



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

Trabajo de Diploma

Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: *Evaluación de la transferencia de calor durante el secado solar natural de las menas lateríticas.*

Autor: *Javier Romero Tur*

Tutor: *M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja*

*Moa – 2010
“Año 52 de la Revolución”*



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Javier Romero Tur**, autor de este trabajo y el tutor **M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja** certificamos la propiedad intelectual del mismo a favor del Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Javier Romero Tur

M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja



PENSAMIENTOS

"...La mecánica es el paraíso de todas las ciencias".

Leonardo Da Vinci

"El conocimiento es la virtud y solo si se sabe se puede divisar el bien".

Sócrates

"Saber es tener. Un hombre instruido vive de su ciencia y como la lleva en sí, no se pierde"...

José Martí

"En los momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento."

Albert Einstein

"Lo último que se pierde no son las esperanzas sino la fuerza de voluntad; el hombre que no tenga fuerza de voluntad que no sueñe con las esperanzas."

Ernesto Che Guevara

... Quien busca algo busca soluciones; quien no busca nada busca justificaciones.

Ernesto Che Guevara

... Y siempre mediremos, por encima de todo un técnico y un científico no por su conocimiento, sino por el grado de humildad y modestia con que sea capaz de aportar sus conocimientos.

Fidel Castro Ruz

AGRADECIMIENTOS

Una obra se forja y elabora con el esfuerzo de un arduo trabajo y la combinación de ideas, logrando vencer obstáculos desde el comienzo hasta el fin, logrando atrapar el ingenio, pero esto puede ser posible con meritorias contribuciones, donde es posible recorrer el largo y complejo camino entre el comienzo y el fin. Es por ello que dejo constancia de mi exclusivo agradecimiento:

Primero que a todo y que a nadie a ese **Dios** que esta en el cielo en el que creo y confío.

A mis padres María Tur Machado y Casimiro Romero Romero, por mi existencia, por el apoyo que me ha brindado y la confianza que han depositado en mí, por sus esfuerzos realizados en todas las esferas de la vida para que pudiera alcanzar esta meta, por su cariño, amor y comprensión que nunca me han faltado y ello junto a su presencia han sido y serán por siempre motivos de inspiración para lograr mis aspiraciones futuras.

A mi tutor **M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja**, por su categórica amistad, orientación y absoluta dedicación durante el desarrollo de la investigación, por su respeto e interés para con mi persona y por haber influido en mi formación profesional e investigativa.

A mi hermano y familia en general, por su apoyo incondicional, por las inagotables demostraciones de cariño y las incontables ayudas prestadas y su constante preocupación respecto a mi superación profesional.

A todos aquellos que de una forma u otra contribuyeron a mi formación Social y Profesional, a mis profesores, a mis compañeros de grupo, por su ayuda durante estos años.

A Todos Muchas Gracias



DEDICATORIA

Cuando al culminar una meta deseada se imponen momentos de especial alegría, cuando se quieren suprimir por instantes los momentos de dolor, duda, nostalgia, desespero, paciencia y gozo, inevitablemente se deben tener presente aquellas personas que por su constancia, dedicación y amor contribuyeron a la realidad que representa llegar hasta el final, obviando de manera impredecible los obstáculos que la vida misma nos impone.

En integridad del humilde esfuerzo que esas personas realizan en aras de la prosperidad de uno mismo y en total conformidad con mis sentimientos dedico este logro personal:

A María Tur y Casimiro Romero (mis padres), por el amor que me dedicaron y por su constante lucha ante las dificultades que a veces me hacían dudar en la posibilidad del triunfo, a ellas que además de mi existencia le debo todo lo que soy y lo que pueda ser mientras vivo.

A todos los profesores que dedicaron parte de su preciado tiempo a enseñarme nuevos conocimientos y que verdaderamente ven en mi resultado el fruto de su arduo trabajo.

A mis familiares, amistades y colegas que me ayudaron en cualquiera de las formas y a los que no pudieron hacerlo, pero que tampoco me hicieron daño, de todo corazón les dedico este éxito.

El autor.

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el secado solar natural de dos pilas de menas lateríticas, para ello se estableció el procedimiento de cálculo apropiado para la evaluación de la transferencia de calor durante el proceso. El referido método de cálculo conjuga los aspectos teóricos expuestos en investigaciones precedentes, está determinado por los modos de transmisión del calor más influyentes en el proceso y el tipo de convección predominante. Se determinaron los flujos de calor promedios por convección, radiación, conducción y latente de humedad los cuales fueron 61.55, 81.49, 15.39 y 244.55 W/m^2 para la pila 1. En la pila 2 se obtuvieron flujos igual a 54.95, 31.52, 11.79 y 143.82 W/m^2 para los modos de transmisión de calor considerados. Se comprobó que con la implementación del secado solar de las menas lateríticas en la empresa Ernesto Che Guevara se disminuye la humedad del material lo cual genera ingresos por concepto de ahorro de petróleo durante el secado térmico que de acuerdo con los resultados del trabajo asciende a 2990628 CUC. Adicionalmente se reducen las emanaciones de los gases tóxicos productos de la combustión de combustibles fósiles.

ABSTRACT

In the presently work is analyzed the natural solar drying of two piles of ore, for he settled down it the procedure of appropriate calculation for the evaluation of the transfer of heat during the trial. The referred calculation method conjugates the theoretical aspects exposed in precedent investigations; it is determined by the ways of transmission of the most influential heat in the process and the type of predominant convección. The flows of heat averages were determined by convection, radiation, conduction and latent of humidity which were 61.55, 81.49, 15.39 and 244.55 W/m² for the pile 1. In the pile 2 flows similar to 54.95 were obtained, 31.52, 11.79 and 143.82 W/m² for the considered ways of transmission of heat. It was proven that with the implementation of the solar drying of the ore lateríticas in the company Ernesto Che Guevara decreases the humidity of the material that which generates revenues for concept of saving of petroleum during the thermal drying that in accordance with the results of the work ascends 2990628 CUC. Additionally they decrease the emanations of the gases toxic products of combustion of fossil fuels.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	5
MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1- Introducción	5
1.2- Principios técnicos y períodos del proceso de secado	5
1.3- Trabajos precedentes sobre el proceso de secado	7
1.4- Generalidades del proceso de secado	15
1.5- Aspectos generales sobre el secado solar natural de materiales	16
1.6- Secado solar de las menas lateríticas	18
1.7- Conclusiones del capítulo 1	20
CAPÍTULO 2	21
PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SECADO SOLAR DE LAS MENAS LATERÍTICAS	21
2.1- Introducción	21
2.2 - Procedimiento de cálculo para la evaluación de la transferencia de calor	21
2.2.1- Transferencia de calor por convección	24
2.2.2- Transferencia de calor por radiación	29
2.2.3- Transferencia de calor por conducción	32
2.2.4- Determinación del calor latente de humedad	34
2.3- Ecuaciones para el cálculo del área de transferencia de calor y masa de las Para obtener el área de transferencia de calor y masa (A) en una pila de menas	35 35
2.4- Conclusiones del capítulo 2	38
CAPÍTULO 3	40
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y DE LOS IMPACTOS DERIVADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SECADO SOLAR DE LAS MENAS LATERÍTICAS	40
3.1- Introducción	40
3.2- Transferencia de calor en el secado solar natural	40
3.3- Comportamiento de los procesos de transferencia de calor	43



3.4- Análisis de los impactos asociados a la implementación del secado solar natural de las menas lateríticas	48
3.4.1- Impacto económico	48
3.4.2- Impacto social	49
3.4.3- Impacto ambiental	49
3.5- Principales beneficios derivados de la implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en la empresa Ernesto Che Guevara	52
3.6- Conclusiones capítulo 3	54
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	57
RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

INTRODUCCIÓN

El sol, fuente de vida y origen de las diversas formas de energía que el ser humano ha utilizado desde el inicio de su historia, puede satisfacer prácticamente todas nuestras necesidades si se aprende cómo aprovechar de forma racional su luz. El sol es una estrella formada por diversos elementos en estado gaseoso, principalmente hidrógeno, en condiciones tales que producen, de forma espontánea e ininterrumpida, un proceso de fusión nuclear, el cual emite luz y calor. Este es el origen de la inagotable energía solar. Para la región de América Central y el Caribe las tecnologías de energía renovable a pequeña escala presentan una alternativa económica y ambiental factible para la expansión de la capacidad eléctrica instalada, ya sea por medio de sistemas aislados o por proyectos conectados a la red eléctrica. La región cuenta con suficientes recursos para desarrollar sistemas hidráulicos, solares, eólicos y de biomasa, principalmente. Adicionalmente, estas tecnologías pueden disminuir la contaminación del medio ambiente, causada por las emisiones de gases de los sistemas convencionales, que utilizan combustibles fósiles, como el carbón y productos derivados del petróleo. Estos gases contribuyen al efecto invernadero y al calentamiento global del planeta. El desarrollo industrial de las tecnologías en el campo de la industria del níquel, exige cada vez más reducir los consumos de portadores energéticos y que cada unas de las instalaciones de la industria sean más eficientes y menos contaminantes del medioambiente.

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 fuentes tradicionales. En la actualidad las empresas niquelíferas se encuentran enfrascada en dos grandes cambios: el de modernización de sus plantas, con el objetivo de reducir los costos en la producción de cada tonelada de níquel, y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional.

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. 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 el desarrollo 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 la planta de preparación de mineral 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 implementar eficientemente el secado solar de las menas lateríticas que contribuye a incrementar la productividad de la planta y reducir los gastos energéticos anuales, los cuales serían de gran importancia para la economía del país ya que el mundo se encuentra inmerso en una crisis económica que golpea a todas las economías.

La evaluación de la transferencia de calor durante el secado solar de las menas lateríticas es un aspecto novedoso no abordado en las literaturas especializadas en la temática del secado (Sherwood, 1936; Lykov, 1968; Knoule, 1968; Strumillo, 1975;), por cuanto depende de sus propiedades físicas, térmicas y de las características específicas del proceso. En general los procedimientos expuestos en la literatura científica tienen un carácter general y no pueden ser considerados para la predicción de la transferencia de calor durante el proceso de secado solar del mineral laterítico. A pesar de que las investigaciones más recientes (Estenoz et al., 2003a; Santos, 2005;

Ramírez, 2006; Romero, 2006; Retirado, 2007) arrojan resultados relevantes en cuanto a la cinética del secado obtenida en todos los casos por métodos experimentales, se requiere de un procedimiento de cálculo efectivo para la determinación de la transferencia de calor por vías analíticas.

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

Insuficiente conocimiento del comportamiento de la transferencia de calor durante el secado solar natural de las menas lateríticas, para las condiciones en que se desarrolla el proceso en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

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

El secado solar natural de las menas lateríticas cubanas.

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

Si se efectúa un estudio teórico y empírico del proceso de secado solar natural de las menas lateríticas y se conjuga con los procedimientos de cálculos establecidos para el análisis de los procesos de transferencia de calor entonces es posible determinar los flujos de calor presentes en el objeto de estudio.

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

Determinar los flujos de calor transferidos durante el secado solar natural de las menas lateríticas, para las condiciones de trabajo de la empresa Ernesto Che Guevara.

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

- 1- Actualizar el estado del conocimiento relacionado con el secado convencional y solar de materiales.
- 2- Establecer el procedimiento de cálculo para la evaluación de la transferencia de calor durante el secado solar natural de las menas lateríticas.
- 3- Calcular los flujos de calor presentes durante el secado solar natural de las menas lateríticas.
- 4- Crear los gráficos de comportamiento de los diferentes procesos de intercambio térmico presentes en el objeto de estudio.



- 5- Realizar la valoración de los impactos derivados de la implementación del secado solar natural de las menas lateríticas.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

El proceso de secado se puede analizar como un proceso termofísico y físico - químico, en el cual se produce el intercambio de calor y de humedad entre la superficie del material que se somete al secado y el medio gaseoso que lo rodea. Reducir el contenido de humedad de los materiales es un proceso que se ha venido realizando desde tiempo remotos. En la actualidad en función de reducir el consumo de combustibles fósiles y la emisión de gases a la atmósfera se ha decidido optar por el uso de fuentes renovables para llevar a cabo dicha actividad. Lo cual contribuye notablemente a reducir el costo de producción además de proteger el medio ambiente, es por ello el interés del secado con el uso de la energía solar.

El **objetivo** de este capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos y la actualización del estado del conocimiento relacionado con el secado convencional y solar de los materiales.

1.2- Principios técnicos y períodos del proceso de 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, entre otras). 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.

