



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

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Título: Procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar del mineral Laterítico.

Autor: Mauricio Ismael Ricardo Pisitelle

Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja

Moa-2008

“Año 50 de la Revolución”



RESUMEN

En las empresas cubanas del níquel se desarrolla el secado térmico con el empleo de los secadores cilíndricos rotatorios, en estos equipos existe un excesivo consumo de combustible debido, entre otros factores, al elevado contenido de humedad presente en el mineral alimentado. En la actualidad solo se ha logrado determinar la variación de la humedad mediante métodos empíricos y se requiere de métodos teóricos que permitan simular el proceso sin necesidad de someter el material al proceso de experimentación.

Durante el desarrollo del trabajo se comprobó la existencia de expresiones teóricas, empíricas y semi-empíricas obtenidas por diferentes investigadores que reflejan el comportamiento físico de los procesos de secado de los diferentes materiales estudiados, pero no pueden ser empleadas para la descripción de la cinética del secado solar para el mineral laterítico. Se estudiaron las características climatológicas de la zona donde está ubicado el yacimiento y los trabajos experimentales realizados por los investigadores precedentes los cuales indican que es factible el desarrollo del secado solar del mineral laterítico en las condiciones objetivas de la empresa Ernesto Che Guevara.

Se estableció el procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la cinética del secado solar para el mineral laterítico, el cual conjuga las leyes que rigen la transferencia de calor y masa en los procesos de secado y se comprobó que al reducir el contenido de humedad en 8,85%; el consumo de combustible disminuyó en 1,02 t/h; generando un ahorro anual por concepto de consumo de combustible en el secadero cilíndrico rotatorio que asciende a 4 089 139,2 USD reduciéndose de esta forma las emisiones de gases contaminantes producto de la combustión de los combustibles fósiles.



ABSTRACT

In the Cuban companies of the nickel the thermal drying is developed with the employment of the rotational cylindrical dryers, in these teams an excessive consumption of due fuel exists, among other factors, to the high content of present humidity in the fed mineral. At the present time alone it has been possible to determine the variation of the humidity by means of empiric methods and it is required of theoretical methods that allow to simulate the process without necessity of subjecting the material to the experimentation process.

During the development of the work he/she was proven the existence of theoretical, empiric and semi-empiric expressions obtained by different investigators that reflect the physical behavior of the processes of drying of the different studied materials, but they cannot be employees for the description of the kinetics of the solar drying for the mineral. The climatological characteristics of the area were studied where the location and the experimental works carried out by the precedent investigators which indicate is located that it is feasible the development of the solar drying of the mineral laterítico under the objective conditions of the company Ernesto Che Guevara.

The procedure of theoretical calculation settled down for the determination of the kinetics of the solar drying for the mineral laterítico, which conjugates the laws that govern the transfer of heat and mass in the drying processes and was proven that when reducing the content of humidity in 8,85%; the consumption of fuel diminished in 1,02 t/h; generating an annual saving for concept of consumption of fuel in the rotational cylindrical dry that ascends 4 089 139,2 USD decreasing this way the emissions of gases polluting product of the combustion of the fossil fuels.



ÍNDICE

Contenido	Págs.
<i>Introducción</i>	4
Capítulo I <i>Marco teórico- metodológico de la investigación.....</i>	5
1.1- <i>Introducción.....</i>	7
1.2- <i>Principios técnicos del secado</i>	7
1.3- <i>Trabajos experimentales precedentes sobre el proceso de secado....</i>	9
1.4- <i>Clasificación de los sólidos húmedos objeto de secado.....</i>	20
1.5- <i>Aspectos fundamentales sobre el secado solar natural.....</i>	23
1.6- <i>Características geográficas del yacimiento Punta Gorda</i> <i>Ubicación geográfica.....</i>	24
1.7- <i>Conclusiones del capítulo I.....</i>	25
Capítulo II <i>Procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico.....</i>	26
2.1- <i>Introducción.....</i>	26
2.2- <i>Métodos de diseños generales de la cinética del secado.....</i>	26
2.3- <i>Procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de humedad en el secado solar del mineral laterítico.....</i>	27
2.4- <i>Conclusiones del capítulo II</i>	41
Capítulo III <i>Análisis de los resultados. Valoración económica e impacto ambiental.....</i>	42
3.1- <i>Introducción.....</i>	42
3.2- <i>Análisis de los resultados.....</i>	42
3.3- <i>Valoración económica.....</i>	46
3.4- <i>Impacto ambiental asociado al proceso de secado solar.....</i>	47
3.5- <i>Conclusiones del capítulo III.....</i>	49
Conclusiones.....	50
Recomendaciones.....	51
Bibliografía.....	53
Anexos	57

INTRODUCCIÓN

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

Hoy día la industria niquelífera cubana se encuentra enfrascada en la modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos de producción por tonelada de níquel y trabaja bajo las normativas del perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional. Este último como proceso integral no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica (Torres, 2003).

Existen dos fábricas en funcionamiento para la obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología carbonato amoniacal: las Empresas “Comandante René Ramos Latour” y “Comandante Ernesto Che Guevara”. En estas industrias metalúrgicas se desarrollan complejos procesos que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas (Guzmán, 2001), entre ellos se encuentran en la planta de preparación de mineral los procesos de secado térmico en cilindros rotatorios y el secado solar.

El secado es la eliminación del agua que contienen los materiales, el mismo se realiza a través de un proceso de transferencia de calor y masa, también puede efectuarse por medios mecánicos (sedimentación, centrifugación y filtración). Sin embargo, la deshidratación más completa se alcanza mediante el secado térmico (Knoule, 1968). Entre los aspectos más importantes que se han planteado los directivos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” en función de disminuir el consumo de combustible, está la realización eficiente del proceso de secado en los cilindros rotatorios, a partir de implementar el secado solar previo del material, aspecto no resuelto en la actualidad, si se tiene en cuenta que solo en el proceso de secado se consume el 23% del total de la energía consumida en la empresa (Informe económico anual de la empresa Ernesto Che Guevara, 2006).

El secado solar por sus múltiples ventajas y perspectivas se encuentra ampliamente aplicado a nivel mundial (Echazu, 2001). En Cuba su empleo se reduce a la industria de alimentos, café, madera, entre otras (Torres et al., 2001; Griñan et al., 2003) y en menor medida en la industria del níquel; pero a partir de la Revolución Energética donde se enfatiza en la necesidad de llevar a cabo una gran campaña de ahorro de energía y combustible, se hace necesario, de acuerdo con el nivel alcanzado por la industria del níquel y su posterior desarrollo: implementar eficientemente el secado solar del mineral laterítico que contribuye a incrementar la productividad de la planta y reducir los gastos energéticos anuales.

A pesar de las potencialidades probadas del secado solar en otros materiales muy poco se ha hecho en la empresa Ernesto Che Guevara. Las causas que originan esta dificultad son: los grandes volúmenes de producción manejados a partir de la ampliación y modernización de la empresa, la ausencia del equipamiento requerido para realizar adecuadamente la homogenización. Estas deficiencias conducen a la inexactitud de los proyectos de las instalaciones de secado solar, derivadas de la ausencia de investigaciones científicas y trabajos experimentales en esta área del conocimiento.

El establecimiento del procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico es un aspecto novedoso no abordado en las literaturas especializadas en la temática del secado (Sherwood, 1936; Lykov, 1968; Knoule, 1968; Strumillo, 1975; Perry, 1985), por cuanto depende de sus propiedades físicas, térmicas y de las características específicas del proceso y climatológicas de la región de Moa, que se caracteriza por presentar un microclima de constantes cambios que hacen difícil su predicción y pronóstico.

En general los procedimientos expuestos en la literatura científica tienen un carácter general y no pueden ser considerados para la predicción de la cinética del proceso de secado para el mineral laterítico

A pesar de que las investigaciones más recientes (Estenoz et al., 2003a; Santos, 2005; Ramírez, 2006; Romero, 2006) arrojan resultados relevantes en cuanto la cinética del secado obtenida en todos los casos por métodos experimentales, se requiere de un procedimiento de cálculo eficaz para la determinación de la variación de humedad.

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

En las literaturas especializadas en la temática de secado no existe un sistema de ecuaciones para determinar la variación de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico, solo relacionan expresiones empíricas o semi-empíricas que no reflejan la realidad física del objeto de estudio.

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

El proceso de secado solar del mineral laterítico.

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

El análisis profundo de los procesos de transferencia de calor presentes en el secado solar del mineral laterítico, conjugado con las expresiones existentes para el estudio de los procesos de secado permitirá el establecimiento de un procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad en el objeto de estudio.

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

Establecer un procedimiento de cálculo teórico que permita la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico.

Para dar cumplimiento al objetivo se desarrollaron las siguientes **tareas**:

- 1- Establecer el estado del arte del proceso de secado solar y la situación actual de la temática en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
- 2- Deducir las limitaciones de las expresiones empíricas obtenidas en el mundo al ser aplicadas al secado solar del mineral laterítico.
- 3- Establecer un sistema de ecuaciones teórico para la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico.
- 4- Analizar los resultados obtenidos a partir de curvas de comportamiento de la cinética del secado.
- 5- Valorar económicamente el proceso y las afectaciones medioambientales asociadas al mismo.

En correspondencia con la hipótesis y el objetivo, se plantea como **aporte del trabajo**:

El procedimiento de cálculo teórico que permite la determinación de la humedad del mineral laterítico durante el proceso de secado solar en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

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

- 1- Método histórico-lógico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso objeto de estudio.
- 2- Método inductivo-deductivo para el establecimiento de las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para el secado de materiales sólidos, al ser aplicadas al mineral laterítico.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

Durante muchos años los procesos de secado artificial a gran escala basado en el uso de combustibles han sido implementados, ahora la realidad impacta. Las reservas mundiales de combustible han sido reducidas considerablemente por lo que la búsqueda de energías alternativas para estos procesos se ha empezado a desarrollar en Cuba. El considerable aumento de los precios de los combustibles y el desarrollo de la industria exigen disminuir los consumos de portadores energéticos, es por ello el interés del secado con el uso de la energía solar tratándose de desarrollar diversas técnicas que posibiliten solucionar las dificultades relacionadas con este importante proceso.

El **objetivo** de este capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos y el estado del arte del proceso de secado solar del mineral laterítico desarrollado en la empresa Ernesto Che Guevara.

1.2- Principios técnicos del secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y transferirla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto y su grado de sequedad) y de las características físico mecánicas del producto (su composición química, mineralógica, contenido de humedad y tamaño de las partículas). 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. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata rápidamente. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto a secar (Sazhin, 1984).

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

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

El período de velocidad de secado constante (primer período) 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.

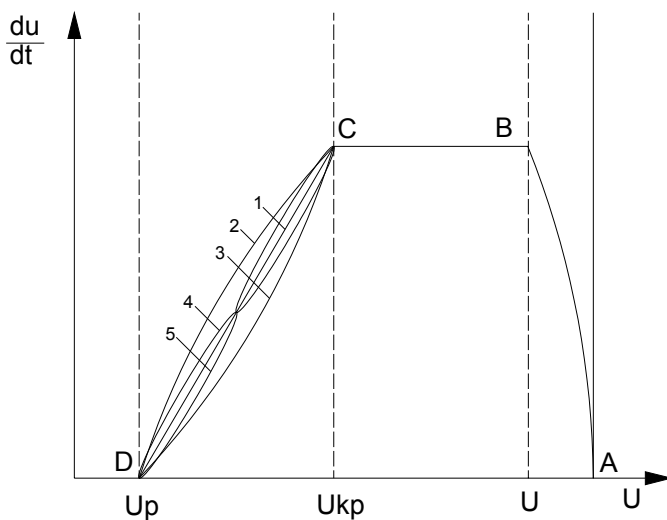


Figura 1.1. Curva de velocidad de secado.

Fuente: Boizán, 1991.

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

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

1.3- Trabajos experimentales precedentes sobre el proceso de secado

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Todo lo anterior es aplicable al secado de materiales de forma estática con régimen de temperatura constante. En el secado solar de los materiales a la intemperie estas condiciones

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

1.3.1- Trabajos experimentales precedentes para el período de velocidad de secado decreciente

La descripción matemática del proceso de secado en este período es más difícil porque la velocidad de secado varía continuamente y sigue una función compleja. En la actualidad se utilizan métodos semi-empíricos y empíricos en la caracterización de esta etapa del proceso.

La forma más sencilla de la curva de secado en el segundo periodo (de velocidad de secado decreciente) es la propuesta por Lykov (1968), según la cual la velocidad de secado ($du/d\tau$) es proporcional a la diferencia de humedad ($u-u_p$); ecuación 1.1, en la que: K es el coeficiente de secado en el segundo período.

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u - u_p) \quad (1.1)$$

El valor de K se puede determinar aplicando el método de los mínimos cuadrados a la relación funcional existente entre $\ln [(u-u_p)/(u_{KP}-u_p)]$ vs τ , hallados a partir de datos experimentales del proceso.

Físicamente los valores de K reflejan las características estructurales internas de los cuerpos capilaroporosos húmedos. Sin embargo, cabe destacar que si cambian las condiciones externas, la resistencia y la transferencia de masa del sólido húmedo al gas se afecta y por tanto, la velocidad de secado en el primer período varía; como consecuencia, la humedad crítica (u_{KP}) dependiente tanto de la resistencia interna como de la externa del transporte de humedad, también cambia.

Del análisis de datos experimentales de diferentes materiales Lykov propuso calcular el coeficiente de secado K , en función de N , como se observa en la expresión (1.2), en la que K_p es el coeficiente relativo de secado, cuyo valor depende de las propiedades del material y de su humedad inicial. El mismo (K_p) se puede hallar mediante el método de los mínimos cuadrados aplicado a la relación K vs N .

$$K = K_p \cdot N \quad (1.2)$$

La expresión (1.3) reportada por Rezchikov et al. (1966) generaliza en cierto modo a la ecuación 1.1 al introducir el exponente M, constante cuya magnitud es función de las propiedades del material.

