a toda mi familia.

Agradezco a todos los técnicos de la planta de preparación de mineral de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” por su ayuda y su humildad principalmente Armando Barrabia Argüello.



RESUMEN

Los hornos rotatorios horizontales son muy utilizados en las industrias del níquel en Cuba, específicamente para el secado de materiales porosos, lo cuales están sometidos a trabajo intenso con alta variabilidad en sus parámetros de operación. En el presente trabajo investigativo se desarrolla la evaluación termo-energética del proceso de secado del mineral laterítico en los secadores #3 y #6 de los hornos rotatorios horizontales de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” para determinar la relaciones que hay entre las variables que intervienen en el proceso (temperatura, humedad, consumo de combustible y flujo de gases de la combustión) y cómo influyen en el rendimiento térmico.

Se hace además una actualización de las expresiones teóricas y empíricas relacionadas con los métodos de balances termo-energéticos, obtenidas a partir de las consultas realizadas en las bibliografías existentes.

Se determina el comportamiento del rendimiento térmico, el consumo de combustible y las pérdidas al ambiente a partir de mediciones y el análisis de los parámetros de operación. Finalmente, se analiza el impacto ambiental asociado al proceso de secado y se realiza una valoración económica que muestra un costo por consumo de combustible de 1648,55418 USD/h, en el período que se ha evaluado.



SUMMARY

The rotational horizontal ovens are very used in the Cuban nickel industries, specifically for the drying of porous materials, which are managed to intensive work with high variability in their operation parameters. The water heater-energy evaluation of the process of drying of the lateritic mineral in dryer number 3 y 6 of the horizontal rotational ovens in “Ernesto Ché Guevara” Enterprise is been developed to determine the relationships that are among the variables that interrupt in the process (temperature, humidity, fuel and flow consumption of the gases combustion) and how do they influence in the thermal yield.

It is also made an upgrade of the theoretical and empiric expressions related to the methods of water heater-energy balances, obtained starting from the consultations carried out in the existent bibliographies.

It is determined the thermal behavior, the fuel consumption of and the losses to the atmosphere starting from mensurations and the analysis of the operation parameters. Finally, it is analyzed the environmental impact associated to the drying process and it is carried out an economic valuation that shows a cost for fuel consumption of 1648,55418 USD/h, in the period that has been evaluated.



Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Marco teórico- metodológico de la investigación.....	5
1.1. Introducción.....	5
1.2. Estado del arte y trabajos precedentes.....	6
1.3. Principios técnicos del secado.....	10
1.4. Clasificación de las operaciones de secado.....	12
1.5. Partes fundamentales del secador.....	13
1.6. Procesos de transferencia de calor en secadores cilíndricos.....	17
1.7. Descripción del flujo tecnológico de la planta de preparación de mineral...18	
1.8. Sistema de limpieza de los gases de secaderos.....	22
1.9. Conclusiones del capítulo 1.....	23
Capítulo 2: Método de balance térmico y de masa para hornos rotatorios horizontales.....	24
2.1. Introducción.....	24
2.2. Adquisición de los valores de los parámetros de trabajo.....	24
2.3. Análisis del sistema de secado.....	26
2.4. Balance de energía.....	27
2.4.1. Balance de masa.....	39
2.5. Rendimiento de la instalación.....	40
2.5.1.Índice de consumo de combustible y productividad específica del secador..40	
2.6. Conclusiones del capítulo 2.....	41
CAPÍTULO 3: Resultados y análisis de la aplicación del método de balance térmico y de masa en el secado convencional del mineral laterítico.....	42
3.1. Introducción.....	42
3.2. Principales parámetros medidos en la instalación.....	42



3.3. Principales resultados del cálculo.	44
3.4. Análisis de las mediciones y los resultados del cálculo.....	45
3.4.1. Estadística descriptiva de las variables para el análisis del secadero.....	45
3.4.2. Rendimiento térmico.....	46
3.4.3. Consumo específico de combustible.....	47
3.4.4. Productividad específica.....	49
3.5. Pérdidas de energía por transferencia de calor.....	50
3.6. Valoración económica asociada el proceso de secado convencional.....	53
3.7. Principales problemas ambientales detectados en la planta.....	57
3.7.1. Influencia del polvo en el ambiente.....	58
3.7.2. Influencia del ruido en el ambiente.....	60
3.7.3. Medidas para la protección del ambiente durante el secado del mineral....	61
3.8. Conclusiones del capítulo 3.....	62
Conclusiones Generales.....	63
Recomendaciones.....	64
Bibliografía.....	65
Anexos.....	71

Introducción

En la actualidad supone un desafío encontrar soluciones efectivas y de largo alcance frente a la crisis mundial imperante. Cuba como país no está ajeno a tales dificultades, por lo que se ha propuesto alcanzar un desarrollo sostenible con tendencia al incremento de los índices productivos.

Como la producción del níquel ha sido uno de los ingresos más importantes del país, ha desempeñado un papel importante dentro del desarrollo económico nacional, donde se destacan la empresa productora de níquel y cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”, del municipio de Moa perteneciente al grupo Empresarial CUBANIQUEL.

Esta industria, respaldada por la existencia en la isla de importantes yacimientos de mineral laterítico, lucha por consolidar su eficiencia convirtiéndose en uno de los eslabones más importantes en la economía nacional y siendo competitiva al introducirse en el mercado internacional.

Hoy en día la industria cubana del Níquel se encuentra enfrascada en dos grandes cambios la modernización de su equipamiento, con el objetivo de disminuir los costos en la producción y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva y reconocida en el mercado internacional.

En la referida empresa se desarrollan complejos procesos que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas, entre ellos se encuentran en la planta de preparación de mineral el proceso de secado térmico en hornos rotatorios horizontales.

El proceso de secado, como se planteó anteriormente se realiza en los secadores cilíndricos de la planta de preparación de mineral cuya tecnología está basada en el esquema carbonato-amoniaco del mineral reducido, este es llamado proceso Carón y 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 mas conocidos como en los hornos de soleras múltiples, espesadores y

columnas de destilación. Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización.

Para contribuir a la realización entre los aspectos más importante que se ha planteado en la empresa, es en la función de disminuir el consumo de combustible que está relacionado con la eficiencia del proceso del secado en los hornos rotatorios.

A nivel mundial se han desarrollado varios estudios, que van desde el análisis termo-energético y la determinación de parámetros de trabajo y propiedades de las sustancias a secar hasta la modelación y simulación del proceso de secado en hornos rotatorios horizontales (Savaresi *et al.*, 2001; Sheehan *et al.*, 2005; Castaño, 2003; Assis *et al.*, 2005; Britton *et al.*, 2006; Lobato *et al.*, 2008; Castaño *et al.*, 2009; Fernandes *et al.*, 2009). En todos los casos se utilizan materiales con características termofísicas diferentes a las del mineral laterítico de la región.

En Cuba los secadores de la referida empresa han sido objeto de estudio de diversas investigaciones (Torres, 1999; Torres *et al.*, 2000; Bachir, 2001). Estos autores analizan el comportamiento del arrastre de partículas finas en los gases durante el secado del mineral laterítico en uno de los equipos en condiciones normales de operación y en otro, eliminaron los levantadores sectoriales en el último tercio del equipo y analizaron en ambos la influencia de los gases residuales provenientes de la planta hornos de reducción; luego obtienen la correlación entre la velocidad de los gases en el interior del cilindro, el contenido de humedad de los gases y el arrastre de partículas como variable de salida.

Posteriormente Torres *et al.* (2003) determinan la influencia que tienen la humedad de equilibrio, la constante de secado y el coeficiente de transferencia de masa, en el secado del mineral obteniendo la correlación y regresión de las variables antes mencionadas en función de la temperatura y el contenido de humedad de las menas.

Por su parte, Aldana *et al.* (2004) analizan los problemas que limitan la productividad de los secaderos en la empresa, demostrando que la limitante fundamental es el

aporte de calor y que se puede elevar la productividad a través del incremento del coeficiente de utilización de los secaderos.

Como se aprecia las investigaciones antes referenciadas abordan aspectos importantes del proceso de secado, pero no analizan la interrelación general que existe entre el rendimiento térmico, productividad específica e índice de consumo de combustible y los restantes parámetros; principalmente la humedad de entrada y el flujo de mineral húmedo; que definen el comportamiento termo-energético de los equipos, cuando estos últimos varían de forma sistemática.

Lo planteado anteriormente se puede argumentar con las siguientes **deficiencias**:

- La carencia de información de los principales parámetros que inciden en la eficiencia del proceso de secado en los hornos rotatorios.
- Las limitaciones de los procedimientos de cálculo existentes para el análisis termo-energético del proceso.
- El deterioro del aislante del cilindro rotatorio.

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

Las limitaciones de los métodos existentes para la evaluación termo-energético del proceso de secado del mineral laterítico en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” considerando la variabilidad de los principales parámetros de trabajo de los mismos.

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

Los secadores 3 y 6 de los hornos rotatorios horizontales de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Y su **campo de acción** es:

El proceso de secado térmico del mineral laterítico.

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

Mediante el método de balance térmico y de masa es posible establecer el comportamiento de los parámetros de eficiencia (rendimiento, índice de consumo de combustible, productividad específica) y su dependencia del contenido de humedad y

flujo de mineral húmedo en el proceso de secado convencional de mineral laterítico en hornos horizontales rotatorios en las condiciones actuales de explotación del secador 3 y 6 de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

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

Realizar el cálculo y evaluación termo-energético de los procesos de secado de mineral laterítico en los secadores 3 y 6 de los hornos horizontales rotatorios mediante el método de balance térmico y de masa.

Como **objetivos específicos** se establecen:

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

Para dar cumplimiento a los objetivos se desarrollan las siguientes **tareas del trabajo**:

3. Establecimiento del estado del arte relacionado con el proceso de secado en hornos rotatorios horizontales y los métodos de balance térmico y de masa existentes.
4. Proposición del método de balance térmico y de masa y sus particularidades en el secado del mineral laterítico en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
5. Identificación de los principales parámetros que influyen en los valores de eficiencia del proceso de secado del mineral laterítico y el sistema de medición empleado.
6. Valoración de los impactos económicos y ambientales del proceso en las condiciones de explotación de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Capítulo 1. Marco teórico- metodológico de la investigación.

1.1. Introducción

El proceso de secado de un material tiene como propósito, eliminar el agua presente en el mismo, para poder ser tratado posteriormente de acuerdo a los requerimientos tecnológicos, los cuales pueden ser realizados en varios equipos como estufas y hornos, donde se le aplica calor de forma directa a un recipiente que contenga dicho material.

Esta acción se realizará siempre que la superficie de la sustancia se considere húmeda, produciéndose un proceso de evaporación superficial, en que la velocidad de extracción de la humedad, llamada velocidad de secado, estará afectada por la transferencia de calor y de masa en la superficie del material.

La importancia de los procesos de secado se puede apreciar a través de los estudios realizados por Franzen *et al.* (1987) quienes estimaron que a nivel mundial se consumen cada año más de $2 \cdot 10^5$ MJ de energía en el secado de alimentos y, por otro lado, Strumillo *et al.* (1995) determinaron que 12 % del consumo mundial de energía a nivel industrial es destinado a los procesos de secado.

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

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 plantea como **objetivo** del capítulo establecer la actualización del estado del arte de los aspectos teóricos del secador 3 y 6 de los hornos rotatorios horizontales

de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Permitiendo establecer un método de cálculo y evaluación termo-energética de estos sistema.

1.2. Estado del arte y trabajos precedentes

El secado es uno de los procesos más antiguos conocidos por el hombre, los primeros intentos realizados y los mecanismos que intervienen en el mismo datan de la primera década del siglo XX, su aplicación aparece en muchos de las manipulaciones a las que es sometido un producto a lo largo de sus fases de elaboración. Son muchos los campos donde se hace necesario este proceso y existen varias razones para disminuir la humedad de un producto, (Castaño *et al.*, 2009).

Este proceso, 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.

El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad que se puede absorber depende, considerablemente de su temperatura, aunque también puede existir la absorción de agua a temperatura constante (Faires, 1991; Fernández, 1994). A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decrece y por tanto, la absorción de la humedad es mayor.

Según Luikov (1966), la transferencia de humedad en un material poroso es el resultado del gradiente de contenido de humedad, temperatura y presión. Por otro lado Fulford (1969), proporciona modelos de la literatura rusa para describir el comportamiento en cuanto a la cinética de secado y la humedad de equilibrio, aspectos esenciales en este importante proceso.

Otros autores como Papadakis *et al.* (1994) que para estimar el coeficiente de transferencia de calor pelicular usaron las relaciones propuestas por Langrish *et al.* (1988), pero realizan gran cantidad de experimentos para eliminar las debilidades del método. Thorpe, G.R. (1972), en su tesis doctoral dividió el cilindro

del secadero en etapas y aplicó las ecuaciones de balance de masas y energía a cada una de esas etapas.

En la literatura escrita por Chang; *et. al.* (1997) se plantea la aplicación de la teoría de los procesos: tecnológicos, aerodinámico, mecánico, transmisión de calor y energético en los cálculos y proyecto de los hornos metalúrgicos, incluyendo sus instalaciones auxiliares.

Por otra parte, Novoa *et al.* (1995), obtuvo ecuaciones empíricas que describen el comportamiento de la cinética del secado de zeolita a escala de laboratorio, siguiendo el modelo propuesto por Hall (1983), y establece valores de humedad de equilibrio para diferentes temperaturas y humedad inicial; finalmente con los resultados alcanzados realizó un software para simular el proceso y predecir su comportamiento bajo determinadas condiciones de operación.

En trabajos realizados por Mora, (1999) y Castillo, (2007) se logran índices de consumo energéticos a partir de balances térmicos y de masa en secaderos de mineral, evaluándose con ello, la incidencia de la humedad en el consumo de combustible y el comportamiento de los diferentes parámetros al aumentar el flujo de mineral húmedo a la entrada del secadero.

Para Muregesan (1996), el intercambio de calor y masa depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a las externas. Independientemente del mecanismo de transmisión de calor, este tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta, al interior del sólido.

Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, el calor generado se conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior (Treybal, 1985; Perry, 1997; Menon *et al.*, 1992).

Por otro lado, Durán (2015), tomado de (Kern, 1969; Isachenko *et al.* 1979) considera que en el secado por convección, el sólido húmedo se pone en contacto con un gas caliente, el líquido de su superficie se vaporiza y difunde en el gas. En este caso, el agente de secado cumple dos funciones: suministrar calor al material húmedo y transportar el vapor de agua desprendido.

Aunque los primeros trabajos en los que se obtuvo un modelo matemático de un secadero rotatorio, corresponden a Myklestad (1963), quien desarrolló el modelo estático de un secadero a contracorriente. Sharples, *et al.* (1964), estableció un modelo con cuatro ecuaciones diferenciales que describen los procesos de diferencia de masa y energía. Reay (1979), propuso un modelo para el sólido y otro para la instalación, de forma independiente. Baker (1988), abordó los modelos de transferencia de calor y masa para secadores rotatorios en cascada.

Douglas *et al.* (1992), propuso un modelo que divide el cilindro en varias secciones, asumiendo un grupo de parámetros fijos para cada sección, a la que impone ecuaciones de equilibrio.

Por su parte, Fitt (1996), es del criterio de que muchos modelos matemáticos de procesos industriales pueden ser descritos como sistemas ($n \times n$) de leyes de conservación en términos de (n) variables independientes. Como resultado muestra un simulador de secaderos rotatorios con cuatro submodelos: modelo de combustión, modelo de transporte, modelo del gas y modelo del sólido. En este sentido, se encontraron trabajos de Duchense *et al.*, (1997). Fulford (1969) y Boizán (1991), proporcionan varios modelos matemáticos tomados de la literatura rusa para describir la cinética del secado.

Philip *et al.* (1957), estudió las fuerzas capilares que causan el transporte del líquido, en términos de gradientes del contenido de humedad y temperatura resultantes en una ecuación de difusión.

A la caracterización y actualización del potencial de secado en el país, a partir del conocimiento y clasificación de los diferentes tipos de secadores, se dedican algunos trabajos (Bérriz, 2002; 2003), en ellos el autor proporciona con precisión los datos necesarios para el diseño, evaluación y selección de prototipos de secadores, tanto a escala experimental como industrial.

