



Secado de granos a altas temperaturas

Contenido (77 p.)

OFICINA REGIONAL DE LA FAO PARA AMERICA LATINA Y EL CARIBE
Santiago, Chile

1991

Serie: Tecnología Poscosecha 10

Valdecir Antoninho Dalpasquale

Daniel Antonio Marques Pereira

Roberto Sinicio

Delly Oliveira Filho

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios,

ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

El conocimiento es un patrimonio de la humanidad y, como tal, debe ser amplia y rápidamente difundido para que beneficie a todas las personas para las cuales ha sido generado.

Por esta razón, la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe autoriza y estimula la reproducción total o parcial del contenido de esta publicación.

Se agradecerá mencionar la fuente del documento y enviar a esta Oficina un ejemplar del material reproducido.

Derechos de autor

Por este medio se autoriza la reproducción digital o impresa parcial o total de este trabajo, para su utilización personal o en las aulas, sin costo y sin solicitud formal de reproducción, siempre que no se elaboren copias con fines de lucro ni comerciales, y que todas las copias lleven este aviso completo en la primera página. Los derechos de autor de los trabajos que no sean propiedad de la FAO deben respetarse. Para hacer reproducciones con otros fines, publicar, enviar a través de los servidores o redistribuir en las listas, se requiere autorización específica previa y el pago de una cuota cuando sea pertinente.

Los permisos de publicación se solicitan a:

Editor en Jefe

FAO, Viale delle Terme di Caracalla

00100 Roma, Italia

correo electrónico: copyright@fao.org

© FAO

Contenido (77 p.)

Prologo

1. Introducción

2. Parámetros del secado de granos

Condiciones del aire ambiente

Temperatura de secado

Presión estática y flujo de aire

Humedad inicial del producto

Flujo del producto dentro del secador

Historia del producto

Temperatura de secado y flujo del producto

3. Clasificación de los secadores respecto al flujo del producto

A. Secadores estacionarios

Secador de lecho fijo o de capa estacionaria

Secador con aire movido por convección natural

B. Secadores continuos

Secadores en cascada ó de canaletas

Secador de flujo cruzados

Secador de flujos paralelos

Secador de flujos contracorrientes

C. Secadores intermitentes

Secado combinado

Seca-aireacion de granos

4. Calentamiento del aire

Fuentes de energía

Combustibles

Combustibles sólidos

[Leña](#)

[Residuos agrícolas.](#)

[Combustibles líquidos](#)

[Combustibles gaseosos](#)

[Combustión](#)

[Cálculo del aire necesario para la combustión](#)

[Exceso de aire](#)

[Control de la combustión](#)

[Hornos](#)

[Hornos para combustibles sólidos](#)

[Hornos para combustibles en polvo](#)

[5. Lista de símbolos](#)

[6. Referencias bibliográficas](#)

[7. Sistema internacional de Unidades \(SI\)](#)

[Home":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">](#)

Prologo

[Indice - Siguiente](#) >

El presente folleto forma parte de la serie: "Tecnología Postcosecha", publicación de la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, que trata diversos temas relacionados con las tecnologías y procedimientos utilizados en la cosecha, beneficio y almacenamiento de los granos, raíces, tubérculos, frutas y hortalizas que se emplean en la alimentación humana, así como de las plagas que los atacan, los métodos para su control y los factores de calidad que intervienen en su manejo y comercialización.

Su contenido está escrito en un lenguaje sencillo, pero apoyado en los conocimientos y experiencias de técnicos e instituciones que han encaminado sus esfuerzos para especializarse en alguna de las muchas disciplinas científicas y técnicas que intervienen en el manejo de estos productos, desde su madurez fisiológica en la planta, hasta que es utilizado como alimento.

Con su publicación se busca proporcionar información de utilidad para todas aquellas personas que tienen bajo su responsabilidad el manejo de estos productos agrícolas, en algunas de sus múltiples etapas, especialmente agricultores y personal técnico encargado de centros de acoplo y almacenamiento; así como también a los extensionistas encargados de programas de capacitación en esta área. No dudamos que la información también será de utilidad para profesionales, personal de docencia y estudiantes que tengan interés en este campo.

La FAO espera que la información ayude a mejorar las técnicas y procedimientos actualmente

utilizados en el manejo y almacenamiento de los productos agrícolas en Latinoamérica y con ello, contribuir a disminuir las cuantiosas pérdidas postcosecha de alimentos que son necesarios para una población cada día más numerosa y hambrienta.

1. Introducción

El secado artificial a altas temperaturas es un procedimiento para eliminar el exceso de humedad de los granos, más seguro que el secado natural, por ser menos dependiente de las condiciones climáticas; es más rápido y permite evitar algunos daños que ocurren durante el secado natural. En lugares donde no se dispone de energía eléctrica y cuyas cosechas son pequeñas, el uso del principio de convección natural puede ser una buena opción.

El secado a altas temperaturas es una técnica muy usada en las granjas de los países más desarrollados y se emplea desde hace mucho tiempo en las industrias de transformación y en las unidades almacenadoras de granos de todo el mundo.

Los procesos de secado a altas temperaturas utilizan grandes flujos de aire calentado en diez grados Celsius o más sobre la temperatura ambiente. Como es natural, este límite no es rígido sino un valor que distingue este proceso del secado a bajas temperaturas.