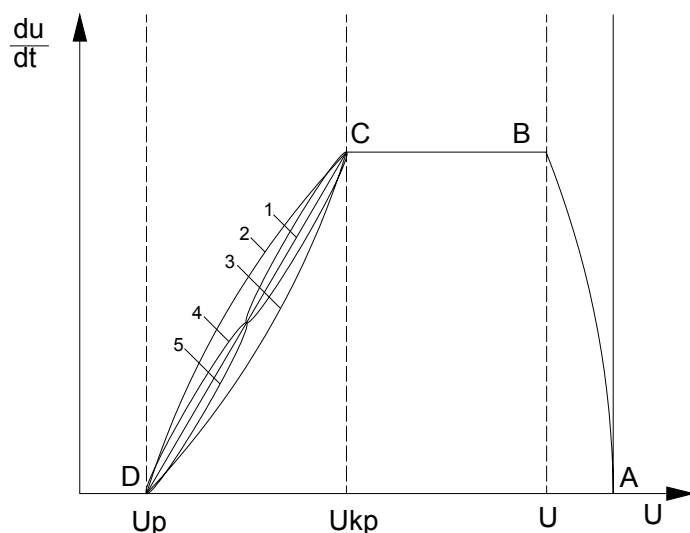


Figura 1.1. Curva de velocidad de secado.

Fuente: Retirado, 2010.

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 período 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 precedentes sobre el proceso de secado

El secado con la utilización 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 primordiales: 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 en el secado y caracterizar la cinética del proceso de secado y la humedad de equilibrio.

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.

El Modelo de Thompson (1968) es un modelo semiempírico, que fue desarrollado originalmente para simular el secado de maíz desgranado. En este modelo se considera la capa gruesa de granos, como constituida de capas delgadas de 2,5 cm. de espesor por capa, colocadas unas sobre otras. El enfoque básico para la simulación consiste en calcular el secado en una capa delgada de grano por medio de balances de calor y masa (modelo de equilibrio), y por medio de un proceso interactivo, aumentar varias

capas delgadas para formar las capas gruesas de dimensiones iguales a las reales del secador.

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 de las menas lateríticas 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.

Leonardi (1984), presenta una revisión extensa de los trabajos que se han hecho en convección natural con fluidos. Es importante mencionar que el tratamiento matemático se complica si se considera la convección simultánea de calor y de masa, originada por gradientes de temperatura y de concentración respectivamente (Fenómeno de doble difusión). En estos casos, también es posible incluir los efectos Soret y Dufour (Bird et al., 1960; Nield y Bejan, 1992), lo que podría ocurrir en el modelamiento matemático de reactores catalíticos o de granos alimenticios almacenados en silos.

El problema de la convección natural en una cavidad cuadrada que contiene aire, la cual está sometida a un gradiente de temperatura en sus paredes verticales, mientras que en las paredes horizontales se consideran adiabáticas, se ha convertido en un problema clásico para evaluar códigos computacionales (De Vahl Davis, 1983). De manera similar ha sido tratado el problema de la cavidad que contiene un medio poroso (Prasad y Kulacki, 1984a).

En el caso de convección natural en medios homogéneos, Leonardi (1984) realizó un estudio numérico de los efectos que se tienen en la convección natural al variar las propiedades de un fluido almacenado en una cavidad rectangular. Las pruebas numéricas se realizaron para agua y aire como fluidos y las propiedades que se analizaron fueron la densidad, presión, viscosidad y conductividad térmica. Este autor concluye que estas propiedades tienen efectos importantes sobre el flujo y perfiles de temperatura para cavidades que contienen aire, mientras que para aquellas que contienen agua, solo la densidad y la viscosidad tienen efectos significativos. La determinación de perfiles de velocidad y de temperatura se realizó en un rango de número de Rayleigh entre 10^3 y 10^6 y para razones de aspecto geométrico de 1,2 y 3.

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 a las menas lateríticas 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.

Le Peutrec y Lauriat (1990) consideraron los efectos de la transferencia de calor en las paredes laterales en la convección natural en cavidades rectangulares. Los autores investigaron los efectos de la pérdida de calor a través de las paredes laterales, utilizando números de Rayleigh entre 10^3 a 10^7 . De acuerdo a los resultados numéricos obtenidos, Le Peutrec y Lauriat (1990) concluyen que el agua se puede emplear como fluido de trabajo en lugar del aire para investigar la transferencia de calor por convección natural a números de Rayleigh elevados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los efectos debidos a números de Prandtl elevados (7-10), se observan mejor a números de Rayleigh elevados, debido a que el incremento del Prandtl conduce a un decremento de la influencia de los términos de transporte convectivo en la ecuación de la energía, originando que el problema presente menos inestabilidad numérica y, por lo tanto, sea más fácil de resolver.

Viehbeck (1999a) describe el proceso que se debe seguir para el secado de la madera, para ello emplea como patrón un modelo de secador que trabaja por convección forzada del aire previamente precalentado con agua caliente o vapor.

Viehbeck (1999b) expone la existencia de dos métodos diferentes de secado al vacío: continuo y discontinuo. En el primero, la madera es calentada y deshumificada al mismo tiempo en una atmósfera de presión reducida. El segundo alterna entre calentar el aire a presión normal y deshumificar en condiciones al vacío. Por ambos métodos se obtienen buena calidad en el secado de la madera.

Lima (1999) obtuvo ecuaciones para las difusividades térmica y másica (α y D_{AB}), el coeficiente convectivo (h) y el coeficiente externo de transferencia de materia (k_M) empleando el método de los mínimos cuadrados, para el cálculos de los referidos parámetros estudió varias situaciones que incluyen la modificación de los números de Biot (Bi) y Fourier (Fo).

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.

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.

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.

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 de menas lateríticas a escala de laboratorio debido a la alta eficiencia que presentan y su fácil construcción.

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.

Karim y Hawlader (2005a) establecieron los modelos matemáticos para secado de Bananas y comprobaron que con ellos se obtienen buenas predicciones de la velocidad de secado, perfiles de temperatura y humedad para el material analizado y de perfiles de temperatura y humedad a lo largo del secador. La validación la desarrollaron a través de la comparación de los datos experimentales obtenidos en un secador solar y los valores calculados con ayuda de los modelos.

Karim y Hawlader (2005b) desarrollaron un modelo de transferencia de materia y energía, para el secado convectivo de frutos tropicales. El modelo del material (banana) es capaz de predecir la temperatura y humedad instantáneas adentro del fruto. Es admitido el encogimiento del material y debido a esto, el coeficiente de difusión no es

constante, pero es dependiente del contenido acuoso y de la temperatura del fruto (Crank, 1976, Bird et al., 2002). También fueron obtenidas ecuaciones para el secador, denominado modelo del equipo, las cuales son usadas para predecir los cambios que ocurren en el equipo durante el proceso de secado.

Es decir, predicen la temperatura y la humedad instantáneas del aire de secado a lo largo del secador tipo túnel. Ellos presentaron datos de coeficientes de difusión de agua en bananas a temperaturas de 40, 50 y 60°C y velocidades del aire de secado de 0,3, 0,5 y 0,7m/s. Según ellos, la velocidad de secado es mucho más dependiente de la temperatura que de la velocidad del aire.

Mabrouk et al. (2006) concluyeron que la temperatura y velocidad del aire influyen considerablemente en la velocidad de secado. Según ellos, el régimen es turbulento y en consecuencia, la superficie del material, directamente expuesta al secado, se acerca rápidamente a la humedad de equilibrio, pero los cambios en el interior de la capa de material son lentos.

Costa y Ferreira (2007) presentan la construcción de un secador solar en el que se realizaron ensayos de secado de frutos tropicales y se desarrolla el modelado matemático del proceso. Se empleó un sistema de adquisición de datos y control de temperatura de secador, usando energía por convección forzada del aire y radiación solar. El sistema es complementado, para emergencia, con resistencias eléctricas. Se realizaron experimentos de secado de bananas en forma de placa, obteniéndose sus pesos y contenidos acuosos en función del tiempo.

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 de menas lateríticas con resultados satisfactorios. Estenoz et al. (2003a), muestra una valoración socio-económica del secado solar y de la homogenización en la explotación de menas lateríticas en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. 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.

Romero (2006) realiza un estudio experimental a escala piloto del secado solar en la empresa comandante Ernesto Che Guevara, permitiendo establecer el comportamiento de la humedad del material en función de los parámetros climatológicos (temperatura del medio ambiente, velocidad del aire, humedad relativa, temperatura del punto de rocío, precipitaciones y radiación solar).

Retirado (2007) realiza un trabajo acerca del comportamiento de la humedad durante el secado en el cual describe modelos matemáticos para el secado solar, posibilitando la reducción de la humedad físico-mecánica presente. La interacción de los parámetros climatológicos con el material durante el proceso le permitió la reducción de un 13 y 6,64% en el contenido de humedad para los dos experimentos realizados.

Ricardo (2008) describe el procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar respecto al tiempo. El mismo está basado en las leyes que rigen la transferencia de calor y masa durante el secado y comprobó que la solución de la ley de Fourier para la conducción del calor durante el

secado solar 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.

Existe un gran número de publicaciones relacionadas con el secado de materiales en los cuales se estudian diferentes aspectos del proceso, del análisis de estos se puede concluir que:

- ❖ En las expresiones empíricas obtenidas por diferentes autores, no se valoran las menas lateríticas sometidas a secado solar en las industrias cubanas del níquel.
- ❖ De los estudios analizados solo en uno se examinan los modos de transferencia de calor presente en el secado solar de las menas lateríticas, pero no se arrojan conclusiones al respecto debido al análisis teórico realizado.

1.4-Generalidades del proceso de secado

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).

1.5- Aspectos generales sobre el secado solar natural de materiales

El secado solar natural (SSN) o secado directo al sol, donde los productos se exponen directamente a la radiación solar colocándolos sobre el suelo o en dispositivos específicos, es uno de los usos más antiguos de la energía solar, siendo aún el proceso más utilizado en países en vías de desarrollo para el secado de productos agrícolas (Corvalan et al., 1995; Anwar y Tiwari, 2001; Tiwari, 2002, 2004). Es un procedimiento con muy bajo costo pero con diversas limitaciones, entre las que se destacan deterioro de los productos por las variaciones de los parámetros climatológicos, dificultad para el control del proceso, necesidades de terreno elevadas, largos tiempos de secado. En los últimos años, debido a los mayores precios de los combustibles y la creciente preocupación por el medio ambiente se han desarrollado técnicas y dispositivos que permitan solucionar los diversos problemas relacionados con el SSN (Saravia et al., 1990; Karathanos y Belessiotis, 1997; Esper y Mühlbaue, 1998).

En el SSN, como se ha indicado, el producto está expuesto a la radiación solar, al viento y a otras condiciones ambientales, siendo los requerimientos energéticos de la operación suministrados por la energía solar, como fuente única de energía. El principio de funcionamiento del SSN se muestra en la Figura 1.2.

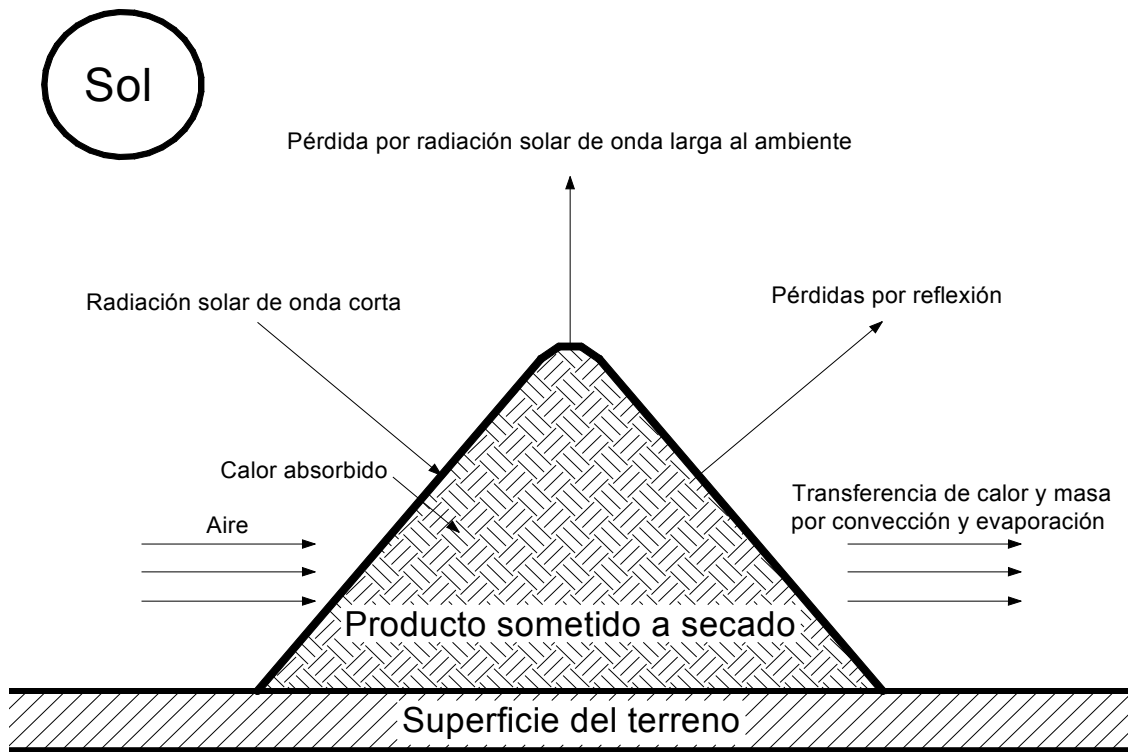


Figura 1.2. Principio de trabajo del secado solar natural.