Se puede destacar la propuesta para la implementación de un secador de granos tipo tambor (Torres *et al.*, 2001) por el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES) en la ciudad de Santiago de Cuba, que establece una alternativa del



secado solar para la disminución del tiempo de secado y la protección del producto de las condiciones climatológicas.

De acuerdo con los análisis realizados al proceso de secado solar, la experiencia acumulada por los obreros de la planta de preparación de mineral y los trabajos precedentes (Santos, 2005; Romero, 2006; Ramírez, 2006), se puede afirmar que la humedad final del mineral laterítico depende fundamentalmente de los siguientes parámetros:

- ✓ Humedad inicial del mineral
- ✓ Precipitaciones
- ✓ Temperatura del medio ambiente
- ✓ Masa de mineral a secar
- ✓ Humedad relativa
- ✓ Propiedades físicas del mineral
- ✓ Intensidad de la radiación solar
- ✓ Superficie de contacto
- ✓ Velocidad y dirección del viento
- ✓ Superficie horizontal disponible
- ✓ Temperatura del punto de rocío
- ✓ Tiempo de secado

El trabajo investigativo realizado por Domínguez (2011), es el estudio más integrador desde el punto de vista de balances térmicos y de masa en secadores en Cuba, este trabajo tiene relación con el secado de carbón antracita en este tipo de equipos. El autor analiza las diferentes corrientes energéticas que se generan en el proceso y estima el índice de consumo de combustible y los principales parámetros que influyen en él.

Por otra parte Tamayo (2011), A través de un procedimiento de balance térmico y de masa, estableció el consumo de combustible, rendimiento térmico y determinando las mayores pérdidas de calor al ambiente en la instalación de secado de Carbón Antracita en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro.

El trabajo investigativo realizado por Delgado (2013), emplea un método de balance térmico y de masa que relaciona los parámetros de eficiencia (rendimiento térmico, consumo específico de combustible y productividad específica del secador) en función de las variables más influyentes del proceso (flujo de mineral húmedo, humedad de entrada) en los hornos giratorios de la empresa del níquel Comandante Ernesto Che Guevara.

Por parte Zalazar (2015), propone un método para la activación del carbón vegetal en los hornos cilíndricos horizontales rotatorios, mediante los procesos de transferencia de calor y masa. Además propuso un modelo matemático formado por un sistema de ecuaciones diferenciales, obtenidas a partir del balance de masa y energía para predecir el comportamiento del flujo y la temperatura en el interior del horno para la activación del carbón vegetal.

1.3. Principios técnicos del secado

Por su importancia y esencia física, el proceso de secado es complicado, su velocidad se define por la velocidad de difusión de la humedad desde el interior del material a secar, hacia el medio ambiente. La deshidratación por secado se reduce a la transferencia de calor y de sustancia (humedad) desde dentro del material a la superficie y su transporte, desde la misma al medio ambiente. Así, el secado es la combinación de los procesos de intercambio de calor y transferencia de masa vinculados uno con el otro.

El proceso de secado, no es solamente un proceso termo-físico, sino que tiene características tecnológicas, en el que juega un papel principal la forma en que se encuentra la humedad en el material, lo que es fundamental en la determinación de cómo ocurre el proceso de secado.

Hay que tener en cuenta que es un proceso tecnológico en el cual las características estructurales, tecnológicas, bioquímicas de los materiales, poseen una importancia primordial, por eso la teoría de secado no es solamente la evaporación de la humedad contenida en el sólido, sino el estudio de las formas de enlace que posee la humedad en los materiales.

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

El tramo AB corresponde al periodo de calentamiento. En esta la temperatura del material se eleva hasta la temperatura de bulbo húmedo y su humedad descende. 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.

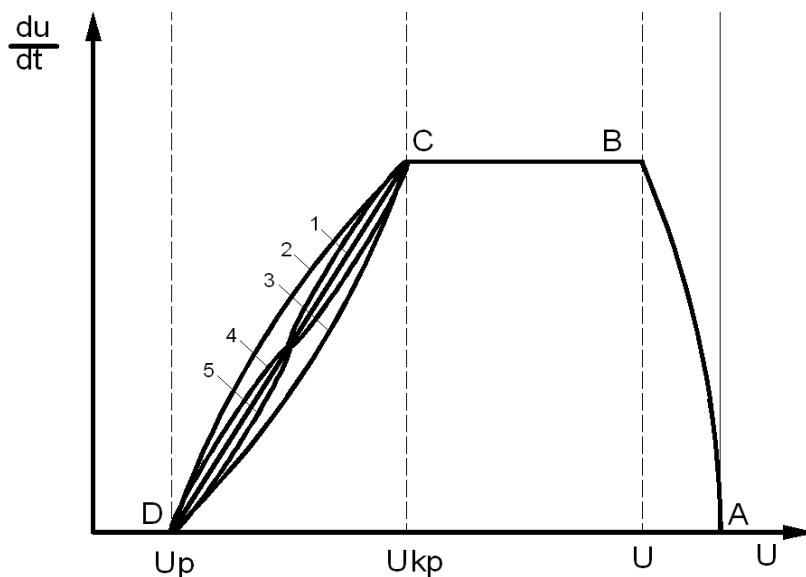


Figura 1.1. Curva de velocidad de secado (Fuente: Boizán, 1991).

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. 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.

El proceso de secado está destinado a eliminar el exceso de humedad para poder ser tratado posteriormente de acuerdo a los requerimientos tecnológicos. En este caso el secado se efectúa en hornos rotatorios con cámara de combustión independiente. Por consiguiente, se reconoce que para el adecuado funcionamiento de los medios disponibles en el proceso de secado de materiales, sea imprescindible el conocimiento de las distintas operaciones de secado.

1.4. Clasificación de las operaciones de secado

Las operaciones de secado se pueden clasificar en discontinuas y continuas. Se aplican estos términos específicamente desde el punto de vista de la sustancia a secar. La operación secado discontinuo en la práctica se refiere generalmente a un proceso semicontinuo, en el que se expone una cierta cantidad de sustancia a secar a una corriente de aire que fluye continuamente, en la que se evapora la humedad.

En las operaciones continuas pasan continuamente a través del equipo, tanto la sustancia a secar, como el agente secador. Generalmente, no se emplean los típicos métodos en etapas, implicando todas las operaciones un contacto continuo del gas y de la sustancia a secar.

Los equipos utilizados para el secado se pueden clasificar de acuerdo con cualquiera de las siguientes categorías:

- ✓ Método de operación, o sea, discontinuo o continuo: Los equipos discontinuos o semicontinuos, se operan en forma intermitente o cíclica bajo condiciones de estacionario: se carga el secadero con la sustancia, la que permanece en el equipo hasta que se seca, momento en el que se vacía el equipo y se carga con nuevo material.
- ✓ Método de proporcionar el calor necesario para la evaporación de la humedad: en secadores directos, se suministra el calor completamente por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el que tiene lugar la evaporación. En secadores indirectos, se suministra el calor en forma independiente del gas para arrastrar la humedad que se evapora.

- ✓ Naturaleza de la sustancia a secar: puede ser la sustancia un sólido rígido tal como la madera, un material flexible como la tela o papel, un sólido granular tal como una masa de cristal, una pasta espesa o delgada, o una solución. Es probable que las características físico – químicas de las sustancias y los distintos métodos de manipulación empleados, ejerzan la influencia más grande en la selección del tipo de secador a utilizar.

Tamayo (2004), hace una clasificación de los procedimientos de suministro del calor hacia el material a secar, quedando de la siguiente forma:

- ✓ Secado por convección: Contacto directo del material con el agente secador, en calidad de la cual ordinariamente se emplea aire calentado o gases de combustión (como regla mezclados con aire).
- ✓ Secado por contacto: Transmisión del calor desde el calor portador hacia el material a través de una pared que los separa.
- ✓ Secado por radiación: Transmisión del calor por rayos infrarrojos.
- ✓ Secado dieléctrico: Calentamiento mediante un campo de corriente eléctrica de alta frecuencia.
- ✓ Secado por sublimación: Secado en estado de congelación al vacío profundo, según el método de transmisión del calor, este procedimiento es análogo al secado por contacto, pero debido a sus peculiaridades, el secado por sublimación se destaca como un grupo especial.

1.5. Partes fundamentales del secador

Para hacer viable económicamente el tratamiento de secado de algunos sólidos, es necesario trabajar en proceso continuo y alcanzar grandes flujos de evaporación.

En los secaderos rotatorios, esto se consigue mediante tres actuaciones combinadas: la primera se basa en incrementar la temperatura (aportando energía al proceso con gas de combustión); la segunda consiste en renovar el gas en contacto con el sólido mediante una corriente forzada del gas caliente; y la tercera, favorecer el contacto sólido-gas mediante el volteo del material.

Teniendo presente lo anterior, en una instalación industrial de secado de sólido mediante cilindro rotatorio, se pueden distinguir tres partes fundamentales: zona de combustión, el cilindro y la zona de salida.

Zona de combustión

Tiene como fin generar el calor suficiente para elevar la temperatura de la corriente de gas que se usará en el proceso. La temperatura elevada se consigue quemando combustible en una cámara de combustión.

Existen distintos tipos de cámaras en función del combustible utilizado, una de las más extendidas es la que usa combustible en estado gaseoso (gas natural u otro), estas reciben el nombre de quemadores, los cuales presentan ventajas, entre las que se pueden citar:

- ✓ La posibilidad de realizar un control preciso de la temperatura y flujos generados al disponer de electroválvulas para dosificar el gas aportado.
- ✓ Presentan respuestas rápidas, no sólo en las operaciones de funcionamiento, sino también en las maniobras de arranque y parada.
- ✓ Ocupan poco espacio.

Cilindro

En el cilindro es donde se produce el proceso de secado. En esta zona circula el material húmedo, así como el gas caliente procedente de la zona de combustión. El material húmedo se introduce por el extremo del cilindro y avanza por él debido a la rotación, saliendo seco por el otro extremo.

Además, este elemento es el responsable de mover y voltear el material dentro de la corriente gaseosa, lo que facilita el contacto sólido-gas, y permite un proceso de evaporación más eficiente.

El tambor secador posee un sistema motriz, acoplado al cuerpo de éste, 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 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, soldados al cuerpo del tambor, que se encargan 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 seis partes, lo que favorece el proceso de secado al:

- ✓ Permitir que la carga alimentada al tambor sea repartida uniformemente en el interior del mismo.
- ✓ Evitar 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.
- ✓ Posibilitar un mayor contacto entre los gases calientes, el mineral y una mayor evaporación de la humedad que trae el mineral.
- ✓ Permitir 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.

Zona de salida

En esta zona es donde se recoge el sólido seco por una parte, y por otra, se expulsa gas húmedo. A la salida del cilindro, el material sólido se puede recoger en una cinta transportadora y los gases pasan a unos ciclones que eliminan el polvo que pudiera llegar en suspensión. Por último, en la chimenea de salida existe un ventilador que es el principal responsable de generar la corriente de gas que atraviesa el cilindro (Castaño *et al.*, 2009).

Estructura interna de los secaderos.

En el interior del cilindro se colocan elementos encargados de suspender el material 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.

Equipos interiores

La magnitud del intercambio de calor y de masa en un tambor de secado o enfriamiento depende en gran manera de la elección del equipo interior. Se adaptará uno u otro tipo de entramado, según la reología del producto (que suele variar a lo largo del proceso térmico), de modo que se consiga un reparto de producto sobre la sección del tambor lo más homogéneo posible y, a la vez, un grado de llenado máximo.

Se tenderá a dar preferencia a aquellos sistemas, que ofrezcan un óptimo de superficies de intercambio entre gas y producto, sin que por ello se incurra en peligro de taponamientos o aglomeraciones.

Palas en hélice de introducción: garantizan la introducción y reparto del producto sobre la sección del tambor y evitan efectos de retención en la alimentación. Bandejas periféricas: equipo de elevación que provoca una densa cortina de producto en caída a través del seno del gas de secado, generando en la zona altas de temperaturas una evaporación repentina con brusca caída de temperatura de gases.

Bandejas en cruz: es el entramado más denso de todos los posibles equipos interiores. Ofrece la máxima superficie activa, tanto para el intercambio de calor convectivo entre gas y producto, como también entre bandeja caliente y producto, debido al incesante cambio de las capas en contacto.

1.6. Procesos de transferencia de calor en secadores cilíndricos

Los procesos de transferencia de calor en un horno rotatorio (o secadores), son únicos comparados con otros hornos, porque en él no solo se involucra el gas y la cama superior del sólido, sino también la pared del horno que está en movimiento (girando). El calor suministrado al material para secar, se transfiere por dos vías: por la superficie expuesta de sólido (el flujo de los gases) y la superficie que está en contacto con la pared del horno. En la Figura 1.2 se muestran los procesos de transferencia de calor en un horno rotatorio horizontal.

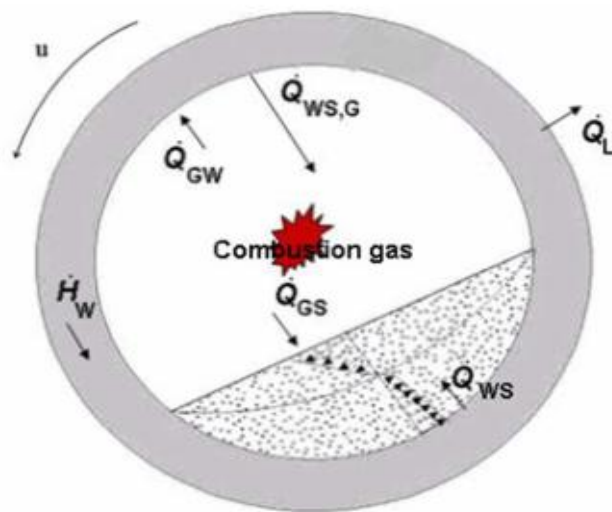


Figura 1.2. Corte trasversal de un secador. (Fuente: Durán; 2015).

Los mecanismos del traslado de calor a las dos superficies del sólido, ocurren de la siguiente manera:

- ✓ La superficie de la cama sólida expuesta recibe el calor directamente por la radiación y convección de los gases producto de la combustión (Q_{GS}) y por conducción de la pared a la superficie que está en contacto con ella (Q_{WS}).
- ✓ Este último intercambio de calor es parte del traslado de calor regenerador de la pared del horno. Durante la rotación, la pared recibe la energía térmica por la radiación y la convección del gas de la combustión caliente (Q_{GW}). Una parte de esta energía se guarda en la pared del horno y se transfiere al sólido (H_W).

Debido a los rangos de temperatura que se obtienen del gas, se considera que la radiación es el traslado de calor dominante (Gorog 1998). La otra parte del calor que se irradia a la pared, se refleja exclusivamente tras la cama sólida (Q_{ws-G}). Por otro lado, parte de la energía suministrada se trasfiere por conducción de la pared interior al exterior y trasferida al medio por convección y radiación (Q_L), estas se pueden considerar como pérdidas, porque son indeseadas en el proceso.

1.7. Descripción del flujo tecnológico de la planta de preparación de mineral

En la planta de preparación de mineral es donde se inicia el proceso de preparación del material de la fábrica, según la tecnología carbonato amoniaco. El mineral procedente de la planta de trituración primaria puede ser suministrado por dos vías:

- a) A través de grúas gantry.
- b) Directamente por los transportadores de enlace

Una vez descargado en galería, es remontado y alimentado por las grúas gantry (215-GR-5, A, B, C). Estas remontan el mineral y lo homogenizan en el depósito exterior que posee una capacidad de 360 000 toneladas húmedas, o 28 días de trabajo de la planta. Estas grúas poseen dos capacidades de trabajo que son: 660 t/h al remontar y 690 t/h al alimentar a las correas.

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

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

Los transportadores 5 y 5A, 6 y 6A alimentan a los transportadores 215 TR-7 y 7A, los que se encargan de llevar el mineral homogeneizado hasta el edificio de los

secaderos. La capacidad de estas correas es de 750 t/h y todo su contenido lo vierten sobre los transportadores 215-TR8 y 8A que tienen como función la de alimentar a los secaderos y al depósito de mineral interior o de emergencia.