El flujo de aire que se recomienda para el proceso de secado a altas temperaturas es superior a $1,3 \times 10^4$ m³ aire/s. kg granos.

El potencial de retención de agua de dicha masa de aire aumenta a medida que sube su temperatura, con lo que se incrementa a su vez el potencial de secado de dicho aire. De ahí la mayor rapidez de los procesos de secado a altas temperaturas, en comparación con los otros procesos de secado.

[Indice](#) - [Siguiete](#) >

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

2. Parámetros del secado de granos

[Indice](#) - < [Precedente](#) - [Siguiete](#) >

[Condiciones del aire ambiente](#)

[Temperatura de secado](#)

[Presion estatica y flujo de aire](#)

[Humedad inicial del producto](#)

[Flujo del producto dentro del secador](#)

[Historia del producto](#)

[Temperatura de secado y flujo del producto](#)

Los parámetros que influyen en la tasa de secado, cuando se secan granos con aire forzado, son: la temperatura y la humedad relativa ambiente, la temperatura y el flujo de aire de secado, el

contenido de humedad inicial y de equilibrio de los granos, la temperatura y, dado el caso, la velocidad de dichos granos dentro del secador. El tipo de grano y las condiciones en la fase de campo también pueden influir en su tasa de secado.

Los parámetros de secado citados no son independientes. Esto quiere decir que influyen en la tasa de secado como un conjunto de factores y no aisladamente. El manejo adecuado de dichos parámetros permite determinar el equipamiento apropiado para las condiciones específicas de secado.

Condiciones del aire ambiente

A la temperatura y la humedad relativa del aire ambiente, muchas veces no se les da importancia para el secado a altas temperaturas. Estos parámetros tienen poca influencia sobre la tasa de secado; en cambio, determinan la cantidad de energía necesaria para alcanzar la temperatura de secado. Cuanto menor sea la temperatura ambiente, mayor será la cantidad de energía necesaria para calentar ese aire, lo que determina un mayor costo del secado.

Temperatura de secado

La temperatura del aire de secado es el parámetro de mayor flexibilidad en un sistema de secado

a altas temperaturas e influye significativamente en la tasa y la eficiencia de secado y en la calidad del producto final. Un aumento de dicha temperatura significa un menor consumo de energía por unidad de agua evaporada y una mayor tasa de secado. En cambio, las temperaturas de secado más elevadas pueden causar daños térmicos más acentuados en los granos. La temperatura de secado, junto con los flujos de aire y de granos, determina la cantidad de agua evaporada en un secador.

Presión estática y flujo de aire

La pérdida de carga de un flujo de aire a través de una capa de granos, conocida generalmente como resistencia al flujo de aire y denominada presión estática, influye en este flujo y, en consecuencia, en la tasa de secado. Para determinado tamaño de ventilador, cuanto mayor sea el espesor de la capa de granos y menor la cantidad de impurezas en ella, mayor será el flujo de aire y también la tasa de secado. Esto, porque el menor espesor de la capa y la menor cantidad de impurezas significan menos resistencia al paso del aire a través de los granos.

Las impurezas que más interfieren en el paso del aire a través de la masa de granos son los "finos". Si se trata de maíz, finos son las impurezas que pasan por una malla de 4,76 mm de diámetro, ASAE (1984). Los finos, por ser más pequeños que los granos enteros, ocupan parte de los espacios intersticiales y dificultan el paso del aire por la masa. Dicha dificultad determina la exigencia de mayores presiones estáticas para el ventilador y, en consecuencia, en la reducción de la masa de aire que éste proporciona. (Figura 1).

Humedad inicial del producto

El contenido de humedad inicial también influye en la tasa de secado. Cuanto más elevado sea el contenido de humedad de un producto, mayor será la cantidad de agua evaporada por unidad de energía. Con elevados contenidos de humedad, las fuerzas de adsorción de la estructura celular del material sobre las moléculas de agua, son menores que cuando el contenido de humedad del producto es más bajo. En consecuencia, se utiliza un mayor porcentaje de energía disponible para evaporar la humedad contenida en los granos más secos.

Flujo del producto dentro del secador

La velocidad con que el material pasa por el secador, denominada con mayor frecuencia flujo de masa o tiempo de residencia del producto en el secador, puede influir en la tasa de secado, la eficiencia del proceso y la calidad final del producto. Si el flujo de masa aumenta, el producto final será, en general, de mejor calidad. Por otra parte, hay un aumento del consumo de energía específica, esto es, de la energía que se necesita para evaporar una unidad de masa de agua y una disminución de la eficiencia térmica del secado, porque los granos que pasan por el secador con mayor velocidad pierden menos humedad y el secado puede resultar insuficiente. El manejo adecuado de la velocidad del producto tiene importancia fundamental en el secado.

Historia del producto

Se ha comprobado que las diferentes variedades de maíz se secan a tasas diferentes (KEENER y GLENN, 1978). Es muy probable que otros granos presenten un comportamiento parecido. Sobre la base de esa hipótesis se han realizado investigaciones para determinar las propiedades físicas de variedades de productos cultivados en diversos países. La obtención de valores de propiedades físicas distintas de las que aparecen en la literatura, podrá conducir a tasas de secado también diferentes. Para el maíz se intentó definir un "factor híbrido de secado" que tuviese en cuenta las características de secado de una partida. El factor híbrido se define como la relación entre la tasa de secado para una condición-patrón y la tasa de secado de una partida del producto para una condición cualquiera (BAKKERARKEMA et al. 1978).