Fuente: Retirado, 2010.

Como se aprecia, parte de la radiación de onda corta incidente del sol es absorbida por el producto y parte es reflejada. Una fracción de la radiación absorbida y el aire caliente que circula sobre el producto provoca el calentamiento superficial del mismo, dando lugar a la propagación de calor al interior (consiguiéndose elevación en la temperatura del producto y producción de vapor de agua) y a la evaporación de la humedad superficial, lográndose de esta forma la desecación del producto. Sin embargo, la otra fracción se pierde por la transmisión de la radiación de onda larga al ambiente y por la conducción a través de los elementos en contacto con el terreno.

En el presente trabajo se realiza un estudio del SSN de las menas lateríticas. Aunque existen en la literatura diversos trabajos sobre el secado solar de diferentes materiales (Mahmutoglu et al., 1996; Türk, 2003; Touré y Kibangu-Hkembo, 2004; Gigler et al., 2004), solo se dispone de estudios aislados para el material analizado (Estenoz y Espinosa, 2003a, 2003b; Retirado et al., 2007; 2008; 2009).

1.6- Secado solar de las menas lateríticas

Según Lykov (1968) los sólidos húmedos objeto de secado 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 objeto de secado se clasifica como un material macrocapilaroporoso.

El secado natural aplicado 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 depende fundamentalmente de los siguientes parámetros: Humedad inicial de las menas, temperatura del aire, humedad relativa, intensidad de la radiación solar, velocidad del aire y dirección predominante, temperatura del punto de rocío, precipitaciones, masa de mineral a secar, propiedades físicas del mineral, superficie de contacto, superficie horizontal disponible y tiempo de secado.

-

- Ventajas del secado solar natural de las menas lateríticas
- 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.

Estas características están presentes en el patio de secado solar empleado en la mina del yacimiento perteneciente a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

1.7- Conclusiones del capítulo 1

- ❖ Se estableció el estado de arte referente a la temática abordada en la investigación y los fundamentos técnicos de los procesos de secado útiles para la evaluación de la transferencia de calor durante el secado solar natural de las menas lateríticas.
- ❖ Se encontraron diversos trabajos dedicados a la evaluación de la transferencia de calor en el secado de disímiles materiales, pero en ninguno de ellos se estudian las menas lateríticas cubanas.

CAPÍTULO 2

PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SECADO SOLAR DE LAS MENAS LATERÍTICAS

2.1- Introducción

Establecer sistemas de ecuaciones que permitan determinar las principales regularidades de los procesos industriales es de vital importancia, esencialmente si se trata de los procesos de secado que son complejos, en los cuales la descripción a partir de ecuaciones teóricas resulta considerablemente difícil.

Un ejemplo de estos procesos es el secado solar de materiales a la intemperie, que debido a los sistemáticos cambios que experimentan las variables fundamentales que lo caracterizan, se hace difícil predecir su comportamiento por vías analíticas puras por lo que es necesario acudir a métodos empíricos o semi-empíricos, de ahí que el **objetivo** del capítulo es: establecer el procedimiento de cálculo para la evaluación de la transferencia de calor durante el secado solar de las menas lateríticas.

2.2 - Procedimiento de cálculo para la evaluación de la transferencia de calor

En el secado solar natural de las menas lateríticas la superficie de secado recibe calor por convección y radiación, una parte del calor que recibe se emplea en evaporar la humedad y el resto en variar la energía interna del material mientras aumenta su temperatura.(Figura 2.1)



Figura 2.1. Interacción de los calores que intervienen en el secado solar natural de las menas.

En la Figura 2.2 se muestra un esquema estructural del secado solar natural de las menas lateríticas, que refleja los calores que intervienen en el proceso, del análisis de la referida figura se establece la ecuación 2.1 para el balance de energía en la superficie de secado.

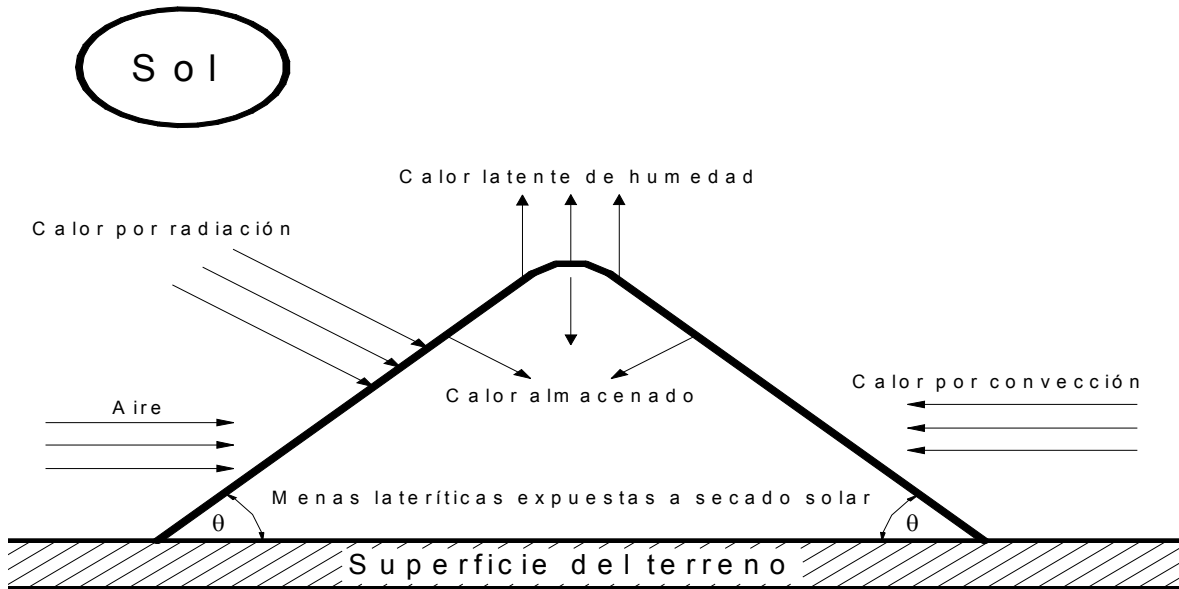


Figura 2.2. Esquema estructural del secado solar natural de las menas lateríticas.

$$q_e + q_g - q_s = q_a \quad (2.1)$$

Donde:

q_e : calores que entran a la superficie de secado; (W/m^2).

q_g : calor generado en el interior de la pila de minerales; (W/m^2).

q_s : calor que sale de la superficie de secado; (W/m^2).

q_a : calor almacenado en el interior de la pila de minerales; (W/m^2).

Al particularizar la ecuación general del balance térmico al secado solar natural de las menas lateríticas resulta:

$$q_e = Q_{Conv} + Q_{Rad} \quad (2.2)$$

$q_g = 0$ Porque no hay generación de energía interna en el proceso.

$$q_s = N \cdot \lambda \quad (2.3)$$

$$q_a = Q_{Cond} \quad (2.4)$$

Donde:

Q_{Conv} : calor por convección que intercambian la corriente de aire y las menas; (W/m²).

Q_{Rad} : calor por radiación solar que se aprovecha en el secado de las menas lateríticas; (W/m²).

$N \cdot \lambda$: calor latente de humedad; (W/m²).

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

Q_{Cond} : calor transferido por conducción hacia el interior de la pila de menas lateríticas; (W/m²).

Para establecer la ecuación de balance de energía se desprecian las pérdidas de calor por conducción en el terreno y el calor necesario para sobrecalentar la humedad evaporada a la temperatura del aire, después de sustituir las ecuaciones 2.2-2.4, la ecuación 2.1 puede ser escrita de la forma siguiente:

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

Luego el régimen de secado N y el régimen del flujo calórico se relacionan por la expresión 2.6.

$$Q_{Conv} + Q_{Rad} - Q_{Cond} = N \cdot \lambda \quad (2.6)$$

Las ecuaciones particulares para la determinación de los calores que intervienen en el miembro izquierdo de la expresión 2.6 se obtienen del análisis particular de los modos de transferencia de calor presente en el proceso.

En el secado solar natural están presentes los tres modos de transmisión de calor (convección, radiación y conducción), su interrelación es compleja, a continuación se analizan de forma independiente.

2.2.1- Transferencia de calor por convección

Según la Ley de Newton-Richman el flujo de calor por convección se determina por la ecuación 2.7 reportada por Kaviani (1994).

$$Q_{Conv} = \bar{h}_a \cdot (T_a - T_s) \quad (2.7)$$

Donde:

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

T_a : temperatura del aire; (K).

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

Debido a que el secado solar de las menas lateríticas se desarrolla a la intemperie el material recibe el calor transferido por el aire a condiciones atmosféricas, en estas circunstancias el intercambio de calor se produce por convección, la cual puede ser libre, forzada o mixta, para definir el modo de transmisión de calor predominante se deben verificar las condiciones expuestas en las ecuaciones 2.8-2.10, si se cumple la primera se puede despreciar la convección forzada, para la segunda se desprecia la convección libre y en la tercera se considera el efecto combinado de ambas (Incropera y De Witt, 1999).

$$\frac{Gr_L}{Re^2} \gg 1 \quad (2.8)$$

$$\frac{Gr_L}{Re^2} \ll 1 \quad (2.9)$$

$$\frac{Gr_L}{Re^2} \approx 1 \quad (2.10)$$

Donde:

Gr_L : número de Grashof; (adimensional).

Re : número de Reynolds; (adimensional).

En caso de que predomine la convección libre para calcular el número de Nusselt promedio ($\overline{Nu}_L$) Tiwari et al. (2006) recomiendan la ecuación 2.11.

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}_a \cdot L}{k_a} = C \cdot (Gr_L \cdot Pr)^n = C \cdot Ra_L^n \quad (2.11)$$

Donde:

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

k_a : conductividad térmica del aire; (W/m K).

Pr : número de Prandtl; (adimensional).

Ra_L : número de Rayleigh; (adimensional).

C y n son constantes que varían con el material y las condiciones en que se desarrolla la convección.

Normalmente n es igual a $1/4$ y $1/3$ para flujos laminar y turbulento respectivamente, siendo C igual a 0,59 y 0,10 para los flujos considerados (Incropera y De Witt, 1999). Para realizar los cálculos correspondientes todas las propiedades son evaluadas a la temperatura de película (T_p) que se determina por la ecuación 2.12.

$$T_p \equiv \frac{T_s + T_a}{2} \quad (2.12)$$

El número de Rayleigh (Ra_L) se determina según Gebhart et al. (1988) por la expresión siguiente:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu_a^2} \cdot \frac{\nu_a}{\alpha_a} = \frac{g \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu_a \cdot \alpha_a} \quad (2.13)$$

Donde:

g : aceleración de la gravedad; ($9,81 \text{ m/s}^2$).

β_a : coeficiente de dilatación volumétrica del aire; (K^{-1}).

ν_a : coeficiente cinemático de viscosidad del aire; (m^2/s).

α_a : coeficiente de difusividad térmica del aire; (m^2/s).

Según Retirado (2007) la superficie de secado tiene una inclinación respecto a la horizontal que oscila entre 30 y 42 grados ($30^\circ \leq \theta \leq 42^\circ$) cuando esto ocurre en la ecuación 2.13 se sustituye g por $g \cdot \sin \theta$ tal como lo recomiendan diferentes investigadores (Fuji e Imura, 1972; Azevedo y Sparrow, 1985) para superficies inclinadas con $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$. Luego la ecuación para el número de Rayleigh resulta:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g \cdot \sin \theta \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu_a^2} \cdot \frac{\nu_a}{\alpha_a} = \frac{g \cdot \sin \theta \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu_a \cdot \alpha_a} \quad (2.14)$$

Los coeficientes de difusividad térmica (α_a) y de dilatación volumétrica (β_a) del aire se calculan por las expresiones 2.15 y 2.16, respectivamente.

$$\alpha_a = \frac{k_a}{\rho_a \cdot Cp_a} \quad (2.15)$$

$$\beta_a = \frac{1}{\rho_a} \cdot \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} \right)_{p=\text{constante}} = \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{p_a}{R \cdot T_a^2} = \frac{1}{T_a} \quad (2.16)$$

Siendo:

$$\rho_a = \frac{p_a}{R \cdot T_a} \quad (2.17)$$

Donde:

ρ_a : densidad del aire; (kg/m^3).

p_a : presión del aire; (Pa).

R : constante universal de los gases; ($\text{kJ}/\text{kg K}$)

Cp_a : calor específico a presión constante del aire; ($\text{kJ}/\text{kg K}$).