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

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

Este depósito posee para la manipulación del material, 2 grúas de puente 215-GRL 101 A y B de capacidad igual a 350 t/h cada una. El mineral llegará a los secaderos 215-SC-101-107 pasando a través de alimentadores de esteras 215-AL-101--107 de capacidad variable y los transportadores de bandas 215-TR-9-1... 9-7 de capacidades igual a 125 t/h cada uno.

El tambor secador posee una longitud igual a 4 800 mm y un diámetro de 4 500 mm. El mineral, al entrar al secadero, lo hará con una humedad aproximadamente igual a 38 % y saldrá del mismo con 4,5 %, según está establecido.

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

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

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

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

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

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

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

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

Sobre esta correa se encuentra montado un sistema de adición de petróleo aditivo en forma de ducha, que se mezclará conjuntamente con el mineral de forma

dosificada mediante un sistema automático que regulará la relación petróleo – mineral, instalada en la misma área, siendo utilizado como agente reductor en la planta de hornos de reducción.

Desde cada tolva, el mineral llegará a los molinos en forma dosificada y este trabajo corresponde hacerlo a los alimentadores de disco 215 AL 201 A y B 215 AL 204 A y B, que posee cada tolva y que pueden entregar 55-120 t/h a las correas 215-TR -13-1...13-4, las que descargan el mineral en el molino de bolas 215 ML-201... 204, la capacidad de esta correa es de 160 t/h. De esta forma el mineral llega al molino de bolas, cuya capacidad es de 120 t/h y tiene como dimensiones 5 700 mm de longitud y 3 200 mm de diámetro. Estos molinos son de forma cilíndrica y para su proceso de molienda fina poseen una carga de bolas, cuyo peso es de 54 toneladas, siendo sus dimensiones (de las bolas.):

100 mm - 10 % 5,5 toneladas (5 500 kg)

70 mm - 10 % 5,5 toneladas (5 500 kg)

60 mm - 15 % 8,0 toneladas (8 000 kg)

40 mm - 25 % 13,5 toneladas (13 500 kg)

32 mm - 40 % 21,5 toneladas (21 500 kg)

54 toneladas (54 000 kg)

El producto que el molino debe entregar tendrá una humedad de 4,5 - 5,5 % y una granulometría de 85 - 87 % de - 0,074 mm. Todo lo que entra al molino saldrá del mismo mediante barrido con aire, que es producido por un ventilador de recirculación 215-VE-205.208 de 134 000 m^3/h de capacidad, situado a la descarga del molino y cerrando un circuito que está formado por el molino, 1 separador 215 - SE-201... 204, 4 ciclones 215-CN-201... 104 A ,B, C ,D y 2 baterías de 6 ciclones 215-CN-205.210 A, B, C, D, E, F.

Con este ventilador se barre el mineral molido y se succiona, este doble efecto propicia la obtención del mineral molido. El mineral barrido y succionado es introducido en un separador neumático de diámetro 4 250 mm donde sufre una

clasificación de forma, el que tenga características de producto final pasará al sistema de colección primaria (a los ciclones) y el que no posea estas características, transitará al molino (constituyendo el rechazo) para su ulterior tratamiento hasta que alcance la granulometría adecuada.

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

El sistema de colección primaria formada por ciclones, se encarga de recoger el polvo producido y lo descarga en las tolvas de producto final 215-TV-205 A y B.

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

El mineral seco con granulometría gruesa (+10 mm), es llevado desde la correa 215 TR11A hasta la 215-TR12A, que es la vía de unión entre los secaderos y la zaranda de control 215-ZA-301.

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

1.8. Sistema de limpieza de los gases de secaderos.

El polvo que es barrido por los gases del interior de cada secadero es introducido en un sistema de colección de polvo formado por dos baterías de 4 ciclones cada

una 215-CN-101- 107 A, B, C, D, de eficiencia 73% y diámetro 1800 mm y por un electrofiltro de 4 polos 215 EF 101 - 107 que trabaja con una tensión de 75 000 - 80000 volts y eficiencia 99,6 %.

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

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

Los gases una vez limpios de polvo, son enviados a la atmósfera debido a la succión que crea un ventilador (215-VE-108-114) colocado al final de cada filtro eléctrico atravesando una chimenea (215-CH-101) de 120 m de altura. La capacidad del ventilador es 279 000 - 249 000 m^3/h . La concentración de polvo que debe salir a la atmósfera debe ser de 200 mg/m^3 .

1.9. Conclusiones del capítulo 1.

- ✓ Quedó actualizado el estado del arte de los aspectos teóricos del secador 3 y 6 de los hornos rotatorios horizontales de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Ya que en ellas se abordan, la modelación matemática y como aspecto a destacar el análisis termodinámico del proceso para materiales con características diferentes del mineral laterítico.
- ✓ Se desarrollaron diversas investigaciones del proceso de secado del mineral laterítico, pero aún es insuficiente el número de trabajos que se destinan al estudio y la integración de los principales parámetros de funcionamiento en los secaderos en las condiciones de explotación actuales de las empresas cubanas productoras de níquel.

Capítulo 2: Método de balance térmico y de masa para hornos rotatorios horizontales.

2.1. Introducción.

En el secado convencional tienen lugar varios fenómenos de intercambio de calor y masa que rigen su comportamiento termoenergético. Los métodos de cálculos teóricos de este proceso son fundamentales para describir el comportamiento del mismo. Sin embargo, en la actualidad se requiere del análisis multicriterial de los secadores de la empresa productora del níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”; aspecto que ha sido poco valorado en los trabajos precedentes consultados.

En tal sentido el **objetivo** del presente capítulo es establecer la metodología para la evaluación del balance térmico y de masa del proceso de secado del mineral laterítico en hornos rotatorios horizontales.

2.2. Adquisición de los valores de los parámetros de trabajo.

Para la toma de los valores de los parámetros que indican el funcionamiento de la instalación de secado se emplearon los medios que se encuentran en el panel de control de la planta de preparación del mineral.

La empresa cuenta con un sistema de adquisición de datos denominado CITECT que permite visualizar, graficar y controlar los parámetros que son de interés para el proceso metalúrgico, en la Figura 2.1 se muestra una imagen con algunas de las principales variables que son registradas por el sistema.

Para desarrollar el balance termoenergético de los secadores de mineral laterítico es necesario el conocimiento y la medición de las principales variables (anexo 2) que intervienen en el proceso, algunas de ellas son:

- ✓ Flujo de combustible en la entrada de la cámara de combustión; F_c [kg/s].
- ✓ Flujo de mineral húmedo alimentado al secador; F_{mh} [kg/s].
- ✓ Flujo de aire para la combustión; F_{ac} [m^3/s].

- ✓ Contenido de humedad del mineral a la entrada y salida; W_e y W_s [%].
- ✓ Tiempo trabajado por cada secador; H_t [h].
- ✓ Temperatura del aire ambiente; T_0 [K].
- ✓ Temperatura de entrada del combustible; T_c [K].
- ✓ Flujo de gases provenientes de la planta de hornos; F_{gh} [m^3/s].
- ✓ Flujo de mineral seco que sale del secador; F_{cs} [kg/s].
- ✓ Temperatura de los gases a la salida del secadero; T_{gc} [K].
- ✓ Temperatura del mineral seco; T_{cs} [K].
- ✓ Temperatura en la superficie exterior del secadero; T_{sec} [K].

Las propiedades termofísicas de las diferentes sustancias de trabajo (aire, gases y mineral laterítico) se seleccionaron de acuerdo con las recomendaciones expuestas en la literatura consultada (Perry, 1985; Faires, 1991; Mijeeva y Mijeev, 1991; Page et al., 1998; Incropera y De Witt, 1999, 2003).

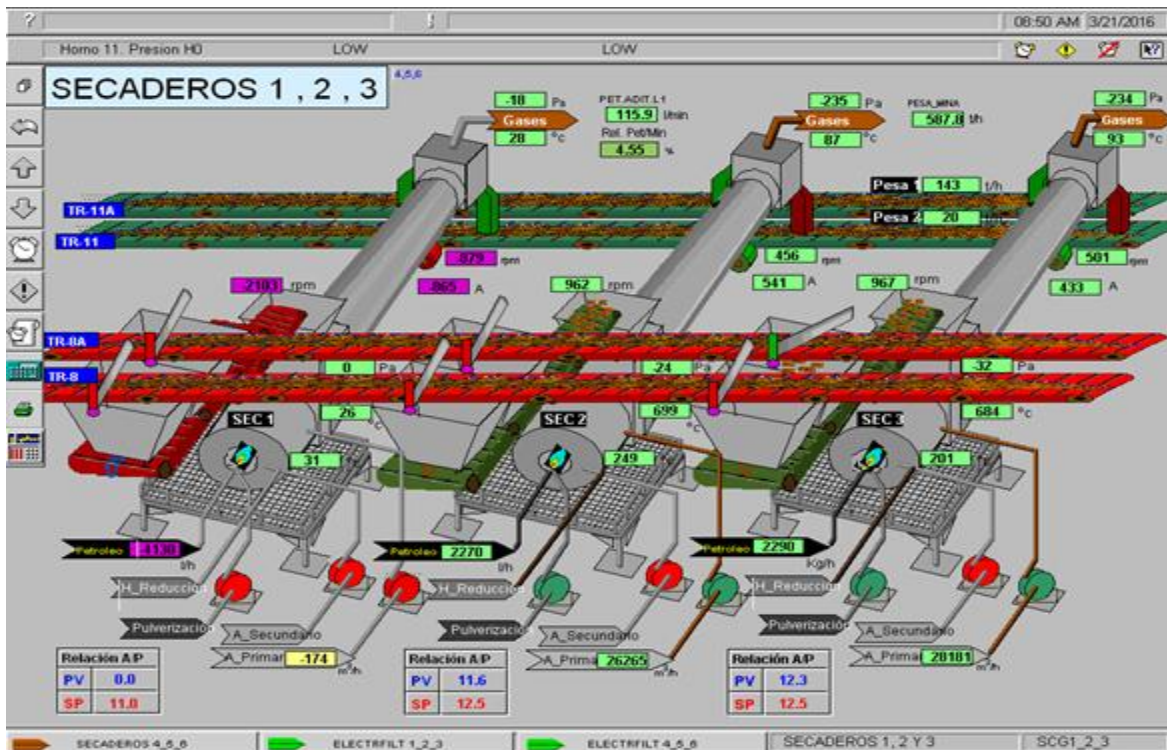


Figura 2.1. Sección del sistema de adquisición de datos registrados por el CITECT.

2.3. Análisis del sistema de secado.

El sistema del secador #3 y #6 de los hornos rotatorios horizontales de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” al cual se le realizará un balance de masa y energía, que incluye las pérdidas de calor al ambiente, está constituido por la cámara de combustión (1), cámara de paso (2), tambor secador (3) y evacuación de los gases (ventilador de tiro inducido) (4), según se muestra en la figura 2.2.

Al sistema entra el combustible precalentado más aire para la combustión, incluyendo el de pulverización, este flujo es suministrado a la cámara a temperatura ambiente, también entra aire para la dilución que no es más que una mezcla de gases provenientes de hornos de reducción y aire secundario, estos gases son trasladado a la cámara de paso a través de aberturas que posee la cámara que en ella también se suministra el mineral a tratar.

Luego los gases pasan al secador donde extraen parte del agua (humedad) del mineral. Después son extraídos del sistema con ayuda del ventilador de tiro inducido y enviados al medioambiente.

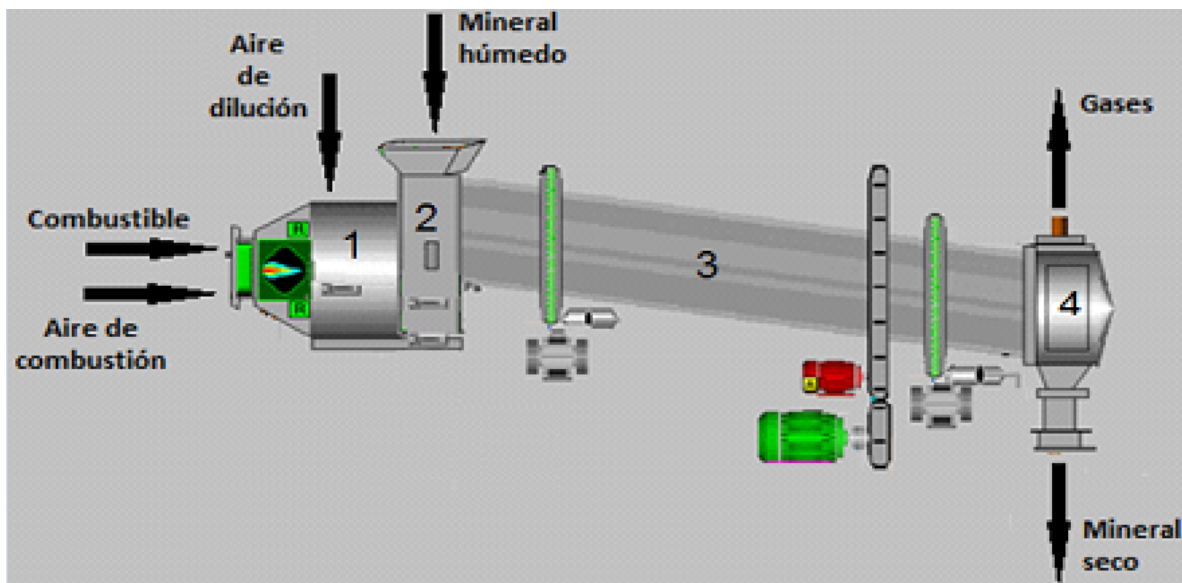


Figura 2.2. Esquema del sistema de secado de mineral.

La representación de la instalación indica que la dirección del flujo de gases y el mineral van en la misma dirección, definiendo que el proceso de secado se realiza en isocorriente.

2.4. Balance de energía.

El balance de masa y energía de un proceso industrial se hace con el objetivo de realizar una contabilidad 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.

La ecuación 2.1 establece el balance de energía para los secadores 3 y 6 de los hornos rotatorios horizontales de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, y tiene en cuenta todos calores que entran y salen del sistema.

$$Q_c + Q_{ic} + Q_a + Q_p + Q_{ap} + Q_h + Q_{ch} = Q_{gs} + Q_{cs} + Q_{pt} \quad (2.1)$$

Donde:

Q_c : Calor aportado por el combustible; W

Q_{ic} : Calor inferior del combustible; W

Q_a : Calor sensible aportado por el aire de combustión o primario; W

Q_p : Calor sensible aportado por el aire de pulverización; W

Q_{ap} : Calor aportado por el aire filtrado; W

Q_h : Calor aportado por los gases de horno de reducción; W

Q_{ch} : Calor aportado por el mineral húmedo; W

Q_{gs} : Calor de los gases a la salida del secador; W

Q_{cs} : Calor del mineral seco; W

Q_{pt} : Calor total por pérdidas; W

Calor de reacción aportado por el combustible.

El combustible (Fuel-Oil) aporta además de su calor de reacción aporta su calor sensible, entra a una temperatura superior a los 100 °C producto del precalentamiento. Las principales características del combustible utilizado se recogen el anexo 1.

$$Q_c = Q_{fc} = F_c \cdot \Delta H_1 + F_c \cdot VCI \quad (2.2)$$

Donde:

F_c : Flujo de combustible; kg/s

VCI : Valor calórico inferior del combustible; kJ/kg

$\Delta H_1 = \Delta H_x$: Variación de entalpía; kJ/kg

$$\Delta H_x = \int_{T_1}^{T_f} C_p \cdot dT \quad (2.3)$$

Siendo:

$$C_{pc} = \frac{0,383 + 0,00045 \cdot T_0}{g_e} \quad (\text{Perry, 1985}) \quad (2.4)$$

Donde:

C_p : Calor específico del combustible; $kJ/kg \cdot K$

T_f y T_i : Temperaturas final e inicial del proceso del precalentamiento; K

g_e : Gravedad específica; kg/m^3

T_0 : Temperatura de combustible; K

Calor inferior del combustible.