Temperatura de secado y flujo del producto

La influencia de cada parámetro en el secado no se podrá establecer de manera aislada, pues el cambio de uno de ellos altera el comportamiento de los demás durante el proceso de secado. Esa interdependencia entre los parámetros hace que el dimensionamiento y la optimización de los secadores de granos se realice con cautela. Por otra parte, el conocimiento de dicha interdependencia permite desarrollar nuevas tecnologías de secado. Con fines ilustrativos se hacen a continuación algunos comentarios acerca de la influencia recíproca entre la temperatura

de secado y el flujo del producto en el secador.

Es universalmente aceptado que la temperatura de secado para semillas no debe subir de 40°C. Esta afirmación, por sí sola, es incompleta, pues el tiempo de exposición del producto al aire de secado es un elemento que hay que considerar. En el secado de soya, con empleo de un secador de flujos concurrentes, se observa que la temperatura del aire de secado y el flujo de granos son los dos factores de mayor influencia en la calidad del producto. En vista de eso, se sugiere usar el término tiempo de residencia del producto en el secador, para definir mejor las condiciones de secado. El tiempo de residencia puede aparecer expresamente como valor definido, o bien implícitamente, mencionando la altura de la cámara de secado y la velocidad del producto en el secador, o flujo de masa.

Como ejemplo, mencionaremos los resultados obtenidos en soya, con un secador de flujos concurrentes. En el ensayo se utilizó aire de secado a una temperatura de 121°C y flujo de masa de 21,7 kg/s. m², y se obtuvo un índice de germinación final de 62%. En otro ensayo se usó aire a 204°C y flujo de masa de 80 kg/s.m², y se obtuvo un porcentaje de germinación de 72%. En ambos casos, el contenido de humedad final fue de alrededor de 13% (DALPASQUALE, 1981). Si se analizan solamente la temperatura de secado y el porcentaje de germinación, los resultados serían opuestos a lo que se acepta comúnmente. En cambio, si se incluyen en el análisis el flujo de masa y, en consecuencia, el tiempo de residencia del producto en el secador, sería posible percibir que los granos están sujetos a la temperatura más elevada durante un tiempo más corto que el que pasan a 121 °C, lo que conduce a un mayor poder de germinación. Se puede afirmar, pues, que es posible secar semillas a altas temperaturas, una vez que se hayan definido correctamente los parámetros de secado y, de manera especial, la temperatura del aire de secado

y flujo del producto.

[Indice](#) - [◀Precedente](#) - [Siguiente▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

3. Clasificación de los secadores respecto al flujo del producto

[Indice](#) - [◀Precedente](#) - [Siguiente▶](#)

A. Secadores estacionarios

[Secador de lecho fijo o de capa estacionaria](#)

[Secador con aire movido por convección natural](#)

B. Secadores continuos

[Secadores en cascada o de canaletas](#)

[Secador de flujos cruzados](#)

[Secador de flujos paralelos](#)

[Secador de flujos contracorrientes](#)

C. Secadores intermitentes

Secado combinado

Seca-aireacion de granos

Los secadores de granos se pueden clasificar acuerdo con diversos criterios, tales como el flujo del producto en el secador y la temperatura de secado. La elección de uno de estos criterios depende del enfoque que se quiera dar al asunto. En el caso presente, los secadores se clasifican según el flujo del producto, como sigue:

a. estacionarios:

a. 1. secador de lecho fijo o de capa estacionaria

a.2. secador con aire movido por convección natural.

b. continuos:

b. 1. en cascada o de canaletas

b.2. de flujos cruzados

b.3. de flujos concurrentes

b.4. de flujos contrarios

c. intermitentes.

A. Secadores estacionarios

Secador de lecho fijo o de capa estacionaria

Los secadores de lecho fijo se componen de cuatro elementos principales que se observan en la Figura 2: sistema de calentamiento del aire, ventilador, cámara de distribución del aire o "plenum", y cámara de secado.

El sistema de calentamiento puede ser de cualquier tipo, siempre que esté dimensionado para aumentar la temperatura del aire hasta los límites recomendados para cada producto y que no haya contaminaciones de él por el aire que proviene de la fuente de calor. El ventilador, generalmente, es del tipo centrífugo, por la presión estática que se necesita en este sistema. La cámara de distribución de aire sirve para transformar la presión dinámica del aire en presión estática, uniformando la distribución del aire dentro del secador. La cámara de secado es un recipiente con fondo de plancha de metal perforado, capaz de soportar el peso del producto húmedo. El producto permanece estático en la cámara de secado, mientras que el calentado, impulsado mecánicamente por el ventilador, pasa a través de la capa de producto y reduce su contenido de humedad. Los secadores de capa fija, en la mayoría de los casos se proyectan para secar solamente una partida por día. Después del secado, el producto se enfría dentro del mismo secador, para lo cual se interrumpe el suministro de energía al sistema de calentamiento y se deja conectado el ventilador.

Las principales variables del sistema de secado de partidas en lecho estacionario son: espesor del lecho, contenido de humedad inicial, flujo de aire, temperatura del aire y tiempo de secado (BROOKER et al., 1974).