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u - u_p)^M \quad (1.3)$$

Zhidko et al. (1986), obtuvo la ecuación general (1.4) de la macrocinética del secado, aplicada con éxito a los períodos de precalentamiento, de velocidad de secado constante y descendente, en la cual:

u_o, u_p : humedad inicial y de equilibrio convencional del material; % .

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u_o - u_p) \cdot \exp(-K \cdot \tau) \quad (1.4)$$

Los valores del coeficiente K y P_s se hallan con las relaciones 1.5 y 1.6.

$$K = A \cdot B \cdot C \cdot P_s \cdot (F_M / G) \quad (1.5)$$

$$P_s = 0,022 \cdot (1,67 + 0,0052 \cdot u)^{0,1 \cdot T} + 0,045 \quad (1.6)$$

Donde:

A: constante que depende del tipo de material y sus propiedades termofísicas.

B: coeficiente cuyo valor depende del tipo de material.

C: parámetro función de la humedad inicial del material.

P_s : presión de saturación del vapor sobre la superficie del sólido secado; Pa .

F_M/G : superficie de vaporización específica, igual a la relación existente entre la superficie de la muestra y el peso de ésta absolutamente seca; m^2/kg .

u : humedad actual del material; % .

T: temperatura actual del material; °C .

La expresión (1.4) ofrece la ventaja de no utilizar la humedad crítica, u_{KP} , y la intensidad de la deshidratación se relaciona directamente con el calentamiento.

Filonenko (1958), propone la expresión (1.7) para el segundo período de secado, en la misma A, B, y M son constantes determinadas experimentalmente.

$$-\frac{1}{N} \cdot \frac{du}{d\tau} = \frac{(u - u_p)^M}{A + B \cdot (u - u_p)^M} \quad (1.7)$$

Los coeficientes A y B dependen del tamaño y forma de las partículas. El valor del exponente M depende de la forma del enlace de la humedad con el material; para diferentes productos oscila entre 0.5 y 2.

Vanecek et al. (1965), definen la variación de la velocidad de secado con la ecuación (1.8), en la cual los coeficientes a y b son constantes y sus valores dependen de la naturaleza del sólido y del régimen de secado respectivamente. Ésta ha sido utilizada para todo el proceso e incluye el periodo de velocidad de secado constante y el descendente. Resulta ventajoso su uso porque no es necesario conocer el valor de la humedad crítica.

$$-\frac{du}{d\tau} = \frac{a}{(a + b \cdot \tau)^2} \quad (1.8)$$

Mediante un procedimiento matemático simple se demuestra que la velocidad de secado según la ecuación 1.8 se puede expresar en términos de un coeficiente de secado $K = b^2/a$ y la diferencia $(u - u_p)$ elevada al cuadrado (expresión 1.9).

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u - u_p)^2 \quad (1.9)$$

Pikus (1965), aplicó la expresión 1.10 al período de velocidad de secado decreciente, al ajustar las curvas halladas en el secado fluidizado de diferentes productos termolábiles. El coeficiente K se puede hallar con datos experimentales aplicando el método de los mínimos cuadrados a la relación funcional existente entre $\ln[(u - u_p)/(u_{KP} - u_p)]$ vs τ .

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u_{KP} - u_p) \cdot \exp(-K \cdot \tau) \quad (1.10)$$

Al analizar en conjunto las expresiones descritas para el segundo período de secado, las cuales permiten una vez integradas hallar el tiempo requerido para reducir la humedad del material de un valor u_0 a otro u_K dados, se demuestra que son importantes porque ofrecen la posibilidad de evaluar la influencia que tienen diferentes factores sobre el secado.

Todas las ecuaciones fueron obtenidas por sus autores del procesamiento de datos experimentales correspondientes a materiales de análogas propiedades físicas y su sencillez no crea dificultades al ser utilizadas en la práctica.

De las ecuaciones reportadas por los diferentes investigadores la más utilizada en los cálculos de la duración del proceso de secado es la propuesta por Lykov (1968), basada en el uso del coeficiente de secado, K (expresión 1.1).

La relación 1.2 indica que la influencia de las condiciones externas del secado y las características estructurales internas del material determinante de los fenómenos elementales del transporte de calor y masa, en el segundo período de secado, pueden expresarse en función de factores individuales. Así, la temperatura, velocidad y humedad del agente secador influyen tanto en el periodo de velocidad de secado constante como en el decreciente. La relación 1.1 aplicada a la condición $u = u_{KP}$, cuando las velocidades de ambos períodos son iguales, permite hallar una relación formal entre K y N dada por:

$$N = K.(u_{KP} - u_p), \quad K = N/(u_{KP} - u_p) \quad y \quad K_p = 1/(u_{KP} - u_p) \quad (1.11)$$

De aquí se infiere que las influencias debidas a las propiedades internas de un material en particular van incluidas en los valores de las humedades críticas y de equilibrio. La ecuación (1.1) de Lykov es criticable, no obstante, porque supone la constancia del coeficiente K durante todo el segundo período, el cual realmente es función de la temperatura y humedad actual del sólido secado que se encuentra en constante cambio.

Sin embargo la restricción señalada al modelo de Lykov puede ser salvada aplicando el procedimiento de cálculo por zonas con valores diferentes del coeficiente de secado K , en cada tramo de la curva, como lo han reportado diferentes investigadores (Nonhebel et al., 1971).

Las expresiones (1.3, 1.4, 1.7, 1.9 y 1.10) no pueden ser deducidas a partir de un análisis físico del proceso de secado (Romankov et al., 1975) y deben considerarse sólo como formas diferentes para el ajuste aproximado de curvas experimentales. Si se observa la estructura matemática de esas ecuaciones se notará que la 1.9 es un caso particular de la 1.3, en tanto que las expresiones 1.4 y 1.10 corresponden a un mismo comportamiento exponencial del segundo periodo de secado, particularizado para los materiales y condiciones utilizadas del proceso y en general, equivalente a la ecuación 1.1.

Si bien es cierto que las expresiones expuestas anteriormente (1.1-1.10) son el resultado del estudio experimental del proceso de secado realizado por diferentes investigadores para materiales con propiedades físicas similares, que las formulaciones matemáticas contribuyen a entender la teoría científica relacionada con el secado, la transferencia de calor y masa simultáneas, tanto externas como internas, también se puede significar, que los modelos matemáticos que describen el comportamiento del secado expuestos en este epígrafe aunque

indican la línea a seguir en el análisis de este complejo proceso, no pueden ser aplicados de igual manera al secado solar del mineral laterítico, debido a que las condiciones de experimentación y las propiedades físico-mecánicas del sólido objeto de estudio difieren considerablemente de los estudiados y reportados en las investigaciones precedentes. Por los aspectos antes mencionados se requiere analizar *los trabajos precedentes referidos al secado solar*.

Respecto a esta temática se han publicado numerosos trabajos en diferentes regiones del mundo, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada los mismos están dirigidos principalmente al secado solar de productos alimenticios y la madera.

Curioni (2000), estudia la producción de especias aromáticas y la factibilidad técnica y económica para el empleo de un secador solar indirecto por convección forzada en el procesado de las siguientes especies: Menta inglesa, Romero, Tomillo, Albahaca, Orégano y Menta japonesa. Estos autores aprovechan la experiencia existente sobre un secadero desarrollado por el Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) destinado al secado de Pimiento en la provincia de Salta, Argentina. Obtienen resultados que permiten concluir que es factible en principio, secar estas especies empleando energía solar con un mínimo costo por kilogramo producido, usando una tecnología simple y de impacto ambiental mínimo.

Chiappero (2001), presenta el cálculo y la simulación de un silo secador de granos elevado de base cónica de 150 toneladas. En el trabajo los autores efectúan la simulación numérica de la distribución de presiones y de las velocidades intragranulares para trigo a través del método de elementos finitos. Para ello emplean el programa ALGOR (Versión 13.06-WIN, 2001). Del análisis de los resultados se observa que la distribución de presiones y velocidades son adecuadas para el secado de diferentes tipos de granos a baja temperatura en sistemas de silos a escalas intermedias. El secado se realiza por el precalentamiento del aire a través de un banco de colectores solares de diseño simple. Realizan además el cálculo de la superficie de los colectores solares para lograr el incremento de la temperatura del aire necesario para el secado de soya.

Berruta (2004), propone una solución tecnológica al problema del secado de café en los estados de Chiapas y Oaxaca en México. Para realizar este proyecto los autores realizan una revisión de experiencias de secado de otros productos agropecuarios identificando similitudes

respecto al secado de café, dando paso al diseño de un secador solar de café con el piso de madera y construcción similar a la de un invernadero con orientación según el movimiento del sol en la época de cosecha de café para un mayor aprovechamiento de la energía solar.

Al secado solar de productos en Cuba se han dedicado varias investigaciones entre las que se destacan las desarrolladas por Todd (2001), que detalla un programa para la inversión en el secado de madera donde cita dos procesos de secado comparando cada uno de ellos con las diferentes ventajas y desventajas que estos presentan. Este análisis facilita la toma de decisiones respecto a la aplicación práctica del proceso y provee a los investigadores de las herramientas necesarias para el estudio de factibilidad.

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; Bérriz, 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. Estos equipos pueden ser utilizados en el secado solar del mineral laterítico a escala de laboratorio debido a la alta eficiencia que presentan y su fácil construcción.

De las investigaciones desarrolladas en el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES) en la ciudad de Santiago de Cuba se puede destacar el trabajo para la implementación de un secador de granos tipo tambor (Torres et al., 2001), en este se establece una alternativa del secado solar para la disminución del tiempo de secado y la protección del producto de las condiciones climatológicas. En el CIES fue construido el secador solar de tambor rotatorio para granos del que se realiza un análisis térmico a partir de calcular los coeficientes de transferencia de calor en diferentes partes del equipo. El resultado del análisis muestra una distribución favorable de las áreas de captación y de pérdidas, por lo que es posible pronosticar un buen funcionamiento térmico en el secado de granos para las condiciones de diseño.

Otra investigación importante en este centro es la efectuada por Pereira (1992), donde se establece un modelo matemático para el desarrollo de los secadores solares con chimenea. Demuestra que constituye un sistema cerrado de ecuaciones diferenciales, no lineales de primer orden, que se pueden resolver numéricamente mediante el método de Runge-Kutta.

Griñán et al. (2003), exponen aspectos técnicos y metodológicos del secado los cuales fueron elaborados a partir de revisiones bibliográficas, observaciones y experiencias de los autores obtenidas durante reiteradas prácticas de secado en el secador solar de madera de 12m³ construido en el mencionado centro. También se presentan algunos conceptos básicos

obtenidos sobre la conservación de la calidad de la madera. Se expone una metodología que permite el entendimiento y aplicación de la tecnología solar para el secado de madera y otros de características similares.

Relacionado con el secado de mineral en la industria del níquel Miranda (1996), destaca la aplicación del método de reflexión neutrónica, para determinar la humedad de las distintas menas de los yacimientos lateríticos arrojando divergencias significativas respecto al método tradicional de diferencias de pesadas, por este motivo realizó análisis termogravimétricos, los cuales revelaron la existencias de fenómenos de descomposición de fases de minerales que no habían tenido tratamiento térmico previo. Los resultados de los análisis demostraron la efectividad del método de reflexión neutrónica sobre el método tradicional y se demostró, además, que el proceso de secado en los hornos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” es excesivo y desvirtúa la interpretación del balance de masa entre la mina y el taller de preparación de mineral.

En Cuba se han desarrollado algunas investigaciones relacionadas con el secado solar del mineral laterítico con resultados satisfactorios. Dentro de ellas se puede destacar la realizada por Estenoz et al. (2003a), que muestra una valoración socio-económica del secado solar y de la homogenización en la explotación de minerales lateríticos en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Para ello realizan la inserción de las operaciones del secado solar y la homogenización dentro del sistema de preparación integral del mineral, agrupando por módulos las diferentes operaciones. Diseñan una forma de apilar, remover y recoger las pilas de acuerdo a las condiciones del microclima de la región. Realizan los estudios de evaluación de la viabilidad económica del secado solar en la región de Moa y la comparan con las condiciones naturales respecto a Tocantins en Brasil y Río Tuba en Filipinas, resultando que el secado solar en Moa tiene mayor potencial energético que las dos regiones antes mencionadas. Con los estudios estadísticos y modelos computarizados se analizó el tiempo de secado, el número de hileras y pilas, sus dimensiones y volúmenes, la disposición en el terreno, los horarios y frecuencia para la remoción de las capas de material seco y otros parámetros de productividad y equipamiento. Estos estudios arrojaron conclusiones alentadoras entre las cuales se destacan que la aplicación en la empresa del secado solar generaría ahorros entre 14 y 17 millones de dólares anuales y unos 10 millones por el procesamiento de mineral homogenizado a más de 90 grados y que con el secado a la intemperie del mineral en los depósitos mineros de la fábrica se puede disminuir hasta el 24% la humedad inicial del mineral.

Estenoz et al. (2003b), realizan el diseño de una instalación de secado multipropósito la misma tiene diferentes funciones y objetivos, ya que debe comprender todo los aspectos que actualmente no se garantizan en la calidad de las menas abastecidas a los procesos fabriles. La instalación diseñada tiene varios aspectos novedosos: debe mantener la sucesión y sincronización en el uso de una instalación diseñada para un sistema compuesto de almacenado, clasificación, homogeneización, secado y estabilización de los flujos mínimos necesarios de los materiales iniciales para el abasto a la industria, de una mezcla homogénea durante un determinado período de tiempo, en el cual se permita la adecuación y ajuste de las operaciones industriales necesarias para racionalizar el aprovechamiento del material resultante y así aumentar las ganancias específicas de la producción y la reducción del impacto ambiental de la minería y la metalurgia.