El combustible (Fuel-Oil) aporta además su calor inferior respecto a la combustión. Se define mediante la ecuación 2.5.

$$Q_{ic} = [(339 \cdot C_t + 1030 \cdot H_t - 109 \cdot (O_t \cdot S_t) - 24W_t) - 24 \cdot \frac{100J}{kg}] \cdot F_c \quad (2.5)$$

Donde:

C_t : Carbón fijo; %

H_t : Hidrogeno; %

O_t : Oxigeno; %

W_t : Bagazo; %

F_c : Flujo de combustible; $\frac{kg}{s}$

Determinación de los calores Qch, Qa, Qp y Qap.

Las temperaturas de cada una de estas corrientes se igualan la temperatura ambiental. Se puede determinar mediante la ecuación 2.6:

$$Q_{ch} = Q_a = Q_p = Q_{ap} = C_{px} \cdot F_x \cdot T_0 \quad (2.6)$$

Donde:

C_{px} : Capacidad calorífica; J/kg · K

F_x : Flujo de másico; kg/s

T_0 : Temperatura ambiente; K

El índice indica el parámetro de cada calor que se va a calcular el flujo de cada componente.

Calor sensible de los gases de salida del secador más calor sensible y latente del agua evaporada.

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

$$Q_{gs} = Q_{va} + Q_g \quad (2.7)$$

Donde:

Q_{va} : Calor aportado por el vapor de agua eliminado del mineral; W

Q_g : Calor aportado por los gases excluyendo el agua evaporada; W

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

$$Q_g = T_g \cdot C_{pg} \cdot F_g \quad (2.8)$$

Donde:

T_g : Temperatura de los gases a la salida del secador; K

$$C_{pg} = C_{pO_2} + C_{pCO_2} + C_{pCO} + C_{pN_2} + C_{pH_2O}$$

El calor específico de los gases de salida es la suma de todos los calores de los componentes de la combustión.

$$F_g = F_{ap} + F_c + F_h + F_{va}$$

Donde:

F_{ap} : Flujo de aire filtrado con el mineral; kg/s

F_c : Flujo de los gases de combustión; kg/s

F_h : Flujo de los gases de horno; kg/s

F_{va} : Flujo de agua evaporada; kg/s

Calor aportado por el vapor de agua durante la reducción del porcentaje del agua en el mineral laterítico.

$$Q_{va} = F_{va} \cdot (C_{va} \cdot T_{va} + \tau_{va}) \quad (2.9)$$

Siendo:

$$F_{va} = F_{ch} \cdot (W_{ce} - W_{cs}) \quad (2.10)$$

Donde:

F_{va} : Flujo de vapor de agua; kg/s

F_{ch} : Flujo de mineral húmedo alimentado al secadero; kg/s

W_{ce} : Contenido de humedad de entrada del mineral; %

W_{cs} : Contenido de humedad de salida del mineral; %

C_{va} : Calor específico del vapor de agua; kJ/(kg · K) (Iglesias ,1990)

T_{va} : Temperatura del vapor de agua; K

τ_{va} : Calor latente de vaporización; kJ/(kg · K) (Iglesias ,1990)

Calor sensible del mineral seco y el agua retenida a la salida del secadero.

El calor que sale con el mineral húmedo se determina a través de la ecuación 2.11, que depende principalmente de la temperatura de salida del secador y el agua retenida en este. El calor específico del agua retenida se determina a la temperatura del mineral a la salida.

$$Q_{cs} = (F_{cs} \cdot C_{pc} + F_{ar} \cdot C_{pH_2O}) \cdot (T_{cs}) \quad (2.11)$$

Donde:

F_{cs} : Flujo de mineral seco; kg/s

F_{ar} : Flujo de agua retenida; kg/s

C_{pc} : Capacidad calorífica del mineral; kJ/kg · K

T_{cs} : Temperatura del mineral a la salida; K

Calor sensible y de reacción aportado por los gases de la planta de hornos de reducción

Los gases provenientes de la planta hornos de reducción aportan su calor sensible más el calor de reacción del monóxido de carbono e hidrógeno.

$$Q_h = Q_{st} = Q_s + Q_{RCO} + Q_{RH_2} \quad (2.12)$$

Calor sensible

El calor específico se busca en la tabla A4 de Incropera y De Witt (2003) a 250 K, los valores se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades de los gases provenientes desde la planta de hornos.

Gases	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O	CO	SO ₂	H ₂
C_p (kJ/kg·K)	1,056	0,972	1,020	1,985	1,065	1,187	14,520
ρ (kg/m³)	0,6739	0,7698	1,0594	0,4405	0,674	1,113	0,0484

Cálculo de la variación de entalpía de los gases de hornos.

$$\Delta H_x = Ax = \int_{35}^{250} C_{p_x} \cdot dT \quad (2.13)$$

El subíndice x representa cada uno de los componentes contenidos por la corriente de gases de hornos.

El flujo de cada componente (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 , A_6 ; para N₂, CO₂, H₂O, CO, SO₂ y H₂; respectivamente) se calcula multiplicando el porcentaje de cada uno de los

elementos (Tabla 2.3) por el flujo de los gases de hornos. La composición química de los gases del horno es la siguiente:

$$A_x = Fgh \cdot \% \cdot \rho \quad (2.14)$$

Tabla 2.3. Por ciento de los elementos en el flujo de gases de hornos

Gases	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O	CO	SO ₂	H ₂
%	54,8	8	8,5	2,5	2,0	0,04	1,2

Aplicando las ecuaciones anteriores se obtiene el calor sensible.

$$Q_s = AN_2 \cdot A_1 + AO \cdot A_2 + ACO_2 \cdot A_3 + AH_{2O} \cdot A_4 + ACO \cdot A_5 + ASO_{2g} \cdot A_6 + AH_2 A_7 \quad (2.15)$$

El calor de reacción del CO (A_{rCO}) y H₂ (A_{rH_2}) se busca en la tabla 203, sección 3 de Perry (1985).

$$A_{rCO} = 10097,9 \text{ kJ/kg}$$

$$A_{rH_2} = 142376,2 \text{ kJ/kg}$$

CO:

$$Q_{RCO} = A_{rCO} \cdot A_5 \quad (2.16)$$

H₂:

$$Q_{RH} = A_{rH_2} \cdot A_7 \quad (2.17)$$

$$Q_{st} = Q_s + Q_{RCO} + Q_{RH} \quad (2.18)$$

Cálculo del flujo de aire filtrado con el mineral.

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 secador, así como por la tolva de alimentación de mineral.

La unión de la cámara de paso con el tambor secador, se calcula la cantidad de aire filtrado que penetra por el espacio anular existente entre el tambor secador y la cámara de paso a partir de la siguiente ecuación:

$$G_{ap} = [\alpha \cdot \psi \cdot \Delta P \cdot A_{sc}] \cdot \left[\frac{29}{R_1 \cdot T_0} \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

Siendo:

$$A_{sc} = \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \quad (2.20)$$

Donde:

α : Eficiencia del orificio; adimensional

ψ : Coeficiente flujo; [adimensional].

R_{ap} : Constante particular de los gases; J/kg · K

ΔP : Variación de presión en el secadero; Pa

T_{a_0} : Temperatura del aire parásito; K

A_{sc} : Área; m²

R_1 : Radio de la cámara de paso; m

R_2 : Radio del tambor; m

Sección de entrada del mineral

Esta sección es la que corresponde a la sección de la tolva de alimentación al secadero. El flujo de aire se determina del mismo modo que en el caso anterior. A partir de la ecuación 2.21.

Luego se determina el flujo de aire filtrado total por:

$$GT = G_{ap} + G_{ta} \quad (2.21)$$

Cálculo de las pérdidas de calor.

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

Pérdidas de calor en la cámara de paso.

Estableciendo los mecanismos que definen la transferencia de calor, debido a que existe energía transmitida por diferencia de temperatura, se calculan las pérdidas de calor en la sección de la cámara de combustión, utilizando la ecuación por convección que en esta sección es libre, a través de la ley de Newton del enfriamiento y las pérdidas por radiación que establece Stefan-Boltzmann.

La cantidad de calor transferida al medioambiente por convección y radiación a través de las paredes de la cámara de combustión se determinan a través de las ecuaciones 2.22 y 2.23.

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} \cdot A_c \cdot (T_s - T_0) \quad (2.22)$$

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_c \cdot (T_s^4 - T_0^4) \quad (2.23)$$

Donde:

q_{conv} : Calor trasferido por convección; kW

q_{rad} : Calor transferido por radiación; kW

h_{conv} : Coeficiente de transferencia de calor por convención; $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

A_c : Área exterior de la cámara; m^2

T_s : Temperatura de la superficie de la cámara de combustión; K

T_0 : Temperatura del medio ambiente; K

ε : Emisividad de la superficie.

σ : Constante de Stefan Bolzmann; $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$

El área de la cámara de combustión se determina a través de la ecuación 2.24.

$$A_0 = 2 \cdot (A \cdot H + A \cdot L + L \cdot H) \quad (2.24)$$

$$A_1 = \pi \cdot d_1^2 \quad (2.25)$$

$$A_2 = \pi \cdot d_2^2 \quad (2.26)$$

$$A_t = A_0 - (A_1 + A_2) \quad (2.27)$$

Donde:

A_0 : Área total de la cámara de paso; m^2

L: Longitud de la cámara; m

A: Ancho de la cámara; m

H: Altura de la cámara; m

d_1 : Diámetro del orificio 1; m

d_2 : Diámetro del orificio 2; m

A_1 : Área del orificio del diámetro 1; m^2

A_2 : Área del orificio del diámetro 2; m^2

At: Área de transferencia de calor en la cámara de paso; m^2

Para la estimación del coeficiente de transferencia de calor es necesario determinar el número de Rayleigh a través de la ecuación 2.28.

$$Ra_l = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_p - T_0) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (2.28)$$

Donde:

Gr : Número de Grashof.

Pr : Número de Prandtl.

g: Aceleración gravitacional; m/s^2

β : Coeficiente de dilatación volumétrica; K^{-1}

ν : Viscosidad cinemática del fluido; m^2/s

α : Difusividad térmica; m^2/s

Los parámetros del fluido se buscan a la temperatura pelicular (T_p) en la Tabla A-4 del Incropera; De Witt (2003) y se determina a través de la ecuación 2.29.

$$T_p = \frac{T_s + T_0}{2} \quad (2.29)$$

Donde:

T_p : Temperatura pelicular; K

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se realiza a través de la ecuación 2.30.

$$h_{conv} = \frac{N_{ul} \cdot K}{L} \quad (2.30)$$

Donde:

h_{conv} : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

L: Longitud de la cámara; m

k: Conductividad térmica; W/(m · K)

N_{ul} : Número de Nusselt.

Si $G_r \cdot P_r > 10^9$, la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt la ecuación (2.31).

$$N_{ul} = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_l^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{P_r} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (2.31)$$

Luego sustituyendo h_{conv} , las respectivas áreas de transferencia de calor y los restantes parámetros en las ecuaciones 2.22 y 2.23 se obtiene el flujo de calor transferido por convección y radiación.

Pérdidas de calor en el Tambor secador.

Las pérdidas en el secadero se producen al salir los gases a una alta temperatura que arrastran gran cantidad de calor hacia la atmósfera, además de interactuar con la superficie metálica del mismo.

Las pérdidas de calor en esta sección se determinan por convección forzada debido a que el aire se mueve con velocidad promedio de 2,3 m/s. A partir de las ecuaciones 2.32 y 2.33.

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{sec} - T_0) \quad (2.32)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{sec}^4 - T_0^4) \quad (2.33)$$

Donde:

T_{sec} : Temperatura de la superficie del secadero; K

El área exterior del cilindro se determina a través de la ecuación 2.34.

$$A_{sec} = \pi \cdot D_{sec} \cdot L_{sec} \quad (2.34)$$

Donde:

A_{sec} : Área del secador; m²

D_{sec} : Diámetro secador; m

L_{sec} : Longitud; m

Excepto el número de Prandtl; Pr (que se determina a la temperatura de la superficie), todas las propiedades se buscan a la temperatura del fluido en la Tabla A-4 del Incropera y De Witt (2003).

Para estimar el coeficiente de transferencia de calor por convección en el secador es necesario calcular el Número de Reynolds a través de la ecuación 2.35.

$$R_e = \frac{V \cdot D_{sec}}{\nu} \quad (2.35)$$

Donde:

R_e : Número de Reynolds.

V : Velocidad del aire; m/s

Para $R_e > 2 \cdot 10^5$ se considera que el régimen es turbulento y se propone la ecuación 2.36 para determinar el número de Nusselt.

$$N_{ud} = C \cdot R_e^m \cdot P_r^n \cdot \left[\frac{Pr_0}{Pr_s} \right]^{1/4} \quad (2.36)$$

C, m, n – Constantes que se determinan en la tabla 7.4 (Incropera, 2003) para Pr < 10.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección a través de la pared del cilindro al aire exterior se sustituye la ecuación 2.36 en la ecuación 2.37.

$$h_{sec} = \frac{N_{ud} \cdot k}{D_{sec}} \quad (2.37)$$

Sustituyendo la ecuación 2.37 y los parámetros físicos relacionados con el tambor secador en las ecuaciones 2.32 y 2.33 se obtiene el flujo de calor transferido por convección y radiación en esta sección.

Pérdidas de calor en la botella.

Las pérdidas de calor y el coeficiente de transferencia de calor por convección en esta sección se calculan igual al tambor secador, el área de transferencia se determina por la ecuación 2.38:

$$A = \pi \cdot S \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right) \quad (2.38)$$

Donde:

A : Área de transferencia de calor en la botella; m^2

S : Generatriz del cono; m

d_1 y d_2 : Diámetro mayor y menor de la botella; m

El número de Reynolds se determina utilizando la expresión 2.35, pero considerando el diámetro asociado a esta sección, los coeficientes c y m se determinan de forma análoga a la sección anterior a partir del valor del número de Reynolds obtenido.

El número de Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor por convección se calculan por las expresiones 2.36 y 2.37 respectivamente.

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

$$Q_{Trad} = Q_{radS} + Q_{radB} + Q_{radC} \quad (2.39)$$

$$Q_{Tcov} = Q_{covS} + Q_{covB} + Q_{covC} \quad (2.40)$$

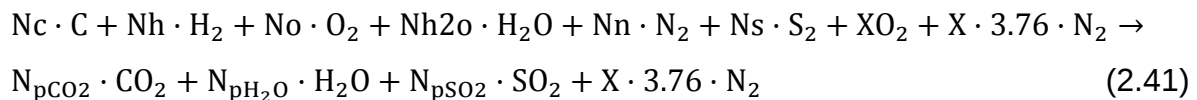
Donde:

Q_{trad} y Q_{Tcov} : Calor total de convección y radiación.

2.4.1. Balance de masa.

Cálculo del oxígeno estequiométrico y los productos de la combustión

El volumen de un mol, que en las mismas condiciones es igual para todos los gases perfectos, en condiciones normales es igual a 22,4 m³/kmol. Los números en el denominador corresponden a la masa molecular de cada componente.



Donde:

N_x : Número de moles.mol/kg

El coeficiente x dice la cantidad de moles de cada componente que tiene la combustion.

Balance para el carbono

$$N_{pCO_2} = N_c \quad (2.42)$$

Balance para el nitrógeno

$$N_{pH_2O} = N_h + N_{h2o} \quad (2.43)$$

Balance de dióxido azufre

$$N_{pSO_2} = N_s \quad (2.44)$$

Balance de oxígeno

$$X O_2 = N_{pCO_2} + \frac{N_{pH_2O}}{2} + N_{pSO_2} - N_o - \frac{N_{h2o}}{2} \quad (2.45)$$

Balance de nitrógeno

$$N_{pN_2} = N_n + 3.76 \cdot X O_2 \quad (2.46)$$

2.5. Rendimiento de la instalación.

El rendimiento de la instalación se determina a través de la relación entre el calor útil y el calor disponible para el proceso de secado y se plantea según la ecuación 2.47.

$$\eta = \frac{Q_{va}}{Q_c + Q_h} \cdot 100 \quad (2.47)$$

2.5.1. Índice de consumo de combustible y productividad específica del secador.