El espesor del lecho, generalmente, debe estar entre 0,4 a 0,6 m cuando se trata de granos. Los productos con alto contenido de humedad, como son los tubérculos cortados en formas apropiadas para el secado, no se deben colocar en capas de más de 0,4 m de espesor, por la dificultad para moverlos. Las capas finas, lo mismo que el movimiento manual o mecánico del producto, sirven para prevenir el secado excesivo cerca de la entrada de aire y disminuir las diferencias de temperatura y de humedad dentro de la partida.

[Figura 2. Esquema del secador de lecho fijo.](#)

Si el espesor del lecho fuera mayor que el la diferencia entre la humedad del producto junto a la plancha perforada y la del que está situado en la parte superior sería muy grande (más de cinco puntos porcentuales de humedad), y puede ocasionar serios riesgos al producto durante el almacenamiento, en especial si la bodega no tiene sistema de ventilación. Por tanto, para disminuir las diferencias de humedad, principalmente en lechos de mayor espesor y con temperaturas del aire más elevadas, es preciso revolver el producto a intervalos determinados.

La temperatura de secado afecta directamente la tasa de secado. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la tasa de evaporación y la irregularidad del contenido final de humedad, si el producto no se revuelve. Con el aumento de la temperatura, la cantidad de granos supersecos no varía mucho, pero la cantidad de granos con alto contenido de humedad es superior (BROOKER et al., 1974). El flujo de aire influye, principalmente, en la tasa de secado y en la distribución de la humedad, en relación con la profundidad de la capa de producto. Al aumentar el flujo de aire, aumenta la tasa de secado y disminuyen las irregularidades de humedad y temperatura en la capa de producto. El flujo de aire que normalmente se emplea en el secado de productos agrícolas en

lecho fijo varia de 0,12 a 0,25 m³/s.m². El tiempo de secado disminuye con el aumento del flujo de aire, pero la eficiencia del secado también disminuye; en condiciones fijas de temperatura, espesor del lecho y flujo de aire, depende también de la humedad inicial y final del producto. Cuanto mayor sea el contenido inicial de humedad o menor sea el contenido final de humedad, mayor será el tiempo de secado.

En el Cuadro 1 aparecen algunas recomendaciones en cuanto a temperaturas, espesores del lecho e intervalos de tiempo para revolver el producto, en el secado en lecho fijo.

Algunas ventajas del sistema de secado en capas fijas son: la capacidad del secador es variable; su dimensionamiento, construcción y funcionamiento son relativamente simples; la inversión es menor en relación con los secadores comerciales, principalmente porque se puede construir con materiales corrientes que se encuentran en las cercanías de las propiedades rurales; si la cámara de secado fuera un silo con fondo falso, al término de la cosecha puede servir también para almacenamiento (Figura 3).

Cuadro 1.Recomendaciones para el secado de productos agrícolas en lecho fijo

TEMPERATURA MAXIMA DEL AIRE EN CONTACTO CON EL PRODUCTO, DE ACUERDO CON SU USO FINAL

			Intervalo de tiempo para			
			Alimentación animal	Espesor de la capa de	revolver el producto(h)	
Productos	Semilla	Comercio			Semilla	Comercio

				producto (m)		
Maní con cascara	30	35	-	1,2- 1,8 ²	-	-
Arroz con cascara	40	45	-	0,25- 0,45 ²	2	2
Avena	40	60 ²	80	0,4-0,6 ²		
Café	-	-	-	0,4-0,5 ¹	-	2
Cebada	40	40	80	0,4-0,6 ²	-	-
Frijol a granel	40	45	-	0,4- 0,5	-	-
Frijol en rama	40	45	-	0,6- 1,0	-	2
Maíz desgranado	40	55 ²	80	0,4- 6 ²	-	2
Maíz en mazorca (sin cascara)	40	55 ²	80	1,5- 6 ²	-	2
Ralladura de yuca	-	50	60	0,3- 0,4	-	2
Soja	40	50	-	0,25- 0,45 ²	2	2
Sorgo	40	60 ²	-	0,4- 0,6 ²	-	-

Trigo	40	60 ²	80	0,4- 0,6 ²	-	-
-------	----	-----------------	----	-----------------------	---	---

¹ SILVA e LA CERDA (1984).

² HALL (1980).

Dimensiones del secador

La capacidad del secador se calcula normalmente para la producción máxima esperada. Al conocer la cantidad de producto que hay que secar diariamente, se dimensiona el secador que se necesita.

Las dimensiones óptimas de funcionamiento del secador de capa fija se pueden determinar, matemáticamente, mediante una simulación de secado, si se conocen los datos siguientes: tipo de producto y finalidad de su uso, contenidos de humedad inicial y final, y cantidad de producto que se va a secar. No obstante, en vista de la rotativa complejidad de dichos cálculos, se puede simplificar ese dimensionamiento si se conoce el valor de algunas variables del sistema. Así se consideran conocidos el espesor de la capa (véase el Cuadro 1) y el flujo de aire (0,12 a 0,25 m³/s. m²).