Sustituyendo la ecuación 2.14 en la 2.11 el número de Nusselts se determina por la expresión siguiente:

$$\overline{Nu}_L = C \cdot \left(\frac{g \cdot \sin \theta \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu_a \cdot \alpha_a} \right)^n \quad (2.18)$$

Despejando el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio en la ecuación 2.11 e incorporando la expresión 2.18 se obtiene:

$$\overline{h}_a = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k_a}{L} = \frac{k_a}{L} \cdot C \cdot Ra_L^n = \frac{C \cdot \left(\frac{g \cdot \sin \theta \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu_a \cdot \alpha_a} \right)^n \cdot k_a}{L} \quad (2.19)$$

Se han desarrollado numerosas investigaciones encaminadas a determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección durante el secado solar natural de diferentes materiales. Anwar y Tiwari (2001b), Jain y Tiwari (2003) y Kumar y Tiwari (2006) determinaron el referido coeficiente para varios productos (chiles verde, pimientos verdes, cebollas, patatas, entre otros) y desarrollaron los modelos matemáticos para calcular este parámetro durante el secado solar natural. Jain y Tiwari (2004) estudiaron la dependencia del coeficiente de transferencia de calor durante el secado solar completo de pimientos verdes. Este coeficiente también ha sido evaluado por Tiwari et al. (2004). Los modelos obtenidos para el coeficiente de transferencia de calor por convección constituyen adaptaciones del reportado por Kumar y Tiwari (1996) y permiten determinar satisfactoriamente las constantes C y n antes mencionadas.

Debido a las características geográficas y climatológicas que tienen las regiones donde se encuentran las empresas, en muchas ocasiones la velocidad del aire ambiente aumenta y provoca que la convección forzada sea predominante durante el proceso de secado solar natural de las menas lateríticas, cuando esto ocurre el número de Nusselt ($\overline{Nu}_F$) es función de los números de Reynolds y Prandtl y puede ser calculado por la expresión 2.20 reportada por Kasatkin (1987).

$$\overline{Nu}_F = \frac{\overline{h}_a \cdot L}{k_a} = 2 + M \cdot Re_L^B \cdot Pr^{1/3} \cdot Gu^{0.133} \quad (2.20)$$

Siendo:

$$Re = \frac{\rho_a \cdot V_a \cdot L}{\mu_a} = \frac{V_a \cdot L}{\nu_a} \quad (2.21)$$

$$Pr = \frac{\nu_a}{\alpha_a} \quad (2.22)$$

$$Gu = \frac{T_a - T_s}{T_a} \quad (2.23)$$

$$\xi = T_a - T_s \quad (2.24)$$

Donde:

μ_a : coeficiente dinámico de viscosidad del aire; (N s/m²).

V_a : velocidad del aire; (m/s).

Gu : número de Gujman; (adimensional).

ξ : potencial de secado; (K).

Despejando el coeficiente de transferencia de calor por convección de la ecuación 2.20 se obtiene:

$$\overline{h}_a = \frac{\overline{Nu}_F \cdot k_a}{L} = \frac{(2 + M \cdot Re_L^B \cdot Pr^{1/3} \cdot Gu^{0.133}) \cdot k_a}{L} \quad (2.25)$$

Al igual que en la convección libre todas las propiedades son evaluadas a la temperatura de película T_p . Los valores del coeficiente M y el exponente B se determinan en función del número de Reynolds (Kasatkin, 1987)

En caso de que se cumpla la condición representada en la ecuación 2.10 la convección es mixta y el número de Nusselt ($\bar{Nu}_M$) se determina por la ecuación 2.26 (Churchill, 1983a; 1983b). El signo más se aplica para flujo asistido y transversal, el menos al flujo opuesto.

$$\bar{Nu}_M = \frac{\bar{h}_a \cdot L}{k_a} = \sqrt[3]{\bar{Nu}_F^3 \pm \bar{Nu}_L^3} \quad (2.26)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.20 y 2.18 en la 2.26 resulta:

$$\bar{Nu}_M = \frac{\bar{h}_a \cdot L}{k_a} = \sqrt[3]{\left(2 + M \cdot \text{Re}_L^B \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \text{Gu}^{0.133}\right)^3 \pm \left[C \cdot \left(\frac{g \cdot \sin \theta \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu_a \cdot \alpha_a}\right)^n\right]^3} \quad (2.27)$$

Luego el coeficiente de transferencia de calor por convección para esta condición se determina por la ecuación 2.28.

$$\bar{h}_a = \frac{\sqrt[3]{\left(2 + M \cdot \text{Re}_L^B \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \text{Gu}^{0.133}\right)^3 \pm \left[C \cdot \left(\frac{g \cdot \sin \theta \cdot \beta_a \cdot (T_a - T_s) \cdot L^3}{\nu_a \cdot \alpha_a}\right)^n\right]^3}}{L} \cdot k_a \quad (2.28)$$

Una vez calculado el coeficiente de transferencia de calor por convección ($\bar{h}_a$) haciendo uso de la ecuación apropiada (entre 2.19, 2.25 y 2.28), el calor por convección (libre, forzada o mixta) que intercambian la corriente de aire y las menas lateríticas sometidas a secado solar natural se determina a través de la ecuación 2.7, conociendo la temperatura del aire y de la superficie de secado, las cuales pueden ser determinadas experimentalmente.

2.2.2- Transferencia de calor por radiación

Para determinar el flujo de calor neto que recibe la pila de menas lateríticas por radiación se realiza el balance de energía en la superficie de secado en

correspondencia con el esquema mostrado en la Figura 2.3 y se obtiene la expresión 2.31.

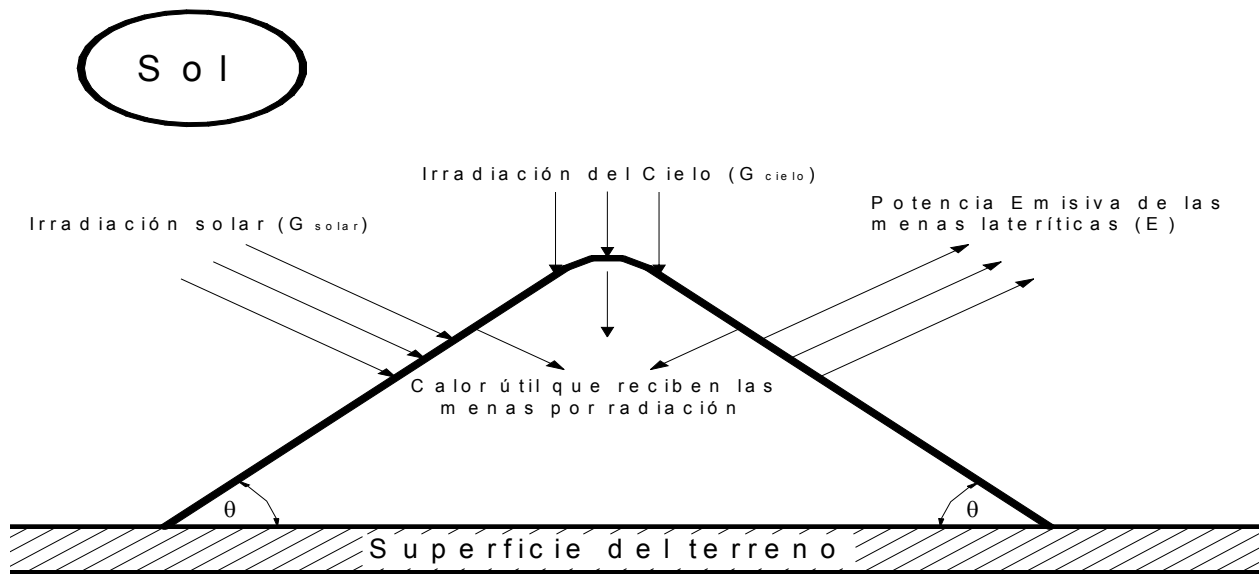


Figura 2.3. Esquema estructural para el intercambio de calor por radiación entre las menas lateríticas y los alrededores.

$$Ee - Es = 0 \quad (2.29)$$

Después del análisis correspondiente a la Figura 2.3 la ecuación anterior (2.29) se transforma de la forma siguiente:

$$\alpha_s \cdot G_{solar} + \alpha_{cielo} \cdot G_{cielo} - E = Q_{Rad} \quad (2.30)$$

Donde:

α_s : absortividad solar de las menas lateríticas; (adimensional)

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

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

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

E : potencia emisiva de las menas lateríticas; (W/m^2).

La irradiación solar puede ser calculada por la ecuación 2.31 propuesta por Sayigh (1977). Para el objeto de estudio se obtiene experimentalmente.

$$G_{solar} = \int_{0,2}^3 G_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.31)$$

Donde:

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

λ : longitud de onda; (μm).

Debido a que la radiación del cielo se concentra aproximadamente en la misma región espectral que la emisión superficial (Incropera y De Witt, 1999), se puede asumir que:

$$\alpha_{cielo} = \varepsilon_m \quad (2.32)$$

La irradiación del cielo debido a la emisión atmosférica se puede calcular según Anderson (1982) por la ecuación siguiente:

$$G_{cielo} = \sigma \cdot T_{cielo}^4 \quad (2.33)$$

Donde:

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

El valor de la temperatura efectiva del cielo depende de las condiciones atmosféricas, variando desde $230K$ bajo un cielo claro y frío hasta $285K$ aproximadamente, para condiciones nubladas y calientes (Howell et al., 1982). La misma puede ser estimada en función de la temperatura del aire ambiente según la ecuación 2.34 reportada por Duffie y Beckman (1991).

$$T_{cielo} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (2.34)$$

La potencia emisiva asociada a la superficie de la pila de menas laterítica puede ser calculada según Duffie y Beckman (1991) por la ecuación siguiente:

$$E = \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.35)$$

Donde

ε_m : emisividad de las menas lateríticas; (adimensional).

σ : constante de Stefan-Boltzman; ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

Luego el flujo de calor por radiación que recibe la superficie de secado se obtiene sustituyendo las ecuaciones 2.32-2.35 en la 2.30.

2.2.3- Transferencia de calor por conducción

El calor que se transfiere por conducción (Q_{Cond}) desde la superficie de secado hacia el interior de la pila de minerales puede calcularse a partir del empleo de la Ley de Fourier (ecuación 2.36) reportada por Incropera y De Witt (1999).

$$Q_{Cond} = -k_m \cdot \frac{T_s - T_{i(X,\tau)}}{X} \quad (2.36)$$

Donde:

k_m : conductividad térmica de las menas lateríticas; (W/m K).

$T_{i(X,\tau)}$: temperatura de las menas lateríticas en el interior de la pila; (K)

X : espesor de la capa donde se produce la conducción del calor; (m).

La temperatura de las menas lateríticas en el interior de la pila $T_{i(X,\tau)}$ se determina resolviendo la ecuación de difusión del calor (2.37), considerando la pila de minerales como un sólido semiinfinito.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = \frac{1}{\alpha_m} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.37)$$

Condición inicial:

$$T_{(X,0)} = T_s \quad (2.38)$$

Condiciones de frontera

$$T(X \Rightarrow \infty, \tau) = T_s \quad (2.39)$$

$$-k_m \cdot \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} = h_a \cdot [T_a - T(0, \tau)] \quad (2.40)$$

Haciendo uso de las condiciones iniciales y de fronteras que se representan a través de las ecuaciones 2.38-2.40 se obtiene la solución de la ecuación 2.37 (Incropera y De Witt, 1999), que se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \frac{T_i(X, \tau) - T_s}{T_a - T_s} = \operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{\alpha_m \cdot \tau}} \right) - \\ - \left[\exp \left(\frac{h_a \cdot X}{k_m} + \frac{h_a^2 \cdot \alpha_m \cdot \tau}{k_m^2} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{\alpha_m \cdot \tau}} + \frac{h_a \cdot \sqrt{\alpha_m \cdot \tau}}{k_m} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.41)$$

Siendo:

$$\operatorname{erfc} = 1 - \operatorname{erf} \quad (2.42)$$

Donde:

erfc : función complementaria de error; (adimensional).

erf : función gaussiana de error; (adimensional).

α_m : difusividad térmica de las menas lateríticas; (m²/s).

τ : tiempo en que se produce la transferencia de calor; (s)

Despajando el término de interés en la ecuación 2.41 se obtiene la expresión apropiada (2.43) para determinar la temperatura de las menas lateríticas en el interior de una pila sometida a convección superficial. Al sustituir la ecuación anterior en la 2.36 se puede determinar el flujo de calor por conducción transferido hacia el interior de la pila.

$$T_i(X, \tau) = \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{\alpha_m \cdot \tau}} \right) - \left[\exp \left(\frac{h_a \cdot X}{k_m} + \frac{h_a^2 \cdot \alpha_m \cdot \tau}{k_m^2} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{\alpha_m \cdot \tau}} + \frac{h_a \cdot \sqrt{\alpha_m \cdot \tau}}{k_m} \right) \right] \right\} \cdot (T_a - T_s) + T_s \quad (2.43)$$

2.2.4- Determinación del calor latente de humedad

El cálculo de este flujo de calor depende del régimen de secado, es por ello que se exponen las expresiones para los dos períodos.

$$q_s = N \cdot \lambda \quad (2.44)$$

Donde:

q_s : calor latente de humedad; (W/m^2).