El índice de consumo de combustible (I_{cb}) se establece como la relación que existe entre las toneladas de combustible consumido y las de mineral seco y se determina por la ecuación siguiente en t/t (tonelada de combustible consumido por cada tonelada de mineral seco):

$$I_{cb} = \frac{F_c}{F_{cs}} \quad (2.48)$$

Este parámetro también se puede obtener a partir del empleo del consumo de combustible teórico estimado a partir de la ecuación 2.48 resultando así el índice de consumo teórico.

En sentido inverso, es decir, relacionando la cantidad de mineral seco con el consumo de combustible se obtiene la productividad del secador, por la ecuación 2.49 en t/t (tonelada de mineral seco por tonelada de combustible consumido); a la cual también se le puede obtener un valor teórico resultado de la sustitución de combustible teórico consumido.

$$I_c = \frac{F_{cs}}{F_c} \quad (2.49)$$

Las ecuaciones 2.47, 2.48, 2.49 representan el resultado final del método de balance térmico y de masa, en las mismas se establece la relación de los parámetros de eficiencia (rendimiento térmico, consumo específico de combustible y productividad del secador) en función de las variables más influyentes del proceso (flujo de mineral húmedo, humedad de entrada, flujo de gases de hornos).



2.6. Conclusiones del capítulo 2.

- ✓ Se estableció el balance de masa y energía para el proceso de secado a través de un sistema de ecuaciones que permite determinar los flujos de calor que entran y salen del sistema.
- ✓ Se estableció el procedimiento para el cálculo de las pérdidas de calor del sistema al ambiente.

Capítulo 3: Resultados y análisis de la aplicación del método de balance térmico y de masa en el secado convencional del mineral laterítico.

3.1. Introducción.

El secado tiene gran influencia en el cómputo energético final de una determinada estructura económica industrial. En la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” este proceso constituye uno de las tecnologías de mayor consumo de energía térmica. En esto influyen un grupo de factores estrechamente relacionados con las características del mineral alimentado y con los mecanismos de transferencia de calor y masa establecidos, principalmente el contenido de humedad que el mismo presenta desde su origen.

A través de la aplicación del procedimiento de cálculo propuesto en el capítulo 2 para la evaluación termo-energética del proceso de secado, el presente capítulo persigue como **objetivo:** establecer el comportamiento de los parámetros de trabajo, eficiencia del proceso de secado térmico de mineral laterítico en la instalación y las mayores pérdidas de calor.

3.2 Principales parámetros medidos en la instalación.

Durante el desarrollo de esta investigación se hizo necesario la obtención de los principales parámetros de trabajo que caracterizan el objeto de estudio; dispuesto en la planta de preparación de mineral de la referida empresa a partir del uso del sistema SCADA (CITECT); así como, se seleccionaron valores para determinadas variables de acuerdo con las recomendaciones de las investigaciones precedentes y literaturas especializadas en procesos termodinámicos de transmisión de calor (Torres, 1999; Torres et al., 2000, 2001; Incropera De Witt, 2003; Moya, 2008; Azmand, 2008).

Por cuanto, en las instalaciones de la industria del níquel es comprometedor, en la mayoría de los casos, variar un parámetro para monitorear su influencia en otras

variables si el resultado final de la prueba experimental pudiera afectar de alguna manera la producción de la entidad.

Para el cálculo del sistema se tiene en cuenta la influencia de las principales variables que intervienen en el proceso de secado y su relación con el consumo de combustible. En la tabla 3.1 y 3.2 se muestra los valores de las variables del sistema para el secador #3 que permitirán la evaluación del proceso a través de la metodología propuesta en el capítulo 2.

Tabla 3.1. Valores medidos para las condiciones del secador #3 de la empresa productora del níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Día	Tgs (°C)	Fc (kg/h)	We (%)	Ws (%)	Fmh (t/h)	Fms (t/h)	Tcs (°C)	T0 (°C)	HR (h)
1	91,250	2220,0	35,370	4,300	200,802	104,606	68,09	35,12	23,87
2	92,043	2235,5	33,490	4,240	202,577	105,577	67,83	34,29	23,62
3	86,695	2103,7	31,920	3,630	188,615	98,409	67,11	35,28	22,99
4	95,347	2242,5	31,420	3,970	174,948	90,997	64,34	35,98	24,83
5	94,625	2176,3	35,700	3,700	170,074	88,625	67,96	35,00	23,70
6	93,363	2172,4	33,510	4,210	156,627	81,576	67,66	35,68	24,00
7	94,173	2331,4	32,830	4,400	153,486	79,838	67,31	34,38	24,79
8	95,791	2192,9	32,780	3,680	160,484	83,716	68,06	35,88	23,09
9	85,000	2013,0	30,590	4,360	132,411	98,712	66,65	34,45	24,41
10	91,500	2515,5	34,150	4,380	206,28	107,429	68,11	35,62	24,04
11	89,750	2315,5	35,400	3,580	177,84	92,638	68,02	35,49	23,91
12	91,041	2192,1	34,620	4,480	168,68	88,036	65,03	32,11	22,82
13	95,000	2292,2	34,560	3,410	212,06	110,590	66,13	33,28	23,25
14	88,250	2334,8	35,060	4,090	157,75	82,215	68,14	34,58	23,62
15	92,625	2425,0	35,290	4,050	143,25	74,528	69,19	35,47	24,66
16	92,541	2426,3	35,640	4,890	188,19	98,002	68,11	33,69	24,08
17	86,913	2562,0	33,600	3,890	198,85	103,603	68,11	32,09	23,79
22	90,541	2464,0	34,470	4,900	168,97	88,081	68,11	34,89	23,50
23	95,227	2.191,0	35,830	4,520	217,30	113,703	65,01	33,44	21,50
24	90,791	2349,4	34,310	4,300	175,01	91,203	70,01	35,84	23,66
25	90,000	2386,2	34,130	4,790	172,20	89,747	70,01	35,77	23,62
26	92,166	2363,9	34,390	4,080	157,40	82,100	69,70	33,77	23,16
27	91,000	2296,3	34,770	4,990	195,28	95,230	70,01	34,59	21,25
28	91,500	2314,4	34,490	4,410	203,18	104,089	70,01	34,81	22,33
29	91,500	2279,0	37,490	5,690	195,23	100,201	70,01	35,59	23,75
30	92,000	2225,8	33,920	4,540	182,95	98,102	68,23	35,53	23,58

Tabla 3.2. Los parámetros medidos para valores máximos, promedios y mínimos del secador # 3.

	Tgs (°C)	Fc (kg/h)	We (%)	Ws (%)	Fmh (t/h)	Fms (t/h)	Tcs (°C)	T0 (°C)	HR (h)
Máx	95,79	2562,04	37,49	5,69	217,29	113,7	70,01	35,9	24,8
Pro.	91,56	2319,11	34,37	4,28	179,24	94,29	67,96	34,7	23,5
Mín.	85,56	2013	30,59	3,41	132,41	74,52	64,34	32,0	21,2

Otra de las variables que se tienen en cuenta para la evaluación termo-energética, son las propiedades del combustible que se emplea en el proceso, ver (anexo 1; Tabla 1).

Los valores medidos para las condiciones del secador # 6 de la empresa productora del níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, se muestran en el anexo 2.

3.3. Principales resultados del cálculo.

Con el objetivo de establecer el comportamiento termo-energético del proceso de secado del mineral laterítico en los hornos rotatorios horizontales de la empresa productora del níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” aplicando el método de cálculo establecido en el capítulo 2, se muestra en la Tabla 3.3 los resultados de las principales variables analizadas para el referido proceso de secado con la ayuda del software profesional Mathcad -15.

Tabla 3.3. Principales resultados para el secador #3.

Parámetros	Máximo	Promedio	Mínimo
Qc; (W)	$2,934 \cdot 10^7$	$2,655 \cdot 10^7$	$2,303 \cdot 10^7$
Qic; (W)	$2,865 \cdot 10^7$	$2,593 \cdot 10^7$	$2,251 \cdot 10^7$
Qa; (W)	$2,946 \cdot 10^7$	$2,656 \cdot 10^7$	$2,285 \cdot 10^7$
Qp; (W)	$1,178 \cdot 10^6$	$1,178 \cdot 10^6$	$1,178 \cdot 10^6$
Qap; (W)	471,855	470,889	468,877
Qh; (W)	$6,549 \cdot 10^6$	$6,549 \cdot 10^6$	$6,549 \cdot 10^6$
Qch; (W)	$1,797 \cdot 10^7$	$1,476 \cdot 10^7$	$1,081 \cdot 10^7$
Qgs; (W)	$4,177 \cdot 10^7$	$3,295 \cdot 10^7$	$2,267 \cdot 10^7$
Qcs; (W)	$1,046 \cdot 10^7$	$8,62 \cdot 10^6$	$6,738 \cdot 10^7$
QTCT; (W)	$1,094 \cdot 10^6$	$1,094 \cdot 10^6$	$1,094 \cdot 10^6$
Fc(teo.); (kg/h)	$3,378 \cdot 10^3$	$2,658 \cdot 10^3$	$1,836 \cdot 10^3$
Fc(real); (kg/h)	$2,562041 \cdot 10^3$	$2,319113 \cdot 10^3$	$2,013000 \cdot 10^3$
η (Sec).	0,849	0,76	0,65

3.4. Análisis de las mediciones y los resultados del cálculo.

Los valores contenidos en la tabla 3.1 y 3.2 pertenecen a las principales variables evaluadas para el secador #3. Este secador es un patrón para mostrar el comportamiento de las variables calculadas. Similares resultados se obtienen al aplicarle el procedimiento descrito en el capítulo 2 al secador #6 que se analiza, ver anexo 2; tabla 3.

El índice de consumo de combustible (I_{cb}) está determinado por el cociente que resulta de las toneladas de combustible consumido y las toneladas de mineral seco producidas por cada secador. De manera inversa en la relación anterior se obtiene, la productividad específica del secador (I_c) que expresa la cantidad de mineral secado por combustible consumido.

3.4.1. Estadística descriptiva de las variables para el análisis del secadero

El control de las variables es fundamental para llegar a obtener valores reales sobre el proceso de secado que se realiza al mineral laterítico. En la tabla 3.4 se describen las variables para el estudio del secadero con el objetivo de lograr obtener un modelo de correlación utilizando los valores que presentan estas variables directamente en el proceso.

Tabla 3.4. Estadística descriptiva de las variables para el análisis del secadero.

Estadística	Tgs (°C)	Fc (kg/h)	We (%)	Ws (%)	Fmh (t/h)	Fms (t/h)	Tcs (°C)
Media	91,562	2293,154	34,220	4,287	179,248	94,290	67,964
Error típico	0,536	24,692	0,289	0,099	4,343	2,020	0,309
Mediana	91,5	2294,28	34,43	4,3	176,425	93,934	68,106
Desviación estándar	2,736	125,906	1,478	0,508	22,145	10,301	1,579
Varianza de la muestra	7,486	15852,452	2,185	0,258	490,416	106,124	2,495
Rango	10,791	549,041	6,9	2,28	84,887	39,174	5,665
Mínimo	85	2013	30,59	3,41	132,410	74,528	64,345
Máximo	95,791	2562,041	37,49	5,69	217,298	113,702	70,01
Suma	2380,632	59622,017	889,73	111,48	4660,454	2451,552	1767,07
Nivel de confianza(95,0%)	1,105	50,854	0,597	0,205	8,9447	4,1609	0,638

Como puede observarse los coeficientes de correlación son muy bajos y esto se debe a que los márgenes de variación de estas variables son muy pequeños, ya que los valores de las mismas dependen de la operación del secadero y como se deduce la operación es muy monótona, prácticamente no se regula ninguna de las variables que supuestamente deben influir en el consumo de petróleo.

3.4.2. Rendimiento térmico.

De los resultados generales entre todos los secadores, es vital el análisis del rendimiento térmico, desde el punto de vista de la relación entre la energía útil para el proceso (energía aportada por el vapor de agua eliminado del mineral) y el calor disponible de combustible (calor de reacción aportado por el diesel y calor sensible de reacción aportado por los gases de la planta de hornos).

Estas variables integra la mayor parte de los datos recogidos en la instalación, que integran el comportamiento térmico del sistema y se determinó por la ecuación 2.47. En la figura 3.1 se muestra el comportamiento de rendimiento térmico calculado para las condiciones mínima, promedio y máxima de operación.

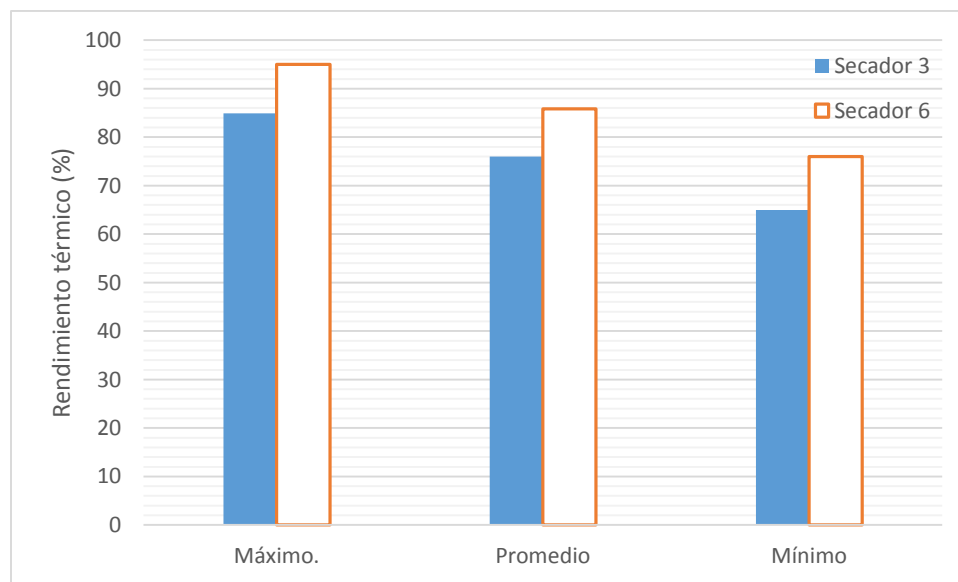


Figura 3.1. Comportamiento del rendimiento térmico.

En este parámetro influyen significativamente varias variables, las fundamentales son la humedad de entrada y salida del mineral laterítico, y el consumo de combustible, ambos tienen una relación algebraica directa, pues con un aumento

de la primera, debe aumentar el consumo de combustible si se quiere mantener un valor determinado de humedad de salida, esto a su vez hace que el rendimiento tienda a la disminución.

El rendimiento en el proceso se entiende como el potencial de secado con que se cuenta a partir del nivel de absorción de agua, es decir, cuanto mayor sea la diferencia entre la humedad de entrada y salida mejor rendimiento tendrá el secador.

3.4.3. Consumo específico de combustible.

El comportamiento del proceso de secado tiene dependencia directa del consumo de combustible por toneladas de mineral laterítico seco, dependencia que se expresa a través del índice de consumo. Las representaciones gráficas para estos parámetros están en las figuras 3.2; 3.3 y 3.4.

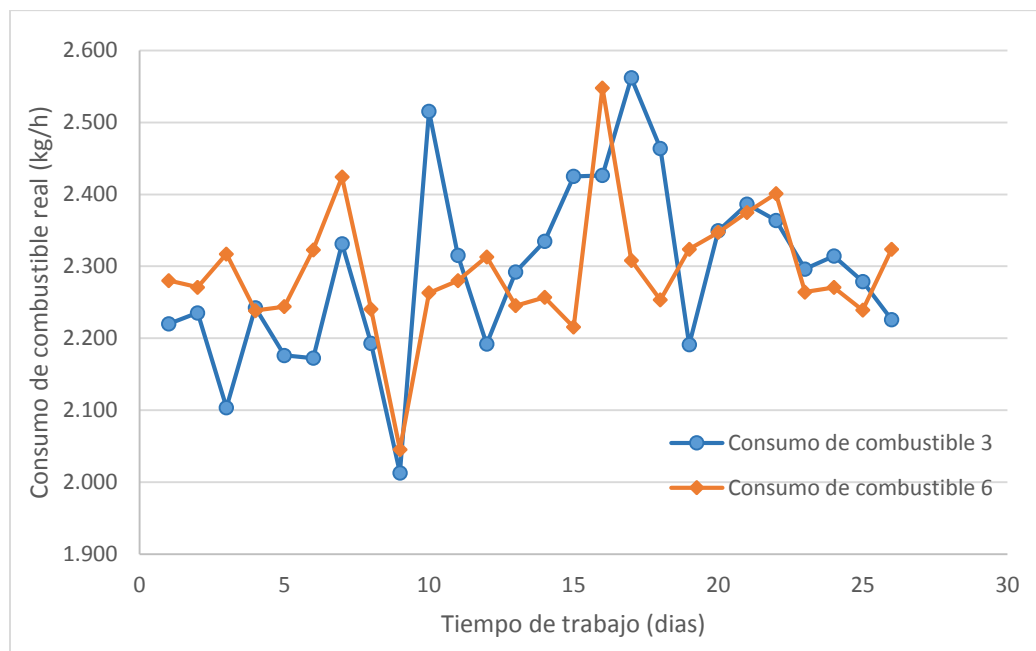


Figura 3.2. Comportamiento del consumo de combustible en los secadores (medido en la instalación).