Luego, conociendo la masa de producto que se va a secar, por partida (mp), el peso específico global del producto (pp) y el espesor de la capa de producto (H), se calcula el área de la cámara de secado (A) con la ecuación:

$$A = \frac{m_p}{P_p^H} \text{ ec.1}$$

El flujo de aire de secado (Q) se puede calcular en función del flujo de aire (Qa), dado en m³/s . m, y del área de la cámara de secado:

$$Q = Q_a A \text{ ec.2}$$

La presión estática del ventilador se puede obtener sumando las pérdidas de carga del sistema. Estas pérdidas se producen por la disminución del aire al pasar por los conductos, ampliaciones, camas, válvulas y principalmente, al pasar a través de la capa de producto. Las pérdidas de carga referentes al sistema de distribución del aire se pueden calcular por mecánica de fluidos. Las pérdidas de carga en virtud del paso del aire entre los granos se puede obtener con ayuda del gráfico de la Figura 4, si se conoce el espesor de la capa de producto y el flujo de aire. Por ejemplo, considerando un flujo de aire igual a 0,17 m³/s m², para el arroz, se tiene una presión estática de 615,8 Pa/m. Así, si se conoce la presión estática del sistema y el flujo de aire necesario, se puede calcular la potencia útil que necesita el ventilador. Para calcular la potencia útil del ventilador se acostumbra aumentar el flujo de aire en cerca del 25%, por razones de seguridad.

Construcción del secador

El secador de capa fija se debe construir en lugar cubierto, para que pueda funcionar incluso en condiciones meteorológicas adversas y de noche. Hay que construirlo de tal modo que su manejo sea seguro, para evitar riesgos para el operador o perjuicios a la calidad del producto. Hay que

tener cuidado de prevenir incendios, tanto en el secador mismo como en las construcciones vecinas. Las partes móviles del motor y del ventilador deben estar protegidas del contacto con personas o animales. La temperatura del aire de secado se debe controlar mediante un termómetro colocado en la entrada de la cámara de distribución del aire, para evitar que este se recaliente.

NOTA: a) Estos valores rigen para producto sin compactar, limpio y seco. Congranos limpios, sin compactar, con alto contenido de humedad (en equilibrio con humedad relativa superior a 85%), se usa solo 30% de la pérdida de presión indicada para una tasa dada de flujo de aire. b) La compactación del grano en el silo puede causar 50% más de resistencia sobre los valores señalados. c) Cuando hay materias extrañas mezcladas con el grano, no hay recomendación específica para correcciones. La resistencia al flujo del aire aumenta si la materia extraña es de menor tamaño que el grano y disminuye si la materia extraña es mayor que el grano.

Figura 4. Resistencia de granos y semillas al paso del aire.

Se pueden emplear diversos materiales en la construcción de conductos y en las cámaras de secado y distribución del aire. Ya existen en el mercado silos metálicos apropiados para funcionar como cámara de secado, con la ventaja de que al final de la cosecha sirven como silos de almacenamiento. Los secadores hechos de madera también son viables, aunque acarrearán riesgos de incendio. En el Brasil parece que una de las opciones más interesantes, del punto de vista económico, es el secador construido de albañilería.

Cabe observar ciertas recomendaciones respecto de los siguientes componentes del sistema:

a) Cámara de secado y cámara de distribución de aire (Figura 5). La cámara de secado debe tener el piso de plancha metálica perforada, de modo que el área perforada sea por lo menos el 10% del área total, para evitar que haya altos valores de pérdida de carga. La cámara de secado puede ser rectangular o circular. El piso de forma rectangular debe tener una relación de 1,5 entre el lado mayor y el lado menor próximo. El piso de forma circular exige mayor cantidad de planchas para su construcción. Si la velocidad del aire que entra en la cámara de distribución es inferior a 1 m/s, la forma del piso deja de tener importancia para el buen desempeño. Para facilitar la mantención del piso de la cámara de secado y del "plenum", y evitar elevadas pérdidas de carga, se puede utilizar una cámara de distribución de aire con una altura de 0,5 m. Los agujeros de las planchas de metal perforadas deben ser tales que no permitan el paso del producto, teniendo en cuenta que interesa más una cantidad elevada de orificios pequeños que pocos orificios de mayor diámetro. La estructura para soportar las planchas de metal perforadas y la masa del producto pueden ser de distintos materiales, como albañilería y madera, fierros de construcción y perfiles metálicos. La cámara de secado deberá contar con aberturas laterales para la descarga manual o mecánica del producto y un sistema de boquilla para facilitar el ensacado, en caso necesario. La altura total del secador es de 1,2 m. aproximadamente, de los cuales 0,70 m. corresponden a la altura de la cámara de secado y 0,5 m. a la altura del "plenum". Para facilitar la limpieza de la cámara de distribución de aire del secador, se puede construir el piso de la cámara de secado de modo que una de las planchas perforadas se pueda retirar.

b) Elemento de transición entre la cámara de distribución del aire y el ventilador. El elemento de transición entre la cámara de distribución de aire del secador y el ventilador sirve para uniformar el flujo de aire en el secador. El ángulo de abertura del elemento de transición, en relación con el eje de simetría del secador, debe ser mayor que 15° para que la pérdida de

carga sea despreciable (Figura 6). Así, la longitud de la transición dependerá del ángulo y de la disponibilidad de espacio para la construcción del secador (SILVA y LACERDA FILHO, 1984). Los conductos de conexión del ventilador con el sistema de calentamiento deben tener dimensiones suficientes para que la velocidad del aire sea inferior a 5 m/s, es decir, 1 m² de área de la sección del conducto por cada 5 m³/s de aire.

Figura 5. Cámara de secado y cámara de distribución del aire en el secador de lecho fijo.

