

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

**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO DE DIPLOMA

En Opción al Título de Ingeniero Mecánico

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

Autor: Ifrain Cutiño Libén

Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja

Moa-2009

“Año del 50 Aniversario del triunfo de la Revolución”



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Ifraín Cutiño Libén**, 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.

Ifraín Cutiño Libén

M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja



PENSAMIENTOS

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

Leonardo Da Vinci

"Como mismo la naturaleza le reveló su secreto a los hombres del pasado; así mismo lo hará con los hombres del presente. Solamente tienen que hacerse las preguntas correctas"...

Albert Einstein

"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

"Quien esconde por miedo su opinión, y como un crimen la oculta en el fondo del pecho, y con su ocultación favorece a los tiranos, es tan cobarde como el que en lo recio del combate vuelve grupas y abandona la lanza al enemigo."

José Martí



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:

A mi madre Ana María, por mi existencia, por el apoyo que me ha brindado y la confianza que depositó 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 por mi persona y por haber influido en mi formación profesional e investigativa.

A mi abuela Irma, por el apoyo que me ha brindado y la confianza que ha depositado en mí, por sus incontables consejos de los cuales tanto he aprendido.

A mi familia, 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 mi padre Ifrain, porque por sus acciones he aprendido a que en la vida las personas deben luchar por lo suyo, lo cual me dio fuerzas para ser lo que soy hoy en día.

A mi novia Yaima Dianelis, por su comprensión e incondicional apoyo, por sus demostraciones de cariño y amor y todo el apoyo que me ha dado durante nuestra relación.

A mi amigo incondicional Daykel, por su fidelidad hacia mi persona, incondicional apoyo y muestra de amistad absoluta durante estos años.

A todos aquellos que contribuyeron a mi formación 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 la memoria de mi abuelo Agustín Libén Duvergel, que en el cielo está, el cual fue como un padre para mí, por el amor y cariño que me dio mientras vivió y por su apoyo, que siempre creyó que yo siempre podía realizar este sueño.

A Ana María Libén e Irma Terry (mis madres), 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 las empresas cubanas del níquel se desarrolla el secado térmico con el empleo de los secadores cilíndricos rotatorios, en estos equipos existe un excesivo consumo de combustible debido, entre otros factores, al elevado contenido de humedad presente en el mineral alimentado.

Para evaluar el comportamiento de la transferencia de calor durante el secado solar natural de las menas lateríticas se desarrolló la presente investigación, en la cual se estableció el procedimiento de cálculo para la determinación de la transferencia de calor durante el proceso analizado, comprobándose que durante el secado solar natural de las menas lateríticas predomina la convección forzada para la cual los coeficientes de transferencia de calor mínimos fueron 4,959 y 5,068 W/m² K y los máximos ascendieron a 10,330 y 10,376 W/ m² K para las pilas 1 y 2 respectivamente. Los flujos de calor por radiación alcanzaron valores máximos igual a 747,922 y 705,785 W/m² para las dos pilas analizadas. El contenido de humedad de las menas se redujo un 13% aunque hubo ocurrencia de precipitaciones.

Finalmente se estimó un ahorro de combustible igual a 1,287 t/h que al precio actual genera una ganancia de 3 037 563 USD al año y disminuyen las emisiones de gases contaminantes producto de la combustión de petróleo, que afectan los suelos, el aire, la flora, la fauna, las poblaciones y el microclima.



ABSTRACT

In Cuban nickel companies thermal drying is developed with the employment of rotational cylindrical dryers, there is an excessive consumption of fuel in these equipments due to the high content humidity in the fed mineral among other factors.

To evaluate the behaviour of the heat transfer during the natural solar drying of the lateritics ores the current research was developed, in which the calculation procedure settled down for the determination of heat transfer during the analyzed process, being proved that during the natural solar drying of the lateritics ores the forced convection prevails for which the coefficients of transfer of minima heat were 4,959 and 5,068 $W/m^2 K$ and the maxima ascended 10,330 and 10,376 $W / m^2 K$ for the piles 1 and 2 respectively. The flows of heat for radiation got maximum values similar to 747,922 and 705,785 W/m^2 reached for the two analyzed piles. The content of humidity of the ores decreased 13% although there was occurrence of precipitations.

Finally it was considered a saving of fuel similar to 1,287 t/h that generates a profit from 3 037 563 USD year to the current price and the emissions of polluting gases due to the combustion of petroleum that affect the floors, the air, the flora, the fauna, the populations and the microclimate diminish.

**ÍNDICE**

Contenido	Págs.
Introducción	1
Capítulo I Marco teórico- metodológico de la investigación.....	4
1.1- <i>Introducción.....</i>	4
1.2- <i>Trabajos precedentes.....</i>	4
1.3- <i>Principios técnicos y periodos del proceso de secado.....</i>	13
1.4- <i>Generalidades del proceso de secado solar.....</i>	15
1.5- <i>Operaciones de secado.....</i>	16
1.6- <i>Secado solar de las menas lateríticas.....</i>	22
1.7- <i>Conclusiones del capítulo I.....</i>	24
Capítulo II Materiales y métodos.....	25
2.1- <i>Introducción.....</i>	25
2.2- <i>Materiales empleados.....</i>	25
2.3- <i>Métodos de diseño generales de la cinética del secado.....</i>	25
2.4- <i>Procedimiento para la evaluación de la transferencia de calor al secado solar de las menas lateríticas.....</i>	26
2.5- <i>Conclusiones del capítulo II.....</i>	41
Capítulo III Análisis de los resultados. Valoración económica e impacto ambiental.....	42
3.1- <i>Introducción.....</i>	42
3.2- <i>Resultados y discusión.....</i>	42
3.2.4- <i>Comportamiento de los procesos de transferencia de calor.....</i>	46
3.3- <i>Valoración económica.....</i>	50
3.4- <i>Impacto ambiental asociado al proceso de secado solar.....</i>	51
3.5- <i>Conclusiones del capítulo III.....</i>	55
Conclusiones.....	56
Recomendaciones.....	57
Bibliografía.....	58
Anexos.....	62

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial de las tecnologías en el campo de la industria del níquel, exigen cada vez más disminuir los consumos de portadores energéticos y que cada una de las instalaciones de la industria sean más eficientes.

Hoy día las empresas niquelíferas se encuentran enfrentadas a dos grandes cambios: el de modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos en la producción de cada tonelada de níquel, y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional. Este último como proceso integral no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica. (Mesa Redonda, Enero del 2001).

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

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

El secado solar por sus múltiples ventajas y perspectivas se encuentra ampliamente aplicado a nivel mundial (Echazu, 2001). En Cuba su empleo se reduce a la industria de alimentos, café, madera, entre otras (Torres et al., 2001; Griñan et al., 2003) y en menor

medida en la industria del níquel; pero a partir de la Revolución Energética donde se enfatiza en la necesidad de llevar a cabo una gran campaña de ahorro de energía y combustible, se hace necesario, de acuerdo con el nivel alcanzado por la industria del níquel y su posterior desarrollo: implementar eficientemente el secado solar del mineral laterítico que contribuye a incrementar la productividad de la planta y reducir los gastos energéticos anuales, 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.

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

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; Perry, 1985), 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**:*

No se conoce en la actualidad el comportamiento de la transferencia de calor durante el secado solar natural de las menas lateríticas, para las condiciones de trabajo de la Empresa Comandante Che Guevara.

Como objeto de estudio de la investigación se plantea:

El proceso de secado solar de las menas lateríticas.

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

Si se realiza un estudio teórico y empírico del proceso de secado solar de las menas lateríticas y se conjuga con los procedimientos de cálculo establecidos para el análisis de los procesos de transferencia de calor entonces es posible evaluar los fenómenos de intercambio térmico presentes en el objeto de estudio.

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

Evaluar los procesos de transferencia de calor presentes en el secado solar natural de las menas lateríticas.

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

- 1- *Establecer el estado del arte sobre los procesos de transferencia de calor en secado convencional y solar.*
- 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- *Establecer gráficos de comportamiento de los diferentes procesos de intercambio térmico.*
- 5- *Realizar una valoración económica elemental del secado solar natural de las menas lateríticas.*
- 6- *Valorar el impacto medioambiental del secado solar natural de las menas lateríticas.*

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

El secado natural ha sido utilizado desde tiempos inmemorables para secar una gran variedad de productos. Sin embargo, para la producción a escala industrial este sistema, a pesar de presentar ciertas limitaciones (necesidades de grandes superficies, dificultades en el control del proceso de secado, entre otras) es más eficaz respecto a la contaminación ambiental que el secado artificial a gran escala basado en el uso de combustibles. Con objeto de aprovechar los beneficios de la fuente solar se han realizado numerosos intentos en los últimos años para el desarrollo de secaderos solares en productos agrícolas e industriales debido a que el desarrollo de la industria exige la disminución de consumos portadores energéticos, es por ello el interés del secado con el uso de la energía solar tratando de desarrollar diversas técnicas que posibiliten solucionar las dificultades relacionadas con este importante proceso.

El **objetivo** de este capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos y el estado del arte del proceso de transferencia de calor en el secado solar de las menas lateríticas.

1.2- 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. Los trabajos más pertinentes se analizan a continuación:

Lykov (1954), demostró experimentalmente que el proceso de secado depende del mecanismo de transporte de la humedad en el interior del sólido bajo la acción de un

gradiente térmico, de la energía de vaporización y de la difusión del vapor desde la superficie del material hacia los alrededores, a través de la capa límite. Este descubrimiento es válido para el secado de los materiales capilaroporosos, grupo al que corresponde el mineral laterítico según la clasificación dada por Kasatkin (1987).

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

Leonardi (1984), también 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.

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.

El modelamiento de la convección natural en cavidades que contienen un fluido o un medio poroso ha sido un problema interesante, tanto por sus implicaciones numéricas como en sus aplicaciones en ciencia y tecnología. Ostrach (1988) presenta una revisión extensa de este fenómeno en cavidades rectangulares y cilíndricas que contienen un fluido, bajo diversas condiciones de frontera. Este autor analiza los parámetros adimensionales que originan el fenómeno de convección tanto de calor como de masa, los cuales son: el número de Grashof, número de Prandtl y el aspecto geométrico para la convección térmica, mientras que para la convección simultánea de calor y de masa también hay que adicionar los efectos del número de Schmidt y de la razón de flotación.

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.

La investigación en el área de transporte de flujos así como también algunos aspectos del transporte de calor en medio poroso, se inicia al comienzo de este siglo. La transferencia de calor por convección en un medio poroso saturado con un fluido, ha adquirido una atención considerable en décadas recientes debido a su relevancia en una gama amplia de aplicaciones tales como: Diseño de aislamientos térmicos, movimiento de agua en depósitos geotérmicos, difusión en el subsuelo de productos químicos, ingeniería geotérmica (García *et al*, 1998), almacenamiento y preservación de granos y cereales y la explotación eficiente de yacimientos petrolíferos.

Por otro lado, la transferencia de calor por radiación y el proceso de transporte multifásico en un medio poroso, ambos con o sin cambio de fase, han ganado interés en años recientes. Algunas aplicaciones de estos estudios son la ingeniería geotérmica, el aislamiento térmico de edificios, diseño de reactores catalíticos, aislamiento para materiales criogénicos, dinámica de los yacimientos petrolíferos, cambiadores de calor por contacto directo, cámaras de combustión de carbón, diseño de confinamientos seguros para materiales radiactivos y la transferencia térmica en reactores nucleares, entre otros.

Varias aplicaciones relacionadas con el medio poroso requieren de un análisis detallado de la transferencia de calor por convección en diferentes geometrías, orientaciones y configuraciones. Con base en las aplicaciones específicas, el flujo en el medio poroso puede ser interno o externo. La mayoría de los estudios efectuados hasta ahora en el medio poroso, toman como ecuación de transporte a la ley de Darcy, que se origina en la consideración de un flujo reptante que pasa a través de un medio poroso uniforme y semi-infinito. Sin embargo, se reconoce generalmente que los efectos no darcianos son significativos en ciertas aplicaciones (Lauriat, 1989). Diferentes modelos se han

propuesto para estudiar y cuantificar el comportamiento no darciano, como los efectos inerciales, las Internas es medio poroso-fluido, la porosidad variable con la posición y/o el tiempo y la matriz porosa deformable.

En el caso de la convección natural en medios porosos, ha habido una gran cantidad de investigaciones numéricas y/o experimentales, principalmente en geometrías cartesianas y cilíndricas. Prasad y Kulacki (1984a) estudiaron la convección natural en una cavidad rectangular sometida a un gradiente de temperaturas en sus paredes laterales, encontrando la existencia de flujo multicelular para aspectos geométricos Prasad y Kulacki (1984b) reportan el efecto de una fuente calorífica en una pared lateral, sobre la convección natural en una cavidad rectangular, Prasad y Chui (1989) presentan un trabajo sobre el efecto de la generación volumétrica de calor en una cavidad cilíndrica.