Como se puede apreciar existe una amplia variedad en cuanto a las publicaciones relacionadas con el secado de materiales sólidos. En los trabajos consultados se estudian diferentes aspectos del proceso. Del análisis de estos se derivan las siguientes **conclusiones**:

- **Las expresiones empíricas-teóricas obtenidas por los diferentes autores aunque reflejan el comportamiento físico de los procesos de secado, las mismas no pueden ser empleadas para la descripción de la cinética del secado para el mineral laterítico. En general las mismas se obtienen bajo parámetros controlados.**
- **Los resultados obtenidos en el estudio del secado solar a la intemperie para materiales sólidos no pueden ser generalizados al mineral laterítico debido a que el mismo tiene diferentes propiedades termofísicas y la región de Moa muestra un microclima que difiere del que presentan otras regiones del mundo donde se ha experimentado el proceso.**
- **Se evidencian pocos estudios experimentales dedicados al secado solar del mineral laterítico en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, los más pertinentes están relacionados con la homogenización y no con la regularidades de los procesos de transferencia de calor presentes en el secado.**

1.4- Clasificación de los sólidos húmedos objeto de secado

Según Lykov (1968) estos se clasifican en tres grandes grupos de acuerdo con sus propiedades físicas coloidales. Se distinguen así los **cuerpos coloidales**, los cuales al ser secados cambian apreciablemente sus dimensiones, aunque conservan sus propiedades elásticas. Es de este tipo de coloides la Gelatina.

Los **cuerpos capilaroporosos** se tornan frágiles, poco compresibles y pueden reducirse a polvo cuando son secados. Son materiales de este tipo el carbón vegetal y la arena de cuarzo.

Los **cuerpos coloidales capilaroporosos** tienen capilares y pueden absorber cualquier líquido que los moje, independientemente de su composición química. Pertenecen a esta categoría la mayoría de los materiales que se someten al secado: turba, aserrín, bagazo, cartón, cereales, café y otros.

En dependencia del tamaño de sus poros los materiales del segundo y tercer grupo pueden clasificarse en subgrupos: macrocapilaroporosos (no tienen microporos, ni poros de tamaño intermedio, su radio es mayor que 10^{-7} m) y microcapilaroporosos (no tienen macroporos, su radio es menor que 10^{-7} m). Aunque los materiales reales tienen frecuentemente una estructura combinada, **el mineral laterítico objeto de secado se clasifica como un material macrocapilaroporoso.**

1.4.1- Formas de enlace de la humedad con el material

El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material: cuanto más sólido es dicho enlace, tanto más difícil transcurre el secado. Durante el proceso el enlace de la humedad con el material se altera.

La clasificación más completa de las diferentes formas de ligarse la humedad con el material es la ofrecida por Kasatkin (1987) la misma está basada en los estudios de la intensidad de la energía de enlace desarrollados por Rebinder (1979). De acuerdo con ésta, existen tres tipos de humedad: de enlace químico, físico-químico y físico-mecánico. A este trabajo ofrece particular interés el último tipo de enlace.

La humedad ligada químicamente es la que se une con mayor solidez al material en determinadas proporciones y puede eliminarse sólo calentando el material hasta altas temperaturas o como resultado de una reacción química. La misma no puede ser eliminada del material por secado con regímenes de temperatura inferior a los 120°C.

Durante el secado se elimina, como regla, sólo la humedad enlazada con el material en forma físico-química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en: humedad de los macrocapilares y microcapilares (capilares con el radio

medio mayor y menor de 10^{-7} m respectivamente). Los macrocapilares se llenan de humedad durante el contacto directo de ésta con el material, mientras que en los microcapilares la humedad penetra tanto por contacto directo, como por la adsorción de la misma en el sólido. La humedad de los macrocapilares se elimina con facilidad no sólo por secado térmico, sino también empleando métodos mecánicos.

El enlace físico-químico une dos tipos de humedad que difieren por la solidez del enlace con el material: la humedad ligada osmóticamente y por adsorción. La primera llamada también humedad de hinchamiento, se encuentra dentro de las células del material y se retiene por las fuerzas osmóticas. La segunda se retiene sólidamente sobre la superficie y en los poros del material. La humedad de adsorción requiere para su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento. La existencia de estos tipos de humedad especialmente se manifiesta en poliméricos. Fundamentalmente la humedad contenida en los sólidos no es de carácter físico-químico, y por eso su extracción durante el proceso de secado exige un consumo de energía igual al calor de evaporación.

Con el secado solar del mineral se reduce sólo la humedad enlazada con el material de forma físico-mecánica. Esto se debe a que en el proceso no se puede eliminar completamente esta humedad en el material debido a que se trabaja con un rango de temperatura bajo que oscila entre 12 y 36 °C aproximadamente.

1.4.2- Mecanismos de secado. Transferencia de calor y masa

Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa. Para esto es necesario conocer los elementos más importantes de la transferencia de calor y masa que funcionan en el secado por contacto directo.

Según Madariaga (1995), el intercambio de calor y masa depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a las externas.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y masa de la capa límite del gas y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido, sino de las condiciones del gas y estará controlado por la transferencia de calor y masa entre el medio ambiente y la superficie del sólido, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del sol, la cual se comporta como una superficie libre de agua.

Las condiciones internas están definidas por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del ambiente, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante serán las propiedades del sólido.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido. Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior (Treybal, 1985; Perry, 1985; Menon et al., 1992).

En el secado por convección el sólido húmedo se pone en contacto con un gas caliente y 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 transporta al vapor de agua desprendido (Kern, 1969; Isachenko et al., 1979; Boizán, 1991).

En el secado por conducción el producto a secar se encuentra en recipientes calentados o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido. En el secado por radiación el calor se transmite por las superficies radiantes mediante ondas electromagnéticas (Perry, 1979; Incropera et al., 2003).

1.4.3- Movimiento de la humedad dentro del mineral laterítico

Cuando se produce la evaporación superficial, debe haber una migración de la humedad desde las profundidades del sólido hacia la superficie. En el mineral laterítico este desplazamiento se denomina movimiento capilar, que es cuando la humedad no límite en sólidos granulares y porosos tales como arcillas, pigmentos de pinturas y otros semejantes, se traslada a través de capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo que implica tensión superficial.

Los capilares se extienden desde pequeños receptáculos de humedad dentro del sólido hasta la superficie de secado. A medida que se desarrolla el secado, al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado. Los regímenes de temperatura satisfactorios para eliminar los diferentes tipos de humedades pueden ser determinados mediante el análisis térmico diferencial del material.

1.5- Aspectos fundamentales sobre el secado solar natural

El secado natural aplicado al mineral laterítico hasta la actualidad se realiza a la intemperie en la mina de la empresa y en la planta de preparación de mineral. Para su total comprensión es necesario establecer los parámetros más influyentes en el secado solar.

De acuerdo con el análisis empírico teórico realizado al proceso, la experiencia acumulada por los obreros de la planta de preparación de mineral y con el estudio de 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
- Temperatura del medio ambiente
- Humedad relativa
- Intensidad de la radiación solar
- Velocidad del viento y dirección predominante
- Temperatura del punto de rocío
- Precipitaciones
- Masa de mineral a secar
- Propiedades físicas del mineral
- Superficie de contacto
- Superficie horizontal disponible
- Tiempo de secado

Ventajas del secado natural del mineral

- Más económico
- Reduce los gastos energéticos durante el secado térmico en los hornos rotatorios
- Mitiga la contaminación del medioambiente por emanaciones de gases

Desventajas

- Lento
- Necesidad de superficie disponible
- Dependencia del clima
- Grandes volúmenes de minerales retenidos

Características que debe cumplir el patio para el secado solar

- **Piso nivelado:** permite el secado uniforme del mineral y evita la formación de concentraciones de agua dentro del patio, durante el drenaje y escurrimiento de abundantes lluvias.
- **Drenaje:** debe ser eficiente, capaz de evacuar el agua en caso de lluvias, de lo contrario el secado será no uniforme y el mineral entrará con un elevado contenido de humedad al horno.

- **Lejanía del agua y de los árboles:** el agua cerca aumenta la humedad relativa del entorno e influye en la humedad del material, los árboles contribuyen a la conservación de la humedad del entorno y refrescan la masa de aire caliente que circula en el patio.
- **Elevación:** evita las inundaciones en caso de lluvia e impide el bloqueo del viento.

A pesar de que estas características están presentes en el patio de secado solar empleado en la mina del yacimiento perteneciente a la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", es importante establecer las características geográficas de la zona donde está ubicado el yacimiento. Esto permitirá conocer cuales son las posibilidades reales que existen para la implementación práctica del proceso estudiado.

1.6- Características geográficas del yacimiento Punta Gorda

Ubicación geográfica

Está ubicado en la porción noroeste de la provincia Holguín (anexo; figura 1), comprendido dentro de los límites del Macizo Montañoso Moa-Baracoa y como límites naturales tiene: al norte el río Moa y el Océano Atlántico, al suroeste el río Yagrumaje y al oeste el arroyo Los Lirios.

Clima

Es tropical, debido a la posición geográfica y las pantallas que forman las montañas, esta zona se caracteriza por tener un microclima, con una distribución estacional de las precipitaciones irregular determinada por una significativa disminución de las mismas dentro del período lluvioso y una tendencia general a la ocurrencia de láminas máximas al final del mismo. Presenta dos máximos uno principal en octubre-noviembre y otro secundario en mayo-junio, de igual manera, presenta dos mínimos, el principal en febrero-marzo y el secundario en julio-agosto. La cantidad de días al año con lluvias mayor que 1 mm es superior a 100 y el promedio anual de precipitaciones alcanza los 2000 mm, la evaporación es cercana a los 1600 mm. La combinación de la máxima evaporación con el mínimo de precipitaciones en el verano y el mínimo de evaporación con el máximo de precipitaciones en el invierno producen un resecamiento intenso en el verano y un exceso de humedad en el invierno.

Temperatura

Según el Atlas de Cuba (1978), la temperatura media anual de 27 °C; en verano fluctúa entre 30 y 32 °C, con máximas entre 34 y 36 °C y en invierno entre 14 y 26 °C con mínimas alrededor de los 12 °C .

Insolación

Es prácticamente constante todo el año, siendo la frecuencia de días despejados en el período seco de 60 días/año y la insolación anual es mayor que 2 900 horas luz/año, la radiación global media anual es de 17 MJ/m² (suma diaria).

Humedad relativa

La media anual para las 7:30 horas es de 85 - 90 % y para las 13:00 horas está entre 70 - 75 %.

Régimen eólico

El sistema local de vientos refleja la ocurrencia mayoritaria de los vientos Alisios reforzados por las brisas marinas y contrarrestados por el terral. Estos vientos soplan sobre la zona oriental procedentes del NE en los meses de octubre-enero; del ENE, durante febrero- mayo; y del Este, en junio-septiembre.

La velocidad promedio de la brisa es en general de 5-15 km/h y mantiene una frecuencia de 180 días al año. Se puede afirmar que el viento reinante en la zona es la combinación Alisios-brisa marina con una frecuencia mayor que el 64 %. Generalmente el viento reinante es el de mayor velocidad promedio anual, que en la zona es de 3,9-4,4 m/s. El total de días con calmas presenta un promedio anual de 41 días.

Las características ante expuestas indican que existen 8 meses del año donde las precipitaciones son moderadas. En este período se destacan los meses de verano donde existe una marcada disminución de las mismas, lo que conjugado con los regímenes de temperatura e insolación provoca la máxima evaporación de la humedad contenida en el aire y favorece la transferencia de calor entre el Sol y el mineral. También el proceso de intercambio de calor y masa en el secado solar se intensifica debido a la velocidad del viento que genera la transferencia de calor y masa por convección forzada entre el mineral y el aire circundante.

1.6- Conclusiones del capítulo I

- Se estableció el estado de arte sobre la temática abordada en la investigación y los fundamentos técnicos necesarios para el establecimiento del procedimiento de cálculo para la determinación de la cinética del secado para el objeto de estudio.
- Las características climatológicas históricas de la zona donde está ubicado el yacimiento y los trabajos experimentales realizados por los investigadores precedentes indican que es factible el desarrollo del secado solar del mineral laterítico en las condiciones objetivas de la empresa Ernesto Che Guevara.

CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO TEÓRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA HUMEDAD DURANTE EL SECADO SOLAR DEL MINERAL LATERÍTICO

2.1- Introducción

El establecimiento de sistemas de ecuaciones que permitan determinar las principales regularidades de los procesos industriales es muy importante, máxime si se trata de los procesos de secado que muestran gran complejidad, en los cuales la descripción a partir de ecuaciones teóricas resulta extremadamente difícil.

El secado solar de materiales a la intemperie es un ejemplo de estos procesos debido a los sistemáticos cambios que experimentan las variables fundamentales que lo caracterizan, esto dificulta predecir su comportamiento por vías analíticas puras por lo que es necesario acudir a los métodos empíricos o semi-empíricos, en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer el procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad del mineral laterítico durante el proceso de secado solar.

2.2- Métodos de diseños generales de la cinética del secado

El secado es un proceso de transferencia de masa típico no isotérmico. La influencia recíproca de los procesos de transferencia de masa y calor, así como la dependencia de las características físicas, térmicas y cinéticas de los potenciales del transporte, hacen muy difícil su descripción matemática, y es necesario emplear modelos matemáticos simplificados. Algunos investigadores (Lykov, et al., 1963; Lykov, 1968) reportan diferentes métodos aproximados de diseño basados en el uso de expresiones empíricas de la curva de secado. No obstante, el desarrollo actual alcanzado en la teoría de la transferencia de calor y masa ha favorecido la introducción de métodos de diseño generales de la cinética del secado basado en principios analíticos.

Los métodos analíticos de diseño de proceso de secado según Krasnikov (1973) y Guinsburg (1973) se pueden clasificar en dos grupos:

1. Métodos analíticos generales basados en el uso simultáneo de las leyes de transferencia de calor y masa.
2. Métodos analíticos particulares apoyados en los modelos físicos de una de las formas de transferencia.