En la figura 3.2 y 3.3 se representan los comportamientos del consumo de combustible experimental (medido en la instalación) y el teórico (determinado por la ecuación 2.48), respectivamente en los dos secaderos. Se observa que el consumo

experimental es mayor que el obtenido mediante el método de balance térmico y de masa (teórico) en el secador #6 y menor en el #3. Las diferencias entre ambos valores están asociadas a problemas relacionados con el estado técnico, sobredimensionado de la cámara y deficiencias operacionales debido a la regulación manual del dámper en el ventilador del quemador y extractor de gases.

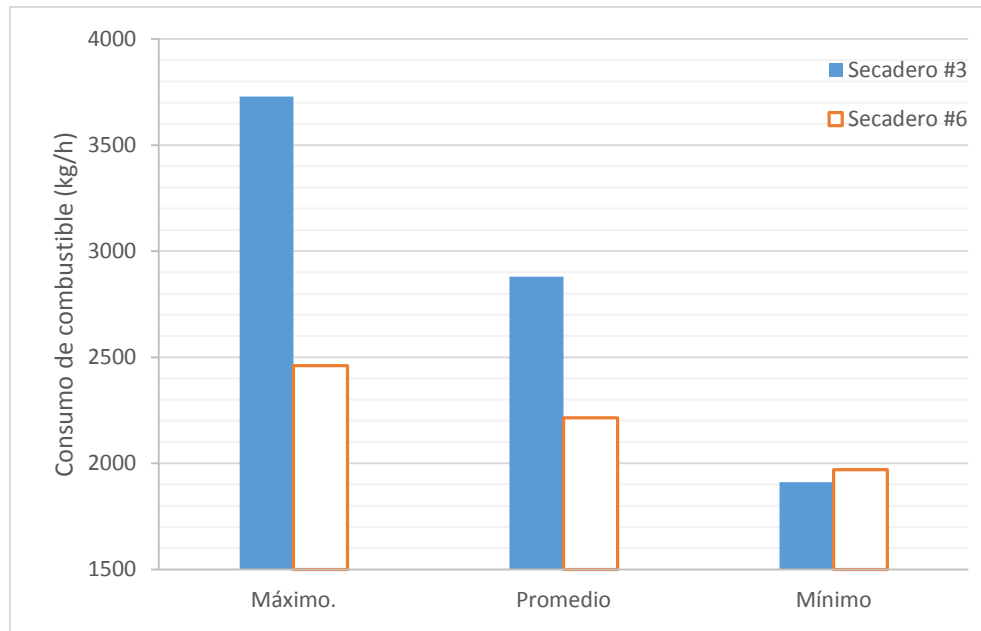


Figura 3.3. Comportamiento del consumo de combustible utilizando el método propuesto.

De los valores del consumo de combustible obtenido a partir de la medición representados por la figura 3.3, los límites son 3728 y 1911 kg/h superior e inferior respectivamente teniendo como promedio para los dos secadores de 2879 y 2214 kg/h.

El otro parámetro relacionado con el combustible, es el consumo específico (índice de consumo de combustible); el cual se muestra en la figura 3.4. En este gráfico se evidencia que este parámetro varía entre un valor mínimo de 0,022 registrado en el secador #6 y un valor máximo de 0,033 en el secador #3 de toneladas de combustible por cada tonelada de mineral seco (t/t).

El promedio del referido parámetro en cada uno de los secadores es de 0,031 y 0,025 (t/t). Por los valores obtenidos a partir de la medición continua del proceso

sugiere establecer como valor estándar del índice de consumo de combustible 0,026 toneladas de combustible por cada tonelada de mineral secado (t/t). Para las condiciones actuales de explotación el valor anterior se puede establecer a partir de la aproximación y el redondeo de los valores promedios.

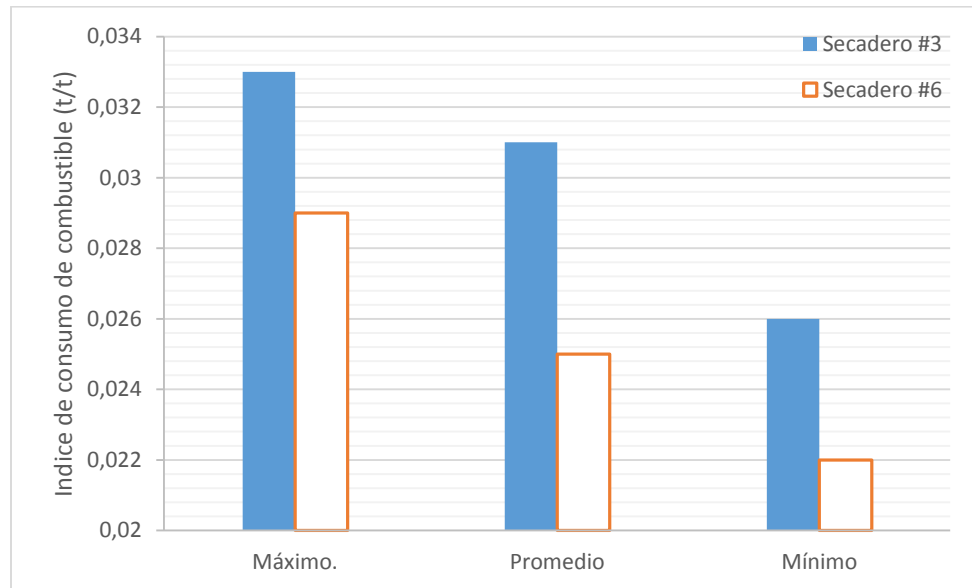


Figura 3.4. Consumo específico de combustible.

El flujo de mineral húmedo así como su contenido de humedad tienen una influencia directamente proporcional en el consumo específico. Un aumento de estas variables favorece aglomeración de mineral y la formación de los pelets (Torres, 2000), por lo que solamente se elimina la humedad superficial. Por este motivo al aumentar el consumo específico de petróleo se obliga a disminuir la cantidad de mineral alimentado al secador para obtener la humedad final deseada.

3.4.4. Productividad específica

La productividad específica es uno de los parámetros más importantes del proceso de secado debido a que representa la cantidad de mineral secado por toneladas de combustible consumido, su comportamiento se muestra en la figura 3.5.

Esta se obtiene en relación inversa al consumo específico de combustible, es decir, dividiendo producción de mineral entre consumo de combustible. En esta instalación según el gráfico de la figura 3.5 el valor mínimo, 32,843 t/t de productividad

específica corresponde al secador #6 y el máximo es 44,38 t/t correspondiente al secador #3, dando un promedio entre 38,57 y 40,67 t/t.

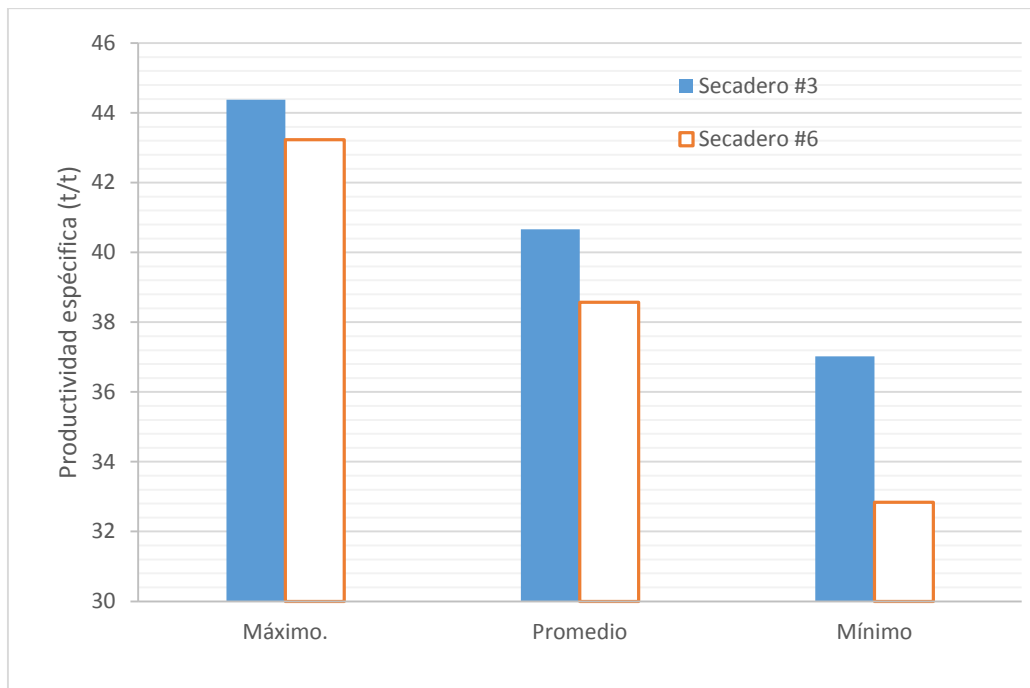


Figura 3.5. Comportamiento de la productividad específica en los secadores.

3.5. Pérdidas de energía por transferencia de calor.

Los resultados del diagnóstico térmico muestran la existencia de elevadas pérdidas de energía en forma de calor, en general este comportamiento se debe a la inexistencia de aislamiento térmico en el secador, el cual no impide el paso del flujo de calor desde el interior del tambor al ambiente. Como lo muestra la figura 3.6 en que se expone los principales resultados obtenidos en la determinación de las pérdidas de calor.

Otros aspectos importantes que se deben destacar, es el hecho de que los operarios de la planta de preparación de mineral de la empresa productora del níquel Comandante Ernesto Che Guevara dedican toda su atención a las especificaciones de calidad del mineral secado (humedad final) y a la temperatura de salida de los gases de escape por la chimenea, aspecto que no ocurre con los restantes factores que influyen sobre el proceso de secado, en general sobre la eficiencia térmica de los secadores.

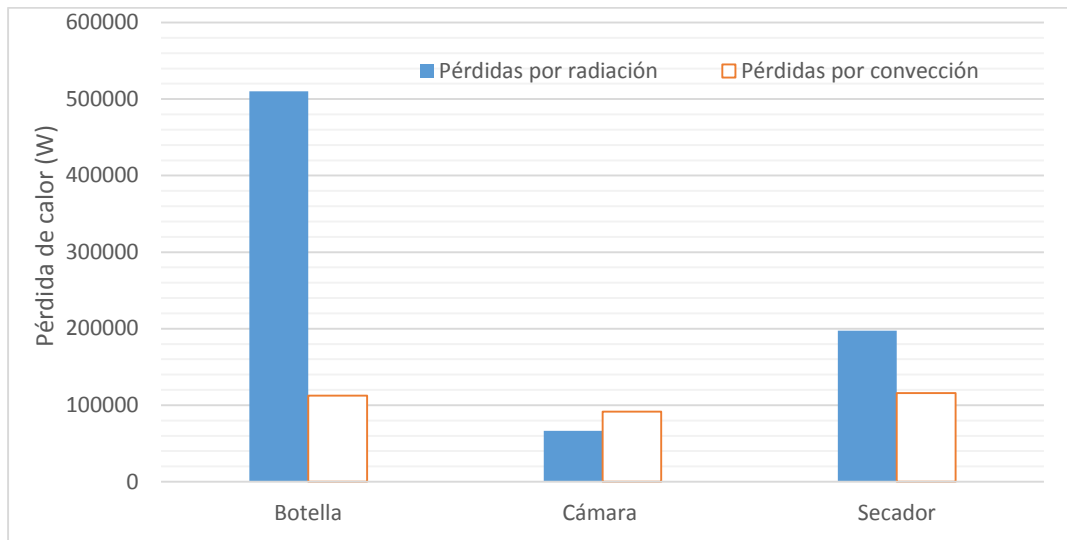


Figura 3.6. Pérdidas de calor en las secciones del secador #3.

Las pérdidas de calor por convección en el tambor secador y la botella muestran valores similares, en todos los casos en la botella son mayores debido al perfil térmico que se genera producto de la combustión del combustible, en esta zona los gradientes de temperatura son superiores, lo cual generan pérdidas de calor elevadas. Lo contrario en la cámara que no existe mayores pérdidas.

El valor perdido por radiación es superior que el perdido por convección, debido a que el último depende significativamente de la velocidad del aire. Como lo muestra la figura 3.7, donde se evidencia las pérdidas totales de convección y radiación.

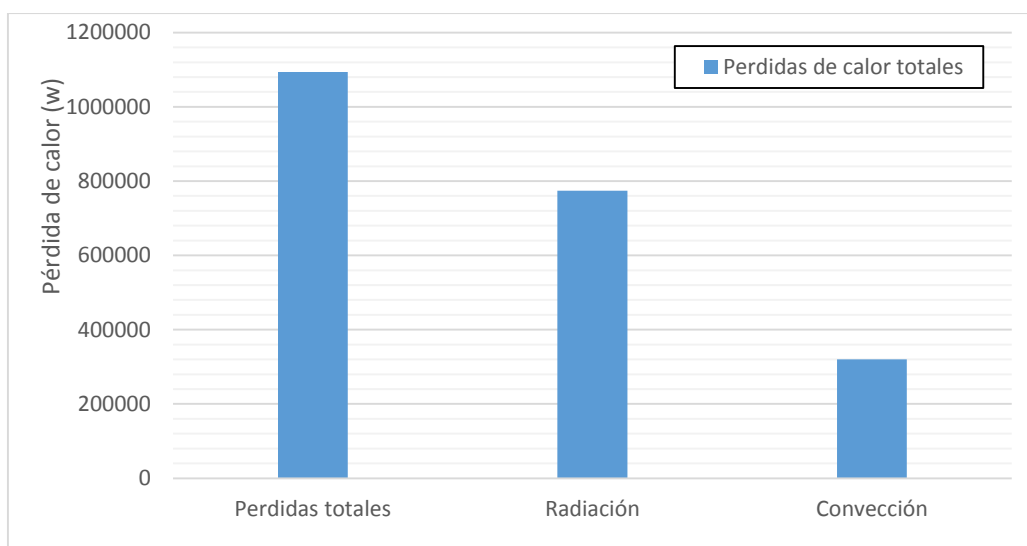


Figura 3.7. Pérdidas totales de calor en la tambor secador, cámara y la botella.

Consideraciones generales del proceso.

De manera general, el rendimiento térmico, el consumo de combustible, el flujo de agua evaporada y la productividad específica presentan comportamiento sinusoidales, sin que se muestre una tendencia al ajuste de algún tipo de función al aumentar la humedad de entrada, manteniéndose valores bajos de humedad de salida con un rango de variación de 1,15 %, esto es debido a que en el proceso analizado no se incluyen varios elementos que por limitaciones tanto teóricas como tecnológicas afectan de alguna manera el análisis:

- ✓ Se considera la temperatura de los gases provenientes de la planta de hornos constante con valor de 250 °C, este es un valor promedio para el período de trabajo analizado. En cada uno de los valores de esta temperatura (30 promedios diarios) se generarían como mínimo 7 datos diferentes de propiedades como densidad y calor específico (tabla 2.2). Estos se seleccionan de tabla A4 de Incropera y De Witt (2003) y ocasionan que el procedimiento de cálculo se vuelva más complejo por el número de veces que hay que realizar las operaciones.
- ✓ Las propiedades termofísicas del aire atmosférico también son función de su temperatura, en este caso se toma como valor promedio 35,88 °C. De la misma manera las propiedades del flujo de gases que transita por el interior del secador se seleccionan de Incropera y De Witt (2003) y Faires (1994) atendiendo a su temperatura y al componente en cuestión. Igual se acumulan un gran número de datos con un pequeño rango de variación, pero cierto grado de influencia en los parámetros principales de operación del secador.