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

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

Todo lo anterior es aplicable al secado de materiales de forma estática con régimen de temperatura constante. En el secado solar de los materiales a la intemperie estas condiciones no se cumplen debido a que el proceso depende de los parámetros termofísicos del sólido objeto de secado y de los climatológicos de la región que varían aleatoriamente y no pueden ser preestablecidos, debido a esto los mecanismos de transferencia de calor y masa se manifiestan de forma compleja, difícil de predecir a través del secado estático con regímenes de temperatura constante.

Por los aspectos antes mencionados se requiere analizar *los trabajos precedentes referidos al secado solar*.

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

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

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

solares para lograr el incremento de la temperatura del aire necesario para el secado de soya.

Berruta (2004), propone una solución tecnológica al problema del secado de café en los estados de Chiapas y Oaxaca en México. Para realizar este proyecto los autores realizan una revisión de experiencias de secado de otros productos agropecuarios identificando similitudes respecto al secado de café, dando paso al diseño de un secador solar de café con el piso de madera y construcción similar a la de un invernadero con orientación según el movimiento del sol en la época de cosecha de café para un mayor aprovechamiento de la energía solar.

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

A la caracterización y actualización del potencial de secado en el país a partir del conocimiento y clasificación de los diferentes tipos de secadores se dedican algunos trabajos (Bérriz, 2002; Bérriz, 2003), en ellos el autor proporciona con precisión los datos necesarios para el diseño evaluación y selección de prototipos de secadores tanto a escala experimental como industrial. Estos equipos pueden ser utilizados en el secado solar del mineral laterítico a escala de laboratorio debido a la alta eficiencia que presentan y su fácil construcción.

De las investigaciones desarrolladas en el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES) en la ciudad de Santiago de Cuba se puede destacar el trabajo para la implementación de un secador de granos tipo tambor (Torres et al., 2001), en este se establece una alternativa del secado solar para la disminución del tiempo de secado y la protección del producto de las condiciones climatológicas. En el CIES fue construido el secador solar de tambor rotatorio para granos del que se realiza un análisis térmico a partir de calcular los coeficientes de transferencia de calor en diferentes partes del

equipo. El resultado del análisis muestra una distribución favorable de las áreas de captación y de pérdidas, por lo que es posible pronosticar un buen funcionamiento térmico en el secado de granos para las condiciones de diseño.

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

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

solar generaría ahorros entre 14 y 17 millones de dólares anuales y unos 10 millones por el procesamiento de mineral homogenizado a más de 90 grados y que con el secado a la intemperie del mineral en los depósitos mineros de la fábrica se puede disminuir hasta el 24% la humedad inicial del mineral.

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

Retirado (2007) realiza un trabajo acerca del comportamiento de la humedad durante el secado del mineral laterítico en el cual describe modelos matemáticos para el secado solar, posibilitando la reducción de la humedad físico-mecánica presente en el mineral laterítico. 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, con lo cual al reducir el contenido de humedad en 8,85%; el consumo de combustible disminuyó en 1,02 t/h; generando un ahorro anual por concepto de consumo de combustible en el secador cilíndrico rotatorio ascendente a 2 172 810,23 USD

Ricardo (2008) describe el procedimiento de cálculo teórico para la determinación de la variación de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico 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 del mineral laterítico puede ser resuelta por vías

analíticas puras o haciendo uso de las ecuaciones de la diferencia finita a través de los métodos explícito e implícito.

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

- ◆ **Existen una gran variedad de expresiones empíricas obtenidas por diferentes autores, pero en ninguno de los estudios se evalúan las menas lateríticas sometidas a secado solar en las industrias cubanas del níquel.**
- ◆ **De los estudios consultados 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.**

1.3- Principios técnicos y periodos 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). El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad que se puede absorber depende, considerablemente de su temperatura, aunque también puede existir la absorción de agua a temperatura constante (Faires, 1991; Fernández, 1994). A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decrece y por tanto, la absorción de la humedad es mayor. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata rápidamente. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto a secar (Sazhin, 1984).

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

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

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

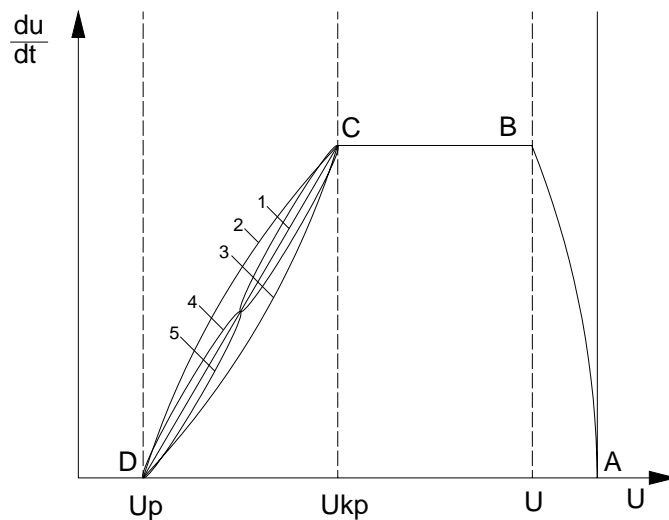


Figura 1.1. Curva de velocidad de secado.

Fuente: Boizán, 1991.

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

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

1.4- 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; Incropera et al., 2003).

1.5- Operaciones de secado

De una manera general, se pueden clasificar las operaciones de secado en discontinuas y continuas. Se aplican estos términos específicamente desde el punto de vista de la sustancia a secar. Así, la operación denominada secado discontinuo en la práctica se refiere generalmente a un proceso semicontinuo en el que se expone una cierta cantidad de sustancia a secar a una corriente de aire que fluye continuamente, en la que se evapora la humedad. En las operaciones continuas pasan continuamente a través del equipo tanto la sustancia a secar como el gas. Generalmente no se emplean los típicos métodos en etapas, implicando todas las operaciones un contacto continuo del gas y de la sustancia a secar.

Los equipos utilizados para secar se pueden clasificar de acuerdo a cualquiera de las siguientes categorías:

1. **Método de operación, o sea, discontinuo o continuo.** Los equipos discontinuos o semicontinuos, se operan en forma intermitente o cíclica bajo condiciones de estado no estacionario: se carga el secador con la sustancia, la que permanece en el equipo hasta que se seca, momento en el que se vacía el equipo y se lo recarga con nuevo material. Usualmente los secadores continuos se operan en estado estacionario.
2. **Método de proporcionar el calor necesario para la evaporación de la humedad.** En los secadores directos, se suministra el calor completamente por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el que tiene lugar la evaporación. En los secadores indirectos, se suministra el calor en forma independiente del gas para arrastrar la humedad que se evapora.
3. **Naturaleza de la sustancia a secar.** Puede la sustancia ser un sólido rígido tal como la madera, un material flexible tal como la tela o papel, un sólido granular tal como una masa de cristales, una pasta espesa o delgada o una solución. Si es un sólido, puede ser frágil o tenaz. Es probable que la forma física de la

sustancia y los distintos métodos de manipulación empleados ejerzan la influencia más grande en el tipo de secador a utilizar.

1.5.1- Secado discontinuo

El secado discontinuo es una operación relativamente costosa y, en consecuencia, se halla limitado a operaciones en pequeña escala, a trabajos en planta piloto o de desarrollo y al secado de materias valiosas cuyo costo total aumentará muy poco por el costo del secado.

1.5.2- Régimen de secado discontinuo

Para poder establecer programas de secado y determinar el tamaño de los equipos, es preciso conocer el tiempo que se ha de necesitar para secar una sustancia desde un cierto contenido de humedad a otro, bajo condiciones especificadas. También se querrá estimar la influencia que sobre el tiempo de secado ejercerán distintas condiciones de secado. El conocimiento del mecanismo de secado es tan incompleto que para estos fines es necesario, salvo pocas excepciones, llevar a cabo algunas mediciones experimentales. Las mediciones del régimen de secado discontinuo son relativamente sencillas y otorgan mucha información, no solo para el caso discontinuo, sino también para operaciones continuas.

1.5.3- Prueba de secado

Se puede determinar el régimen de secado para una muestra de una sustancia, suspendiéndola de una balanza en presencia de una corriente de aire, dentro de un gabinete o de un conducto. Luego se puede medir, en función del tiempo, el peso de la muestra a secar. Para que los datos sean de la máxima utilidad, deben tomarse ciertas precauciones. La muestra no deberá ser muy pequeña. Además, las siguientes condiciones deben ser lo más semejantes que sea posible a aquellas con las que se espera operar en gran escala. 1) Deberá hallarse la muestra análogamente sostenida en una bandeja o marco. 2) Deberá tener la misma relación de superficie seca a no seca. 3) Deberá estar sometida a condiciones análogas de transferencia de calor radiante. 4) El aire deberá tener la misma temperatura, humedad y velocidad (en valor y en dirección con respecto a la muestra). Si fuera posible, se efectuarán varios ensayos,

con muestras de diferentes espesores. Deberá obtenerse también el peso de la muestra seca.

La exposición de la muestra a aire de temperatura, humedad y velocidad constantes, constituye un secado bajo condiciones constantes de secado.

1.5.4- Curva de régimen de secado

Con los datos obtenidos durante tal prueba puede hacerse un gráfico de contenido de humedad en función del tiempo (Figura. 1.2).

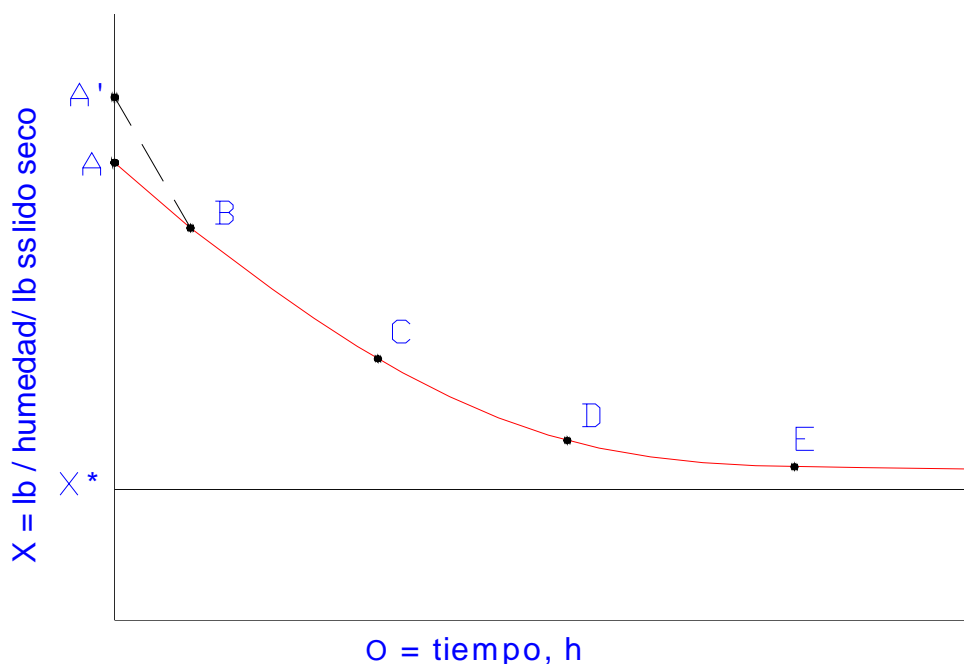


Figura 1.2 Secado discontinuo, condiciones constantes de secado.

Este será útil para la determinación directa del tiempo necesario para el secado discontinuo de grandes partidas bajo las mismas condiciones de secado. Se puede obtener abundante información si se convierte los datos a regímenes de secado, expresados como N kilogramos de humedad evaporada/h m^2 , y se los lleva a un gráfico en función del contenido de humedad, como en la Figura.1.3.