A este trabajo le ofrece particular interés el primero el cual es un método analítico general porque no se fundamenta con expresiones empíricas de la cinética del secado y calentamiento de las partículas, sino en las leyes de la transferencia de calor y masa. Se puede aplicar cuando se conocen tanto las peculiaridades de la transferencia de calor como las de masa del sistema objeto de cálculo. Aquí, se considera despreciable la termodifusión o se utilizan coeficientes de transferencia de masa generalizados (Krisher, 1961), y la cinética del secado se calcula dándole solución aproximada al sistema de ecuaciones diferenciales.

2.3- Procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de humedad en el secado solar del mineral laterítico

Según Cabrera y Gandón (1983) para determinar el tiempo de secado de un material debe considerarse el régimen de secado, el cual es por definición:

$$N = -\frac{Ls}{A} \frac{du}{dt} \quad (2.1)$$

Donde:

N : régimen de secado; ($\text{kg}_h / \text{h m}^2$).

Ls : masa del sólido seco; (kg_{ss}).

A : superficie húmeda sobre la que sopla el aire y a través de la cual se lleva a cabo la evaporación; (m^2).

$-\frac{du}{dt}$: variación de la humedad del sólido en el tiempo; ($\text{kg}_h / \text{h kg}_{ss}$).

Periodo de velocidad de secado constante

En este periodo el régimen de secado (N_c) es igual a N por tanto es aplicable la ecuación 2.1 para cualquier sólido cuyo proceso de secado transcurra completamente dentro del periodo de velocidad de secado constante, luego:

$$N = N_c = -\frac{Ls}{A} \frac{du}{dt} \quad (2.2)$$

2.3.1- Aplicaciones de las ecuaciones generales al secado solar del mineral laterítico

En la figura 2.1b se muestra un esquema estructural del secado solar del mineral laterítico, donde se reflejan los calores que intervienen en el proceso, del análisis de la referida figura se puede establecer la ecuación para el balance de energía (expresión 2.3), considerando que no existe generación de energía interna.

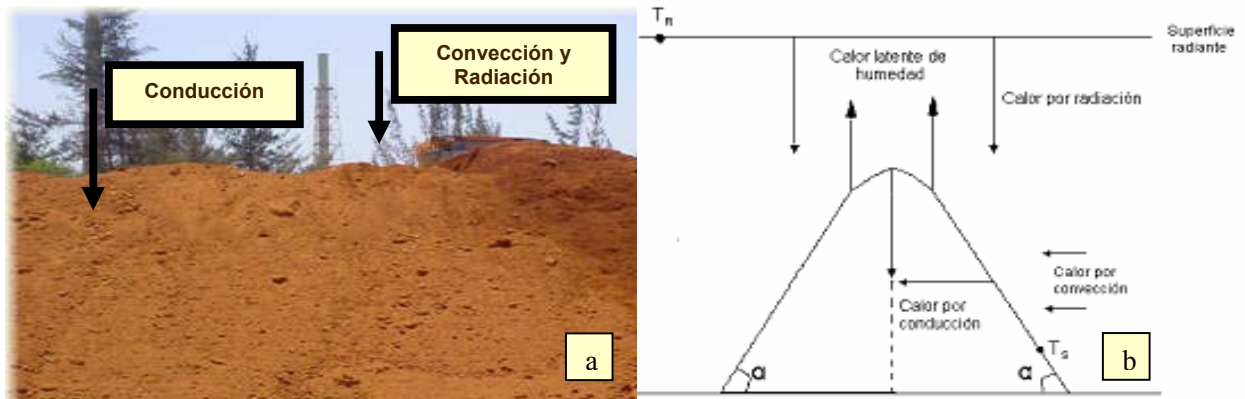


Figura 2.1. Proceso de secado solar. a- Interacción de los factores, b- esquema estructural.

$$\sum Q_{Entran} = \sum Q_{Salen} \quad (2.3)$$

Los términos representados en la ecuación 2.3 se refieren a los calores que entran y salen de la superficie de secado respectivamente (expresados en W/m^2). Al particularizar la ecuación general del balance térmico al caso de estudio, despreciando el calor necesario para sobrecalentar la humedad evaporada a la temperatura del aire la misma puede ser escrita de la forma siguiente:

$$Q_{Conv} + Q_{Rad} = Nc \cdot \lambda + Q_{Cond} \quad (2.4)$$

Donde:

Q_{Conv} : calor por convección natural que intercambian la corriente de aire y el sólido; (W/m^2).

Q_{Rad} : calor por radiación solar desde la superficie radiante; (W/m^2).

Q_{Cond} : calor por conducción a través del sólido; (W/m^2).

$Nc \cdot \lambda$: calor latente de humedad; (W/m^2).

λ : calor latente de vaporización del agua; (kJ/kg)

Luego el régimen de evaporación (de secado) Nc y el régimen del flujo calórico se relacionan por la expresión 2.5.

$$Q_{Conv} + Q_{Rad} - Q_{Cond} = Nc \cdot \lambda \quad (2.5)$$

Las ecuaciones particulares para la determinación de los calores que intervienen en el miembro izquierdo de la expresión 2.5 se relacionan a continuación:

$$Q_{Conv} = \bar{h}a \cdot (Ta - Ts) \quad (2.6)$$

$$Q_{Rad} = \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Ts^4) = hr \cdot (Tr - Ts) \quad (2.7)$$

Siendo

$$hr = \frac{\varepsilon_m \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Ts^4)}{Tr - Ts} \quad (2.8)$$

Donde:

$\bar{h}a$: coeficiente de transferencia de calor por convección del aire; (W/m² K).

Ta : temperatura del aire; (K).

Ts : temperatura de la superficie de secado, en este caso la del mineral laterítico; (K).

ε_m : emisividad del mineral laterítico; (adimensional).

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

Tr : temperatura radiante; (K).

hr : coeficiente de transferencia de calor por radiación; (W/m² K).

El calor que se transfiere por conducción (Q_{Cond}) desde la superficie de secado hacia el interior del sólido debe calcularse para las tres direcciones en que se propaga a partir del empleo de la Ley de Fourier generalizada:

$$Q_{Cond(n)} = -K \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.9)$$

Donde:

n : dirección del flujo (x, y, z).

K : coeficiente de conductividad térmica del mineral; (W/m K).

$\frac{\partial T}{\partial n}$: gradiente de temperatura en la dirección analizada; (K/m).

Al sustituir las expresiones (2.6; 2.7 y 2.9) que caracterizan a los diferentes calores que intervienen en el secado solar del mineral laterítico en la ecuación de balance (2.5), resulta:

$$\bar{h}a \cdot (Ta - Ts) + \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Ts^4) - K \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = Nc \cdot \lambda \quad (2.10)$$

En la ecuación 2.10 no se considera el signo negativo del calor por conducción porque él solo significa que el flujo de calor se propaga en el sentido decreciente de la temperatura. Luego al sustituir la expresión 2.2, la ecuación 2.10 queda de la forma siguiente:

$$\bar{h}a \cdot (Ta - Ts) + \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Ts^4) - K \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{Ls}{A} \frac{du}{dt} \cdot \lambda \quad (2.11)$$

Luego de algunas transformaciones se obtiene:

$$-\frac{du}{dt} = \frac{A \cdot \left[\bar{h}a \cdot (Ta - Ts) + \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Ts^4) - K \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \right]}{Ls \cdot \lambda} \quad (2.12)$$

Periodo de caída del régimen o de velocidad de secado decreciente

Aunque existen al menos dos formas de determinar el régimen de secado en este periodo, una de las más prácticas empleadas por diferentes investigadores (Treybal, 1985) es la que considera en comportamiento de la curva de secado como una línea recta según la ecuación 2.13:

$$N_D = m \cdot (u - u^*) = \frac{Nc \cdot (u - u^*)}{u_c - u^*} \quad (2.13)$$

Donde:

m : pendiente de la porción lineal de la curva; (adimensional).

u : contenido de humedad; (kg_n/kg_{ss}).

u^* : humedad de equilibrio; (kg_n/kg_{ss}).

u_c : humedad final del régimen constante; (kg_n/kg_{ss}).

En estas condiciones son aplicables las ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.9 que al combinarlas con la expresión 2.13 se obtiene:

$$-\frac{du}{dt} = \frac{A \cdot (u - u^*) \cdot \left[\bar{h}a \cdot (Ta - Ts) + \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Ts^4) - K \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \right]}{Ls \cdot \lambda \cdot (u_c - u^*)} \quad (2.14)$$

Las ecuaciones 2.12 y 2.14 permiten calcular la variación de humedad durante el secado solar del mineral laterítico para los periodos de velocidad de secado constante y decreciente respectivamente, sin embargo en las referidas ecuaciones existen diferentes parámetros que deben ser obtenidos a partir del análisis de los diferentes modos de transferencia de calor presente en el proceso de secado objeto de estudio.

2.3.2- Análisis general de los diferentes modos de transferencia de calor

En el secado solar están presentes los tres modos de transmisión de calor (convección, radiación y conducción), su interrelación es muy compleja, pero para lograr una mejor comprensión de la influencia que tienen en el proceso estudiado a continuación se analizan cada uno de forma independiente.

➤ Transferencia de calor por convección

Debido a que el secado solar del mineral laterítico se desarrolla a la intemperie donde el material recibe el calor por convección que le transfiere el aire en condiciones atmosféricas, en estas circunstancias se considera que el intercambio de calor se desarrolla por convección libre o natural (que es el movimiento del aire provocado por la diferencia de densidad), de acuerdo con estos criterios el número de Nusselt promedio ($\overline{Nu}_L$) para una superficie inclinada ($0 \leq \theta \leq 60^\circ$) y un número entero de Rayleigh (Ra_L), Churchill y Chu (1975) recomiendan la ecuación 2.15.

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(0,492 / Pr \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.15)$$

Estos mismos autores (Churchill y Chu, 1975) recomiendan utilizar la ecuación 2.16 para $Ra_L \leq 10^9$, en estas condiciones se obtiene una mayor exactitud en la determinación del número de Nusselt promedio.

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(0,492 / Pr \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad (2.16)$$

Donde:

Pr: número de Prandtl; (adimensional).

El número de Rayleigh (Ra) se determina según Rich (1953) por la expresión siguiente:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g \cdot \cos \theta \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (2.17)$$

Donde:

Gr_L : número de Grashof; (adimensional).

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

θ : ángulo de inclinación de la superficie de secado; (grados).

β_a : coeficiente de dilatación volumétrica del aire; (K⁻¹).

L : longitud de la superficie de secado; (m).

ν : coeficiente cinemática de viscosidad; (m²/s).

α : coeficiente de difusividad térmica; (m²/s).

Los coeficientes de dilatación volumétrica y difusividad térmica del aire se calculan por las expresiones 2.18 y 2.19:

$$\beta_a = \frac{1}{T_a} \quad (2.18)$$

$$\alpha = \frac{k_{aire}}{\rho_{aire} \cdot Cp_{aire}} \quad (2.19)$$

Donde:

k_{aire} : coeficiente de conductividad térmica del aire; (W/m K).

ρ_{aire} : densidad del aire; (kg/m³).

Cp_{aire} : calor específico a presión constante; (kJ/kg K).

Luego de seleccionar la expresión empírica más adecuada (entre 2.15 y 2.16) para la determinación del número de Nusselt promedio, se combina la expresión 2.20 con la seleccionada y se determina el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio del aire a la superficie de secado ($\bar{h}_a$); ecuación 2.21.

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}a \cdot L}{k_{aire}} \quad (2.20)$$

Siendo:

$$\overline{h}a = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k_{aire}}{L} \quad (2.21)$$

Una vez calculado el $\overline{h}a$, el calor por convección natural que intercambian la corriente de aire y el mineral sometido al secado se determina a través de la ecuación 2.6, conociendo la temperatura del aire y de la superficie de secado, las cuales pueden ser determinadas experimentalmente.

➤ Transferencia de calor por radiación

Para determinar el flujo de calor neto que recibe el mineral por radiación (en caso que no se conozca la temperatura radiante contenida en la ecuación 2.7) se debe aplicar la ecuación de balance de energía en la superficie de secado en correspondencia con el esquema mostrado en la figura 2.2.

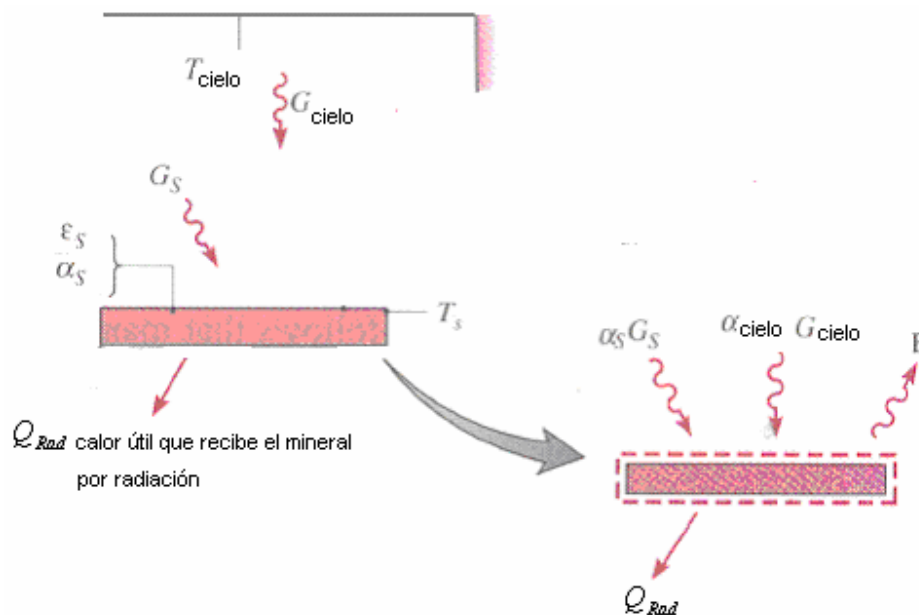


Figura 2.2. Esquema estructural para el intercambio de calor por radiación entre el mineral y los alrededores.

$$\alpha_s \cdot G_{solar} + \alpha_{cielo} \cdot G_{atm} - E = Q_{Rad} \quad (2.22)$$

Donde:

α_s : absorptividad del mineral; (adimensional)

G_{solar} : irradiación solar; (W/m^2).