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

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

Período de velocidad de secado constante

En este período se considera que la humedad está distribuida uniformemente en toda la superficie del material, por tanto se cumple que:

$$\tau = 0 \quad u = \text{constante} \quad k = \text{constante} \quad (2.45)$$

Luego el régimen de secado (N_c) es igual a N por lo que es aplicable la ecuación 2.57 para cualquier sólido cuyo proceso de secado transcurra completamente dentro del período de velocidad de secado constante, por tanto:

$$N = N_C = -\frac{m_s}{A} \frac{du}{d\tau} = k_y \cdot (Y_s - Y) \quad (2.46)$$

Donde:

N_C : régimen de secado en el período de velocidad constante; ($kg_h/m^2 \text{ h}$).

m_s : masa del sólido seco; (kg_{ss}).

A : área de transferencia de calor y masa donde se lleva a cabo la evaporación; (m^2).

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

k_y : coeficiente de transferencia de masa gaseosa; ($\text{kg}_{\text{as}}/\text{m}^2 \text{ h}$).

Y_s : humedad del aire en la superficie del líquido; ($\text{kg}_h/\text{kg}_{\text{as}}$).

Y : humedad del aire en la corriente principal; ($\text{kg}_h/\text{kg}_{\text{as}}$).

Período de velocidad de secado decreciente

Aunque existen al menos dos formas de determinar el régimen de secado en este período, una de las prácticas más empleadas por diferentes investigadores (Treybal, 1985; Rudenko y Shemajanov, 1989; Ekechukwu y Norton, 1999) es la que considera el comportamiento de la curva de secado como una línea recta (Figura 1.1; curva 1) según la ecuación 2.47.

$$N = N_D = \frac{N_C \cdot (u - u_e)}{u_c - u_e} = k_2 \cdot (u - u_e) \quad (2.47)$$

Donde:

N_D : régimen de secado en el período de velocidad decreciente; ($\text{kg}_h/\text{m}^2 \text{ h}$).

u : humedad en un instante cualquiera; ($\text{kg}_h/\text{kg}_{\text{ss}}$).

u_e : humedad de equilibrio; ($\text{kg}_h/\text{kg}_{\text{ss}}$).

u_c : humedad final del régimen constante; ($\text{kg}_h/\text{kg}_{\text{ss}}$).

k_2 : coeficiente de secado para el segundo período; ($\text{kg}_{\text{ss}}/\text{m}^2 \text{ h}$).

2.3- Ecuaciones para el cálculo del área de transferencia de calor y masa de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar

Para obtener el área de transferencia de calor y masa (A) en una pila de menas lateríticas formada simétricamente se tienen en cuenta las áreas laterales y frontales presentes en la misma, considerando que las primeras corresponden a superficies rectangulares y las segundas a superficies cónicas, en correspondencia con la Figura 2.4. Luego se calcula por la expresión 2.48:

$$A = 2 \cdot A_{SL} + A_C \quad (2.48)$$

Donde:

A_{SL} : área de la superficie lateral; (m^2)

A_C : área lateral del cono formado entre los dos extremos de la pila de menas lateríticas; (m^2)

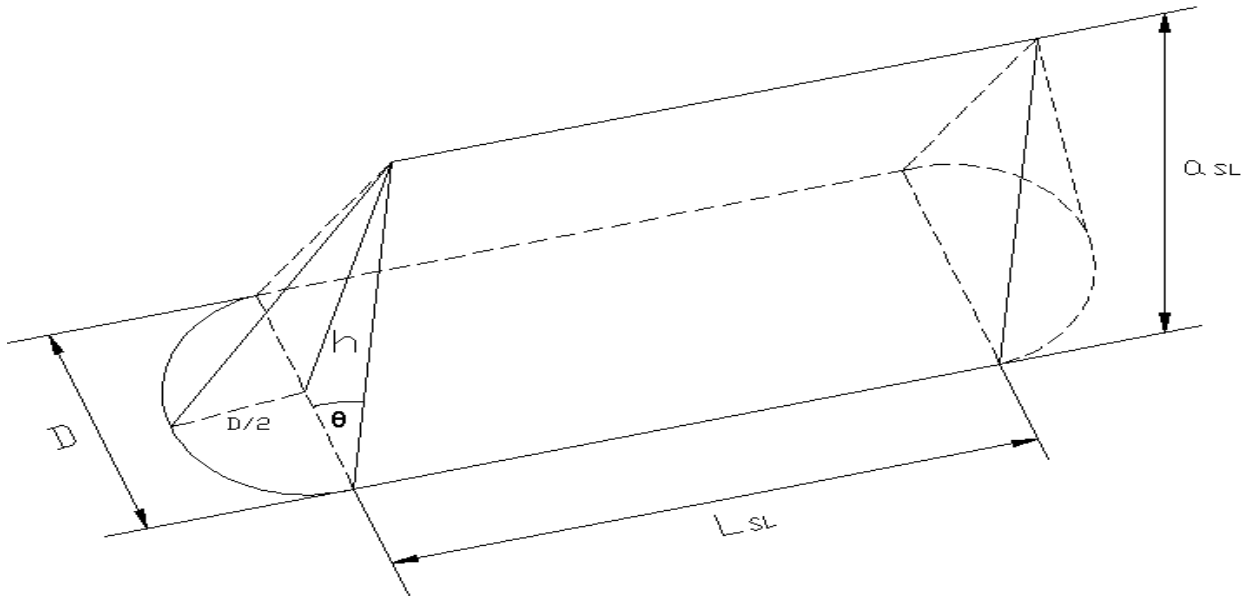


Figura 2.4. Esquema estructural útil para la determinación del área de transferencia de calor y masa de una pila de menas lateríticas sometida a secado solar natural.

Teniendo en cuenta que las superficies laterales son rectangulares, las áreas pueden ser calculadas por la expresión 2.49.

$$A_{SL} = a_{SL} \cdot L_{SL} \quad (2.49)$$

Donde:

a_{SL} : ancho de la superficie lateral de la pila; (m)

L_{SL} : longitud de la superficie lateral de la pila; (m)

Aplicando trigonometría se obtiene que:

$$\cos \theta = \frac{D}{2 \cdot a_{SL}} \quad (2.50)$$

Despejando

$$a_{SL} = \frac{D}{2 \cdot \cos \theta} \quad (2.51)$$

Donde:

D : ancho de la base de la pila de menas lateríticas; (m)

θ : ángulo de talud natural de las menas lateríticas; (grados)

Sustituyendo la ecuación 2.51 en la 2.50 se obtiene:

$$A_{SL} = \frac{D}{2 \cdot \cos \theta} \cdot L_{SL} \quad (2.52)$$

Luego el área lateral del cono formado por los extremos de la pila de menas lateríticas se determina por la ecuación 2.53.

$$A_C = \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} \quad (2.53)$$

Donde:

h : altura de la pila de menas lateríticas; (m)

Sustituyendo las expresiones 2.52 y 2.53 en la ecuación 2.48 se obtiene:

$$A = \frac{D}{\cos \theta} \cdot L_{SL} + \left(\pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} \right) \quad (2.54)$$

El parámetro D puede ser calculado en función del ángulo de talud natural de las menas lateríticas (θ) y la altura de la pila (h), luego:

$$\tan \theta = \frac{h}{D/2} \quad (2.55)$$

Despejando se obtiene:

$$D = \frac{2 \cdot h}{\tan \theta} \quad (2.56)$$

Sustituyendo la ecuación 2.56 en la 2.54 resulta:

$$A = \frac{2 \cdot h}{\tan \theta} \cdot \frac{L_{SL}}{\cos \theta} + \left(\pi \cdot \frac{h}{\tan \theta} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \theta} + h^2} \right) \quad (2.57)$$

La expresión (2.57), obtenida para el proceso analizado, permite calcular el área de transferencia de calor y masa de una pila de menas lateríticas, formada simétricamente, expuesta a secado solar natural a partir de conocer dos dimensiones geométricas de la pila (altura, y longitud de la superficie lateral) y una propiedad del material (ángulo de talud natural).

2.4- Conclusiones del capítulo 2

- ❖ Los diferentes fenómenos físicos que caracterizan la transmisión de calor por convección, radiación y conducción determinan el procedimiento de cálculo para el cálculo de la transferencia de calor durante el secado solar natural en las menas lateríticas.
- ❖ El modo de transferencia de calor por convección que predomina en el secado solar natural de las menas lateríticas debe determinarse mediante mediciones experimentales, ya que existen tres situaciones físicas en las que puede desarrollarse el flujo de calor convectivo.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y DE LOS IMPACTOS DERIVADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SECADO SOLAR DE LAS MENAS LATERÍTICAS

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 relacionada con la explotación de la energía solar, eólica y otras fuentes renovables que cobran particular relevancia en el mundo actual, ya que son fuentes de energía limpias que posibilitan disminuir el impacto ambiental de las tradicionales.

El análisis de los resultados de la investigación juega un papel esencial en el proceso investigativo, ya que permite establecer el comportamiento de los parámetros fundamentales del proceso analizado; en tal sentido el **objetivo** de este capítulo es: Analizar los resultados obtenidos en la transferencia de calor y los impactos asociados al secado solar natural de las menas lateríticas.

3.2- Transferencia de calor en el secado solar natural

A continuación se exponen los resultados de la transferencia de calor en el secado solar natural de las menas lateríticas analizadas

Transferencia de calor por convección

En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los resultados de la transferencia de calor por convección para las dos pilas de menas lateríticas analizadas. Al valorar los resultados mencionados se aprecia un predominio de la convección forzada que se manifiesta en el hecho de que la relación (Gr / Re^2) por lo general es mucho menor que 1, sin embargo para las humedades 32 y 28% la relación antes mencionada no se cumple y en ambos casos (Gr / Re^2) es mucho mayor que 1 lo que permite concluir que la convección es libre. Para la humedad 40% la relación (Gr / Re^2) se aproxima a 1 lo

que indica la existencia de la convección mixta. De los aspectos anteriores es razonable concluir que en el secado solar de las menas lateríticas están presentes la transferencia de calor por convección libre, forzada y mixta, siendo predominante la segunda.

Tabla 3.1 Resultados de la transferencia de calor por convección para la pila 1

Humedad (%)	Taire (°C)	Re	Gr	Gr/Re ²	Ra	Nusselts	hconv. (W/m ² K)	q conv. (W/m ²)
39	25,7	149353,758	1338924505	0,06	No se calcula	541,473	7,851	20,963
38	28,8	249353,005	1990208226	0,032	No se calcula	907,053	13,249	54,586
36	31,7	245483,963	2263012734	0,038	No se calcula	913,38	13,436	65,566
35	32,4	144607,798	2478310301	0,119	No se calcula	575,381	8,476	45,683
37	28,1	204474,456	1746035193	0,042	No se calcula	745,553	10,877	39,048
34	30,0	304312,979	2245692736	0,024	No se calcula	1103,844	16,165	76,297
31	31,4	345478,748	1852137221	0,016	No se calcula	1209,318	17,799	71,195
29	30,9	302408,064	2089303561	0,023	No se calcula	1088,893	15,991	71,318
40	24,8	46243,9626	1558549578	0,729	1101757724	551,647	7,972	24,394
38	28,1	148008,526	2061696079	0,094	No se calcula	570,001	8,306	35,049
33	31,6	246715,137	2947173128	0,048	No se calcula	940,154	13,799	86,793
30	32,4	245790,222	3135456172	0,052	No se calcula	954,543	14,033	94,865
32	27,6	11423,8568	2212170991	16,951	1562912395	610,74	8,883	39,884
30	30,4	304503,647	2668963145	0,029	No se calcula	1129,9	16,542	92,798
28	28,1	11410,9659	2463621383	18,92	1740469661	633,021	9,213	46,247
26	33,8	342916,139	2883213105	0,025	No se calcula	1276,364	18,848	120,065

Se observan, en general, bajos valores del coeficiente de transferencia de calor por convección que alcanzan valores máximos de 18,848 y 16,461 W/m² K para las pilas 1 y 2 respectivamente. Estos comportamientos se deben a los bajos regímenes de velocidad y temperatura que tiene el agente secador (el aire) durante el secado solar natural de las menas lateríticas.

Tabla 3.2 Resultados de la transferencia de calor por convección para la pila 2

Humedad (%)	Taire (°C)	Re	Gr	Gr/Re ²	Ra	Nusselts	hconv. (W/m ² K)	q conv. (W/m ²)
38	27,9	0,000	1746249403,22		No se calcula	2,000	0,029	0,104
36	30,2	146428,460	2326852475,23	0,109	No se calcula	575,212	8,426	41,286
34	28,7	102065,246	1988263238,59	0,191	No se calcula	406,961	5,943	24,424
30	31,3	246251,811	2425031419,75	0,040	No se calcula	923,660	13,568	70,417
28	33,9	298115,615	2655220539,41	0,030	No se calcula	1113,774	16,461	96,957
30	30,1	146244,516	2004308261,87	0,094	No se calcula	563,491	8,259	34,934

Los flujos de calor transferidos por convección están en correspondencia con los respectivos coeficientes de transferencia de calor por convección ($h_{conv.}$), los mismos pueden incrementarse con el aumento de la temperatura del aire ambiente como resultado de la intensificación de la radiación solar.