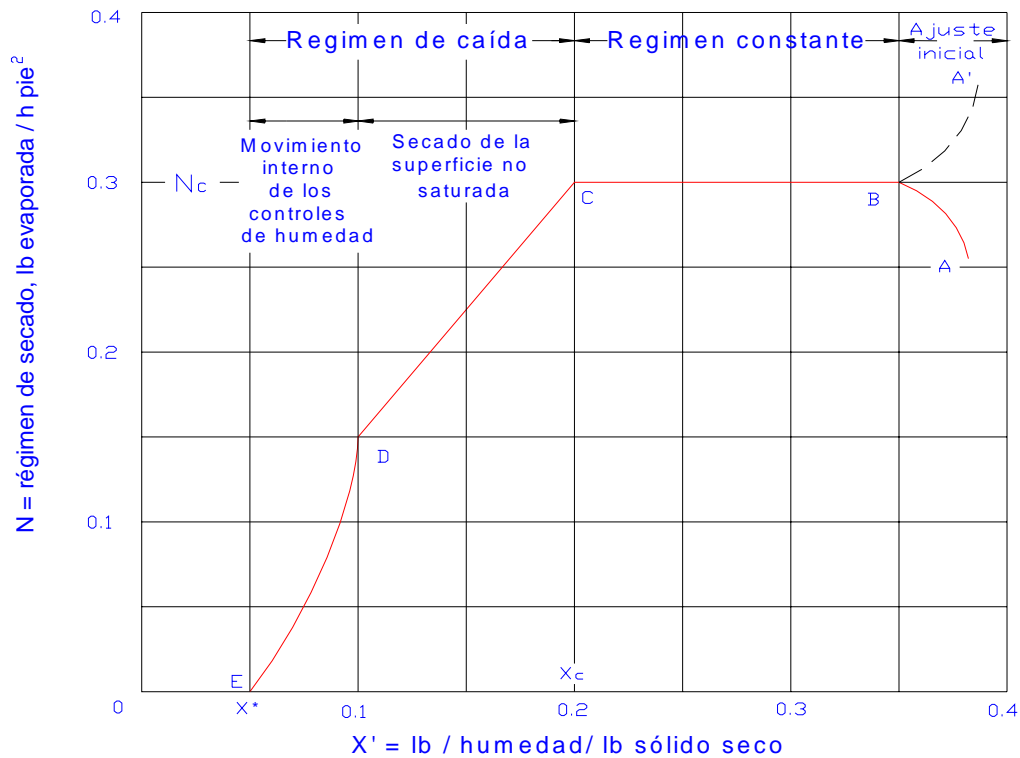


Figura 1.3 Curva típica del régimen de secado, condiciones constantes de secado.

Se puede apreciar hacer esto midiendo las pendientes de las tangentes trazadas a la curva de la Figura 1.2, o por medio de la determinación, en base a la curva, de pequeños cambios ΔU en el contenido de humedad para los correspondientes cambios en el tiempo Δt y calculando el régimen de secado como:

$$N = -\frac{L_s}{A} \cdot \frac{\Delta u}{\Delta t} \tag{1.1}$$

Aquí L_s es el peso del sólido seco, y A es la superficie húmeda sobre la que sopla el gas y a través de la cual se lleva a cabo la evaporación en el caso de secado con circulación cruzada de aire. En el caso de secado con circulación a través del lecho, A es la sección transversal del lecho medida en dirección normal a la de flujo del gas.

A veces se representa la curva de régimen de secado con la coordenada expresada como kilogramos de humedad evaporada/h (kg. de sólido seco), lo que con la presente notación es $-du / dt$.

Generalmente, hay dos partes notorias en la curva de régimen de la Figura 1.3, un periodo de régimen constante y uno de caída del régimen. Aunque para distintos sólidos y con diferentes condiciones de secado tendremos curvas de distinta forma en el periodo de caída del régimen, la curva que se muestra se producirá con frecuencia. Posteriormente se considerarán algunas de las diferencias que pueden surgir, pero al presente veamos brevemente las razones generales anticipadas para las diferentes partes de la curva mostrada.

Si un sólido se halla inicialmente muy húmedo, la superficie se cubrirá con una delgada película de líquido, con lo cual supondremos que se trata enteramente de una humedad no límite. Cuando se lo expone a aire relativamente seco, tendrá una evaporación desde la superficie. El al que se evaporará la humedad se lo puede describir en función de un coeficiente de transferencia de masa gaseosa k_y y la diferencia entre la humedad y el gas en la superficie líquido Y_s y en la corriente principal Y . Así, para secado con circulación cerrada

$$N_c = k_y(Y_s - Y) \quad (1.2)$$

Cabe esperar que el coeficiente k_y permanezca constante mientras no cambien la velocidad y la dirección del flujo gaseoso que pasa por la superficie. La humedad Y_s es la humedad de saturación a la temperatura del sólido en la superficie líquida y dependerá por lo tanto de esta temperatura. Como la evaporación de la humedad absorbe calor latente, la superficie líquida alcanzará, y permanecerá a una temperatura de equilibrio tal que el régimen del flujo calórico desde los alrededores a la superficie iguale exactamente al régimen de absorción de calor. Por lo tanto Y_s permanece constante. Como además Y permanece constante bajo condiciones invariables de secado, el régimen de evaporación debe permanecer constante al valor N_c , como muestran las Figuras 1.2 y 1.3 entre los puntos B y C . al principio, el sólido y la superficie líquida generalmente se hallan mas fríos que la temperatura del sólido, y el régimen de evaporación aumentará mientras la temperatura de la superficie llegue a su valor final durante el período AB en estas curvas. De otro modo, la temperatura t_s de equilibrio puede ser más baja que el valor inicial, lo que originará una curva $A'B$ hasta

que se produzca el ajuste inicial. Generalmente el periodo inicial es tan corto, que de ordinario en los análisis de tiempos de secado se lo desprecia.

Cuando el contenido medio de humedad del sólido ha alcanzado un valor X_c , el *contenido crítico de humedad* (Figura 1.3), la película superficial de humedad se ha reducido tanto por la evaporación que un posterior secado ocasiona la aparición de manchas secas sobre la superficie, las que en la superficie expuesta provocarán progresivamente mayores proporciones a medida que continúa el secado. No obstante, como se calcula el régimen N mediante la superficie total constante A , el valor de N cae aunque permanezca constante el régimen por unidad de superficie húmeda. Esto da lugar a la primera parte del periodo de caída de velocidad, el periodo de *secado con superficie no saturada*, desde los puntos C a los D (Figuras 1.2 y 1.3). Finalmente la película superficial original del líquido se habrá evaporado totalmente a un contenido medio de humedad para el sólido correspondiente al punto D . esta parte de la curva puede faltar completamente o puede constituir la totalidad del periodo de caída del régimen. En el caso de ciertos textiles, para el período de caída lineal del régimen se necesitaron otras explicaciones. En un posterior secado, el paso controlante es el régimen al que puede moverse la humedad a través del sólido, a consecuencia de los gradientes de concentración que existen entre las partes más profundas y la superficie. Como generalmente baja la concentración de humedad. En algunos casos puede tener lugar una evaporación debajo de la superficie del sólido, en un plano o zona que se aparta más de la superficie a medida que el secado continúa. En cualquier circunstancia, la velocidad de secado cae aún más rápidamente que antes, como desde D a E (Figura 1.3). En el punto E , el contenido de humedad del sólido ha caído al valor de equilibrio U^* para la humedad existente del aire, y el secado cesa.

1.5.5- Efectos de condiciones de secado

- ❖ *Efecto de la velocidad del gas.* Si son despreciables la radiación y la conducción a través del sólido, el régimen de secado es proporcional a la velocidad de masa para flujo paralelo de gas y para flujo perpendicular. Si existen radiación y conducción, el efecto de la velocidad del gas será menos importante.

- ❖ *Efecto de la temperatura del gas.* Aumentando la temperatura del aire aumenta la diferencia de temperatura entre el sólido y la superficie, por lo tanto, aumenta el régimen de secado. No existiendo efectos de radiación y despreciando la variación de U en moderados intervalos de temperatura, el régimen de secado es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el gas y el sólido.
- ❖ *Efecto de la humedad del gas.* El régimen de secado varía directamente como $Y_s - Y$, y consecuentemente el aumento de la humedad disminuye el régimen de secado. Generalmente los cambios en Y y t_g incluyen simultáneamente cambios en t_s y Y_s .
- ❖ *Efecto del espesor del sólido a secar.* Si se produce la conducción del calor a través del sólido, se obtienen valores del régimen de secado menores con incrementos en el espesor del sólido. No obstante, la conducción del calor a través de los bordes de las superficies de los recipientes y bandejas puede llegar a ser una importante fuente de calor que alcance a originar un aumento en el régimen de secado, si son grandes las superficies de los bordes. Si están aisladas las superficies que no son de secado, o si se produce el secado desde toda la superficie del sólido, el régimen de secado es independiente del espesor. Luego, dentro del periodo de régimen constante, el *tiempo* necesario para el secado de contenidos fijos de humedad, será directamente proporcional al espesor.

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 mineral laterítico objeto de secado se clasifica como un material macrocapilaroporoso.

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

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

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

Ventajas del secado natural del mineral

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

Desventajas

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

Características que debe cumplir el patio para el secado solar

- **Piso nivelado:** permite el secado uniforme del mineral y evita la formación de concentraciones de agua dentro del patio, durante el drenaje y escurrimiento de abundantes lluvias.
- **Drenaje:** debe ser eficiente, capaz de evacuar el agua en caso de lluvias, de lo contrario el secado será no uniforme y el mineral entrará con un elevado contenido de humedad al horno.
- **Lejanía del agua y de los árboles:** el agua cerca aumenta la humedad relativa del entorno e influye en la humedad del material, los árboles contribuyen a la conservación de la humedad del entorno y refrescan la masa de aire caliente que circula en el patio.
- **Elevación:** evita las inundaciones en caso de lluvia e impide el bloqueo del viento.

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

1.7- Conclusiones del capítulo I

- Se estableció el estado de arte sobre la temática abordada en la investigación y los fundamentos técnicos necesarios para la evaluación de la transferencia de calor durante el secado solar de las menas lateríticas.
- Existe una amplia gama de trabajos dedicados a la evaluación de la transferencia de calor en el secado de diversos materiales, pero en ninguno de ellos se determinan los flujos de calor para las menas lateríticas.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN

2.1- Introducción

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

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

En el desarrollo del trabajo se utilizaron varios instrumentos y materiales que permitieron la ejecución de los experimentos (Estufa Memmert, Desecadora, Balanza Owa Labor, Cronómetro, entre otros). Todos formaron parte de las pruebas de humedad.

Las mediciones de los parámetros climatológicos se realizaron en la estación meteorológica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, se empleó el equipo Davis EZ-Mount Groweather. El mismo presenta un sistema de adquisición de datos, haciendo uso de la instrumentación virtual, utilizando un conjunto básico de sensores meteorológicos, el cual incluye la medición, adquisición, procesamiento y registro de datos en PC para las variables: temperatura del medio ambiente, velocidad y dirección del viento, precipitaciones.

2.3- Métodos de diseños generales de la cinética del secado

El secado es un proceso de transferencia de masa típico no isotérmico. La influencia recíproca de los procesos de transferencia de masa y calor, así como la dependencia

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

Los métodos analíticos de diseño de proceso de secado según Krasnikov (1973) y Guinsburg (1966) se pueden clasificar en dos grupos:

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

A este trabajo le ofrece particular interés el primero el cual es un método analítico general porque no se fundamenta con expresiones empíricas de la cinética del secado y calentamiento de las partículas, sino en las leyes de la transferencia de calor y masa.

2.4- Procedimiento para la evaluación de la transferencia de calor al secado solar de las menas lateríticas

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

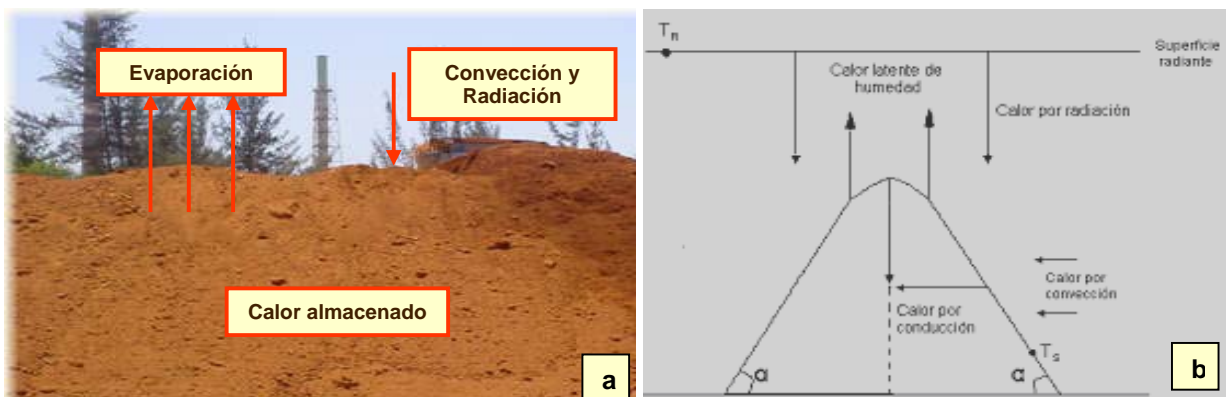


Figura 2.1 Proceso de secado solar. a- Interacción de los factores, b- esquema estructural.

$$\sum Q_{Entran} = \sum Q_{Salen} \quad (2.1)$$

Los términos representados en la ecuación 2.1 se refieren a los calores que entran y salen de la superficie de secado respectivamente (expresados en W/m^2). Al particularizar la ecuación general del balance térmico al caso de estudio, despreciando el calor necesario para sobrecalentar la humedad evaporada a la temperatura del aire la misma puede ser escrita de la forma siguiente:

$$Q_{Conv} + Q_{Rad} = Nc \cdot \lambda + Q_{Cond} \quad (2.2)$$

Donde:

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

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

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

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

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

Luego el régimen de evaporación (de secado) Nc y el régimen del flujo calórico se relacionan por la expresión 2.3.

$$Q_{Conv} + Q_{Rad} - Q_{Cond} = Nc \cdot \lambda \quad (2.3)$$

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

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

Transferencia de calor por convección

Las ecuaciones particulares para la determinación de los calores que intervienen en el miembro izquierdo de la expresión 2.3 se relacionan a continuación:

$$Q_{Conv} = \bar{h}_a \cdot (Ta - Ts) \quad (2.4)$$

Donde:

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

Ta : temperatura del aire; (K).