α_{cielo} : absorptividad del cielo; (adimensional)

G_{atm} : irradiación de la tierra debido a la emisión atmosférica; (W/m^2).

E : potencia emisiva; (W/m^2).

La distribución espectral de radiación solar es significativamente diferente a partir de la asociada con la emisión para superficies ingenieriles. Como se muestra en la figura 2.3 esta distribución se aproxima a la del cuerpo negro a $5800K$. La radiación se concentra en la región de baja longitudes de onda ($0,2 \leq \lambda \leq 3\mu m$) del spectrum térmico, con el tope ocurriendo en aproximadamente $0,50\mu m$. (Duffey y Beckman, 1974; Meinel, 1976).

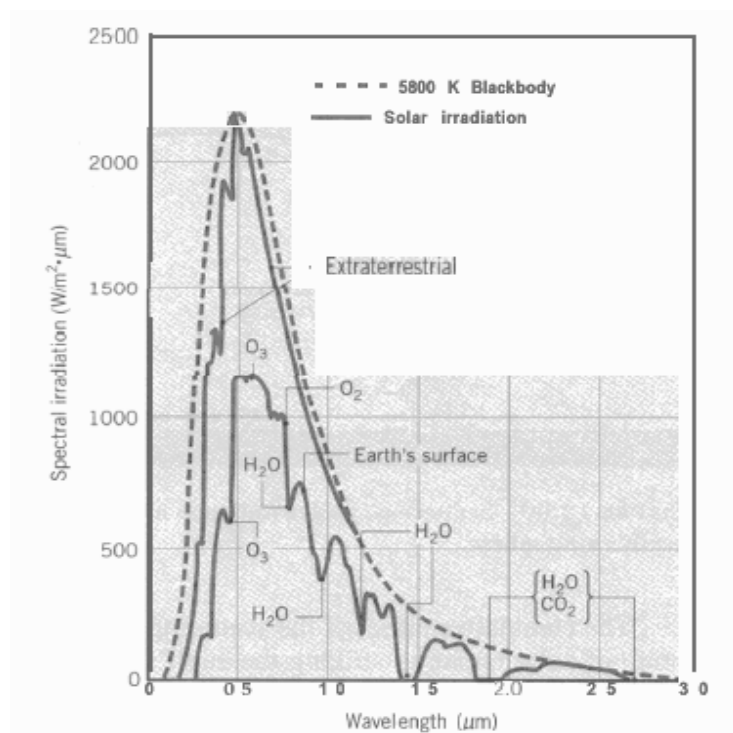


Figura 2.3. Distribución espectral de la radiación solar.

Fuente: Incropera et al., 2003.

La irradiación solar puede ser calculada con el empleo del gráfico mostrado en la figura 2.3, para cualquier valor de longitud de onda por la ecuación (2.23) propuesta por Sayigh (1977).

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.23)$$

Donde:

G_{λ} : irradiación espectral; ($\text{W}/\text{m}^2\mu\text{m}$)

λ : longitud de onda; (μm).

Al aplicarla a la radiación solar, la ecuación anterior (2.23) se transforma de la siguiente forma:

$$G_{\text{solar}} = \int_{0,2}^3 G_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.24)$$

La irradiación de la tierra debido a la emisión atmosférica se puede expresar según Anderson (1982) de la forma siguiente:

$$G_{\text{atm}} = \sigma \cdot T_{\text{cielo}}^4 \quad (2.25)$$

Donde:

T_{cielo} : temperatura efectiva del cielo; (K).

Su valor depende de las condiciones atmosférica, variando desde 230K para un día frío hasta 285K aproximadamente para un día caluroso (Howell et al., 1982).

La potencia emisiva asociada a la superficie de la tierra puede ser calculada por la ecuación siguiente:

$$E = \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.26)$$

Donde:

ε_m : emisividad del mineral laterítico; (adimensional).

T_s : temperatura de la superficie de secado; (K).

➤ Transferencia de calor por conducción

En el secado solar del mineral laterítico la superficie de secado recibe calor por convección y radiación, una parte del calor que recibe se emplea en reducir la humedad y el resto en variar la energía interna del material mientras aumenta su temperatura. Este cambio de energía interna se produce mediante la conducción del calor en estado no-estacionario en tres direcciones (3D).

Para el análisis de la conducción en estado no-estacionario en 3D se considera un volumen de control de lados dx , dy , dz según las direcciones de los ejes x , y , z , la ecuación de balance térmico aplicando la Primera ley de la Termodinámica a la Figura 2.4 es la ecuación 2.27.

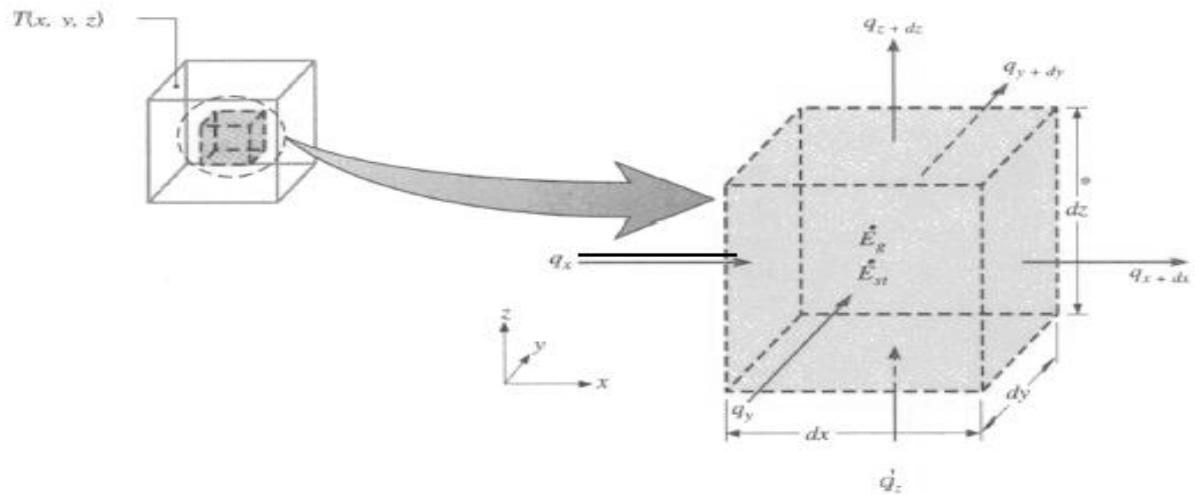


Figura 2.4. Volumen de control diferencial, dx , dy , dz , para el análisis de la conducción en coordenadas cartesianas.

Fuente: Incropera et al., 2003.

Según la primera ley de la termodinámica

$$E_e + E_g - E_s = E_a \quad (2.27)$$

Donde:

E_e : energía que entra al sistema; (W).

E_g : energía generada dentro del sistema; (W).

E_s : energía que sale; (W).

E_a : energía almacenada; (W).

Como en el proceso estudiado no existe generación de energía interna, el término $E_g = 0$, por tanto no se considera en los posteriores análisis.

La energía almacenada se calcula por la ecuación 2.28.

$$E a = \rho \cdot C p_m \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.28)$$

Donde:

$\frac{\partial T}{\partial \tau}$: variación de la temperatura en el tiempo; (K/s).

$\rho \cdot C p_m \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$: variación de la energía interna del medio por unidad de volumen; (W/m³)

ρ_m : densidad del mineral laterítico; (kg/m³).

$C p_m$: calor específico a presión constante del mineral laterítico; (kJ/kg K)

La energía que entra al sistema en la dirección x, y, z, es:

$$q_x = -k_{m(x)} \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \quad (2.29)$$

$$q_y = -k_{m(y)} \cdot dx \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot dy \quad (2.30)$$

$$q_z = -k_{m(z)} \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot dz \quad (2.31)$$

Donde:

k_m : coeficiente de conductividad térmica del mineral laterítico; (W/m K).

Los subíndices x, y, z se refieren a la dirección considerada.

La energía que sale del sistema en la dirección x, y, z, se expresa por:

$$q_x + dx = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot dx \quad (2.32)$$

$$q_y + dy = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} \cdot dy \quad (2.33)$$

$$q_z + dz = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} \cdot dz \quad (2.34)$$

Sustituyendo las expresiones (2.28-2.34) en la ecuación 2.27 y luego de algunas transformaciones se obtiene la ecuación de difusión del calor (2.35) que proporciona las herramientas básicas para el análisis de la conducción del calor en 3D para un sólido cualquiera, de la solución a esta ecuación se puede obtener la distribución de la temperatura T(x, y, z) como una función del tiempo.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{m(x)} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{m(y)} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{m(z)} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \cdot Cp \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.35)$$

El término $\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{m(x)} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right)$ describe la conducción del flujo de calor neto en el volumen de control (en este caso en la dirección del eje x), el cual se representa como sigue.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{m(x)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = q_x - q_{x+dx} \quad (2.36)$$

En este trabajo se considera que el mineral laterítico es homogéneo e isótropo respecto a la temperatura y las direcciones en el volumen de control, además se considera despreciable la variación de la conductividad térmica del material (k_m), esta decisión estuvo sustentada en el informe expuesto por TUNRA (1998) donde se plantea que el mineral laterítico tiene baja conductividad térmica, en estas condiciones la ecuación 2.35 se transforma de la forma siguiente:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.37)$$

Para el proceso analizado solo se considera la conducción en 2D porque sobre el mineral incide uniformemente la radiación solar y la convección del aire. Por tales razones para los efectos de este trabajo se considera despreciable la conducción del calor en el sentido longitudinal de la pila de mineral (eje z) por tanto la ecuación 2.37 se reduce de la forma siguiente:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.38)$$

Para obtener la distribución de temperatura por vías analíticas puras se debe resolver la ecuación diferencial 2.38 haciendo uso de las condiciones de unicidad (Isachenko et al., 1979).

También se pueden aplicar una de las formas de las ecuaciones de la diferencia finita debido a que los métodos analíticos pueden ser usados en determinados casos para efectuar soluciones matemáticas exactas para problemas de conducción en estado no-estacionario en 2D y 3D (Poulikakos, 1994), no obstante muchos problemas implican geometrías y condiciones límites

que excluyen tales soluciones. En estos casos la mejor alternativa es el uso de técnicas numéricas tales como el método de elemento finito, diferencia finita o elemento limite.

Por el contrario a la solución analítica, la cual permite determinar la temperatura en cualquier punto de interés en el medio, la solución numérica facilita la determinación de la temperatura solo en los puntos discretos.

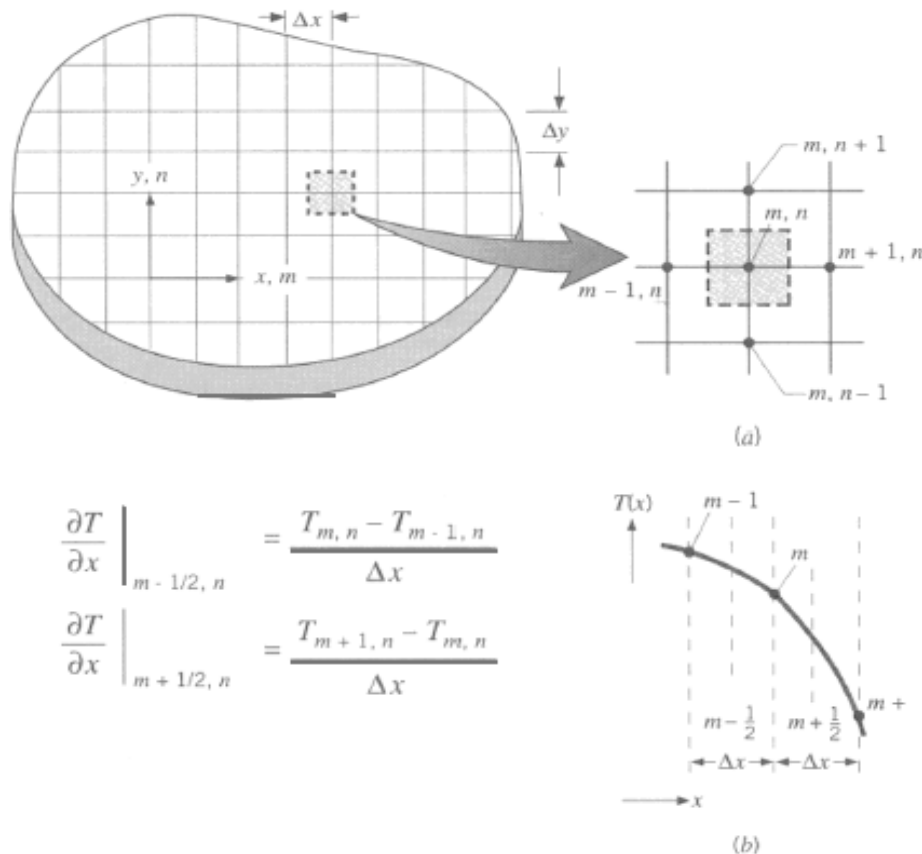


Figura 2.5. Conducción bi-dimensional. (a) Red Nodal. (b) Diferencia finita.

Fuente: Incropera et al., 2003.

Forma de la diferencia finita de la ecuación de conducción del calor

La determinación de la distribución numérica de la temperatura recomienda que una apropiada ecuación de conservación puede ser resuelta simultáneamente para la temperatura en cada nodo.