Funcionamiento y mantenimiento del secador de lecho fijo.

Para obtener buenos resultados con el uso del secador de capa fija, hay que observar las siguientes recomendaciones:

- a) las temperaturas y los espesores de la capa, para varios productos, aparecen en el Cuadro 1. La temperatura de secado depende del fin que se dará al producto;
- b) la superficie de la capa de producto se debe nivelar con un rastrillo de madera, después de cargado el secador, para evitar la irregularidad en el flujo de aire;
- c) se debe evitar al máximo la compactación del producto;
- d) se debe revolver el producto a intervalos predeterminados (Cuadro 1), para evitar la irregularidad en la humedad final del producto, principalmente con temperaturas superiores a 45°C. Para esto, el operador debe desconectar el ventilador y mover el producto con una pala o con rastrillo de madera;
- e) el término de la operación de secado depende de varios factores, tales como espesor de la capa, humedades inicial y final del producto, flujo de aire y temperatura de secado; el operador

deberían contar con equipos capaces de determinar el contenido de humedad final del producto. Si el producto está excesivamente seco, el productor perdería dinero al comercializar sobre la base del peso húmedo. Si el producto estuviera demasiado húmedo, quedaría expuesto a deterioro durante el almacenamiento;

f) al término del secado, se debe interrumpir el calentamiento del aire o abrir todas las entradas de aire frío en la fuente de calor, y dejar el ventilador conectado hasta que la masa de granos alcance una temperatura próxima a la del ambiente. En los secadores con horno de albañilería se debe interrumpir el abastecimiento de leña cuando el contenido medio de humedad del producto llegue a alrededor de uno a dos puntos por ciento de humedad por encima del valor recomendado para almacenarlo, manteniendo el ventilador conectado y haciendo pasar todo el aire por el horno. De este modo, se aprovecha la energía almacenada en las paredes de las tuberías y del horno para terminar el secado de producto, evitando los choques térmicos de enfriamiento; y

g) se debe limpiar el secador después de secar cada partida, retirando los residuos de productos agrícolas que queden sobre la plancha perforada.

[Figura 6. Angulo de abertura del elemento de transición, entre la cámara de distribución del aire y el ventilador del secador de lecho filo.](#)

Secador con aire movido por convección natural

El secado artificial es una alternativa que ha dado buenos resultados, pero, en países subdesarrollados o en desarrollo, el uso de secadores ha quedado limitado a las regiones de mayor desarrollo agrícola. El secado con aire natural o calentado, en muchos casos no se puede usar,

porque la relación inversión/producto es muy elevada, o incluso por falta de energía eléctrica para accionar el ventilador.

En la mayoría de los secadores el aire pasa por la masa de granos, forzado por medio de ventiladores. Sin embargo! hay secadores en los que el aire se mueve por acción de las diferencias de presión, producidas por la diferencia de temperatura y humedad, entre el aire de secado y el aire ambiente. Estos secadores se denominan secadores con movimiento del aire por convección natural y han tenido éxito en países de África y Asia; han beneficiado principalmente a los agricultores de bajas producciones, con poca capacidad técnica y sin capital para adquirir equipos de secado .

Los secadores con movimiento del aire por efecto de la convección natural se pueden construir con materiales característicos de la región y mano de obra poco especializada. Además, utilizan como combustible la leña o los subproductos de la propiedad rural, talas como la caña de maíz, corontas, paja y demás residuos agrícolas.

El primero de tales secadores de que se tiene noticia es el secador de tipo Samoa, que sirve para secar copra. En este secador se coloca la copra sobre un piso perforado, bajo el cual se quema leña para calentar el aire que pasa por la masa granular por convección natural. El inconveniente de este secador es la contaminación del producto por el humo, además de los daños causados al producto por el calor, pues aquí queda directamente encima del fuego. Entre 1961 y 1963, se hicieron modificaciones al secador Samoa y se le usó en el secado de almendras. Este secador pasó, entonces, a llamarse "Brook" o de Tipo T (Figura 8) (BROOK, 1964 ab).

[Figura 8. Esquema del secador con aire movido por convección natural \(BROOK, 1964 ab\).](#)

- A. Cámara de secado
- B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiados de calor
- E. Chimenea para el escape de gases de combustión
- F. Entrada de aire
- G. Base de sustentation del piso perforado
- H. Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1,5 mmx15 m.)
- I. Puerta de entrada de la cámara de combustión

Las principales adaptaciones que se realizaron fueron las siguientes: a) adaptación de un intercambiador de calor; b) aumento de la altura del piso perforado en rotación con el intercambiados, para obtener mayor uniformidad en la temperatura del aire de secado e Impedir el deterioro del producto por acción del calor; c) construcción de una chimenea para la eliminación de los gases de combustión; y d) construcción de las paredes del secador en adobe.

Otros investigadores propusieron la adaptación de intercambiadores de calor suplementarios, con el fin de aumentar la superficie de intercambio de calor, con lo que mejoraría la eficiencia térmica del secador (Figura 9).