Ts : temperatura de la superficie de secado, en este caso la de las menas lateríticas; (K).

Debido a que el secado solar de las menas lateríticas se desarrolla a la intemperie donde el material recibe el calor por convección que le transfiere el aire en condiciones atmosféricas, en estas circunstancias se considera que el intercambio de calor se desarrolla por *convección libre o natural* (que es el movimiento del aire provocado por la diferencia de densidad), de acuerdo con estos criterios el número de Nusselt promedio (\overline{Nu}_L) para una superficie inclinada ($0 \leq \theta \leq 60^\circ$) y un número entero de Rayleigh (Ra_L), donde el número de Rayleigh se basa en la longitud característica de la geometría. Típicamente, $n = 1/3$ y $1/4$ para flujos laminar y turbulento respectivamente. Para flujo turbulento \bar{h}_L es independientemente de L . Note que todas las propiedades son evaluadas a la temperatura pelicular, $T_f \equiv (T_s - T_\infty)/2$. Por tanto cuando $\frac{Gr_L}{Re_L^2} \gg 1$ el efecto de la convección forzada se omite y $Nu_L = f(Gr_L, Pr)$ y se calcula de la siguiente forma:

$$\overline{Nu}_L = C \cdot Ra_L^n \quad (2.5)$$

Donde:

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

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g \cdot \text{sen} \theta \cdot \beta_a \cdot (Ta - Ts) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (2.6)$$

Donde:

Gr_L : número de Grashof; (adimensional).

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

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

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

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

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

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

Los coeficientes de dilatación volumétrica y difusividad térmica del aire se calculan por las expresiones 2.7 y 2.8:

$$\beta_a = \frac{1}{T_a} \quad (2.7)$$

$$\alpha = \frac{k_{aire}}{\rho_{aire} \cdot Cp_{aire}} \quad (2.8)$$

Donde:

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

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

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

Luego de calcular el número de Rayleigh (2.6) para la determinación del número de Nusselt promedio, se combina la expresión 2.9 con la misma y se determina el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio del aire a la superficie de secado (\bar{h}_a); ecuación 2.10.

$$\bar{Nu}_L = \frac{\bar{h}_a \cdot L}{k_{aire}} \quad (2.9)$$

Siendo:

$$\bar{h}_a = C \cdot \left[\frac{g \cdot \text{sen} \theta \cdot (T_s - T_a) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \right]^n \cdot \frac{k_{aire}}{L} \quad (2.10)$$

Una vez calculado el \bar{h}_a , el calor por convección natural que intercambian la corriente de aire y las menas lateríticas sometidas al secado se determina a través de la ecuación 2.4, conociendo la temperatura del aire y de la superficie de secado, las cuales pueden ser determinadas experimentalmente.

Para el cálculo de la *convección forzada* se tiene en cuenta el número de Reynolds y el Prandtl, los cual caracterizan la misma, cuando la convección forzada es mucho mayor que la libre esta última se puede despreciar y ocurre que:

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \ll 1$$

El Nusselt promedio se representa por una ecuación de la forma general:

$$\bar{Nu}_L = C \cdot Re_L^m \cdot Pr^n \quad (2.11)$$

Debido a que los valores de C, m, n son siempre independientes de la naturaleza del fluido, en este trabajo se consideran los reportados en la literatura (Incropera y De Witt, 2003) debido a la inexistencia de estudios experimentales relacionados con las menas lateríticas.

El Nusselt promedio para **flujo laminar** se calcula por:

$$Nu_x \equiv \frac{\bar{h}_x \cdot x}{k} = 0,664 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad Pr \geq 0,6 \quad (2.12)$$

Si el flujo es laminar sobre la superficie entera, el subíndice X puede ser reemplazado por L.

Para flujo turbulento:

$$Nu_{Ux} = St \cdot Re_x \cdot Pr = 0,0296 \cdot Re_x^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad 0,6 < Pr < 60 \quad (2.13)$$

Para flujo mixto:

Para esta región el número de Nusselt se determina por:

$$Nu_L = \left[0,064 \cdot Re_{x,c}^{1/2} + 0,037 \cdot \left(Re_L^{4/5} - Re_{x,c}^{4/5} \right) \right] \cdot Pr^{1/3} \quad (2.14)$$

$$Nu_L = \left(0,037 \cdot Re_L^{4/5} - A \right) \cdot Pr^{1/3}$$

Donde la constante A se determina por el valor del número del Reynolds crítico.

$Re_{x,c}$, es.

$$A = 0,037 \cdot Re_{x,c}^{4/5} - 0,664 \cdot Re_{x,c}^{1/2} \quad (2.15)$$

Si el número de Reynolds de transición es $Re_{x,c} = 5 \cdot 10^5$ la ecuación 2.15 se reduce a:

$$Nu_L = \left(0,037 \cdot Re_L^{4/5} - 871 \right) \cdot Pr^{1/3} \quad (2.16)$$
$$\left[\begin{array}{l} 0,6 < Pr < 60 \\ 5 \cdot 10^5 < Re_L \leq 10^8 \\ Re_{x,c} = 5 \cdot 10^5 \end{array} \right]$$

Convección mixta

Esta es el resultado de la combinación de la convección forzada y la libre, donde los números de Nusselt se calculan para la convección forzada pura y libre pura respectivamente, generalmente el efecto combinado de la convección libre y forzada se considera cuando:

$$\left(\frac{Gr_L}{Re_L^2} \right) \approx 1$$

Donde la ecuación a aplicar es la siguiente:

$$N_{u_M}^n = N_{u_F}^n \pm N_{u_N}^n \quad (2.17)$$

Para fluidos transversales se utiliza el signo positivo y el superíndice $n = 3.5$, por lo que la ecuación queda de la siguiente forma:

$$N_{u_M} = \sqrt[3.5]{N^{3.5}_{u_F} + N^{3.5}_{u_N}} \quad (2.18)$$

Transferencia de calor por radiación

Para determinar el flujo de calor neto que reciben las menas por radiación se debe aplicar la ecuación de balance de energía en la superficie de secado en correspondencia con el esquema mostrado en la Figura 2.2.

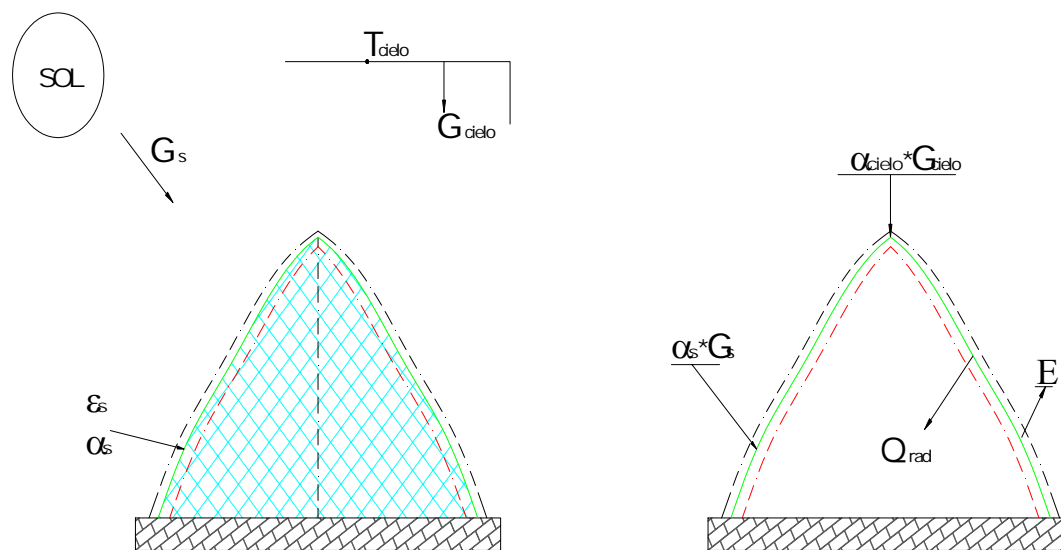


Figura 2.2. Esquema estructural para el intercambio de calor por radiación entre el sol, las menas y los alrededores.

$$\alpha_s \cdot G_{solar} + \alpha_{cielo} \cdot G_{cielo} - E = Q_{Rad} \quad (2.19)$$

Donde:

α_s : absorptividad de las menas; (adimensional)

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

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

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

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

La distribución espectral de radiación solar es significativamente diferente a partir de la asociada con la emisión para superficies ingenieriles. Como se muestra en la Figura 2.3

esta distribución se aproxima a la del cuerpo negro a $5800K$. La radiación se concentra en la región de baja longitudes de onda ($0,2 \leq \lambda_1 \leq 3\mu m$) del spectrum térmico, con el tope ocurriendo en aproximadamente $0,50\mu m$. (Duffiey y Beckman, 1974; Meinel, 1976).

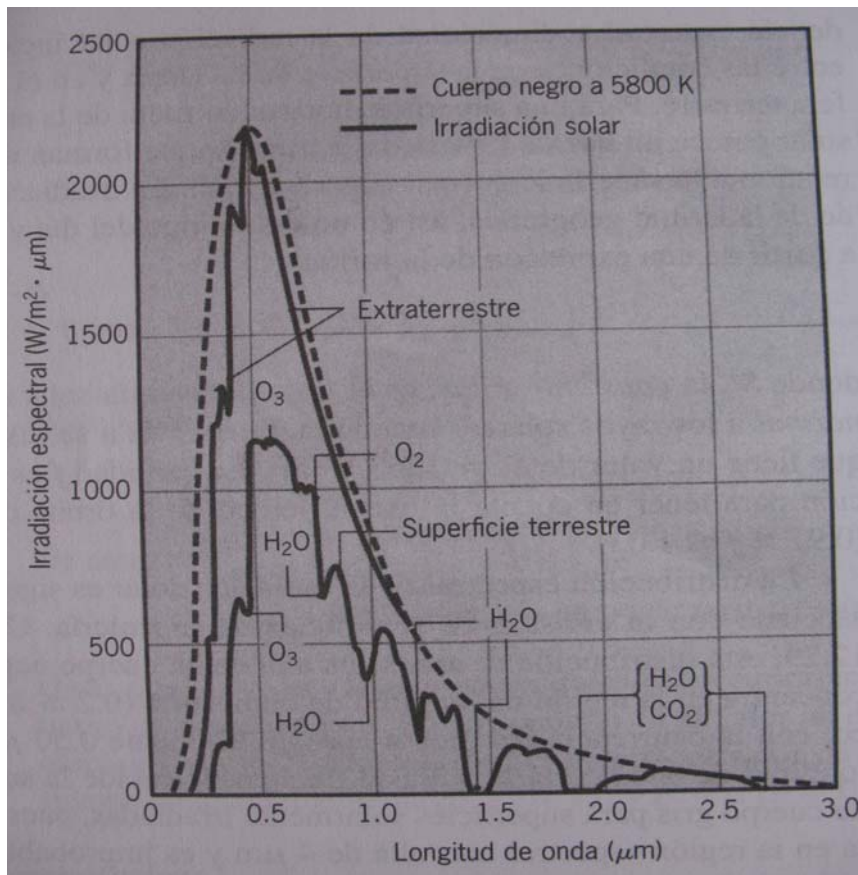


Figura 2.3 Distribución espectral de la radiación solar.

Fuente: Incropera y de Witt., 2003.

La irradiación solar puede ser calculada con el empleo del gráfico mostrado en la Figura 2.3, para cualquier valor de longitud de onda por la ecuación (2.20) propuesta por Sayigh (1977).

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda_1) \cdot d\lambda \quad (2.20)$$

Donde:

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

λ_1 : longitud de onda; (μm).