La ecuación de la diferencia finita considerando el mayado cuadrado ($\Delta x = \Delta y$) y la segunda derivada ($\partial^2 T / \partial x^2$) de la Figura 2.5b, el valor de esta derivada en el punto nodal (m, n) puede ser aproximada como:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+1/2,n} - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-1/2,n}}{\Delta x} \quad (2.39)$$

Los gradientes de temperatura pueden ser expresados como una función de las temperaturas nodales como se muestra:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+1/2,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (2.40)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-1/2,n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (2.41)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.40 y 2.41 en 2.39 se obtiene:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (2.42)$$

Procediendo de forma análoga en la dirección del eje y, se obtiene que:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n+1/2} - \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n-1/2}}{\Delta y} \approx \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \quad (2.43)$$

Integrando las ecuaciones 2.42 y 2.43 en 2.38, la ecuación resultante es:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{T_{m+1,n} - T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \quad (2.44)$$

La discretización de la ecuación del calor por el **Método Explícito** se obtiene a partir de considerar el parámetro p, el cual se calcula por la expresión 2.45

$$\tau = p \cdot \Delta \tau \quad (2.45)$$

La derivada del miembro derecho de la ecuación 2.38 se puede determinar como se muestra a continuación:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta \tau} \quad (2.46)$$

Luego la ecuación general para el análisis de la conducción del calor por el Método Explícito es:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta \tau} = \frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta y)^2} \quad (2.47)$$

Para el **Método Implícito** se evalúan todas las temperaturas en el nuevo (p+1) tiempo previo a p, la ecuación general resulta:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta \tau} = \frac{T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} - 2T_{m,n}^{p+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} - 2T_{m,n}^{p+1}}{(\Delta y)^2} \quad (2.48)$$

Luego para obtener la distribución de temperatura (para el mineral laterítico) por ambos métodos para las cuatro condiciones físicas que se pueden presentar se procede en correspondencia con las expresiones mostradas en el anexo 1, para ello se recomienda utilizar software de cálculo (MATLAB ó ANSYS) apropiado para este propósito.

Una vez que se obtienen las distribuciones de la temperatura en todas las direcciones en correspondencia con las expresiones expuestas en el anexo 1 se sustituye en las expresiones 2.12 y 2.14.

2.4- Conclusiones del capítulo II

- Quedó establecido el procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad del mineral laterítico respecto al tiempo. El mismo está basado en las leyes que rigen la transferencia de calor y masa durante el secado.
- Se comprobó que la solución de la ley de Fourier para la conducción del calor durante el secado solar del mineral laterítico puede ser resuelta por vías analíticas puras o haciendo uso de las ecuaciones de la diferencia finita a través de los métodos explícito e implícito.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

3.1- Introducción

El desarrollo de la industria minero metalúrgica en la región de Moa, es una muestra de todo lo agresiva que puede ser la actividad humana sobre el medio ambiente. Es por eso que se hace necesario el desarrollo de investigaciones para la explotación de la energía solar, eólica y otras fuentes naturales que cobran particular relevancia en el mundo actual, ya que son fuentes de energía limpias que posibilitan disminuir el impacto ambiental de las tradicionales, en tal sentido el **objetivo** de este capítulo es:

Analizar los resultados obtenidos, considerando el impacto económico y medioambiental asociado al secado solar del mineral laterítico.

3.2- Análisis de los resultados

El procedimiento de cálculo teórico expuesto en el capítulo precedente, una vez validado, permitirá la determinación de la variación de humedad durante el secado solar del mineral laterítico, esta posibilidad es muy importante para la toma de decisiones del personal administrativo de la empresa Ernesto Che Guevara respecto al proceso, por cuanto se podrá simular el comportamiento real del mismo sin tener la necesidad de someter al proceso de experimentación una cantidad de mineral determinado, lo cual en todos los casos genera gastos económicos.

Es importante señalar además que el referido procedimiento tiene un aporte metodológico ya que puede ser utilizado por los trabajadores de la planta para realizar cálculos previos y verificativos del proceso de secado solar y por los estudiantes de cuarto año de la especialidad de Ingeniería Mecánica como metodología de cálculo en la asignatura Transferencia de calor ya que en la actualidad las literaturas especializadas no abordan con claridad el procedimiento de cálculo a emplear cuando se secan materiales granulares y multicomponentes a la intemperie. Otro elemento importante a señalar es el hecho de que al realizar el análisis dimensional de todas las expresiones que componen el procedimiento de cálculo se comprobó la compatibilidad existentes con las unidades básicas del sistema internacional de unidades, de esto se infiere que el procedimiento está adecuadamente formalizado desde el punto de vista termodinámico.

Los datos que generan los comportamientos que se muestran a continuación (Figuras 3.1, 3.2 y 3.3) fueron obtenidos experimentalmente por Retirado (2007) con el propósito de compararlos con los teóricos determinados con el empleo del procedimiento de cálculo, pero debido a la inexistencia de una caracterización termofísica del mineral científicamente fundamentada no fue posible establecer esta comparación, en lo adelante se explican la cinética del secado para diferentes condiciones de trabajo.

3.2.1- Comportamiento de la humedad del mineral respecto al tiempo de secado

De acuerdo con la figura 3.1 para 100 kg de mineral (Pila 1) la humedad superficial se afecta considerablemente por las precipitaciones al comienzo del tercer día, elevando su valor hasta alcanzar el 40%, se observan además pequeños picos en las curvas que indica un aumento de la humedad superficial, los incrementos se producen en las horas de las madrugadas donde la humedad del mineral es afectada por la disminución de la temperatura del punto de rocío y el incremento de la humedad relativa del aire. En el horario comprendido entre las 8:00 AM y las 2:00 PM existe una intensificación del proceso de secado y por consiguiente una disminución acelerada de la humedad como lo indica la pendiente de la curva. Se necesitó cinco días para disminuir la humedad del mineral desde 39% hasta 26%, el tiempo de secado para el experimento fue de 102 horas.

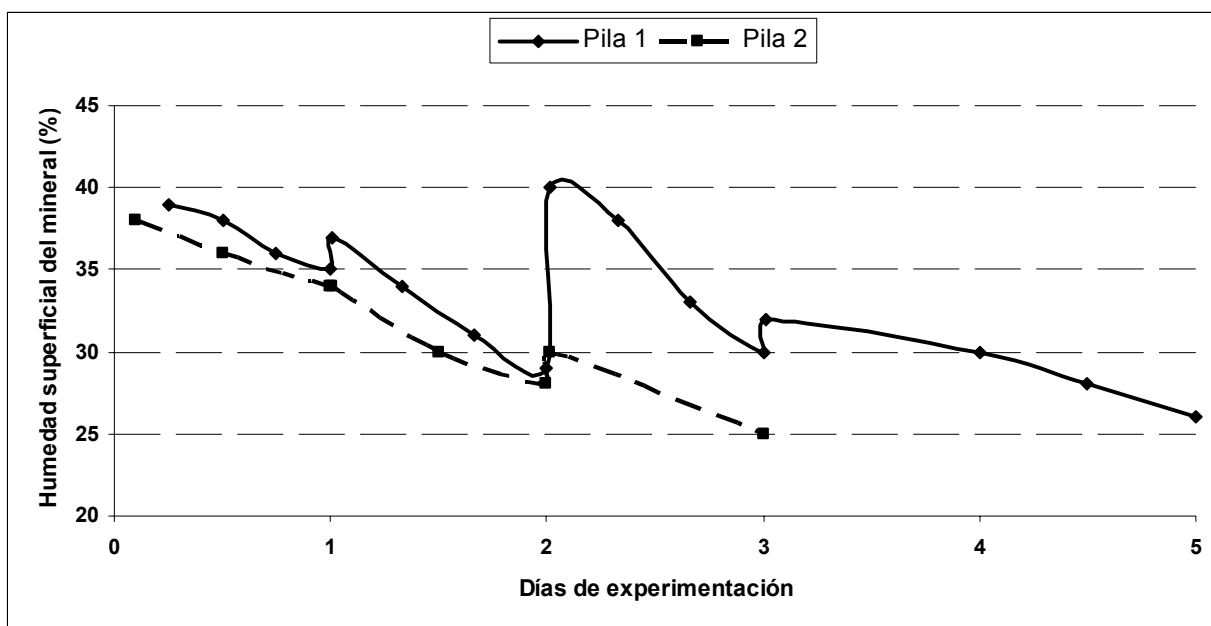


Figura 3.1. Influencia del tiempo de secado en la humedad superficial del mineral para las masas de mineral analizadas.

En el caso de la pila 2 (50 kg) se muestra un comportamiento de la humedad superficial más estable, porque no hubo precipitaciones, la temperatura del punto de rocío y la humedad relativa tuvieron muy poca influencia sobre el mismo. Solo al comienzo del tercer día ocurrió una alteración de la humedad superficial en horas de la madrugada. Para disminuir el contenido de humedad de 38 a 25% se necesitó un tiempo menor que para la pila 1, siendo solamente de tres días lo cual demuestra que sin la influencia negativa de las precipitaciones y un comportamiento similar de la temperatura del medio ambiente y la velocidad de los vientos, se puede reducir considerablemente el tiempo de secado que para la pila fue de 51 horas. Estos comportamientos también demuestran la influencia que tiene la masa de mineral a secar en el tiempo de secado.

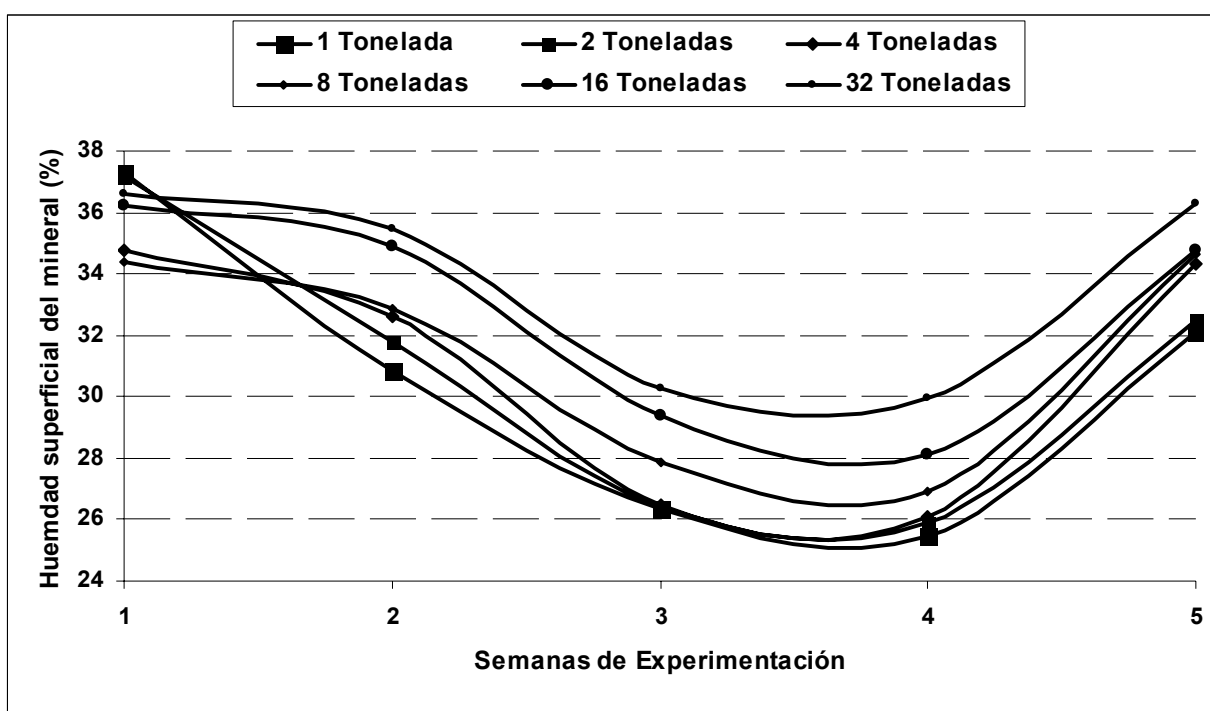


Figura 3.2. Comportamiento de la humedad del mineral en las pilas depositadas respecto al tiempo de secado.

La figura 3.2 muestra el comportamiento de la humedad del mineral para las diferentes pilas en el período de experimentación, como se puede apreciar al ser depositadas el valor de la humedad inicial no depende directamente de la masa de material, llegando a tener la pila de 1t mayor por ciento de humedad que la de 32t, transcurrida la primera semana cuando los parámetros climatológicos comienzan a ejercer su influencia las pilas de 1, 2 y 4t tienen un

comportamiento similar, sus humedades se reducen considerablemente y el valor entre ellas no excede el 2%, llegando a tener valores aproximados en la segunda semana (Figura 3.3), cuando se comparan los resultados con los de las pilas de 8, 16 y 32 toneladas se observa que la humedad prácticamente no ha sufrido cambio (respecto a los valores iniciales) para iguales condiciones climatológicas y el mismo tiempo de secado (1ra semana) sus curvas características tienden a unirse en la cuarta semana cuando cayeron 70 milímetros de precipitaciones.