Transferencia de calor por radiación

Para los valores obtenidos en el cálculo del flujo de calor por radiación se observa una dependencia considerable de la radiación solar que se manifiesta en los máximos valores de flujo de calor para los valores de radiación solar mayores en ambas pilas. La porción de la radiación solar que es absorbida por las menas lateríticas depende de la absorptividad solar de las mismas, también es importante la irradiación del cielo y la emisividad de las menas. En general, los calores calculados por convección son superiores a los de la radiación, lo cual puede ser atribuible a la nubosidad existente en determinados días de experimentación y al hecho de que la influencia del movimiento del aire es prácticamente permanente durante todo el año y la radiación solar no influye de igual manera.

Tabla 3.3 Resultados de la transferencia de calor por radiación para la pila 1

Humedad (%)	G _s (W/m ²)	G _s *a _s (W/m ²)	G _{cielo} (W/m ²)	G _{cielo} *a _{cielo} (W/m ²)	E (W/m ²)	Q _{rad} (W/m ²)
39	143	131,56	375,024	75,005	405,778	-199,214
38	591	543,72	398,979	79,796	414,897	208,619
36	967	889,64	422,529	84,506	426,950	547,196
35	536	493,12	428,384	85,677	428,033	150,764
37	70	64,40	393,461	78,692	413,950	-270,858
34	529	486,68	408,587	81,717	418,250	150,147
31	244	224,48	420,040	84,008	430,262	-121,774
29	145	133,40	415,920	83,184	424,791	-208,207
40	174	160,08	368,298	73,660	398,755	-165,015
38	605	556,60	393,461	78,692	410,457	224,836
33	980	901,60	421,698	84,340	418,418	567,521
30	648	596,16	428,384	85,677	420,272	261,565
32	158	145,36	389,559	77,912	406,217	-182,945
30	602	553,84	411,833	82,367	415,510	220,697
28	164	150,88	393,461	78,692	406,052	-176,480
26	695	639,40	440,296	88,059	430,434	297,026

Tabla 3.4 Resultados de la transferencia de calor por radiación para la pila 2

Humedad (%)	G _s (W/m ²)	G _s *a _s (W/m ²)	G _{cielo} (W/m ²)	G _{cielo} *a _{cielo} (W/m ²)	E (W/m ²)	Q _{rad} (W/m ²)
38	143	131,56	391,896	78,379	412,894	-202,955
36	591	543,72	410,207	82,041	418,362	207,399
34	536	493,12	398,186	79,637	414,395	158,362
30	70	64,40	419,213	83,843	422,922	-274,680
28	529	486,68	441,158	88,232	433,766	141,146
30	244	224,48	409,397	81,879	421,567	-115,208

Transferencia de calor por conducción

La conducción es el método de transferencia de calor con menor influencia en el secado solar natural ya que los valores máximos para ambas pilas son 33,133 W/m² y 27,792 W/m² respectivamente. Por lo que no se valoran sus resultados.

Calor latente de humedad

El flujo de calor latente de humedad presente tiene valores que oscilan entre 268.23 y 657.46 W/m² para la pila 1 y 25.78 y 398.85 W/m² para la pila 2

3.3- Comportamiento de los procesos de transferencia de calor

Las figuras 3.1 y 3.2 reflejan el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección y el flujo de calor por convección para las pilas 1 y 2, en general se aprecia un predominio de la convección forzada, aunque para la pila 1 existen tres puntos en los que el coeficiente de transferencia de calor por convección es inferior a 10 W/m² K indicativo de la existencia de la transferencia de calor por convección libre y mixta y de la convección forzada a baja velocidad.

Al valorar el comportamiento del flujo de calor se observa una dependencia proporcional respecto al coeficiente de transferencia de calor por convección que está determinado fundamentalmente por la velocidad del aire y su temperatura, en los dos gráficos existen puntos de inflexión que demuestran la influencia de la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie de secado en el flujo de calor transferido.

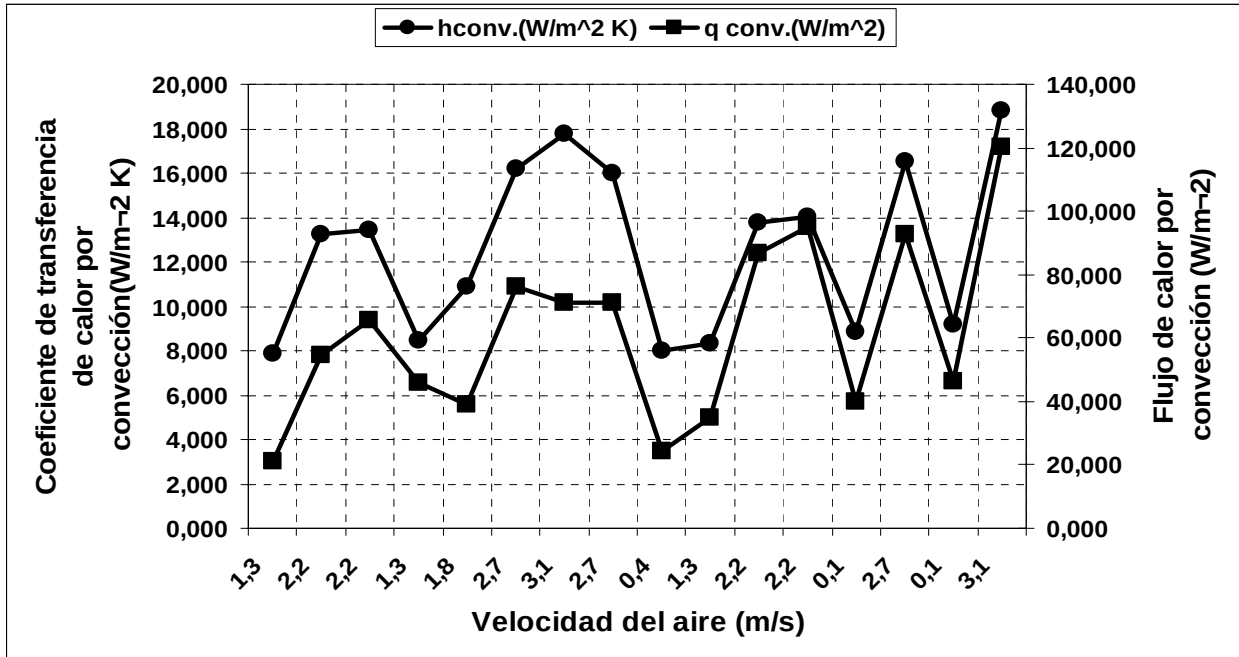


Figura 3.1. Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección y el flujo de calor por convección respecto a la velocidad del aire (pila 1).

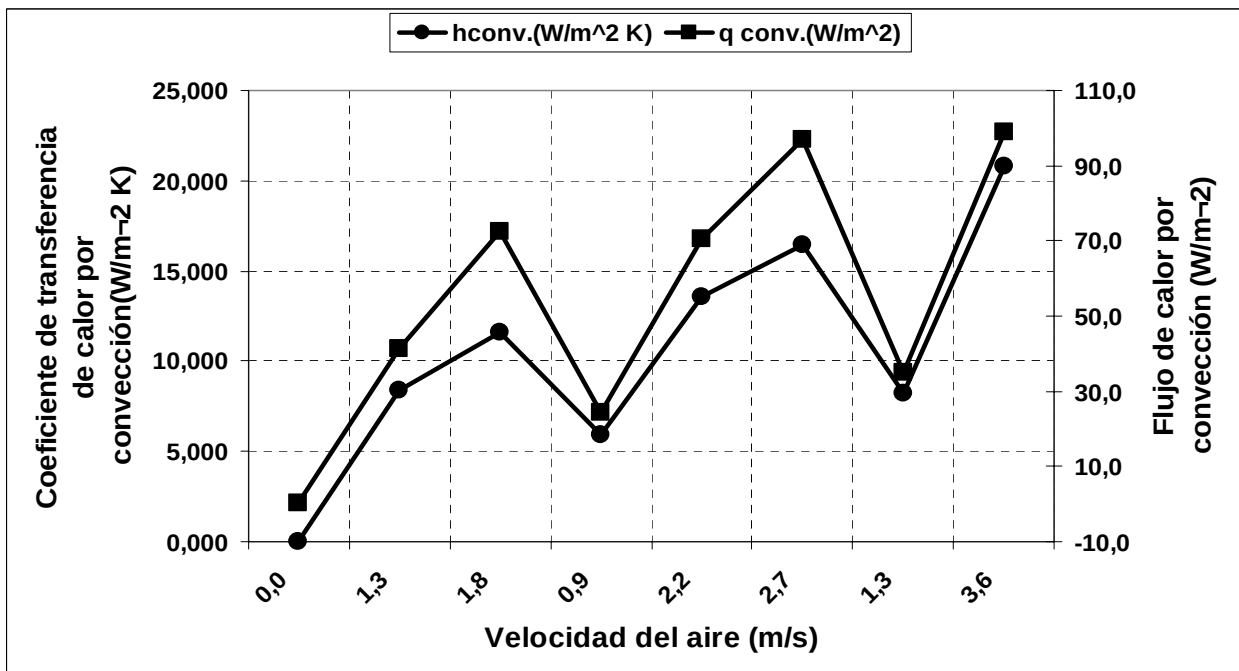


Figura 3.2. Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección y el flujo de calor por convección respecto a la velocidad del aire (pila 2).

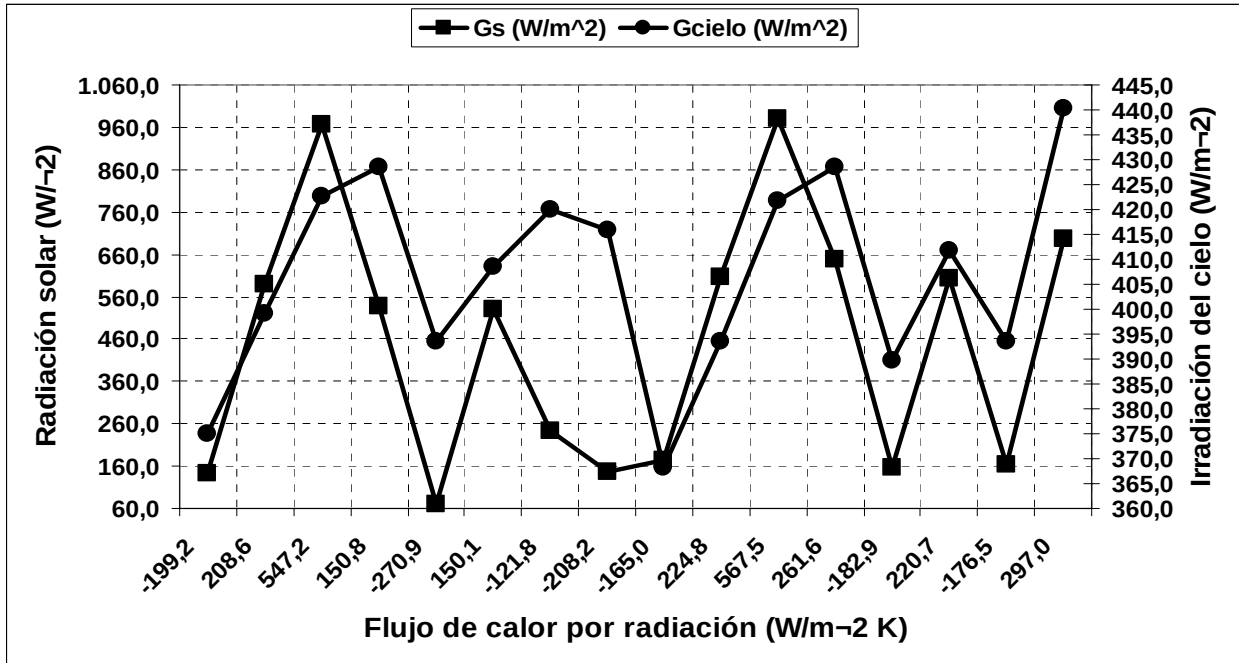


Figura 3.3. Comportamiento de la radiación solar y la irradiación del cielo respecto al flujo de calor por radiación (pila 1).