Al aplicarla a la radiación solar, la ecuación anterior (2.20) se transforma de la siguiente forma:

$$G_{solar} = \int_{0,2}^3 G_{\lambda}(\lambda_1) \cdot d\lambda \quad (2.21)$$

Debido a que la radiación del cielo se concentra aproximadamente en la misma región espectral que la emisión superficial (Gubaraff et al., 1960; Touloukian y De Witt, 1972), se puede asumir que:

$$\alpha_{cielo} = \varepsilon_m \quad (2.22)$$

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

$$G_{atm} = \sigma \cdot T_{cielo}^4 \quad (2.23)$$

Donde:

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

El valor de la temperatura efectiva del cielo depende de las condiciones atmosférica, 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 2.24 reportada por Duffie y Beckman (1991).

$$T_{cielo} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (2.24)$$

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

$$E = \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.25)$$

Donde:

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

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

Transferencia de calor por conducción o calor almacenado

El calor transferido por conducción desde la superficie de secado se almacena en el interior de la pila de menas lateríticas, el mismo puede ser calculado por expresión 2.26 reportada por Abdel-Rehin y Nagib (2007) para el secado solar natural de pulpa de Bagazo.

$$q_a = m_m \cdot Cp_m \cdot \frac{(T_{fm} - T_{im})}{\tau \cdot A} \quad (2.26)$$

Donde:

m_m : masa de menas lateríticas; (kg).

Cp_m : calor específico de la mena laterítica; (kJ/kg K).

T_{im} y T_{fm} : temperatura de la mena laterítica al inicio y final del proceso de secado; (K).

τ : tiempo de secado; (s)

A: área de transferencia de calor y masa; (m²)

Determinación del área de transferencia de calor y masa

Para obtener el área de transferencia de calor y masa (A) en una pila de menas lateríticas se consideran 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 la expresión de cálculo es:

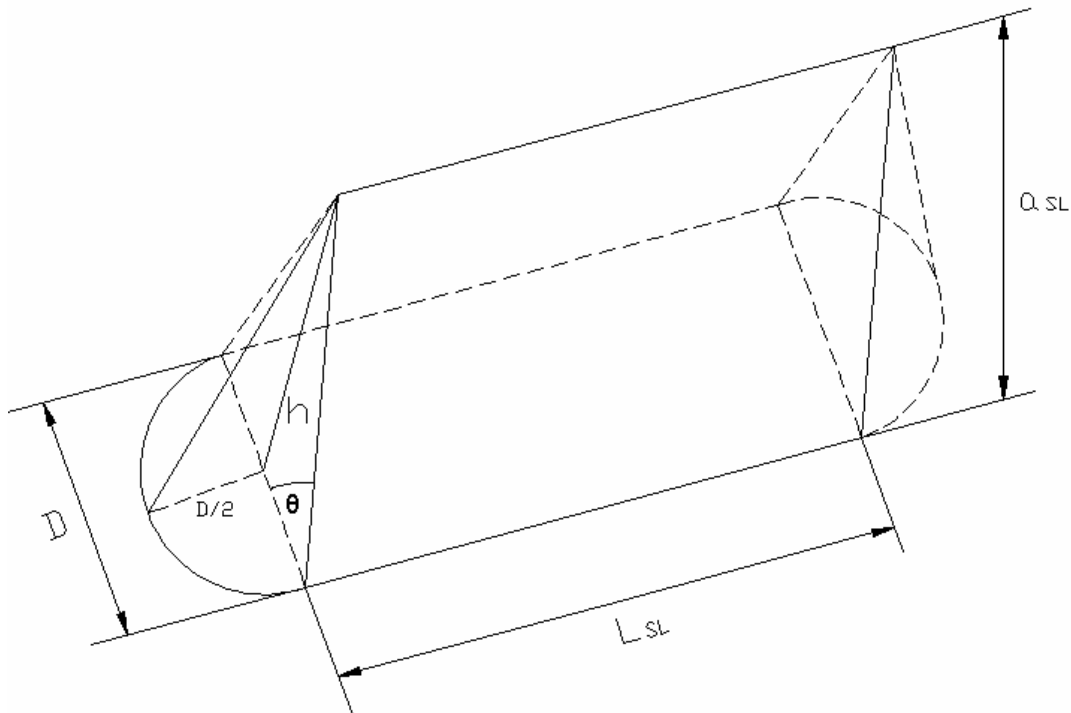


Figura 2.4 Área de transferencia de calor para el secado solar natural de las menas lateríticas.

$$A = 2 \cdot A_{SL} + A_C \quad (2.27)$$

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)

Teniendo en cuenta que las superficies laterales son rectangulares, las áreas pueden ser calculadas por la expresión 2.28

$$A_{SL} = a_{SL} \cdot l_{SL} \quad (2.28)$$

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:

$$\cos \theta = \frac{D}{2 \cdot a_{SL}} \quad (2.29)$$

Despejando

$$a_{SL} = \frac{D}{2 \cdot \cos \theta} \quad (2.30)$$

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 2.30 en la 2.28 se obtiene:

$$A_{SL} = \frac{D}{2 \cdot \cos \theta} \cdot l_{SL} \quad (2.31)$$

Luego el área lateral del cono formado por los extremos de la pila de menas lateríticas se determina por la ecuación 2.32.

$$A_C = \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} \quad (2.32)$$

Donde:

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

Sustituyendo las expresiones 2.31 y 2.32 en la ecuación 2.27 se obtiene:

$$A = \frac{D}{\cos \theta} \cdot l_{SL} + \left(\pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} \right) \quad (2.33)$$

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:

$$\tan \theta = \frac{h}{D/2} \quad (2.34)$$

Despejando se obtiene:

$$D = \frac{2 \cdot h}{\tan \theta} \quad (2.35)$$

Sustituyendo la ecuación 2.35 en la 2.33 resulta:

$$A = \frac{2 \cdot h}{\tan \theta} \cdot \frac{l_{SL}}{\cos \theta} + \left(\pi \cdot \frac{h}{\tan \theta} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \theta} + h^2} \right) \quad (2.36)$$

La expresión 2.36, obtenida para el proceso analizado, permite calcular el área total de transferencia de calor en una pila de menas lateríticas formada simétricamente con altura h , longitud de la superficie lateral l_{SL} y ángulo de talud natural θ .

Determinación del calor latente de humedad

Según Cabrera y Gandón (1983) para determinar la variación de la humedad respecto al tiempo de secado de un material (du/dt) debe considerarse el régimen de secado, el cual es por definición:

$$N = -\frac{m_s}{A} \frac{du}{d\tau} \quad (2.37)$$

Donde:

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

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

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

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

Como se explicó en el capítulo 1 (epígrafe 1.3) el proceso de secado puede desarrollarse en dos periodos, el de velocidad de secado constante y el de velocidad de secado decreciente, la expresión de cálculo varía de acuerdo con el régimen presente, a continuación se analizan ambos periodos.

Periodo de velocidad de secado constante

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

$$\tau = 0 \quad u = \text{constante} \quad k = \text{constante} \quad (2.38)$$

Luego régimen de secado (N_C) es igual a N por tanto es aplicable la ecuación 2.36 para cualquier sólido cuyo proceso de secado transcurra completamente dentro del periodo de velocidad de secado constante, por tanto:

$$N = N_C = -\frac{m_s}{A} \frac{du}{d\tau} \quad (2.39)$$

Donde:

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

Luego el calor latente de humedad (q_{LH}) para este periodo se calcula por la expresión:

$$q_{LH} = N_C \cdot \lambda = -\frac{m_s}{A} \frac{du}{d\tau} \lambda \quad (2.40)$$

Periodo de caída del régimen o de velocidad de secado decreciente

Aunque existen al menos dos formas de determinar el régimen de secado en este periodo, una de las prácticas más empleadas por diferentes investigadores (Treybal, 1985) es la que considera el comportamiento de la curva de secado como una línea recta (Figura 1.1; curva 1) según la ecuación 2.41.

$$N = N_D = \frac{N_c \cdot (u - u_e)}{u_c - u_e} \quad (2.41)$$

Donde:

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

u : contenido de 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; ($\text{kg}_h/\text{kg}_{\text{ss}}$).

Desarrollo de las ecuaciones

Atendiendo al modo de transferencia para la **convección libre**, integrando las ecuaciones correspondientes atendiendo a que para flujo laminar la ecuación 2.4 queda de la siguiente forma:

$$Q_{\text{Conv}_{LL}} = C \cdot \left(\frac{g \cdot \text{seno} \cdot \beta(T_s - T_a) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \right)^{1/4} \cdot \frac{k_a}{L} \cdot (T_a - T_s) \quad (2.42)$$

Para flujo turbulento:

$$Q_{\text{Conv}_{LT}} = C \cdot \left(\frac{g \cdot \text{seno} \cdot \beta(T_s - T_a) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \right)^{1/3} \cdot \frac{k_a}{L} \cdot (T_a - T_s) \quad (2.43)$$

Para la **convección forzada** con *flujo laminar* y número de Prandtl $\text{Pr} \geq 0.6$ la ecuación queda de la siguiente forma:

$$Q_{\text{Conv}_{FL}} = \frac{k_a}{L} \cdot 0.664 \cdot \text{Re}^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot (T_a - T_s) \quad (2.44)$$

Para *flujo turbulento* y números de Prandtl $0.6 \leq \text{Pr} \leq 60$ la ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$Q_{\text{Conv}_{FT}} = \frac{k_a}{L} \cdot 0.0296 \cdot \text{Re}^{4/5} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot (T_a - T_s) \quad (2.45)$$

Para *flujo mixto* con $0.6 \leq \text{Pr} \leq 60$, $\text{Re}_{x,c} = 5 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5 \leq \text{Re}_L \leq 10^8$, $A = 871$

$$Q_{Conv_FM} = \frac{k_a}{L} \left(0.037 \cdot Re^{4/5} - A \right) \cdot Pr^{1/3} \cdot (Ta - Ts) \quad (2.46)$$

Para la **convección mixta** teniendo en cuenta que en la convección libre y la forzada exista flujo laminar:

$$Q_{Conv_ML} = \frac{k_a}{L} \cdot (Ta - Ts) \cdot \sqrt[3.5]{\left[C \cdot (Ra)^{1/4} \right]^{3.5} + \left(0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \right)^{3.5}} \quad (2.47)$$

Para cuando existe flujo turbulento:

$$Q_{Conv_MT} = \frac{k_a}{L} \cdot (Ta - Ts) \cdot \sqrt[3.5]{\left[C \cdot (Ra)^{1/3} \right]^{3.5} + \left(0.0296 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \right)^{3.5}} \quad (2.48)$$

2.5- Conclusiones del capítulo II

- Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la determinación de la transferencia de calor en el secado solar de las menas lateríticas. El mismo considera los diferentes fenómenos físicos que caracterizan la transmisión del calor por convección y radiación.
- Existe una amplia gama de situaciones físicas en las que puede desarrollarse la transferencia de calor durante el secado de las menas lateríticas, el modo predominante solo puede determinarse a partir de mediciones experimentales.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1- Introducción

La incansable labor transformadora que realiza el hombre día a día para explotar al máximo los recursos naturales, acompañado del crecimiento de la población y el desarrollo acelerado de la economía han provocado consecuencias indeseables para la humanidad.

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

3.2- Resultados y discusión

3.2.1- 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 obtenidos en el cálculo de la transferencia de calor por convección 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) puede ser aproximada a 1 lo que indica la existencia de la convección mixta o mezclada. 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

H (%)	Ta (°C)	Re	Gr	Gr/Re ²	Ra	Nusselts	h conv. (W/m ² K)	q conv. (W/m ²)
39	25,7	136864,5	1338280584	0,0714	No se calcula	339,425	4,959	14,382
38	28,8	232987,7	2681093149	0,0493	No se calcula	519,490	7,590	44,024
36	31,7	235778,8	3049134511	0,0548	No se calcula	524,463	7,663	49,809
35	32,4	140163,4	3506008274	0,1784	No se calcula	345,954	5,055	37,405
37	28,1	191761,3	2532424156	0,0688	No se calcula	444,549	6,495	35,075
34	30	292873,4	3239140017	0,0377	No se calcula	623,814	9,115	61,068
31	31,4	342490,9	2697671238	0,0229	No se calcula	707,017	10,330	55,784
29	30,9	302028,4	3284647095	0,0360	No se calcula	639,365	9,342	59,788
40	24,8	41865,8	3110148005	1,7744	2208205084	131,582	1,923	13,073
38	28,1	137674,5	2733659388	0,1442	No se calcula	341,031	4,983	29,399
33	31,6	240093,1	3992656360	0,0692	No se calcula	532,126	7,775	63,755
30	32,4	244568,2	4740029873	0,0792	No se calcula	540,046	7,891	74,172
32	27,6	10980,2	3197296835	26,5188	2270080753	131,425	1,920	12,290
30	30,4	300151,9	4009902128	0,0445	No se calcula	636,185	9,295	73,434
28	28,1	11249,5	3984953286	31,4884	2829316833	141,436	2,067	15,706
26	33,8	336669,8	4020632478	0,0354	No se calcula	697,388	10,190	85,593

También se observan, en general, bajos valores del coeficiente de transferencia de calor por convección que alcanzan valores máximos de 10,330 y 10,376 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

H (%)	Ta (°C)	Re	Gr	Gr/Re ²	Ra	Nusselts	h conv. (W/m ² K)	q conv. (W/m ²)
38	27,9	146428,0	2838707748	0,1323	No se calcula	358,270	5,235	28,268
36	30,2	244264,7	3343780449	0,0560	No se calcula	539,510	7,883	52,027
34	32,9	240239,6	4223355472	0,0731	No se calcula	532,386	7,779	67,675
34	28,7	140617,3	3209724965	0,1623	No se calcula	346,850	5,068	32,434
30	31,3	198498,0	3883243134	0,0985	No se calcula	456,999	6,677	52,083
28	33,9	293051,0	3918781567	0,0456	No se calcula	624,116	9,119	74,776
30	30,1	344404,9	2993908602	0,0252	No se calcula	710,177	10,376	61,221
25	32,3	295923,2	3185303148	0,0363	No se calcula	629,005	9,190	59,738

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.