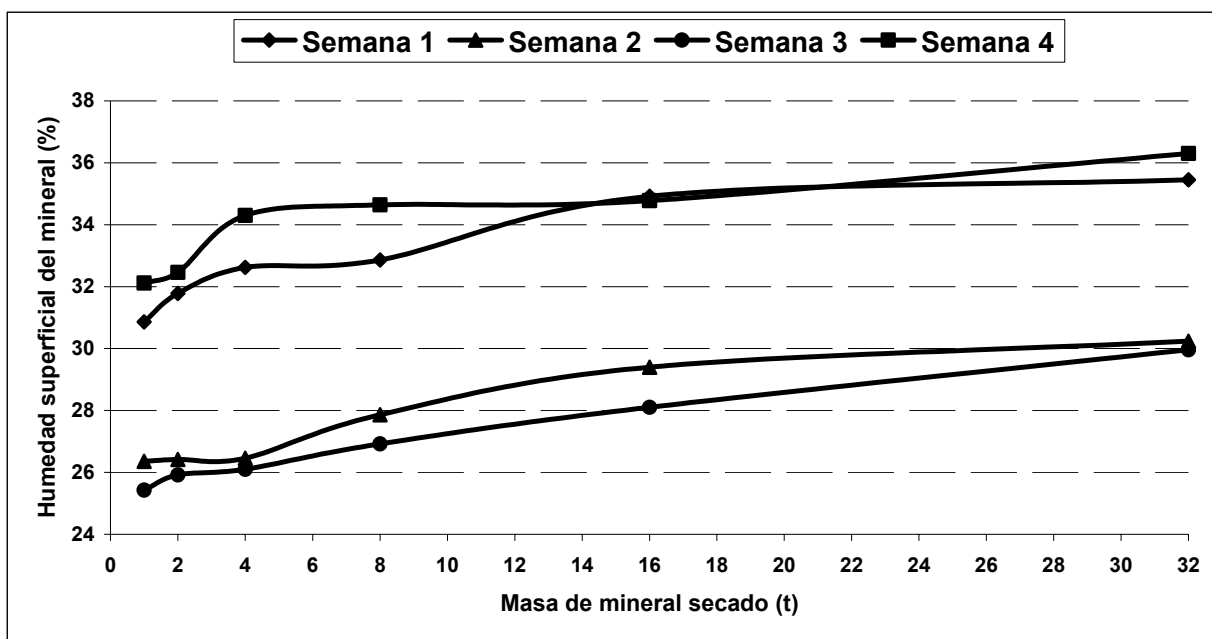


Figura 3.3. Comportamiento semanal de la humedad por pilas de mineral depositado.

Los aspectos antes mencionados demuestran la importancia que tiene la masa de mineral a secar en el secado solar, reflejado en los comportamientos siguientes: la pila de 32t redujo su humedad en 6,74% mientras que la de 1t la redujo en 11,87% (1,76 veces) en 31 toneladas de diferencia entre ambas pilas. Los cálculos fueron obtenidos para el periodo comprendido entre el 16/05 y el 03/06, no se considera la última semana debido a que los 70mm de lluvia que cayeron desvirtúan la cinética del proceso. De lo anterior se deduce la importancia que tiene estimar certeramente el tiempo de secado en el proceso a la intemperie, aspecto al que también se han referido otros investigadores (Cabrera et al., 1985; Chiapero, 2001).

3.3- Valoración económica

La coyuntura internacional, en especial los enfrentamientos bélicos en el medio oriente, donde está involucrado el segundo productor mundial de petróleo (Irak), ha conllevado a una crisis energética que afecta a todos los continentes.

En la industria cubana del níquel el consumo de combustible es un fenómeno que influye notablemente en los costos de producción (Informe económico anual de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, 2007). En la planta de preparación de mineral es un parámetro que depende considerablemente del contenido de humedad del mineral a secar, la reducción de la humedad antes de efectuar la operación de secado en los secaderos cilíndricos rotatorios genera un ahorro apreciable de petróleo (Columbié, 2005). En sentido general los cálculos que se exponen en este epígrafe tienen el objetivo de orientar al lector en los aspectos esenciales a considerar al valorar económicamente el proceso estudiado, de ahí que no constituyen una representación exacta del proceso industrial, sino una aproximación debido a la diferencias significativas que existen entre las masas empleadas en el proceso productivo y la considerada en el proceso de experimentación expuesto en el trabajo.

Para obtener el ahorro de combustible se considera la reducción de la humedad (utilizando los valores promedios) experimentada por el mineral durante el experimento 2 (36,08 a 27,23 %), se escogen los resultados de este experimento porque es el que más se aproxima al proceso real, se calcula el consumo de combustible para ambos contenidos de humedad y se realiza la comparación entre los mismos, según metodología de cálculo expuesta por Castillo (2007). El precio del petróleo empleado en el cálculo es 464 USD/t, el cual fue reportado por el departamento de Economía Energética de la empresa para el mes de mayo del 2008.

Tabla 3.1. Ahorro por concepto de consumo de combustible en los secaderos rotatorios.

Método	Humedad inicial del mineral (%)	Consumo de combustible t/h	Costo USD/mes	Costo USD/año
Sin secado solar	36,08	2,60	868608	10 423 296
Con secado solar	27,23	1,58	527 846,4	6 334 156,8
Ahorro (parcial)	8.85	1,02	340 761,6	4 089 139,2

En la tabla 3.1 se muestra un ahorro parcial de 4089139,2 USD para un secador cilíndrico, al mismo se le restó el gasto total incurrido en el patio de secado por concepto consumo de

combustible en los equipos utilizados (valorado a 0,45 USD/litros) y salario para los 23 días que se realizaron los experimentos (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Gastos incurridos durante las pruebas realizadas.

Equipos	Consumo litros/h	Tiempo trab. (h)	Consumo total (litros)	Costo (USD)	Salario Operad. (\$)	Costo USD/mes
Retroexcavador a -895	40	17,25	690	310,5	515,1	331,104
Cargador -910	15	1	15	6,75	477,29	25,8416
Total	55	18,25	705	317,25	992,39	356,95
Ahorro total asociado al secado solar					4 088 782,25	

Los resultados mostrados anteriormente indican que el consumo de combustible en los patios de secado es insignificante comparado con los beneficios que ofrece el secado solar. Es bueno destacar que la aplicación del proceso a escala industrial genera un gasto mayor que el previsto en los datos consultados. De esta manera lo que se persigue con la implementación de la tecnología solar al proceso industrial es reducir el contenido de humedad entre un 3 y 5%, los ahorros en esas condiciones de trabajo serían diferentes.

3.4- Impacto ambiental asociado al proceso de secado solar

El proceso analizado se considera que daña poco al medio ambiente, debido a que el mismo es natural y utiliza energía solar y eólica como fuentes de secado, pero mediante el desarrollo de este existe una afectación constante al medio ambiente y los trabajadores, la misma es debido a las emanaciones de polvo que se generan en el proceso de carga, descarga y remoción del mineral, por esta razón se procede a explicar las principales afectaciones causadas por el polvo.

3.4.1- Influencia del polvo en el medio ambiente y el organismo humano

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, porque es 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, produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad, además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetro comprendido entre 0.1 a 1 μm . Entre los efectos que pueden tener sobre los materiales se encuentran:

Abrasión: realizada por aquella partícula de mayor diámetro y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).

Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente con ellas.

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 vías: por inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias y absorción de polvo a través de la piel.

En la primera, 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.

En la segunda, las partículas de diámetro superiores a 5 μm quedan retenidas en los bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0,5 y 5 μm son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

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

A pesar de los aspectos antes mencionados, se puede afirmar que con la implementación del secado solar se reducen considerablemente las emanaciones de gases producto de la

combustión liberados por los secaderos rotatorios, debido a que el tiempo de permanencia del mineral dentro de los mismos es mucho menor y el consumo específico de combustible decrece considerablemente, entre las afectaciones causadas por los gases se encuentran las siguientes:

Dióxido de carbono

Es considerado el responsable del cambio climático global por su efecto sobre la atmósfera terrestre.

Óxido nítrico

Favorece la formación de ozono en las capas bajas de la atmósfera, causante de fuertes irritaciones, sobre todo en las vías respiratorias y los ojos.

Monóxido de carbono

Denominado también veneno de la muerte dulce porque bloquea la capacidad de fijación de oxígeno por parte de la sangre.

Dióxido de azufre

Al reaccionar con el vapor de agua contenido en el aire forma un ácido que ataca las plantas y los edificios (conocido también como lluvia ácida).

Al valorar las afectaciones medioambientales asociadas al proceso estudiado (por emanaciones de polvo) se observa que el secado solar como elemento de la minería a cielo abierto afecta de manera directa el entorno y el medio ambiente, en el trabajo no se exponen los valores cuantitativos de las concentraciones de los diferentes elementos porque no se han realizado mediciones recientes en la mina de la empresa.

3.5- Conclusiones capítulo III

- Se demostró a través de los gráficos de comportamiento la dependencia existente entre la cantidad de humedad evaporada, el tiempo de secado y los parámetros climatológicos más influyentes en el secado solar del mineral laterítico.
- Para las condiciones expuestas en el trabajo se obtuvo un ahorro económico considerable, el cual debe incrementarse en la medida que se eleven los precios del combustible en el mercado internacional.
- Con la aplicación del secado solar del mineral laterítico se reduce el contenido de humedad del material antes de ser alimentado a los secaderos y por consiguiente se mitigan las emisiones de gases contaminantes producto de la combustión de los combustibles fósiles.

CONCLUSIONES

- Se comprobó la existencia de expresiones teóricas, empíricas y semi-empíricas obtenidas por diferentes investigadores, aunque las mismas reflejan el comportamiento físico de los procesos de secado, no pueden ser empleadas para la descripción de la cinética del secado solar del mineral laterítico.
- Las características climatológicas de la zona donde está ubicado el yacimiento y los trabajos experimentales realizados por los investigadores precedentes indican que es factible el desarrollo del secado solar del mineral laterítico en las condiciones objetivas de la empresa Ernesto Che Guevara, pero solo es posible eliminar el agua no estructural ligada al material debido al bajo gradiente de temperatura y humedad existente en el proceso.
- Se estableció el procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la cinética del secado solar del mineral laterítico, el mismo conjuga las leyes que rigen la transferencia de calor y masa en los procesos de secado y establece que la ley de Fourier para la conducción del calor puede ser resuelta por vías analíticas puras o haciendo uso de las ecuaciones de la diferencia finita a través de los métodos explícito e implícito.
- Al reducir el contenido de humedad en 8,85%; el consumo de combustible disminuyó en 1,02 t/h; generando un ahorro anual por concepto de consumo de combustible en el secadero cilíndrico rotatorio que asciende a 4 089 139,2 USD y la reducción de las emisiones de gases contaminantes producto de la combustión de los combustibles fósiles.



RECOMENDACIONES

- Realizar la caracterización termofísica del mineral laterítico y climatológica de la región de Moa que permita la determinación de los principales parámetros expuestos en el procedimiento de cálculo.
- Validar el procedimiento de cálculo establecido en este trabajo para las condiciones de explotación en la empresa Ernesto Che Guevara.
- Convertir el procedimiento de cálculo, una vez validado, en una herramienta para la realización de cálculos previos y verificativos del proceso de secado solar por parte de los trabajadores de la planta de preparación de mineral y los estudiantes de cuarto año de Ingeniería Mecánica respectivamente.

RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Anderson, E. E. Solar Energy fundamentals for designers and engineers. Addison- Wesley. Reading. MA, 1982.
2. Azevedo, L. F. A., and E. M. Sparrow, Natural convection in open- ended inclined chanel. J. Heat transfer. 107, 893, 1985.
3. Bérriez, L. Secador Solar de Madera, Centro de Investigaciones de Energía Solar. Cuba, 2002.
4. Bérriez, L. Secador Solar de Madera, Centro de Investigaciones de Energía Solar. Cuba, 2003.
5. Berruta, L. Participación Campesina en el Diseño y Construcción de un Secador Solar para Café. Agrociencia. Vol. 37:95-106. 2004.
6. Boizan, M. Macrocínética del secado de Bagazo. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1991.145p.
7. Cabrera. E; Gandón. J. Fundamentos de las operaciones unitarias. La Habana, 1983.
8. Cabrera. L.; A. Cardoso. Influencia de los parámetros de secado sobre la calidad de dos variedades de cebolla deshidratada. Vol. 6. No.2. 1985./pág 56-64.
9. Castillo. A. 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, 2007.
10. Chiapero, M. Factibilidad del secado solar de granos en silos de bases cónicas. Avances en energías renovables y medio ambiente. Argentina. Vol 6. (2). 2001.
11. Churchill, S. W., and H. H. S. Shu. Correlating Equations for laminar an turbulent free convection from a vertical plate. Int. J. Heat mass transfer. 18, 1323, 1975.
12. Columbié, E. Caracterización de los parámetros fundamentales del proceso de secado del mineral en los tambores rotatorios. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa, 2005. 53p.
13. Curioni, A. Secado de especies aromáticas en la provincia de Buenos Aires.Factibilidad del recurso solar. Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en el ámbito Latinoamericano. Editorial Board, /pág 378-400. 2000.
14. De Dios, D.; R. Díaz. Distribución y clasificación de las intercalaciones en el yacimiento laterítico ferroniquelífero Punta Gorda, Cuba. Minería y Geología 18 (3-4) :5-20. 2003.
15. Dinulescu, H; E. Eckert. Analysis of the one dimensional moisture migration caused temperature gradients in porous medium. Institute Heat Mass Transfer 28 (9): 1069-1077.1985.