[Figura 9. Esquema del secador con aire movido por convección natural \(BERNAL, 1982\).](#)

- A. Cámara de secado

- B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiados de calor
- D. Intercambiadores de calor adicionales
- E. Chimenea para el escape de gases de combustión
- G. Base de sustentación del piso perforado
- H. Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1,5 mmx15 m.)
- K. Cámara de distribución de los gases de combustión

Los parámetros que deben considerarse en la construcción de secadores del tipo Brook son:

- a) Dimensiones de b entrada de aire. La entrada de aire tiene un efecto significativo sobre el flujo de aire y hay que dimensionarla de manera que la velocidad del aire en ese punto sea inferior a 0,25 m/s;
- b) Espesor de b capa de graneada. El flujo de aire disminuye a medida que aumenta el espesor de la capa de granos;
- c) Distancia entre el intercambiador de calor y el piso perforado que sostiene el producto. El flujo de aire aumenta linealmente con el incremento de la distancia entre el intercambiador y el piso perforado, y con la diferencia entre la temperatura del aire de secado y la del aire ambiente (se recomienda una distancia mínima de 0,8 m. para evitar el sobrecalentamiento de producto);
- d) Superficie de intercambio de calor. El aumento de la superficie de intercambio de calor aumenta la eficiencia térmica del secador y reduce al mínimo la diferencia de temperatura del aire de secado bajo la capa de granos (BERNAL, 1982).

Los resultados de las investigaciones señalan que la colocación de una pirámide truncada sobre

la cámara de secado (Figura 10) mejora significativamente el desempeño del secador en cuestión, pero dificulta la operación de revolver el producto (BERNAL, 1982; ADEYMO, 1979).

La entrada de aire situada solamente en el frente del secador determina que la distancia que debe haber entre el piso perforado y el intercambiador de calor sea de un metro, por lo menos. Esto es para que exista una temperatura uniforme del aire de secado debajo de la capa de producto que se está secando.

Los secadores con aire movido por convección natural presentan problemas de uniformidad de temperatura y flujo de aire, principalmente por la posición de la entrada de aire en la parte frontal del secador (al lado del quemador). Además, su eficiencia térmica es baja, puesto que la mayor parte de la energía se elimina por las chimeneas, junto con los gases de combustión. En el Centro Nacional de Capacitación en Almacenamiento - CENTREINAR, se construyó una versión del secador de tipo Brook con innovaciones respecto de la entrada de aire ambiente a ser calentado en el quemador - intercambiador de calor (PEREIRA et al., 1985).

En la Figura 11 aparecen los esquemas de este secador.

[Figura 10. Esquema del secador con aire movido por convección natural \(BERNAL. 1982\).](#)

- A. Cámara de secado
- B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiados de calor
- D. Intercambiadores de calor adicionales

F. Entrada de aire

G. Base de sustentación del piso perforado

[Figura 11. Esquema del secador con aire movido por convección natural \(PEREIRA et al.. 1985\)](#)

A. Cámara de secado

B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado

C. Quemador intercambiados de calor

D. Intercambiadores de calor adicionales

E. Chimenea para el escape de gases de combustión

F. Entrada de aire

G. Base de sustentación del piso perforado

H. Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1,5 mm. x 1,5 m.)

I. Puerta de entrada de la cámara de combustión

J. Puerta de inspección de la cámara de uniformación

K. Cámara de distribución de los gases de combustión

L. Regulación de los gases de la combustión

En este modelo, el quemador-intercambiador de calor se construye con tambores de 0.87 m. de altura por 0,58 m. de diámetro (tambores de 200 litros), sin fondo ni tapa y unidos entre sí. El quemador-intercambiador de calor se fija en la pared anterior del secador y en una cámara de distribución de gases de combustión construida en la parte posterior del secador, donde están conectados los intercambiadores de calor adicionales.

Los intercambiadores de calor adicionales, construidos con tambores de 0,26 m. de diámetro por 0,35 m. de altura, también unidos entre sí, van desde la cámara de distribución hasta las chimeneas instaladas en la parte anterior del secador. Las chimeneas se construyen con tubos de barro de 0,10 m. de diámetro.

El quemador-intercambiador se debe instalar en posición inclinada, más alto en la parte posterior del secador, donde se fija en la cámara de distribución de los gases de combustión, para facilitar la eliminación de éstos. Lo mismo se debe hacer con los intercambiadores de calor adicionales, los cuales deben quedar más altos en su unión con las chimeneas. En el quemador se debe colocar una parrilla hecha de fierros de construcción de 1/4", entrelazados, para evitar el contacto directo entre el material que se quema y el tambor. Así, se aumenta la vida útil del tambor y se facilita la combustión.

En la entrada del quemador-intercambiador de calor se coloca una puerta con sistema de regulación, para cerrar parcialmente la entrada del quemador. El propósito de esto es evitar la salida de gases de combustión y también la acción del viento que aumenta la combustión y el consumo de leña. En cuanto a las dimensiones del secador (ancho y largo), sobre la base de los trabajos de investigación de ADEYEMO (1979); BERNAL (1982); BOLDUC (1978); BROOK (1964); PEREIRA et al. (1985), y RYU (1976), no se recomienda que dichas medidas sean superiores a 3 m. por falta de datos para el dimensionamiento.

Operación de secado

La primera etapa de funcionamiento del secador es la de colocar, sobre la base con la malla, una

capa de producto para secar. Se enciende el fuego sobre la parrilla, utilizando leña o cualquier otro residuo agrícola, y se mide con un termómetro de mercurio la elevación de temperatura del aire de secado, debajo de la base con la malla. El bulbo del termómetro se coloca en la masa de granos, de tal modo que quede próximo a la malla galvanizada que sostiene al producto. Bastan 20 minutos, aproximadamente, para que el aire se caliente a la temperatura de secado que se desea.