3.2.2- Transferencia de calor por radiación

Para los valores obtenidos en el cálculo del flujo 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 algunos días de experimentación y al hecho de que la influencia del movimiento del aire es prácticamente permanente durante todo el año y la influencia de la radiación no es de igual manera.

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

H (%)	G _s (W/m ²)	G _s *α _s (W/m ²)	G _{cielo} (W/m ²)	G _{cielo} *α _{cielo} (W/m ²)	E (W/m ²)	Q _{rad} (W/m ²)
39	143	111,54	373,896	358,940	416,723	53,758
38	591	460,98	397,791	381,879	417,851	425,009
36	967	754,26	421,283	404,432	430,412	728,279
35	536	418,08	427,124	410,039	429,259	398,860
37	70	54,6	392,287	376,596	416,159	15,036
34	529	412,62	407,376	391,081	419,547	384,153
31	244	190,32	418,801	402,049	435,050	157,319
29	145	113,1	414,690	398,102	426,385	84,817
40	174	135,72	367,187	352,500	390,325	97,895
38	605	471,9	392,287	376,596	413,352	435,144
33	980	764,4	420,454	403,636	420,114	747,922
30	648	505,44	427,124	410,039	417,851	497,628
32	158	123,24	388,395	372,859	407,779	88,320
30	602	469,56	410,613	394,189	415,035	448,714
28	164	127,92	392,287	376,596	403,912	100,604
26	695	542,1	439,007	421,447	431,568	531,978

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

H (%)	G _s (W/m ²)	G _s *α _s (W/m ²)	G _{cielo} (W/m ²)	G _{cielo} *α _{cielo} (W/m ²)	E (W/m ²)	Q _{rad} (W/m ²)
38	152	118,56	390,726	375,097	415,034	78,623
36	596	464,88	408,992	392,632	421,248	436,263
34	556	433,68	431,337	414,083	424,667	423,095
34	168	131,04	397,001	381,121	413,912	98,249
30	586	457,08	417,976	401,257	420,681	437,656
28	919	716,82	439,866	422,272	433,306	705,785
30	149	116,22	408,183	391,856	424,667	83,408
25	775	604,5	426,285	409,234	433,887	579,847

3.2.3- Calores almacenado y latente de humedad

Los valores calculados para estos dos calores (almacenado y latente de humedad) se exponen en las tablas 3.5 y 3.6, el primero generalmente tiene valores pequeños que indica en cierto modo que la mayor parte del calor que llega a la superficie por convección y radiación es aprovechada en el proceso, los valores obtenidos para el segundo se corresponde con el proceso investigado, el mismo define la eficiencia del proceso de secado para los regímenes de temperatura considerados.

Tabla 3.5 Resultados de los calores almacenado y latente de humedad para la pila 1

H (%)	M _{menas} (kg)	C _p menas (KJ/kg*K)	τ (s)	Q alma. (W/m ²)	N _c (kg/m ² h)	λ (kJ/kg)	N _c * λ (W/m ²)
39	100	2.01					
38	100	2.01	7200	32,203	0,310	2433,68	210
36	100	2.01	14400	37,565	0,293	2426,72	198
35	100	2.01	7200	75,131	0,276	2425,04	186
37	100	2.01	57600	5,3665	-0,069	2435,36	-47
34	100	2.01	7200	32,199	0,813	2430,8	549
31	100	2.01	14400	21,466	0,367	2427,44	247
29	100	2.01	7200	42,932	0,451	2428,64	304
40	100	2.01	57600	4,0248	-0,353	2442,88	-240
38	100	2.01	7200	38,638	0,582	2435,36	394
33	100	2.01	14400	37,565	0,645	2426,96	435
30	100	2.01	7200	32,199	0,678	2425,04	457
32	100	2.01	57600	5,3665	-0,055	2436,56	-37
30	100	2.01	7200	32,199	0,437	2429,84	295
28	100	2.01	14400	37,565	0,204	2435,36	138
26	100	2.01	21600	14,310	0,127	2421,68	85

Tabla 3.6 Resultados del los calores almacenado y latente de humedad para la pila 2

H (%)	Mmenas (kg)	Cp menas (KJ/kg*K)	τ (s)	Q alma. (W/m ²)	Nc (kg/m ² h)	λ (kJ/kg)	Nc * λ (W/m ²)
38	50	2.01					
36	50	2.01	7200	37,565	0,300	2430,2	202,517
34	50	2.01	14400	18,782	0,146	2423,84	98,300
34	50	2.01	64800	4,1739	0,000	2433,92	0,000
30	50	2.01	7200	16,099	0,506	2427,68	341,224
28	50	2.01	14400	10,733	0,122	2421,44	82,060
30	50	2.01	64800	1,7888	-0,026	2430,56	-17,554
25	50	2.01	10800	21,466	0,350	2425,28	235,791

3.2.4- 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 3 W/m² K indicativo de la existencia de la transferencia de calor por convección libre y mixta.

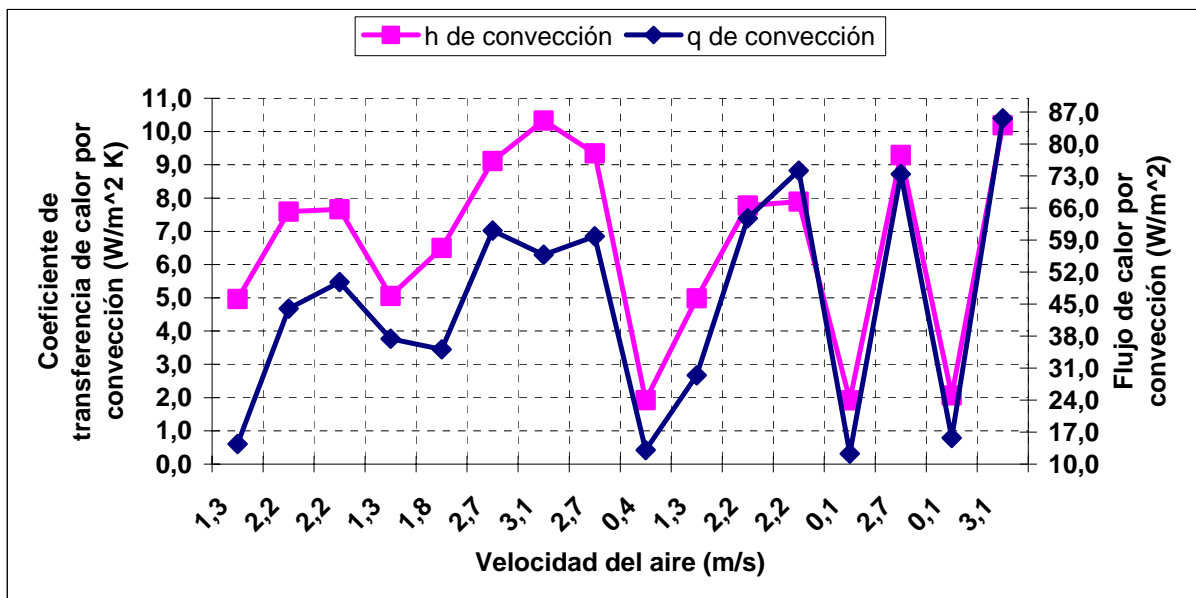


Figura 3.1. Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección y el flujo de calor por convección respecto a la velocidad del aire (pila 1).

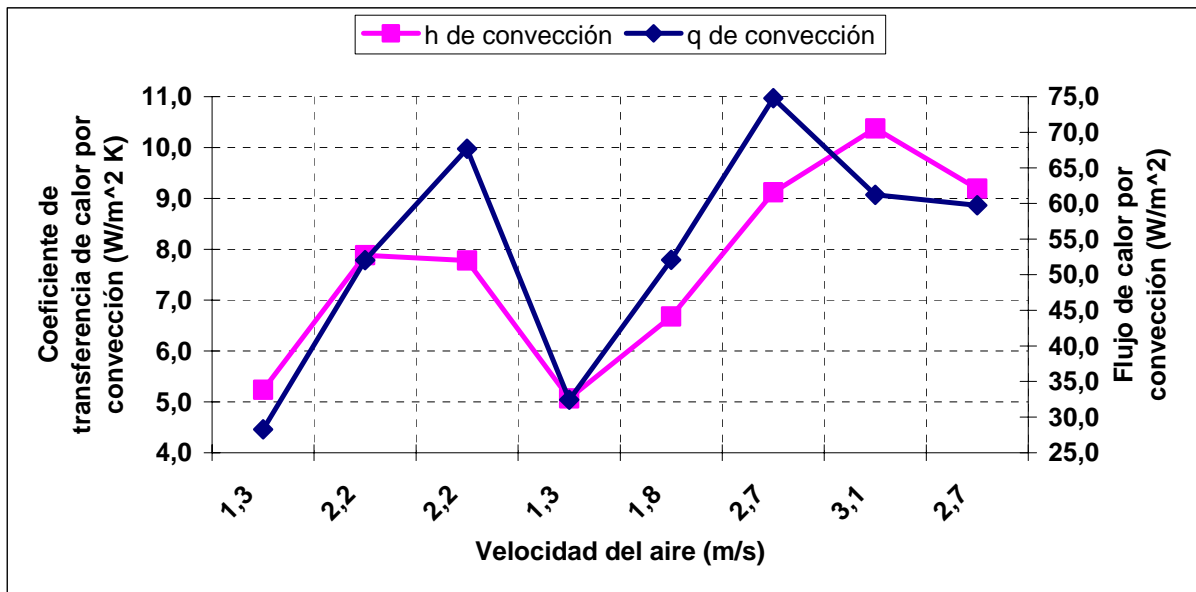


Figura 3.2. Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección y el flujo de calor por convección respecto a la velocidad del aire (pila 2).

Al valorar el comportamiento del flujo de calor se observa una dependencia proporcional 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.

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 de l horario del día.

Al comparar los valores de los flujos de calor por convección y radiación entre ambas pilas se aprecia 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 y se justifica el criterio planteado por los expertos en la temática cuando afirman que el secado en condiciones naturales es considerado como secado eólico y solar.

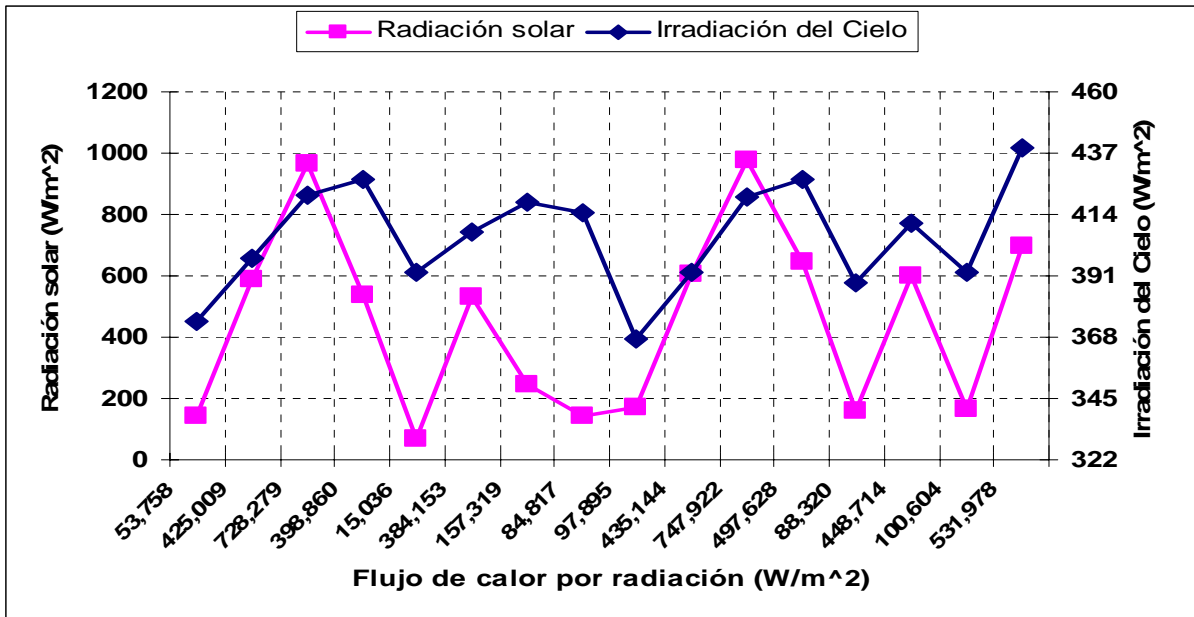


Figura 3.3. Comportamiento de la radiación solar y la irradiación del cielo respecto al flujo de calor por radiación (pila 1).