De los resultados graficados anteriormente es válido destacar las relaciones entre la productividad específica, el rendimiento térmico y el índice de consumo en ambos secadores, para un aumento de la productividad aumenta el rendimiento térmico, lo cual sugiere dependencia de estos parámetros directamente proporcional, no así con el índice de consumo de combustible que disminuye con el aumento de la productividad específica. Aquí las relaciones se basan fundamentalmente en la dependencia de tres variables, el flujo de mineral húmedo, humedad de entrada del mineral laterítico y el consumo de combustible.

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

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

3.6. Valoración económica asociada al proceso de secado convencional.

En la Tabla 3.5 se expone el calor total ingresado por el combustible a cada uno de los secadores considerando fijo el valor calórico inferior y el consumo de combustible promedio para el mes analizado. El precio del barril de petróleo es de 55 CUC en el referido al período de evaluación (enero de 2016).

Tabla 3.5. Calor total ingresado por el combustible al proceso.

Equipo analizado	Consumo de combustible promedio (kg/h)	Valor calórico del combustible (kJ/kg)	Calor ingresado (kJ/h)
Secador 3	2293,155	44204,988	100874323
Secador 6	2292,823	44204,988	101859049
Gasto por consumo de combustible (USD/h)			1648,55418

En que el gasto económico asociado al consumo de combustible promedio entre los dos secaderos trabajando simultáneamente asciende a 1648,55418 USD/h. Se utilizó como referencia los datos del secador #3 para ilustrar con mayor claridad las cuantiosa suma que el país debe destinar para la compra de combustible. La tabla 3.6 expresa los principales resultados económico obtenidos.

Como se mencionó anteriormente el precio del combustible se establece en 55 CUC/barril. En el referido secador #3 se determinan la cantidad de barriles de combustible consumido, a partir de la relación entre el flujo de combustible, el valor calórico y su densidad.

Tabla 3.6. Análisis económico para el secador #3.

Días de trabajo	Precio del barril (CUC/barril)	Combustible (barriles/h)	CUC/h	Combustible (barriles/día)	CUC/día
1	55	14,510	798,054	346,428	19053,538
2	55	14,611	803,611	345,114	18981,294
3	55	13,750	756,250	316,181	17389,969
4	55	14,657	806,142	363,937	20016,511
5	55	14,224	782,342	337,189	18545,415
6	55	14,199	780,949	340,778	18742,775
7	55	15,238	838,106	377,833	20780,834
8	55	14,333	788,318	331,022	18206,210
9	55	13,157	723,627	321,225	17667,364
14	55	16,441	904,265	395,246	21738,524
15	55	15,134	832,369	361,929	19906,111
16	55	14,328	788,019	326,956	17982,589
17	55	14,982	824,015	348,334	19158,350
18	55	15,260	839,319	360,526	19828,913
19	55	15,850	871,762	390,946	21502,006
20	55	15,858	872,217	381,872	21002,974
21	55	16,745	920,995	398,372	21910,474

22	55	16,105	885,766	378,464	20815,510
23	55	14,321	787,644	307,897	16934,351
24	55	15,356	844,576	363,398	19986,901
25	55	15,597	857,817	368,471	20265,927
26	55	15,450	849,774	357,909	19685,008
27	55	15,008	825,467	318,931	17541,181
28	55	15,127	831,974	337,781	18577,976
29	55	14,895	819,248	353,766	19457,149
30	55	14,548	800,124	343,035	18866,928
Importe total					(USD/mes) 504544,780

Los resultados mostrados en la Tabla 3.6 indican la importancia que tienen estos equipos en la empresa, debido a que los mismos son considerados puestos clave para el ahorro de combustible.

Al extender el mismo análisis a todos los días evaluados en los que se trabaja de forma continua en la empresa, considerando que se consume una cantidad de combustible determinada fundamentalmente por el tiempo de trabajo diario, entonces el gasto económico por consumo de combustible total sería de 504544,780 USD/mes para el secador en cuestión. En este secador el mayor valor corresponde a los días 21 con 21910,474 CUC, y el día de menor gasto es el 23 con 16934,351 CUC.

Es válido destacar la utilización del calor aportado por los gases generados en la planta de hornos, lo cuales intervienen en el mejoramiento de la eficacia del proceso de secado. Estos gases como promedio aportan 16062130,978 kJ/h de energía en forma de calor. El análisis del efecto económico de este aporte energético para el secador #3 se ofrece en la Tabla 3.7.

En la tabla anteriormente mencionada así como el gráfico de la figura 3.8 se ilustran el comportamiento del costo por consumo de combustible, donde el consumo de combustible equivalente está relacionado con los gases de hornos de reducción y el costo real está relacionado con el consumo de combustible del equipo en el mes.

Tabla 3.7. Análisis económico del aporte energético para el secador #3 de los gases de hornos.

Días de trabajo	Precio (CUC/barril)	Sumatoria energética (kJ/día)	Combustible equivalente (barriles/día)	CUC/día	Suma costo diaria CUC/día
1	55	95926615,563	50,662	4392,382	23445,920
2	55	102976106,381	54,385	4715,171	23696,465
3	55	105563894,15	55,752	4833,663	22223,632
4	55	93294210,764	49,272	4271,846	24288,357
5	55	96997424,295	51,227	4441,413	22986,828
6	55	97398977,569	51,439	4459,8	23202,575
7	55	100745254,856	53,207	4613,022	25393,856
8	55	103333042,625	54,573	4731,514	22937,724
9	55	36407496,883	19,228	1667,062	19334,426
14	55	56128224,362	29,643	2570,054	24308,578
15	55	105965447,424	55,964	4852,049	24758,160
16	55	105206957,906	55,563	4817,319	22799,908
17	55	104091532,144	54,974	4766,245	23924,595
18	55	104448468,387	55,162	4782,589	24611,502
19	55	103333042,625	54,573	4731,514	26233,520
20	55	103689978,869	54,762	4747,858	25750,832
21	55	92892657,489	49,06	4253,46	26163,934
22	55	91420295,483	48,282	4186,042	25001,552
23	55	98514403,332	52,029	4510,874	21445,225
24	55	98871339,576	52,217	4527,218	24514,119
25	55	104091532,144	54,974	4766,245	25032,172
26	55	103689978,869	54,762	4747,858	24432,866
27	55	98112850,057	51,816	4492,487	22033,668
28	55	100388318,612	53,018	4596,678	23174,654
29	55	96283551,807	50,85	4408,725	23865,874
30	55	103734595,9	54,785	4749,901	23616,829
Importe total mensual				114632,989 (CUC/mes)	619177,769 (CUC/mes)

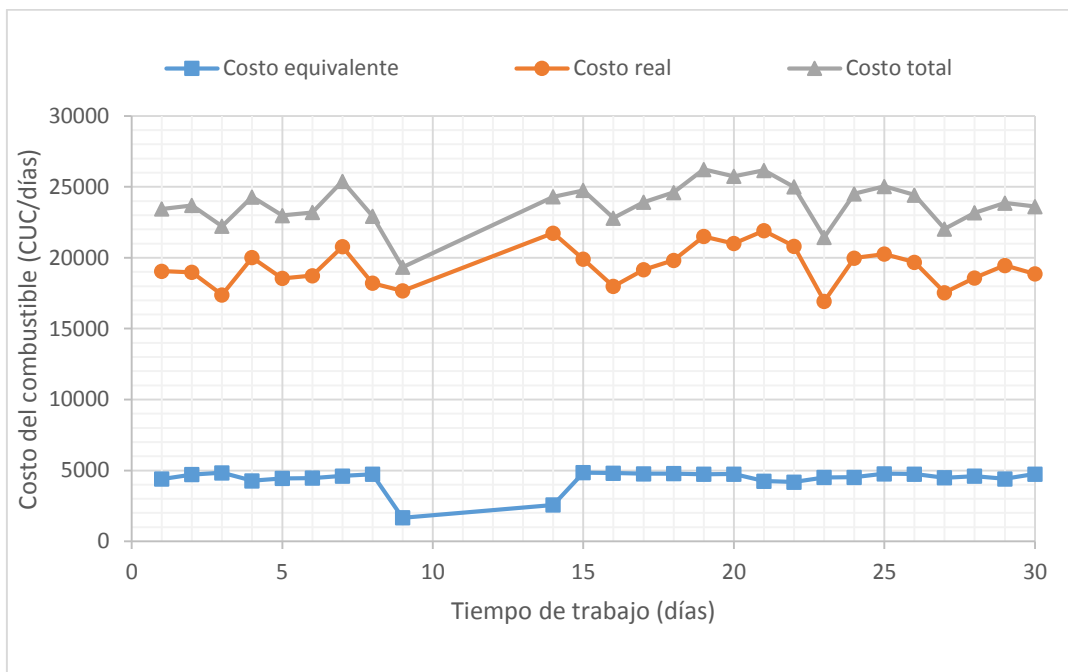


Figura 3.6. Comportamiento del costo del combustible consumido en el secador #3.

Como se puede apreciar los costos son variables, con promedios de 19405,568 y 4408,96112 CUC/mes para los consumos de combustibles real y equivalente respectivamente.

Todo el valor diario del costo por consumo de combustible equivalente se puede concebir como un ahorro energético y económico, pues constituye una fuente gratis de calor generada como parte del proceso de reducción del material en otra planta (planta de hornos de reducción). Por lo tanto en este período evaluado se ahorraron 114632,989 CUC/mes por este concepto, lo que evidencia la importancia de la utilización de estos gases generados en otra instalación.

3.7. Principales problemas ambientales detectados en la planta.

- ✓ La zona de preparación de mineral (depósito de homogenización, transportadores de banda, hasta la sección de molinos), constituyen áreas de contaminación por polvo.
- ✓ Los gases que salen de los electrofiltros de cada secador contienen CO (0,4%) y SO₂ y aunque cumplen las normas deben ser controlados en ese nivel como máximo mediante un monitoreo periódico.

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

3.7.1. Influencia del polvo en el 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.

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 $1 \text{ }\mu\text{m}$. 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 bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre $0,5$ y $5\ \mu\text{m}$ son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

La situación más preocupante corresponde al 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.

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.

3.7.2. Influencia del ruido en el 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.

3.7.3. Medidas para la protección del ambiente durante el secado del mineral.

En la planta de preparación de mineral se expulsa a la atmósfera polvo de mineral proveniente de la limpieza de gases. A la chimenea de 140 m de altura y 6 m de diámetro se descargan los gases provenientes de los secadores, después de pasar por el sistema de purificación mecánico y electrostático (ciclones y electrofiltros). Los gases que se expulsan a la atmósfera contienen CO₂, SO₂, N₂, O₂, y vapor de agua, el contaminante principal es el polvo a razón de 40,55 a 74,4 g/seg. Para eliminar los problemas ambientales se proponen las siguientes medidas:

- ✓ Construcción de transportadores de enlace entre recepción y trituración y la planta de secadero.
- ✓ Techado y reparación de los electrofiltros según proyecto de mantenimiento.
- ✓ Limpieza de los canales de drenaje.
- ✓ Limpieza de la canalización fluvial.
- ✓ Aprovechamiento de los gases calientes de horno a la cámara de combustión (mantenimiento del ducto de gases).
- ✓ Instalación de un nuevo sistema de combustión para el secado de mineral (cámara Voltón).
- ✓ Instalación para la dosificación y mezclado del petróleo en los alimentadores de los molinos.
- ✓ Instalación de tarjetas de control automatizado en los electrofiltros, mejorando la eficiencia de estos.
- ✓ Proyecto para el tratamiento de los residuales líquidos y restablecimiento del sistema por proyecto original.
- ✓ Reparación del aislante térmico de los secadores de mayor explotación.

- ✓ El mantenimiento en los ductos de los gases que transportan los gases provenientes de los hornos de reducción.

3.8. Conclusiones del capítulo 3.

- ✓ Quedó establecida la relación entre los principales parámetros que rigen el comportamiento de los secadores, el rendimiento térmico, consumo de combustible, consumo específico de combustible y productividad específica. Todos tienen una fuerte dependencia del flujo y la humedad de entrada del mineral laterítico.
- ✓ En las condiciones actuales de operación, los secadores evaluados; 3 y 6 presentan; en el rendimiento térmico; valores promedios de 76 y 85, respectivamente. Para la misma secuencia de análisis, los valores de consumo específico de combustible son 0,031 y 0,025 t/t (toneladas de combustible por cada tonelada de mineral seco) y los de productividad específica están en el orden de los 40,658 y 38,851 t/t (tonelada de mineral seco por cada tonelada de combustible) respectivamente.
- ✓ Los gastos promedios por concepto de consumo horario de combustible en el periodo analizado (enero-2016) ascendieron a 1648,55418 USD/h para las condiciones actuales de explotación. Tomando como ejemplo el secador #3, el costo por consumo de combustible bruto fue de 504544,780 USD/mes.
- ✓ 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 GENERALES

- ✓ El procedimiento de cálculo para la evaluación termoenergética del secado convencional del mineral laterítico incluye el balance de 10 corrientes energéticas basadas en las sustancias de trabajo fundamentales, aire, combustible, mineral laterítico, gases de hornos y las pérdidas por transferencia de calor.
- ✓ Con la aplicación del método descrito en el capítulo 2 y realizando los análisis estadísticos correspondientes se definieron los límites superior e inferior para los diferentes parámetros de eficiencia para un nivel de confianza de 95 %. Los límites para el rendimiento térmico son: superior e inferior a 95 y 65 %; para el consumo específico de combustible son: 0,033 y 0,022 t/t (toneladas de combustible consumido por toneladas de mineral seco) y para la productividad son: 44,38 y 32,84 t/t (toneladas de mineral seco por toneladas de combustible consumido).
- ✓ Los gastos promedios por concepto de consumo horario de combustible en el periodo analizado (enero- 2016) ascendieron a 1648,55418 USD /h para las condiciones actuales de explotación. Tomando como ejemplo el secador #3, el costo por consumo de combustible bruto fue de 504544,780 USD /mes. En el mismo secador se ahorran 114632,989 CUC/mes con la utilización de la corriente energética generada por los gases provenientes de la planta hornos de reducción.



Recomendaciones

- ✓ Continuar con el estudio de la temática en cuestión para garantizar una mejor identificación del proceso a partir de la utilización de sistemas de ecuaciones diferenciales.
- ✓ Realizar el mantenimiento a las superficies exteriores de los secadores y mejorar el aislamiento térmico con vista a disminuir las pérdidas por transferencia de calor al ambiente.

Bibliografías

1. Aldana, E.; I. Ramírez; H. Alepuz. Determinación de la carga y capacidad actuales de la instalación de secado de mineral de la empresa Ernesto Che Guevara. *Tecnología Química*, 2004, 24(2): 90-96.
2. Assis, A.; T. V. Lira; V. Murata; S. Barrozo. Concurrent drying of soybean seeds: the effect of the radial air profile. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2005, 22(02): 311 – 318.
3. Bachir, H. Balance térmico y de masa del secador # 3 en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Proyecto de curso. ISMMM, Moa. 2001. 36p.
4. Baker, C.: *Cascading Rotary Dryers* in Mujumdar, A.S. (ed): *advances in Drying*, 2, Hemisphere Publicated Corporation., New York, 1988.
5. Bérriez, L. (2002),(2003): *Secador Solar de Madera*, Centro de Investigaciones de Energía Solar. Cuba.
6. Boizán, M. (1991): “Macrocinética del secado de Bagazo”. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, pp. 145.
7. Boizán, M. *Macrocinética del secado de Bagazo*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1991.145p
8. Britton, P.; M. Sheehan; P. Schneider. A physical description of solids transport in flighted rotary dryers. *Powder Technology*, 2006, 165 (1): 153-160.
9. Castaño, F. Aportaciones al modelado y control de secaderos rotatorios. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. España. 2003. 280 h.
10. Castaño, F., Rubio, F.R. y Ortega, M.G. (2009): “Modelado de secaderos rotatorios en isocorriente”. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. Vol.6 (4): pp 32-43.
11. Castaño, F.; R. Rubio; M. Ortega. Modelado de secaderos rotatorios en isocorriente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2009, 6(4): 32-43.