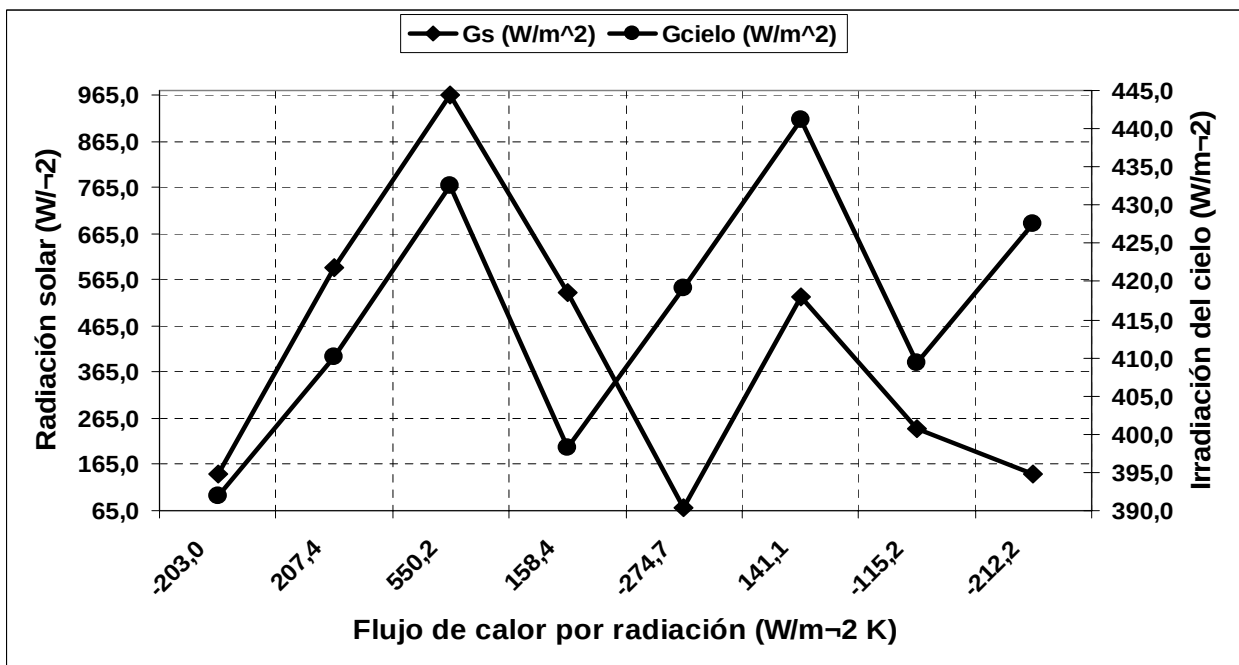


Figura 3.4. Comportamiento de la radiación solar y la irradiación del cielo respecto al flujo de calor por radiación (pila 2).

En las figuras 3.3 y 3.4 se demuestra la influencia que tiene la radiación solar y la irradiación del cielo en el flujo de calor por radiación que es aprovechado en el secado, en las referidas figuras se aprecia que para los mayores valores de radiación solar se obtienen los flujos de calor superiores. También se debe destacar las oscilaciones considerables presentes en la radiación solar, lo que es lógico por cuanto ella depende de las condiciones climatológicas de la región y del horario del día.

Al comparar los valores de los flujos de calor por convección y radiación entre ambas pilas se aprecia que la mayor influencia en el secado la tiene la convección, de lo anterior se refiere la importancia del régimen eólico presente en el patio de secado.

En las figuras 3.5 y 3.6 se establece el comportamiento del calor latente de humedad respecto a la humedad de las menas, de las referidas figuras se derivan los análisis siguientes: los flujos de calor están determinados por las condiciones climatológicas (fundamentalmente por las precipitaciones) y por el horario del día, en la figura 3.5 se observan tres picos inferiores para los cuales el calor es negativo, los que están en los extremos obedecen a la disminución de las propiedades termodinámicas del aire en el período nocturno que provoca una entrega de calor del material al medio y en el pico más pronunciado obedece a la ocurrencia de precipitaciones que provocaron el enfriamiento brusco de las menas.

Para la pila 2 ocurre de forma similar entre los valores 28 y 30% de humedad y a entrega de calor está asociada al período nocturno, en el valor de la humedad igual a 34% se obtiene un proceso en el cual el calor absorbido por las menas se reduce hasta tanto se hace nulo, este comportamiento se corresponde con la humedad constante que mantuvo la muestra lo cual determinó que el régimen de secado se anulara también.

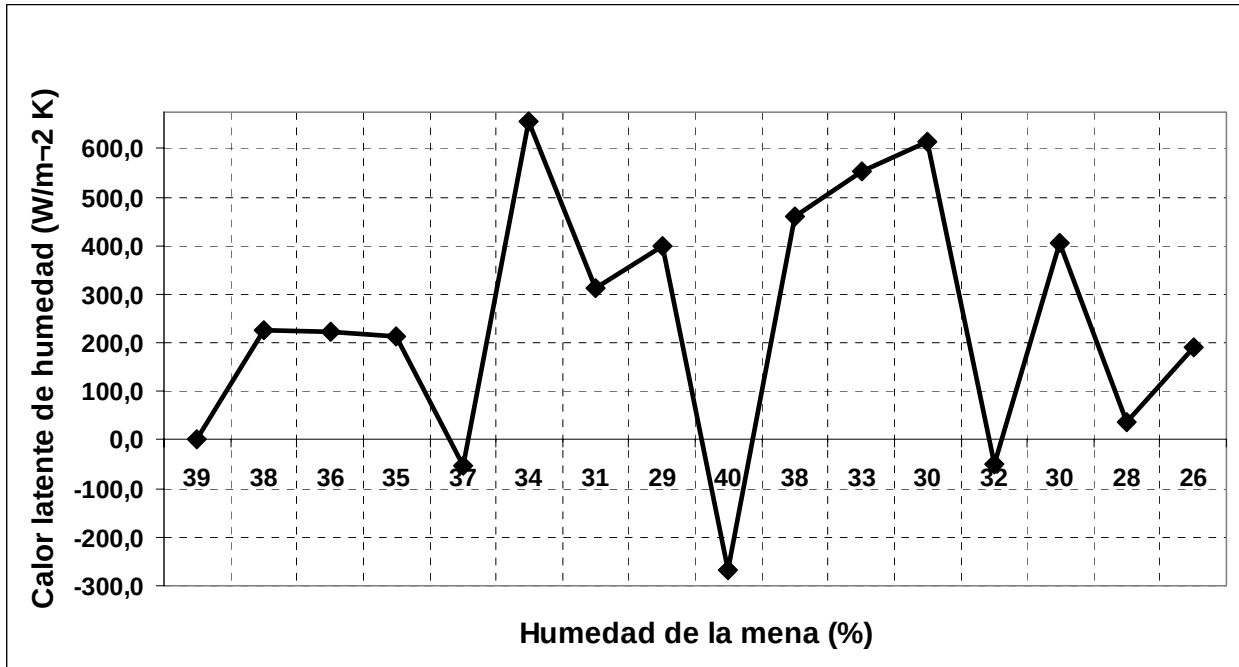


Figura 3.5. Comportamiento del calor latente de humedad respecto a la humedad de las menas (pila 1).

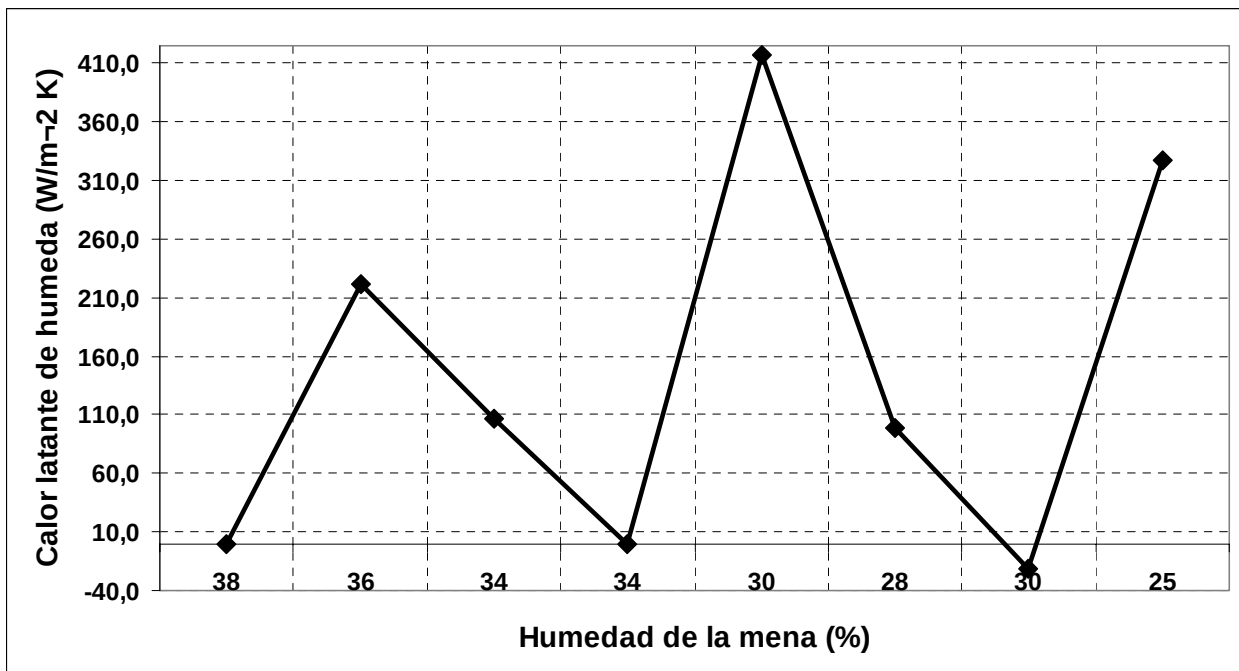


Figura 3.6. Comportamiento del calor latente de humedad respecto a la humedad de las menas (pila 2).

3.4- Análisis de los impactos asociados a la implementación del secado solar natural de las menas lateríticas

Diferentes investigadores (Estenoz, 1999; Estenoz et al., 2004; 2008; Retirado, 2007) coinciden en que de la implementación del secado solar natural de las menas lateríticas fundamentalmente se derivan impactos económicos, sociales y ambientales. Los mismos se detallan a continuación:

3.4.1- Impacto económico

La disminución de la humedad del mineral a la entrada de los secaderos mediante el secado solar contribuye a que la planta de preparación de mineral opere con mayores flujos de producción, disminuye los consumos de combustible y energía lo que permite elevar la eficiencia de la empresa y con ello maximizar los aportes al estado, lo cual podría utilizarse en compras de alimentos para los niños y la población en general, la educación, la salud pública, círculos infantiles o construcción de alguna infraestructura social importante en la comunidad. Además con la innovación tecnológica en el secado solar de las menas lateríticas se logran otros beneficios económicos, entre los que se destaca el mejoramiento de la homogeneidad y el mezclado de la materia prima abastecida a la empresa, lo cual según Estenoz et al. (2008) permite:

- Reducir el contenido de humedad de las menas lateríticas alimentadas a los secaderos, lo cual conduce al ahorro de petróleo y a la disminución de las emanaciones de CO₂, SO₂ y otros gases contaminantes en los cilindros secadores, así como al ahorro de electricidad durante los procesos de secado y molienda.
- Mejorar el desmenuzamiento y reducir la adherencia de las menas, lo que conlleva a:
 - a. Reducir las pérdidas de mineral útil en los procesos de beneficio.
 - b. Incrementar la productividad de los secaderos por la ampliación de la superficie de contacto entre el mineral y los gases dentro de los tambores secadores.
 - c. Incrementar la productividad de los molinos al pasar menos mineral fino con el material granulado.
- Aumentar la estabilidad del abasto y la homogeneización de las menas al proceso metalúrgico y con ello incrementar la recuperación metalúrgica de los metales útiles

para producir más níquel con la misma cantidad de materia prima y a un menor costo de producción (Estenoz, 2007).

3.4.2- Impacto social

La introducción de la tecnología del secado solar para las menas lateríticas permite humanizar la labor de los operadores de los secaderos ubicados en la planta de preparación de mineral, mejorar ostensiblemente el entorno laboral y disminuir las emisiones gaseosas hacia los puestos de trabajo y los barrios residenciales de la comunidad, aumentando la calidad del aire lo que conlleva a la disminución de los problemas respiratorios en las personas que viven en las comunidades cercanas a las empresas.

Otro aspecto positivo lo representa la posibilidad de obtener mejores índices de producción y con ello una mayor estimulación de los obreros al poder cumplir exitosamente los planes de producción, lo que repercute favorablemente en las familias de los trabajadores ya que se incrementa el nivel adquisitivo y por ende se eleva el nivel y la calidad de vida de los mismos. También a nivel de estado pueden erogarse determinados recursos para la construcción de algunas obras sociales de utilidad para los ciudadanos de las comunidades donde están enclavadas las empresas y de todo el país en general.

3.4.3- Impacto ambiental

El proceso estudiado daña poco al medio ambiente, ya que el mismo es natural y utiliza las energías solar térmica y eólica como fuentes de secado, con la implementación del secado solar natural de las menas lateríticas se reducen las emanaciones de gases producto de la combustión (CO_2 , SO_2 y otros gases tóxicos) liberados por los secaderos rotatorios, debido a que el tiempo de permanencia del mineral dentro de los mismos se reduce y el consumo específico de combustible decrece considerablemente. Teniendo en cuenta que estos gases son perjudiciales para la vida de los seres humanos y las plantas se infiere que la reducción de las emisiones mejora la calidad del aire en el entorno laboral y en los barrios cercanos, lo que repercute en la disminución de los niveles de contaminación de las aguas y los ecosistemas de los territorios aledaños.

Las principales afectaciones medioambientales provocadas por algunos de los gases que se generan durante el secado convencional en los secaderos se relacionan a continuación:

- **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 da lugar a la formación de las lluvias ácidas que atacan a las plantas y los edificios.