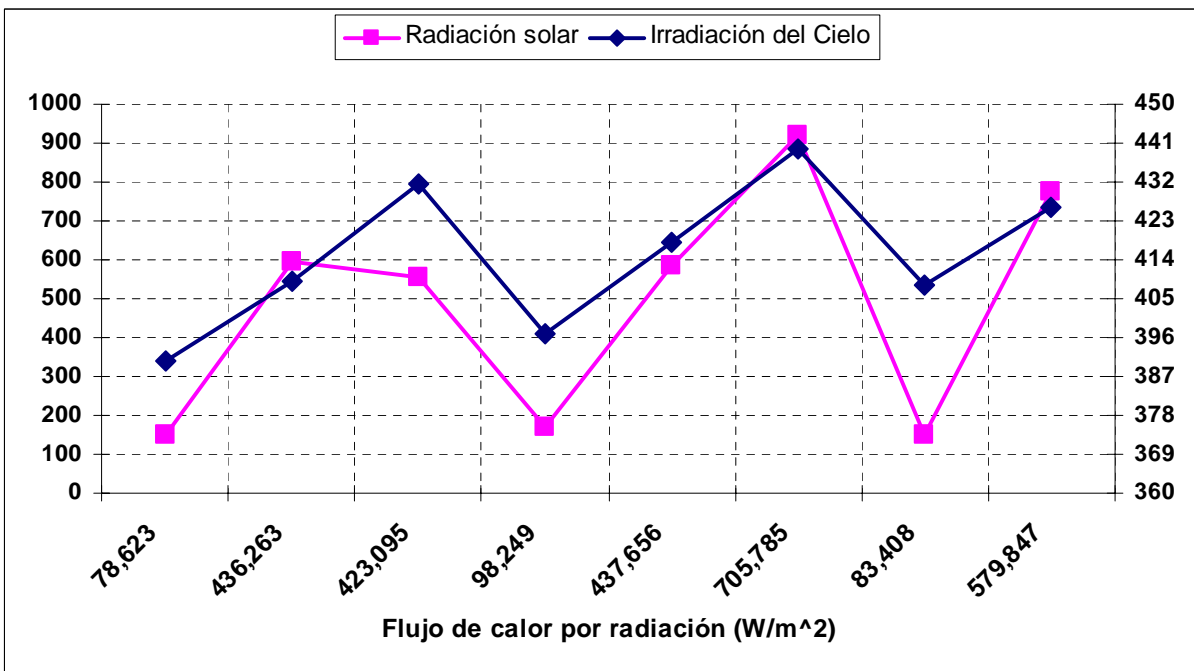


Figura 3.4. Comportamiento de la radiación solar y la irradiación del cielo respecto al flujo de calor por radiación (pila 2).

En las figuras 3.5 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 periodo 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 periodo 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.

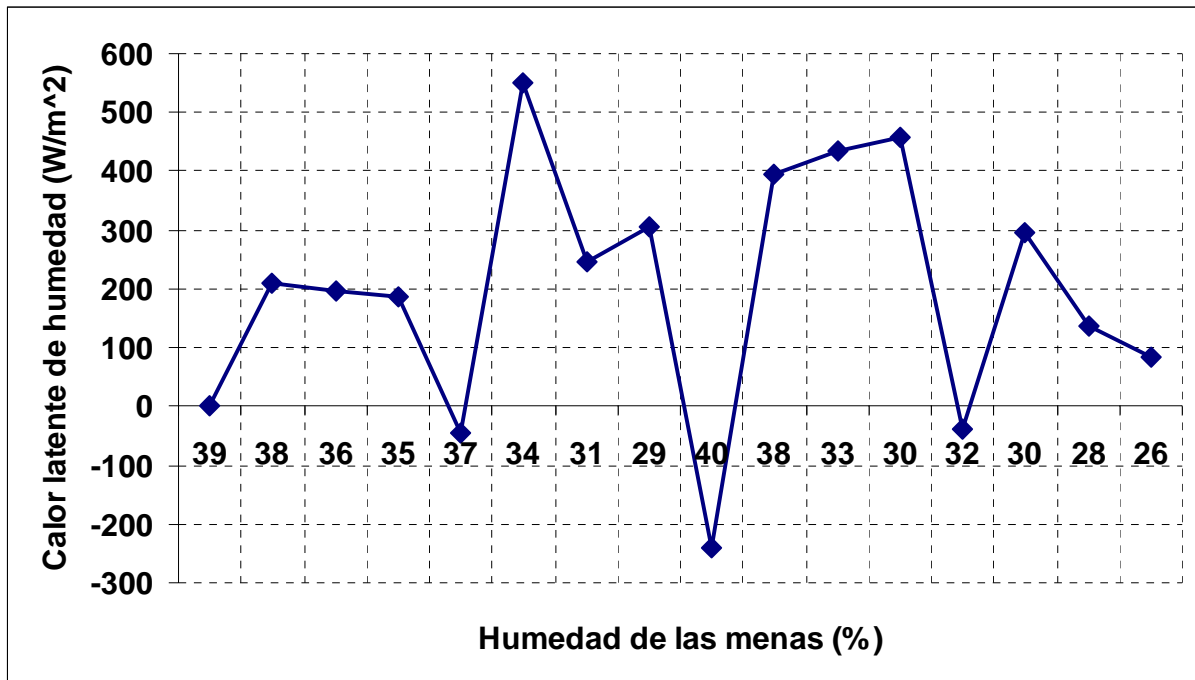


Figura 3.5. Comportamiento del calor latente de humedad respecto a la humedad de las menas (pila 1).

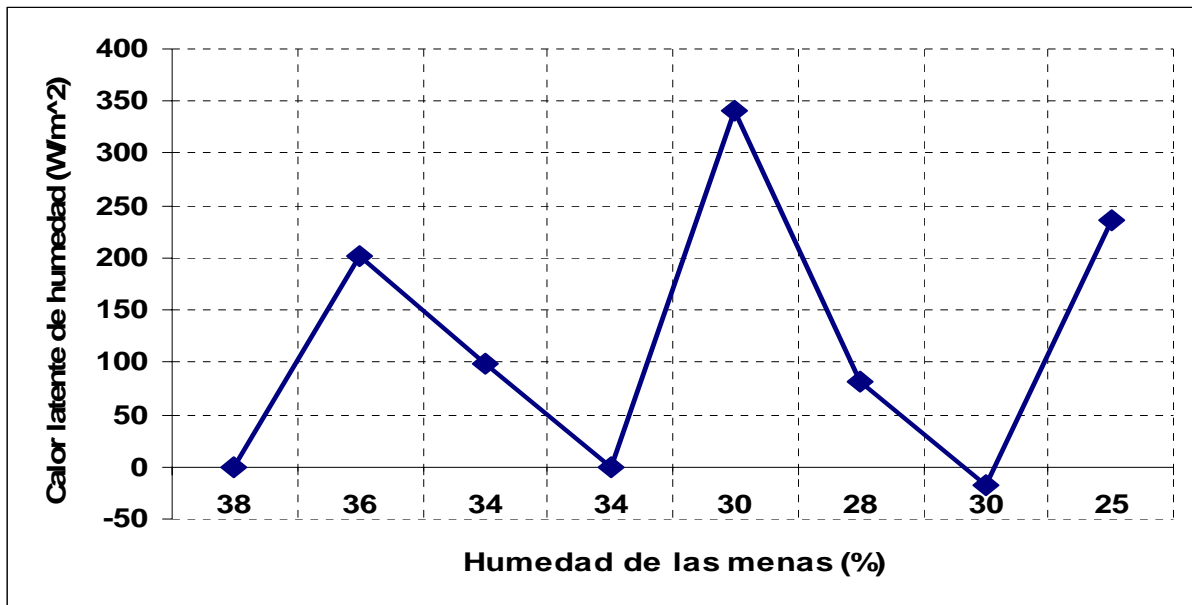


Figura 3.6. Comportamiento del calor latente de humedad respecto a la humedad de las menas (pila 2).

3.3- Valoración económica

La coyuntura internacional, en especial la crisis económica que afecta a todas las economías, ha conllevado a una crisis energética que afecta a todos los continentes, por lo que se hace necesario el ahorro de combustible tanto como sea posible.

En la industria cubana del níquel el consumo de combustible es un fenómeno que influye notablemente en los costos de producción (Informe económico anual de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, 2007). En la planta de preparación de mineral es un parámetro que depende considerablemente del contenido de humedad del mineral a secar, la reducción de la humedad antes de efectuar la operación de secado en los secaderos cilíndricos rotatorios genera un ahorro apreciable de petróleo (Azman, 2008). En sentido general los cálculos que se exponen en este epígrafe tienen el objetivo de ilustrar algunos de los aspectos esenciales a considerar al valorar económicamente el proceso estudiado, de ahí que constituyan una aproximación debido a la diferencias significativas que existen entre las masas empleadas en el proceso productivo y la considerada en el proceso de experimentación expuesto en el trabajo.

Para obtener el ahorro de combustible se considera la reducción de la humedad (utilizando los valores promedios) experimentada por el mineral durante el secado de la pila 2 (38 a 25 %), se selecciona esta pila porque los cálculos para la pila 1 fueron desarrollados por Socarrás (2009), se calcula el consumo de combustible para ambos contenidos de humedad y se realiza la comparación entre los mismos, según metodología de cálculo expuesta por Castillo (2007) y Azman (2008). El precio del petróleo empleado en el cálculo es 273.17 USD/t, el cual fue reportado por el departamento de Economía Energética de la empresa para el mes de mayo del 2008.

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

Método	Humedad inicial del mineral (%)	Consumo de combustible t/h	Costo USD/mes	Costo USD/año
Sin secado solar	38	2,738	538 516.41	6 462 196.93
Con secado solar	25	1,451	285 386.16	3 424 633.95
Ahorro (parcial)	13	1,287	253 130.25	3 037 563.00

En la tabla 3.1 se muestra un ahorro parcial de 3 037 563 USD para un secador cilíndrico, al mismo no se le restó el gasto total incurrido en el patio de secado por los diferentes conceptos involucrados en la valoración económica del proceso estudiado

3.4- Impacto ambiental asociado al proceso de secado solar

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

La minería a cielo abierto es una actividad industrial de alto impacto ambiental, social y cultural. Es también una actividad industrial insostenible por definición, en la medida en que la explotación del recurso supone su agotamiento.

A continuación se destacan las siguientes actividades mineras como posibles causas de impacto ambiental durante la fase de EXPLOTACIÓN:

- Preparación de los caminos de acceso.
- Mapeos topográficos y geológicos.
- Montaje de campamentos e instalaciones auxiliares.
- Trabajos geofísicos.
- Investigaciones hidrogeológicas.
- Aperturas de zanjas y pozos de reconocimiento.
- Tomas de muestras.

Durante la fase de EXPLOTACIÓN, los impactos que se producen están en función del método utilizado, los principales impactos ambientales causados por la minería a cielo abierto en su fase de explotación son los siguientes:

- Afectación de la superficie: la MCA devasta la superficie, modifica severamente la morfología del terreno, apila y deja al descubierto grandes cantidades de material estéril, produce la destrucción de áreas cultivadas y de otros patrimonios superficiales, puede alterar cursos de aguas y formar grandes lagunas para el material descartado.
- Afectación del entorno en general: transforma radicalmente el entorno, pierde su posible atracción escénica y se ve afectado por el ruido producido en las distintas operaciones, como por ejemplo en la trituración y en la molienda, en la generación de energía, en el transporte y en la carga y descarga de minerales y de material estéril sobrante de la mina y del ingenio.
- Contaminación del aire: el aire puede contaminarse con impurezas sólidas, por ejemplo polvo y combustibles tóxicos o inertes, capaces de penetrar hasta los pulmones, provenientes de diversas fases del proceso. También puede contaminarse el aire con vapores o gases de cianuros, mercurio, dióxido de azufre

contenidos en gases residuales, procesos de combustión incompleta o emanaciones de charcos o lagunas de aguas no circulantes con materia orgánica en descomposición.