16. Duffie, J. A., and W. A. Beckman. Solar energy thermal Processes. Wiley. New York. 1974.
17. Echazú, P. Secado solar de carnes de llamas. Avances en energías renovables y medio ambiente. Argentina. Vol. 5. 2001.
18. Estenoz, S.; M. Espinosa. Procedimiento y equipo para secado solar de materiales a la intemperie, Solicitud de invención cubana No. 175, OCPI, OCPI, La Habana, 2003.
19. Estenoz, S.; M. Espinosa. Prueba de homogeneización y secado solar del mineral (Parte I): Centro de Investigaciones del Níquel, Cuba, Informe de Investigación, 2003.
20. Faires, V. Termodinámica. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
21. Ferguson, W.; J. Turner. A comparison of the finite element and control volume numerical solution techniques applied to timber drying problems below the boiling point. Int. J. Num. Methods Eng.38: 451-467. 1995.
22. Fernández, E. Termodinámica Técnica. La Habana: Editorial "Felix Varela, 1994. Tomo I.
23. Filonenko, G. Secado de semillas de tomate. Conferencia nacional de secado-Sección de energética. Editorial Profizdat, Moscú, 1958.
24. Fulford, G. A survey of recent soviet research on the drying of solids. Can. J Chem. Eng. 47: 378-491.1969.
25. Griñán. P.; S. Fonseca. La madera y el secado solar. Santiago de Cuba, 2003.
26. Guinburg, A. Fundamentos de la teoría y práctica del secado de productos alimenticios. Editorial Promyshlennost. Moscú, 1973.
27. Guzmán, D. Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal. Tesis doctoral. ISMM, Moa, 2001. 124p.
28. Hall, C. Drying technology An International Journal. New York, 1983.
29. Hesler, M. P. Temperature charts for induction and constant temperature heating. Trans. ASME. 69, 227- 236, 1947.
30. Howel, J. R., R. B. Bannerot, and G. C. Vliet. Solar- Thermal energy systems, Analysis and design. Mc- Graw- Hill. New York, 1982.
31. Huang, C. Multi-Phase moisture transfer in porous media subjected to temperature gradient Int .J.Heat Mass Transfer 22: 295-307.1979.
32. Incropera, F.; D. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II y III. 723p.
33. Ilic, M.; I. Turner. Convective drying of a consolidated slab of wet porous materials . Int .J. Heat Mass Transfer 32(12): 215-262.1989.
34. Informe económico anual de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Moa, 2007.

35. Isachenko. V.; V. Osipova.; A. Sukomel. Transmisión del calor. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1979. 566p.
36. Kallel, F.; N. Galanis; B. Perrin; R. Javelas. Effects of Moisture on temperature during drying of consolidated porous materials. J. Heat Transfer, ASME Trans, 1993.
37. Kasatkin, A. Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. /pág 262-366.
38. Kern, D. Procesos de transferencia de calor. Edición Revolucionaria. La Habana, 1969. 980p.
39. Knoule, F. El secado. Bilbao. Ediciones Urno. 1968./pág 50-150.
40. Krasnikov, V. Secado por conducción. Editorial Energía. Moscú, 1973
41. Krisher, O. Fundamentos científicos de la técnica del secado. Editorial Izdatinlit. Moscú, 1961.
42. Kuroshkina, M. La fluidización en la industria química Editorial XIMIA. Leningrado, 1972.
43. Lykov, A. Fenómenos del transporte en cuerpos capilaroporosos. Editorial gostejizdat. Moscú, 1954.
44. Lykov, A. Teoría del secado. Editorial Energía, 2da edición, Moscú, 1968.
45. Lykov, A. V. y Yu. A. Mijailov. Teoria de la transferencia de calor y masa. Editorial Gosenerjizdat. Moscú, 1963.
46. Madariaga, J. El secado de biomasa residual de la caña de azúcar. Tesis Doctoral. ISJAE. Ciudad de la Habana. 1995.
47. Meinel, A. B., and M. P. Meinel. Applied solarenergy: An introduction. Addison- Wesley. Reading. MA, 1976.
48. Menon and Mujundar. Drying of solids. Mc Graw Hill, Montreal, Canadá. 1992.
49. Miranda, J. Composición y conjugación de métodos de determinación de humedad de la industria del Níquel. Revista Minería y Geología. Moa. 13(2): 39-45, 1996.
50. Muregesan, K.; N. Seetharamu. A one dimensional analysis of convective drying of porous materials. Heat and Mass Transfer 32: 81-88. Springer – Velag .1996.
51. Nonhebel, G.; H. Moss. Secado de sólidos en la industria química. Editorial Butterworths, Canadá, 1971.
52. Novoa, R.; M. Boizán. Secado de Zeolita a escala de laboratorio (III). Revista Tecnología Química. Santiago de Cuba, No.1: 24-29, 1995.
53. Peishi, C.; D. Pei. A Mathematical model of drying processes. Int.J.Heat Mass Transfer 32(2): 297-310. 1989.

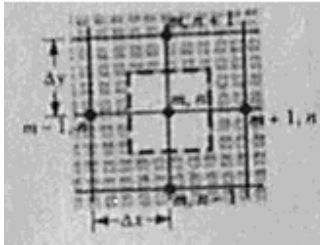
54. Pereira, A. Modelo matemático de secadores solares con chimenea. Revista Tecnología Química. Año 13 (2): 1-7. 1992.
55. Perrin, B.; Javelas, D. Transferts couples de chaleur et de masse dans les matériaux consolidés utilisés en Génie Civil. Int. J. Heat Mass Transfer 30: 297-309. 1987.
56. Perry, J. Chemical Engineering Handbook. 4ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1979.
57. Perry, J. Chemical Engineering Handbook. 6ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1985.
58. Philip, J.; De Vries, D.; Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Trans. Am. Geophys. Union 18: 222-232. 1957.
59. Pikus, F. Método del cálculo de la cinética del calentamiento de un material húmedo fluidizado en colección transferencia de masa en sistemas dispersos. Editorial Nauta y Tiejmika. Minsk, 1965.
60. Plumb, O.; G. Spolek; B. Olmstead. Heat and Mass Transfer in Wood during drying. Int. J. Heat Mass Transfer 28(9): 169-178. 1985.
61. Poulikakos, D. Conduction Heat Transfer. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. NJ, 1994.
62. Ramírez, Y. Influencia de los parámetros climatológicos en el secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2006. 52p.
63. Rebinder, P. Secado de materiales dispersos en la industria química. Editorial XIMIA. Moscú, 1979.
64. Retirado, M. Y. Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico. Tesis de Maestría. Moa: ISMM, 2007. 60p.
65. Rezhnikov, V.; A. Guinsburg. Secado de productos alimenticios en cama fluidizante. Editorial Pischevaya Promyshlennost, Moscú, 1966.
66. Rich, B. R. An investigation of heat transfer from an inclined flat plate in free convection. Trans. ASME. 75, 489, 1953.
67. Romankov, P.; B. Rashkovskaya; V. Frolov. Procesos de transferencia de masa en las tecnologías químicas. Editorial XIMIA. Leningrado, 1975.
68. Romero, Y. Estudio experimental a escala piloto del secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, Moa, 2006. 55p.
69. Santos, Y. Estudio preliminar a escala de laboratorio del secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, 2005. 71p.
70. Sayigh, A. A. M., Ed. Solar energy engineering. Academic Press. New York, 1977.
71. Sazhin, B. Fundamentos de la técnica del secado. Editorial XIMIA, 1984.
72. Sherwood, T. Secado de los sólidos. Editorial Goslesizg. Moscú, 1936.

73. Strumillo, C. Fundamentos de la teoría y práctica del secado. Editorial W.N.T. Varsovia, 1975.
74. Todd, F. Secado por aire y solar de la madera. Centro de agricultura de Louisiana State University. Estados Unidos, 2001.
75. Thomas, H; K. Morgan; R. Lewis. A Fully nonlinear analysis of heat and mass transfer problems in porous bodies. Int. J. Num. Methods Eng.15: 381-393.1980.
76. Torres, E. Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico. Tesis doctoral. ISMM. Moa, 2003. 105p.
77. Torres, T.; A. Fonseca. Análisis térmico de un secador solar de tambor rotatorio para granos. Santiago de Cuba, 2001.
78. Treybal, R. Operaciones con transferencia de masa. Capítulo. XII./pág 653. 1985.
79. TUNRA. Ore Cooler Evaluation. The University Of New Castle Research Associates Limited. 1998. 18p.
80. Vanecek, V., R. Drbohlav; M. Markvart. Secado fluidizado Editorial Leonard Hill, Londres, 1965.
81. Vliet, G. C. Natural convection local heat transfer on constant- heat- flux inclined surfaces. Trans. ASME, 91C, 511, 1969.
82. Whitaker, S. Simultaneous heat, mass and momentum transfer and theory of drying. Adv.Heat Transfer 13: 119-203.1977.
83. Zhidko, V.; M. Boizan. Secado fluidizado de productos alimenticios. Editorial oriente. Santiago de cuba, 1986.

ANEXO 1

Ecuaciones de la diferencia finita para la ecuación de conducción del calor

1. Nodo interior



Método explícito

$$T_{m,n}^{p+1} = Fo(T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1 - 4Fo)T_{m,n}^p$$

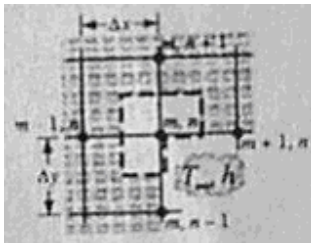
Criterio de estabilidad

$$Fo \leq \frac{1}{4}$$

Método implícito

$$(1 + 4Fo)T_{m,n}^{p+1} - Fo(T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1}) = T_{m,n}^p$$

2. Convección en la esquina interior del nodo



Método explícito

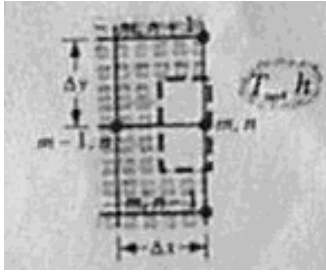
$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2}{3}Fo(T_{m+1,n}^p + 2T_{m-1,n}^p + 2T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p + BiT_{\infty}) + \left(1 - 4Fo - \frac{2}{3}BiFo\right)T_{m,n}^p$$

Criterio de estabilidad $Fo(3 + Bi) \leq \frac{3}{4}$

Método implícito

$$\left(1 + 4Fo\left(1 + \frac{1}{3}Bi\right)\right)T_{m,n}^{p+1} - \frac{2}{3}Fo \cdot (T_{m+1,n}^{p+1} + 2T_{m-1,n}^{p+1} + 2T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1}) = T_{m,n}^p + \frac{4}{3}BiFoT_{\infty}$$

3. Convección en la superficie plana del nodo



Método explícito

$$T_{m,n}^{p+1} = Fo(2T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p + 2BiT_{\infty}) + (1 - 4Fo - 2BiFo)T_{m,n}^p$$

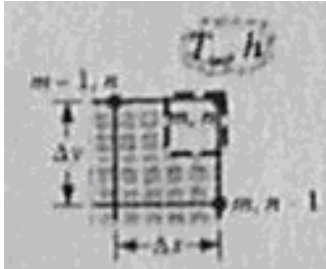
Criterio de estabilidad

$$Fo(2 + Bi) \leq \frac{1}{2}$$

Método implícito

$$(1 + 2Fo(2 + Bi))T_{m,n}^{p+1} - Fo(2T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1}) = T_{m,n}^p + 2BiFoT_{\infty}$$

4. Convección en la esquina exterior del nodo



Método explícito

$$T_{m,n}^{p+1} = 2Fo(T_{m-1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2BiT_{\infty}) + (1 - 4Fo - 4BiFo)T_{m,n}^p$$

Criterio de estabilidad

$$Fo(1 + Bi) \leq \frac{1}{4}$$

Método implícito

$$(1 + 4Fo(1 + Bi))T_{m,n}^{p+1} - 2Fo(T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1}) = T_{m,n}^p + 4BiFoT_{\infty}$$

ANEXO 2

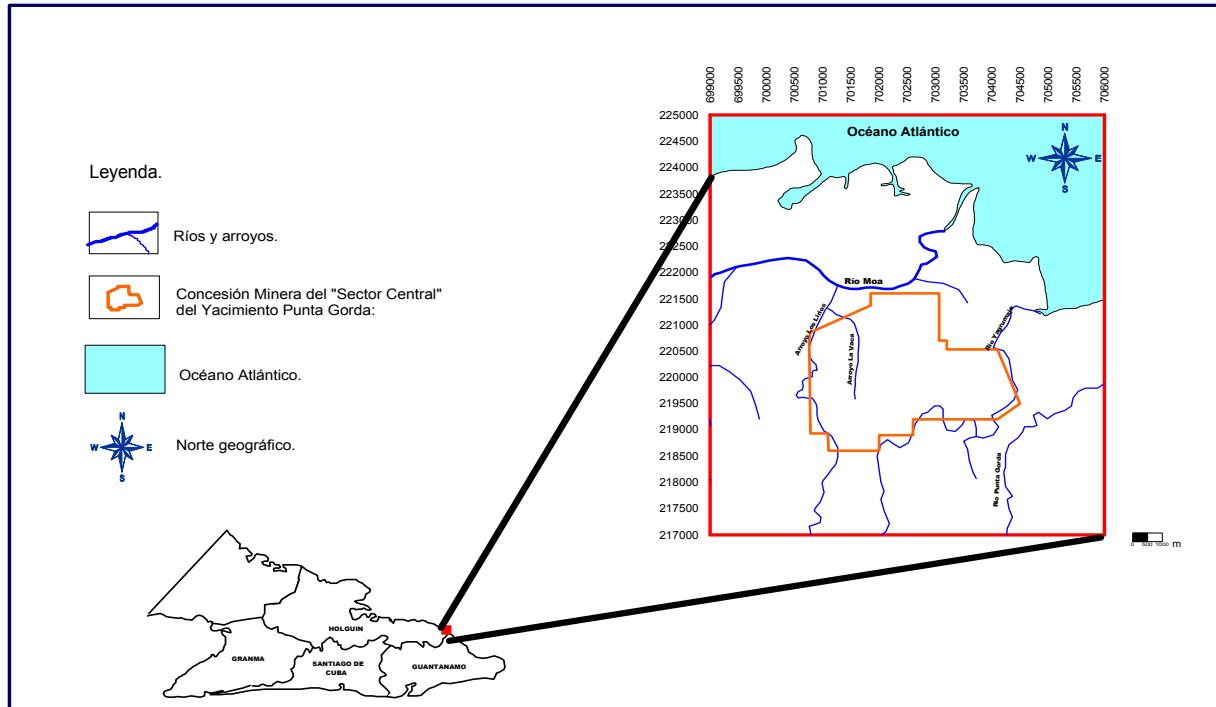


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del yacimiento Punta Gorda.

Fuente: De Dios et al., 2003.



Figura 2. Pilas de mineral de 1, 2 y 4 toneladas (observando desde el fondo).