A pesar de los beneficios medioambientales asociados al secado solar natural de las menas lateríticas durante el desarrollo del mismo existe una afectación constante al medio ambiente y los trabajadores en el patio de secado provocadas por las emanaciones de polvo y ruido que se generan en el proceso de carga, descarga y remoción de las menas lateríticas, por esta razón se procede a explicar las principales afectaciones causadas por ambas fuentes contaminantes.

Afectaciones causadas por el polvo al medio ambiente y el organismo humano

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 (en el trabajo no se exponen los valores cuantitativos de las concentraciones porque no se han realizado mediciones recientes en las empresas). Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetro comprendido entre 0.1 a 1 μ m. Entre los efectos que producen sobre los materiales se encuentran la abrasión realizada por aquella partícula de mayor diámetro y ataque químico que puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases que viajan 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.

Sin embargo, cuando se habla del organismo humano, la situación se torna más preocupante, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias y mediante la 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 entre otras características. En la segunda, las partículas de diámetro superiores a 5 μm quedan retenidas en la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea. 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.

Efecto del ruido sobre la salud humana

Entre los impactos negativos del ruido se encuentran los cambios y pérdida de la audición, interferencia de la comunicación oral, molestias y disminución de la capacidad de trabajo. Se ha demostrado que la exposición prolongada a altos niveles de ruido puede provocar la pérdida total de la audición. Otras alteraciones del oído producto del ruido son: el tapamiento del canal auditivo y la ruptura de la membrana timpánica.

El ruido también produce en el sistema neuro-vegetativo una serie de modificaciones funcionales que son reacciones de defensa del organismo frente a una agresión externa, por ejemplo: la elevación de la presión arterial, aceleración del ritmo cardiaco y de los movimientos respiratorios, tensión muscular, descarga de hormonas en sangre,

entre otros. Esto ocurre sobre todo cuando el ruido es muy intenso, de carácter impulsivo y el que escucha no está preparado para ello. Los niveles de ruido altos, están considerados como factores de riesgo ya que en la generalidad de los casos desencadenan en una enfermedad cardiovascular.

3.5- Principales beneficios derivados de la implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en la empresa Ernesto Che Guevara

En este epígrafe se exponen de forma resumida los resultados alcanzados en la implementación del proceso en la mencionada empresa en el período de junio de 2004 a noviembre de 2007. Los datos que a continuación se exponen (Tablas 3.5 y 3.6) fueron extraídos de la fuente bibliográfica consultada (Estenoz et al., 2008).

Tabla 3.5. Beneficio económico del ahorro de petróleo en los secaderos.

Descripción	Total	UM
Mineral en base seca abastecido a depósitos solares.	2246321	t
Contenido medio de humedad en el mineral alimentado a los depósitos mineros.	38,31	%
Cantidad de agua en las menas abastecidas a los depósitos mineros	1394984	t
Contenido medio de humedad en el mineral evacuado de los depósitos mineros.	36,90	%
Agua evaporada durante el proceso de remonte en los depósitos mineros.	81,367	t
Tonelada de petróleo por tonelada de agua evaporada durante secado industrial.	15,37	t/t
Incremento de la productividad en los secaderos por mayor superficie de contacto.	5,77	t/h
Reducción del tiempo de operación en los secaderos por aumento de su productividad.	1,225	h
Ahorro de petróleo por evaporación de agua en el mineral trasegado por los depósitos.	5,294	t
Ahorro de petróleo por desmenuzamiento del mineral en los		

depósitos.	3,771	t
Ahorro total de petróleo en el secado térmico por la aplicación del secado solar previo de las menas lateríticas.	9,065	t
Costo de las operaciones de remonte del mineral en los depósitos de estabilización.	320,429	CUC
Precio de la tonelada de petróleo (precio del barril de petróleo fue de 50 CUC).	330	CUC/t
Ingresos por el ahorro de petróleo durante el secado térmico.	2990628	CUC
Diferencia ingresos - gastos por ahorro de petróleo durante el secado térmico.	2670820	CUC
Impuesto sobre la ganancia (32% de los ingresos).	854,662	CUC
Ganancia por procesar la materia prima recuperada.	1816157	CUC

Fuente: Estenoz et al. 2008.

Los análisis cuantitativos asociados al impacto ambiental se detallan con suficiente claridad en las publicaciones consultadas (Estenoz, 1999; Estenoz et al., 2005; 2008). En la Tabla 3.6 se relacionan de forma resumida los principales indicadores que muestran los beneficios ambientales de la implementación del proceso.

Tabla 3.6. Beneficio ambiental al procesar mineral con menos humedad y más desmenuzado.

Descripción	Total	UM
Mineral en base seca abastecido a depósitos solares.	2246321	t
Volumen de gases generados por minerales no trasegados por depósitos.	308049234	m ³ N/h
Masa específica de CO ₂ generada por el mineral sin pasar por los depósitos.	622841666	kg/t
Masa específica de SO ₂ generado por el mineral sin pasar por los depósitos.	820230373	kg/t
Volumen de gases generados por el mineral preparado en los depósitos.	28703900	m ³ N/h

Masa específica de CO ₂ generado por el mineral preparado en los depósitos solares.	57348996	kg/t
Masa específica de SO ₂ generado por el mineral preparado en los depósitos solares.	74380287	kg/t
Volumen de gases no generados por preparar el mineral en depósitos solares.	342617193	m ³ N
Masa de CO ₂ no generada por preparar el mineral en los depósitos solares.	80478617	kg
Masa de SO ₂ no generada por preparar el mineral en los depósitos solares.	1246315	kg

Fuente: Estenoz et al. 2008.

De los resultados mostrados en la Tablas 3.5 y 3.6 se infiere que la implementación del secado solar natural de las menas genera ahorros de combustible y reducciones de las emanaciones de gases en el secado del material en los secaderos rotatorios convencionales.

3.6- Conclusiones capítulo 3

- ❖ Durante el secado solar natural de las menas lateríticas se produce la transferencia de calor por convección libre, forzada y mixta, pero predomina la segunda para la cual el coeficiente de transferencia de calor mínimo es 7.851 y 0.029 W/ m² K para las pilas 1 y 2 respectivamente.
- ❖ Se comprobó que en los horarios de mayor radiación solar los flujos de calor por radiación fueron superiores a los restantes, alcanzando los valores máximos de 567.521 y 207.399 W/m² para las dos pilas analizadas.
- ❖ Con la aplicación del secado solar de las menas lateríticas se produjo la absorción del calor por parte de las menas en el horario diurno, pero en los horarios nocturnos y en el momento de ocurrencia de lluvias las pilas de minerales cedieron calor oscilando los valores entre -268,23 y -25,87 W/m² para las dos pilas.

-
- ❖ Se comprobó, a través del análisis de los impactos desarrollados, que de la implementación del secado solar de las menas lateríticas se derivan múltiples beneficios económicos, sociales y ambientales para la empresa Ernesto Che Guevara, los trabajadores que en ellas laboran y el medioambiente de las regiones donde se encuentra la industria.

CONCLUSIONES

- ❖ Existe una amplia variedad de trabajos científicos-técnicos dedicados al análisis de la transferencia de calor y masa en los procesos de secado pero solo se reportan estudios aislados relacionado con la transmisión de calor durante el secado solar natural de las menas lateríticas.
- ❖ Quedó establecido el procedimiento de cálculo apropiado para la evaluación de la transferencia de calor durante el secado solar natural de las menas lateríticas. El mismo conjuga los aspectos teóricos expuestos en investigaciones precedentes y está determinado por los modos de transmisión del calor más influyentes en el proceso y el tipo de convección predominante.
- ❖ Los flujos de calor promedios por convección, radiación, conducción y latente de humedad fueron igual a 61.55, 81.49, 15.39 y 244.55 W/m² para la pila 1. En la pila 2 se obtuvieron flujos de 54.95, 31.52, 11.79 y 143.82 W/m² para los modos de transmisión de calor considerados.
- ❖ Con la implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en la empresa Ernesto Che Guevara se disminuye la humedad del material lo cual genera ingresos por concepto de ahorro de petróleo durante el secado térmico que de acuerdo con los resultados del trabajo asciende a 2990628 CUC. Adicionalmente se reducen las emanaciones de los gases tóxicos productos de la combustión de combustibles fósiles.



RECOMENDACIONES

- ❖ Perfeccionar el procedimiento de cálculo establecido a partir del desarrollo de corridas experimentales con una base de datos más representativa.
- ❖ Implementar un software o una aplicación informática que permita aumentar la eficiencia y rapidez en el cálculo de los flujos de calor transferidos en el proceso.
- ❖ Introducir el procedimiento de cálculo y el trabajo en general como material de consulta para las asignaturas de la Disciplina Tecnología Energética de la carrera Ingeniería Mecánica.

RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, E. E. *Solar Energy fundamentals for designers and engineers*. Addison-Wesley. MA, 1982.
- AZEVEDO, L. F. A.; E. M. SPARROW, *Natural convection in open- ended inclined channel*. J. Heat transfer. 1985, 893 p.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, Inc. 1960. N.Y.
- 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 Borrada, 2000. 400 p.
- 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.
- ESTENOZ, S.; M. ESPINOSA. *Prueba de homogeneización y secado solar del mineral (Parte I)*: Centro de Investigaciones del Níquel, Cuba, Informe de Investigación, 2003.
- FAIRE, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
- FILONENKO, G. *Secado de semillas de tomate. Conferencia nacional de secado- Sección de energética*. Editorial Profizdat, Moscú, 1958.
- 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.
- Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. *Informe económico anual*. Moa, 2007. 53p.
- KASATKIN, A. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. 405 p.
- KERN, D. *Procesos de transferencia de calor*. Edición Revolucionaria. La Habana, 1969. 980p.
- KRISHER, O. *Fundamentos científicos de la técnica del secado*. Editorial Izdatinlit. Moscú, 1961.

- LE PEUTREC, Y. AND LAURIAT, G. *Effects of the Heat Transfer at the Side Walls on Natural Convection in Cavities*. J. of Heat Transfer, Vol. 112, 1990. 378 p.
- LEONARDI, E. (1984). *A Numerical Study of the Effects of Fluid Properties on Natural Convection*. Ph.D. Thesis. University of New South Wales, Australia.
- LYKOV, A. *Fenómenos del transporte en cuerpos capilaroporosos*. Editorial gostejizdat. Moscú, 1954.
- LYKOV, A. *Teoría del secado*. Editorial Energía, 2da edición, Moscú, 1968.
- LYKOV, A. V. Y YU. A. MIJAILOV. *Teoría de la transferencia de calor y masa*. Editorial Gosenerjizdat. Moscú, 1963.
- MENON AND MUJUNDAR. *Drying of solids*. Mc Graw Hill, Montreal, Canadá. 1992.
- MIRANDA, J. *Composición y conjugación de métodos de determinación de humedad de la industria del Níquel*. Revista Minería y Geología. Moa. 13(2): 1996, 39-45 p,
- NIELD, D.A. AND BEJAN, A. *Convection In Porous Media*. Springer-Verlag, USA. 1992.
- PERRY, J. *Chemical Engineering Handbook*. 4ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1979.
- PERRY, J. *Chemical Engineering Handbook*. 6ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1985.
- PRASAD, V. AND KULACKI, F. A. *Convective Heat Transfer in a Rectangular Porous Cavity. Effect on Aspect Ratio on Flow Structure and Heat Transfer*. ASME, J. of Heat Transfer, Vol.106 .1984.630 p.
- PRASAD, V. AND KULACKI, F. A. *Natural Convection in a Rectangular Porous Cavity with Constant Heat Flux on one Vertical Wall*. ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 106, 1984. 310 p.
- PRASAD, V., KULACKI, F. A. AND KEYHANI, M. *Natural Convection in Porous Media*. J. Fluid Mech. (1985), 150 p.
- RETIRADO, M. Y. *Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico*. Tesis de Maestría. Moa: ISMM, 2007. 60p.
- RICARDO, P. M. *Procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2008. 57p

- ROMERO, Y. *Estudio experimental a escala piloto del secado solar del mineral laterítico*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, Moa, 2006. 55p.
- SAZHIN, B. *Fundamentos de la técnica del secado*. Editorial XIMIA, 1984.
- SHERWOOD, T. *Secado de los sólidos*. Editorial Goslesizg. Moscú, 1936.
- STRUMILLO, C. *Fundamentos de la teoría y práctica del secado*. Editorial W.N.T. Varsovia, 1975.
- TODD, F. *Secado por aire y solar de la madera*. Centro de agricultura de Louisiana State University. Estados Unidos, 2001.
- THOMAS, H; K. MORGAN; R. LEWIS. *A Fully non linear analysis of heat and mass transfer problems in porous bodies*. Int. J. Num. Methods Eng.15.1980, 415 p.
- TORRES, E. *Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico*. Tesis doctoral. ISMM. Moa, 2003. 105p.
- TORRES. T.; A. FONSECA. *Análisis térmico de un secador solar de tambor rotatorio para granos*. Santiago de Cuba, 2001.
- TREYBAL, R. *Operaciones con transferencia de masa*. Capítulo. XII.1985, 659 p.
- WHITAKER, S. *Simultaneous heat, mass and momentum transfer and theory of drying*. Adv.Heat Transfer 13.1977, 250 p.