- Afectación de las aguas superficiales: los residuos sólidos finos provenientes del área de explotación pueden dar lugar a una elevación de la capa de sedimentos en los ríos de la zona. Diques y lagunas de oxidación mal construidas o mal mantenidas, o inadecuado manejo, almacenamiento o transporte de insumos (como combustibles, lubricantes, reactivos químicos y residuos líquidos) pueden conducir a la contaminación de las aguas superficiales.
- Afectación de las aguas subterráneas o freáticas: aguas contaminadas con aceite usado, con reactivos, con sales minerales provenientes de las pilas o botaderos de productos sólidos residuales de los procesos de tratamiento, así como aguas de lluvia contaminadas con contenidos de dichos botaderos, o aguas provenientes de pilas o diques de colas, o aguas de proceso contaminadas, pueden llegar a las aguas subterráneas. Además, puede haber un descenso en los niveles de estas aguas subterráneas cuando son fuente de abastecimiento de agua fresca para operaciones de tratamiento de minerales.
- Afectación de los suelos: implica la eliminación del suelo en el área de explotación, y produce un resecamiento de este en la zona circundante, así como una disminución del rendimiento agrícola y agropecuario. También suele provocar hundimientos y la formación de pantanos en caso de que el nivel de las aguas subterráneas vuelva a subir. Además, provoca la inhabilitación de suelos por apilamiento de material sobrante.
- Impacto sobre la flora: implica la eliminación de la vegetación en el área de las operaciones mineras, así como una destrucción parcial o una modificación de la flora en el área circunvecina, debido a la alteración del nivel freático. También puede provocar una presión sobre los bosques existentes en el área, que pueden verse destruidos por el proceso de explotación.
- Impacto sobre la fauna: la fauna se ve perturbada y ahuyentada por el ruido y la contaminación del aire y del agua, la elevación del nivel de sedimentos en los ríos.

Además, la erosión de los amontonamientos de residuos estériles puede afectar particularmente la vida acuática. Puede darse también envenenamiento por reactivos residuales contenidos en aguas provenientes de la zona de explotación.

- Impacto sobre las poblaciones: la MCA puede provocar conflictos por derechos de utilización de la tierra, dar lugar al surgimiento descontrolado de asentamientos humanos ocasionando una problemática social y destruir áreas de potencial turístico. Puede provocar una disminución en el rendimiento de las labores de pescadores y agricultores debido a envenenamiento y cambios en el curso de los ríos debido a la elevación de nivel por sedimentación. Por otra parte, la MCA puede provocar un impacto económico negativo por el desplazamiento de otras actividades económicas locales actuales y futuras.
- Cambios en el microclima: puede causar cambios en el microclima y puede provocar una multiplicación de agentes patógenos en charcos y áreas cubiertas por aguas estancadas.
- Impacto escénico posterior a la explotación: deja profundos cráteres en el paisaje. Su eliminación puede conllevar costos tan elevados que puedan impedir la explotación misma.

3.5- Conclusiones capítulo III

- 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 4,959 y 5,068 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 747,922 y 705,785 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 -17,554 y -240 W para las dos pilas.
- Para la reducción de un 13% del contenido de humedad en las menas lateríticas se estimó un ahorro de combustible equivalente a 1,287 t/h que al precio actual genera una ganancia 3 037 563 USD al año y disminuye la emisión de gases contaminantes producto de la combustión de petróleo.

CONCLUSIONES

- El desarrollo del estado de arte evidenció la existencia de varios trabajos dedicados a la evaluación de la transferencia de calor en el secado de diversos materiales, pero en ninguno de ellos se determinan los flujos de calor para las menas lateríticas sometidas a secado solar natural.
- Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la determinación de la transferencia de calor durante el secado solar natural de las menas lateríticas. El mismo considera las diferentes situaciones físicas en las que puede desarrollarse la transmisión del calor durante el proceso.
- Se comprobó que durante el secado solar natural de las menas lateríticas se produce la transferencia de calor por convección libre, forzada y mixta, predominando la segunda para la cual los coeficientes de transferencia de calor mínimos fueron 4,959 y 5,068 W/m² K y los máximos ascendieron a 10,330 y 10,376 W/ m² K para las pilas 1 y 2 respectivamente.
- Los flujos de calor por radiación alcanzaron valores máximos igual a 747,922 y 705,785 W/m² para las dos pilas analizadas. Los mismos se corresponden con los horarios de mayor radiación solar.
- Con la aplicación del secado solar a las menas lateríticas se redujo el contenido de humedad en un 13% debido a la absorción del calor por parte de las menas, pero en los horarios nocturnos las pilas de minerales cedieron calor, proceso que se agudizó en el momento de ocurrencia de lluvias alcanzando el valor máximo de -240 W.
- Para las condiciones consideradas en la investigación se estimó un ahorro de combustible igual a 1,287 t/h que al precio actual genera una ganancia de 3 037 563 USD al año y se disminuyen las emisiones de gases contaminantes producto de la combustión de petróleo, que afectan los suelos, el aire, la flora, la fauna, las poblaciones y el microclima.



RECOMENDACIONES

- Realizar la caracterización termofísica de las menas lateríticas del yacimiento que actualmente está en explotación para predecir con exactitud su comportamiento cinético durante el secado solar y convencional.
- Desarrollar los estudios estadísticos para determinar la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones en un periodo determinado para con esta información proyectar las instalaciones de secado solar natural con los mínimos costos económicos y riesgos posibles.
- Desarrollar corridas experimentales de secado solar con muestras de menas lateríticas de mayor masa a las experimentadas en el presente trabajo y verificar la validez del procedimiento de cálculo empleado en esta investigación.

RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZMAN, G. *Evaluación energética de los secaderos rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de diploma. Moa. ISMM, 2008. 55p.
- 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.
- CABRERA. L.; A. CARDOSO. *Influencia de los parámetros de secado sobre la calidad de dos variedades de cebolla deshidratada*. Vol. 6. No.2. 1985. 455 p.
- 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.
- HALL, C. *Drying technology An International Journal*. New York, 1983.
- 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.
- 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.

- ISACHENKO. V.; V. OSIPOVA.; A. SUKOMEL. *Transmisión del calor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1979. 566p.
- KALLEL, F.; et al. *Effects of Moisture on temperature during drying of consolidated porous materials*. J. Heat Transfer, ASME Trans, 1993.
- 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.
- NONHEBEL, G.; H. MOSS. *Secado de sólidos en la industria química*. Editorial Butterworths, Canadá, 1971.
- NOVOA, R.; M. BOIZÁN. Secado de Zeolita a escala de laboratorio (III). *Revista Tecnología Química*. Santiago de Cuba, No.1: 1995, 24-29 p.
- OSTRACH, S. *Natural Convection in Enclosures*. Journal of Heat Transfer. Transactions of the ASME. Vol. 110, 1175-1190, 1988.
- 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.
- PIKUS, F. *Método del cálculo de la cinética del calentamiento de un material húmedo fluidizado en colección transferencia de masa en sistemas dispersos*. Editorial Nauta y Tiejmika. Minsk, 1965.
- PLUMB O.; G. SPOLEK; B. OLMSTEAD. *Heat and Mass Transfer in Wood during drying*. Int.J. Heat Mass Transfer 28(9): 1985.350 p.
- 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.
- REIZES, J. A., LEONARDI, E. AND DE VAHL DAVIS, G. *Problems with Derived Variable Methods for the Numerical Solution of Three-Dimensional Flows. Computational Techniques and Application Conference*. University of Sydney, Australia.1983.
- RETIRADO, M. Y. *Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico*. Tesis de Maestría. Moa: ISMM, 2007. 60p.
- REZCHIKOV, V.; A. GUINSBURG. *Secado de productos alimenticios en cama fluidizante*. Editorial Pischevaya Promyshlennost, Moscú, 1966.
- 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
- ROMANKOV, P.; B. RASHKOVSKAYA; V. FROLOV. *Procesos de transferencia de masa en las tecnologías químicas*. Editorial XIMIA. Leningrado, 1975.
- ROMERO, Y. *Estudio experimental a escala piloto del secado solar del mineral laterítico*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, Moa, 2006. 55p.



- SANTOS, Y. *Estudio preliminar a escala de laboratorio del secado solar del mineral laterítico*. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, 2005. 71p.
- 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.
- VANECEK, V., R. DRBOHLAV; M. MARKVART. *Secado fluidizado*. Editorial Leonard Hill, Londres, 1965.
- WHITAKER, S. *Simultaneous heat, mass and momentum transfer and theory of drying*. Adv.Heat Transfer 13.1977, 250 p.
- ZHIDKO, V.; M. BOIZAN. *Secado fluidizado de productos alimenticios*. Editorial oriente. Santiago de cuba, 1986.

ANEXO CÁLCULO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SECADO SOLAR DE LAS MENAS LATERÍTICAS

Transferencia de calor por Convección

$$T_a := 298.7 \cdot \mathbf{K} \quad T_s := 295.8 \cdot \mathbf{K} \quad L_1 := 1.8 \cdot \mathbf{m} \quad \theta := 40.93 \cdot \mathbf{deg}$$

$$V_a := 1.3 \cdot \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}} \quad v_a := 17.0972 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\mathbf{m}^2}{\mathbf{s}} \quad k_a := 0.0263 \cdot \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{m} \cdot \mathbf{K}}$$

$$Re_1 := \frac{V_a \cdot L_1}{v_a} \quad Re_1 = 136864.516 \quad Pr := 0.71$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección del aire

$$Nu := 0.0296 \cdot Re_1^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad h_{conv} := \frac{Nu \cdot k_a}{L_1} \quad h_{conv} = 4.959 \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{K}}$$

Flujo de calor por convección

$$q_{conv} := h_{conv}(T_a - T_s)$$

$$q_{conv} = 14.382 \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{m}^2}$$

Transferencia de calor por Radiación

Para determinar el flujo de calor neto que recibe el mineral por radiación se debe utilizar la siguiente ecuación correspondiente a la figura 2.2.

Absortividad del mineral: (α_s)

$$\alpha_s := 0.78$$

Absortividad del cielo: (α_{cielo})

$$\epsilon_m := 0.96$$

Irradiación solar (G_{solar})

$$\alpha_{cielo} := \epsilon_m$$

Irradiación solar puede ser calculada por:

$$G_{\text{solar}} := 143 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Irradiación de la tierra debido a la emisión atmosférica:(G_{cielo})

La irradiación de la tierra debido a la emisión atmosférica

Temperatura del cielo

$$f_3 := 1 \cdot \text{K}^{-2}$$

$$T_{\text{cielo}} := 0.0552 \cdot T_a^{1.5}$$

$$T_{\text{cielo}} = 284.965 \text{ K}^{1.5}$$

Constante de Stefan-Boltzmann:(
 σ

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$G_{\text{cielo}} := (\sigma \cdot T_{\text{cielo}}^4) \cdot f_3$$

$$G_{\text{cielo}} = 373.896 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Potencia emisiva:(E)

Potencia emisiva asociada a la superficie de la tierra

Emisividad del mineral laterítico: (ϵ_m)

$$E := \epsilon_m \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

$$E = 416.723 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Calor transferido por Radiación

$$Q_{\text{rad}} := \alpha_s \cdot G_{\text{solar}} + \alpha_{\text{cielo}} \cdot G_{\text{cielo}} - E$$

$$Q_{\text{rad}} = 53.758 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Cálculo del calor Almacenado

Masa de las menas lateríticas:(m_m)

$$m_m := 100 \cdot \text{kg}$$

Calor específico de las menas lateríticas:(C_{p_m})

$$C_{p_m} := 2.01 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Temperatura de las menas lateríticas al inicio del proceso de secado:(T_{im})

$$T_{im} := 296 \cdot \text{K}$$

Temperatura de las menas lateríticas al final del proceso de secado:(T_{fm})

$$T_{fm} := 299 \cdot \text{K}$$

Tiempo de secado:(τ)

$$\tau := 7200 \cdot \text{s}$$

Área de transferencia de calor para una pila de mineral

$$h := 0.35 \cdot \text{m} \quad L_{SL} := 2 \cdot 0.90 \text{m}$$

Área de transferencia de calor en la superficies laterales (rectangulares)

$$A_1 := \frac{2 \cdot h \cdot L_{SL}}{\tan(\theta) \cdot \cos(\theta)}$$

$$A_1 = 1.923 \text{ m}^2$$

Área de transferencia de calor en la superficies frontales (cónicas)

$$A_2 := \left(\pi \cdot \frac{h}{\tan(\theta)} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan(\theta) \cdot \tan(\theta)} + h^2} \right)$$

$$A_2 = 0.677 \text{ m}^2$$

Área total de transferencia de calor para una pila de mineral

$$A_T := A_1 + A_2$$

$$A_T = 2.601 \text{ m}^2$$

$$A_{T_v} := \frac{2 \cdot h \cdot L_{SL}}{\tan(\theta) \cdot \cos(\theta)} + \left(\pi \cdot \frac{h}{\tan(\theta)} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan(\theta) \cdot \tan(\theta)} + h^2} \right)$$

$$A_{T_v} = 2.601 \text{ m}^2$$

Calor almacenado en la pila de mineral

$$q_a := m_m \cdot C_{p_m} \cdot \frac{T_{fm} - T_{im}}{\tau \cdot A_{T_v}}$$

$$q_a = 32.203 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$