12. Castillo. A. (2007): Influencia del contenido de humedad en el consumo de combustible de los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM.
13. Chang Cardona y Yuzhaninov; Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos: (1997).
14. Delgado (2013): Delgado (2013): Método de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado en cilindros rotatorios horizontales. Trabajo de Diploma. ISMM Moa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
15. Domínguez, V.L.A. (2011): "Evaluación del proceso de secado del Carbón Antracita en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro", Tesis de Maestría. ISMM. Moa.
16. Douglas P. L, Kwade, A.Lec, P.L, Mallick, S.K., (1992). "Simulation of a Rotary Dryer for Sugar Crystalline" Drying Technology 11(1), 129-155.
17. Duchense, C., Thibault, J. y Bazin, C. (1997): "Modelling and Dynamic Simulation of an Industrial Rotary Dryer". Dev. Chem. Eng. Mineral Process 5(3/4), pp.155-182.
18. Durán (2015), Evaluación termo-energética del proceso de secado en los secadores 2 y 3 de la ECG. Trabajo de Diploma. ISMMM, Moa. 2015.70p
19. Faires, V. (1994): Termodinámica. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
20. Fernandes, N.; H. Ataíde; S. Barrozo. Modeling and experimental study of hydrodynamic and drying characteristics of an industrial rotary dryer. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2009, 26(02): 331 – 341.
21. Fernández D.P. (1996): "Ingeniería Térmica de los Fluidos", <http://www.termica.webhop.info>.
22. Fitt, A. D. : Mixed Systems of Conservation Laws in Industrial Mathematical Modelling. Industrial Mathematics Institute Johannes Kepler Universitat. Vol. 6, Nro. 1, 1996.
23. Franzen, K.; H. Liang; B. Litchfield; M. Okos. Desing and Control of Energy Efficient Drying Processes with Specific Reference to Foods. Vol. 1 Literature Review DOE/ID/12608-2, 1987.



24. Fulford, G, D. (1969): "A suvey of recent soviet research on the drying of solids". Can. J Chem. Eng. 47: pp. 378 – 491.
25. Fulford, G. A suvey of recent soviet research on the drying of solids. Can. J Chem. Eng. 47: 378-491.1969.
26. Hall, C. Drying technollogy An International Journal. New York, 1983.
27. Hernández, J.; P. Quinto. Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. Científica, 2005, 9(2): 63-71.
28. Incropera, F.; D. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003. 3 t.
29. Informe económico anual de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Moa, 2016.
30. Isachenko. V.; V. Osipova.; A. Sukomel. (1979): Transmisión del calor. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 566p.
31. Kern, D. (1969): Procesos de transferencia de calor. Edición Revolucionaria. La Habana. 980p.
32. Krisher, O. Fundamentos científicos de la técnica del secado. Editorial Izdatinlit. Moscú, 1961.
33. Langrish, T. A. G., et al. (1988): An Investigation into Heat Transfer in Cascading Rotary Dryers, J. Separ. Proc. Technol. 9: 15 – 20.
34. Likov A. Application of irreversible thermodynamic methods to investigation of heat and mass transfer. Journal of Heat and Mass Transfer, 1966, 9(1): 139-152.
35. Lobato, F.; V. Steffen; E. Arruda; M. Barrozo. Estimation of drying parameters in the rotary dryers using diferencial evolution. In: 6ta International conference on inverse problems in engineering: theory and practice, 2008, 135: 12063.
36. Lykov, A. (1968): "Teoría del secado", Editorial Energía, 2da edición, Moscú.
37. Manual de operaciones de la planta Preparación de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", 2016. 219 p.
38. Menon and Mujundar. (1992): Drying of solids. Mc Graw Hill, Montreal, Canadá.
39. Mijeeva, I.; M. Mijeev. Fundamentos de termotransferencia. Santiago de Cuba: ENPES, 1991. 376 p.



40. Mora, E. (1999): 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.
41. Moya, Y. Determinación de las pérdidas de calor en los secaderos convencionales de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Tesis de Ingeniería. ISMMM. 2008. 75 h.
42. Muregesan, K.; N. Seetharamu. A one dimensional analysis of convective drying of porous materials. Heat and Mass Transfer 32: 81-88. Springer – Velag .1996.
43. Myklestad O. (1963): “Moisture Control in Rotatory Dryers”. Chem.Eng. Progress Syump. Series 59), pp 138-144
44. Novoa, R.; M. Boizán. (1995): Secado de Zeolita a escala de laboratorio (III). Revista Tecnología Química. Santiago de Cuba, No.1: 24-29
45. Page, N.; D. Bisset; G. Daly; E. Kisi. Ore cooler evaluation. A report for Prior Industries Asutrialia Pty. Ltd. The University of Newcastle research associates limited. Department of Mechanical Engineering at the University of Newcastle, Autralia, 1998. 17p.
46. Papadakis, S. E. (1994): Scale – up of cascading rotatory dryers. Drying Technology. 12: 259 – 279.
47. Perry, J. Chemical Engineering Handbook. 6ta Edición. Mc Graw Hill, New York, 1985.
48. Perry, J. Chemical Engineering Handbook. 6ta Edición. Mc Graw Hill, New York, 1985.
49. Philip, J.; De Vries, D. (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Trans. Am. Geophys. Union 18: 222-232..
50. Ramírez, Y. (2006): Influencia de los parámetros climatológicos en el secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 52p.
51. Reay, D., (1979): “Theory in the Designo f Dryers”. Chem. Eng. Pp. 501-506.
52. Romero, Y. (2006): Estudio experimental a escala piloto del secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, Moa, 55p.



53. Santos, Y. (2005): Estudio preliminar a escala de laboratorio del secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa. 71p.
54. Savaresi, S.; R. Bitmead; R. Peirce. On Modelling and Control of Rotary Sugar Dryer. Control Practice, 2005, 9(1): 249-266. Consultado: 30 de septiembre de 2012. Disponible en: http://oodgeroo.ucsd.edu/~bob/docs/p69_sergio_cep.pdf.
55. Sharples, K., Glikin, P.G., Warne, R. (1964). "Computer Simulation of Rotary Dryers". Transactions of the Institution of Chemical Engineering Science pp. 4171-4182.
56. Sheehan, M.; P. Britton; P. Schneider. A model for solids transport in flighted rotary dryers based on physical considerations. Chemical engineering science, 2005, 135: 4171-4182.
57. Strumillo, C.; P. Jones; Z. Romuald. Energy Aspects of Drying. In: Mujumdar AS, ed. Handbook of Industrial Drying, 2nd ed. New York, Marcel Dekker, 1995.
58. Tamayo (2011). Balance de masa y energía en la instalación de secado de Carbón Antracita en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro. Trabajo de Diploma. ISMM Moa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
59. Tamayo, B.M. (2004): "Estudio preliminar de los secadero de mineral de la empresa Comandante René Ramos Latour-de Nicaro". Trabajo de diploma. Universidad de Oriente, Sede Mella.
60. Thorpe, G.R. (1972): "The Mathemarical Modelling of Dryers". Ph.D.Thesis, university of Nottingham.
61. Torres, E. Investigación del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral en tambores cilíndricos rotatorios. Tesis de Maestría. ISMMM. 1999. 81h.
62. Torres, E.; R. Galano; E. Fernández; A. García. Comportamiento del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios. Minería y Geología. 2000, 17(2): 73-77. Consultado: 3 de noviembre de 2008. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
63. Torres. T.; A. Fonseca. (2001): Análisis térmico de un secador solar de tambor rotatorio para granos. Santiago de Cuba.



64. Treybal, R. (1985): Operaciones con transferencia de masa. Capítulo. XII./pág 653.
65. Zalazar (2015). Modelación matemática del proceso de activación de carbón vegetal en un horno cilíndrico rotatorio. Trabajo de Diploma. ISMM Moa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

Anexo 1

Tabla 1. Propiedades químicas del petróleo,

Columna1	Columna2	Método	Especificación	Certificación Laboratorio Químico ECG
Indice	Unidad	analítico	contratada	
Visc, a 50 °C	CSTOK	D-445	450 Máx,	509,60
Visc, a 80 °C	CSTOK		69 Máx,	93,91
Densidad	API	D-1298	10,5 Mín,	14,7
Pto, Inflamación	°C	D-93	65 Mín,	105,0
Carbón Conradson	%	D-189	17 Máx,	10,62
Cenizas	%	D-382	0,10 Máx,	0,05
Agua	%	D-95	1 Máx,	0,10
Azufre	%	D-197	3,5 Máx,	2,22
Temp, de fluidez critico	°C	D-97	18 Máx,	
Impurezas Mecánicas	%	D-473	0,15 Máx,	0,01
Asfaltenos	%	D-1548	13 Máx,	5,72
Valor Calórico	kcal/kg	D-4698	9 600 Mín,	10330,10
Sodio	PPM	D-1218	60 Máx,	
Vanadio	PPM	D-1548	400 Máx,	
Densidad	g/cm ³	-	0,9846 Máx,	0,9673

Valor calórico inferior del combustible (VCI): VCI = 44204,988 kJ/kg

Anexo 2

Tabla 2, Principales datos para el secador 6.

HR (h)	We (%)	Ws (%)	Fmh (t/h)	Fcs (t/h)	To (°C)	Fc (kg/h)	Tgh (°C)	Tcs (°C)	Tgpc (°C)	T0 (°C)
23,66	35,89	3,95	115,1	84,77	114	2280,3	267,00	68,08	100,81	35,12
22,99	36,1	4,2	123,5	90,78	113,4	2270,9	256,50	67,89	100,74	34,29
22,75	36,4	4,15	122,2	89,63	112,5	2317,2	273,00	66,84	104,53	36,28
22,99	36,64	4,4	130,628	95,6	110	2238,5	267,50	59,94	99,36	36,98
23,66	36,6	4,1	115,564	84,6	115	2244,1	250,50	67,79	99,79	36
21,91	36,75	3,95	114,87	84	111	2322,9	261,00	67,93	88,83	35,68
18,91	36,95	4,25	125,994	92	109,5	2424,3	269,50	66,98	106,54	34,38
23,16	36,9	4,1	121,02	88,4	109,5	2240,6	259,00	68,03	90,96	35,88
22,25	36,19	4,1	120,433	88,43	110	2045,5	259,00	67,33	94,42	34,45
22,91	36,39	4,35	129,025	94,6	109	2263,2	260,00	68,13	99,47	37,92
23,24	35,85	3,95	115,201	84,8	115	2280,0	250,00	67,1	99,54	36,97
23,49	35,73	4,05	118,899	87,6	115	2313,2	259,00	68	96,4	36,16
21,25	35,76	4,05	118,383	87,2	114	2245,3	227,00	69,09	97,18	36,27
23,58	35,51	4,15	121,417	89,6	115,5	2257,0	241,50	68,11	91,14	36,62
23,49	36,31	4	117,227	86	115,5	2215,6	251,50	67,96	102,29	36,49
22,25	36,3	4,35	128,122	94	116	2548,0	245,00	67,12	90,19	37,11
22,33	36,1	4,2	123,579	90,8	117	2308,4	254,00	68,09	93,59	39,28
23,66	35,57	4,3	127,165	93,8	112	2253,4	229,50	68,31	93,92	34,58
23,41	35,96	3,95	114,614	84,3	106,5	2,323,8	224,00	69,12	98,69	35,47
23,49	35,73	3,85	111,842	82,4	112,5	2347,2	228,00	68,12	92,1	33,69
22,24	36,65	3,25	106,587	78	109	2375,0	238,50	68,12	99,77	36,09
22,99	36,47	3,70	121,185	88,8	108	2401,0	237,00	68,12	93,47	34,89
23,91	38,77	4,00	119,342	86	108	2264,2	246,00	65,02	99,32	36,44
23,16	37,98	4,25	126,942	92	107	2270,8	201,00	70,01	95,23	35,84
23,75	36,37	4,20	122,733	90	102,5	2239,1	226,50	68,13	94,45	36,77
21,49	36,4	4,40	130,398	95,6	104	2323,9	220,00	67,1	94,29	33,77
20,66	35,3	4,00	116,764	86,3	105,6	2443,1	208,00	68	95,36	37,59
23,5	36,12	4,10	120,33	88,4	108,7	2276,2	211,50	70,01	102,1	34,81
24	36,05	4,15	121,901	89,6	117,6	2248,7	218,50	70,01	96,96	35,59
23,16	36,76	3,95	115,152	84,2	119,7	2268,3	231,00	68,29	94,77	37,53

Tabla 3, Principales resultados para el secador 6.

η_{sec}	F_c ($10^3 \cdot \text{kg/h}$)	F_{teor} ($10^3 \cdot \text{kg/h}$)	Q_c W	Q_{cs} W	Q_{gs} W	Q_{va} W	I_{cb} (t/t)	I_{cde} (t/t)	I_c (t/t)
0,82	2,280	2,20	1,01	3,16	1,00	9,57	0,0269	0,0259	37,176
0,88	2,27	2,19	1,01	3,48	1,08	1,03	0,025	0,0241	39,975
0,87	2,32	2,24	1,03	3,12	1,08	1,03	0,0259	0,0249	38,68
0,95	2,24	2,16	9,93	2,52	1,14	1,09	0,0234	0,0226	42,706
0,84	2,24	2,16	9,96	3,06	1,02	9,75	0,0265	0,0256	37,698
0,81	2,32	2,24	1,03	3,06	1,01	9,59	0,0277	0,0267	36,162
0,88	2,42	2,34	1,08	3,43	1,13	1,09	0,0264	0,0254	37,95
0,88	2,24	2,16	9,94	3,23	1,06	1,01	0,0253	0,0244	39,454
0,93	2,05	1,97	9,08	3,30	1,04	9,97	0,0231	0,0223	43,232
0,92	2,26	2,18	1,00	3,28	1,12	1,07	0,0239	0,0231	41,799
0,81	2,28	2,20	1,01	2,89	9,98	9,51	0,0269	0,0259	37,192
0,82	2,31	2,23	1,03	3,16	1,02	9,71	0,0264	0,0255	37,87
0,84	2,25	2,17	9,97	3,25	1,02	9,69	0,0257	0,0248	38,836
0,84	2,26	2,18	1,00	3,21	1,02	9,73	0,0252	0,0243	39,699
0,86	2,22	2,14	9,84	3,06	1,03	9,85	0,0258	0,0248	38,815
0,81	2,55	2,46	1,13	3,23	1,09	1,05	0,0271	0,0261	36,891
0,85	2,31	2,23	1,02	2,98	1,05	1,01	0,0254	0,0245	39,334
0,88	2,25	2,17	1,00	3,62	1,07	1,03	0,024	0,0232	41,626
0,80	2,32	2,24	1,03	3,20	9,98	9,50	0,0276	0,0266	36,276
0,76	2,35	2,26	1,04	3,19	9,63	9,15	0,0285	0,0275	35,105
0,76	2,38	2,29	1,05	2,75	9,66	9,18	0,0304	0,0294	32,843
0,83	2,40	2,32	1,07	3,30	1,07	1,02	0,027	0,0261	36,984
0,92	2,26	2,18	1,00	2,78	1,12	1,07	0,0263	0,0254	37,983
0,95	2,27	2,19	1,01	3,59	1,15	1,10	0,0247	0,0238	40,515
0,88	2,24	2,16	9,93	3,22	1,06	1,01	0,0249	0,024	40,195
0,91	2,32	2,24	1,03	3,66	1,13	1,08	0,0243	0,0234	41,138
0,80	2,44	2,36	1,08	2,97	1,04	9,89	0,0283	0,0273	35,324
0,86	2,28	2,20	1,01	3,53	1,05	1,01	0,0257	0,0248	38,837
0,87	2,25	2,17	9,98	3,51	1,05	1,01	0,0251	0,0242	39,844
0,83	2,27	2,19	1,01	2,93	1,02	9,69	0,0269	0,0260	37,12