El tiempo de secado es función del tipo de producto, altura de la capa y temperatura del aire de secado. En el Cuadro 2 aparecen los resultados del secado de distintos productos, que figuran en la literatura científica.

[Fig.Resultado del secado en secador con movimiento de aire por convección natural](#)

Es preciso revolver el producto para que el secado sea uniforme, sin diferencias de humedad entre la parte inferior y la superior de la capa. Además, la acción de revolver el producto durante el secado mejora significativamente la tasa de secado. Cuanto mayor es la temperatura del aire de secado, más frecuente debe ser la operación de revolver la capa para evitar daños al producto que queda en contacto con la malla. La eficiencia térmica del secador aumenta si se seca el producto en partidas sucesivas.

B. Secadores continuos

Secadores en cascada o de canaletas

Los secadores en cascada se componen de una serie de canaletas invertidas, en forma de V, dispuestas en filas alternadas o cruzadas dentro del cuerpo del secador, con intervalos de 0,30 m., aproximadamente. Los granos bajan por acción de la gravedad y caen sobre las canaletas invertidas. El aire de secado entra por una fila de canaletas y sale por las otras inmediatamente adyacentes (superior e inferior). De este modo, al bajar por el secador, los granos se mueven tanto en el mismo sentido que el aire, como en sentido contrario. En la Figura 12 aparece un esquema de distribución de canaletas alternadas, en secadores de tipo cascada, y en la Figura 13 hay un esquema de secador de canaletas cruzadas.

Los secadores en cascada, se cuentan entre los primeros modelos de secadores continuos que se usan comercialmente. En los países desarrollados se les ha ido reemplazando paulatinamente, por su elevado costo inicial, problemas de contaminación y problemas de manejo.

El principal inconveniente de los secadores en cascada es el elevado costo inicial; la cantidad de material que se necesita para confeccionar las canaletas es el factor que más contribuye a elevar los costos. (Figuras 14 y 15).

Los secadores en cascada se consideran contaminantes de ambiente por la velocidad relativamente alta que tiene el aire a la salida de los ductos. En consecuencia, las impurezas más livianas que se encuentran en la masa de granos son arrastradas al exterior del secador. En los países desarrollados, las leyes más rigurosas en ese campo han obligado a los fabricantes a instalar filtros a la salida del aire de estos secadores, en cumplimiento de las normas de control de la

contaminación ambiental.

[Figura 12. Esquema de distribución de canaletas paralelas en secadores de tipo cascada.](#)

[Figura 13. Esquema de distribución de canaletas en un secador de canaletas cruzadas \(KREYGER 1972\).](#)

Los secadores en cascada utilizan flujos de aire menores que los que se emplean en otros tipos de secadores continuos. Los flujos de aire más elevados determinan velocidades altas del aire a la salida de los ductos, superiores a la velocidad final de la mayoría de los granos. Por esto, muchos granos pueden verse arrastrados por el aire de escape, con la consiguiente pérdida del producto. El uso de flujos de aire más bajos hace que el secador de este tipo sea energéticamente eficiente, pero de capacidad limitada para el secado.

Los secadores en cascada exigen ciertos cuidados en cuanto al flujo del producto. Cuando pasan por el secador granos limpios con relativa rapidez, se obtiene un secado parejo, pero si los granos llevan impurezas se dificulta su flujo. En tales casos (comunes en las unidades almacenadoras), el secado será disparejo. Del mismo modo, cuando se reduce el flujo del producto por el secador para secar granos más húmedos en una sala pasada, es corriente obtener un secado disparejo. Se estima que ésta es la base para limitar la reducción del contenido de humedad de un producto en 5,0 puntos por ciento en cada pasada por el secador (HAWK et al., 1978).

[Indice](#) - [◀Precedente](#) - [Siguiente▶](#)

Secador de flujos cruzados

[Indice](#) - [◀Precedente](#) - [Siguiente▶](#)

El secador de flujos cruzados es el que más se usa en el mundo, gracias a su popularidad en los Estados Unidos. Dicha popularidad se deriva de los principios simples de su construcción y funcionamiento, Junto con el costo Inicial más moderado, en comparación con otros tipos de secadores (Figura 16).

Los secadores de flujos cruzados se caracterizan por el paso del aire perpendicular a una capa de granos, que se mueven entre planchas perforadas. Esos secadores pueden tener diversas configuraciones y la forma comercial más común es el secador de tipo torre, fijo a una fundación permanente (Figura 17).

La torre puede ser circular, con la capa de granos rodeando el quemador y el ventilador, o bien rectangular, con columnas de granos en dos o en los cuatro costados. En la Figura 18 se presentan esquemas de estos tipos de secadores.

[Figura 18. Esquemas de secadores de flujos cruzados de tipo torre.](#)

El secador del tipo de torre rectangular también puede presentar varias columnas dispuestas unas al lado de otras. En la Figura 19 se presenta otro esquema de secador de flujos cruzados, Junto con

el tipo de torre rectangular de varias columnas.

Figura 19. Esquema de secadores de flujos cruzados.

Algunos secadores de flujos cruzados son de construcción horizontal, con las columnas de granos colocadas a los dos lados de la cámara de distribución de aire. Se les puede usar como secadores de partidas, de etapas múltiples, o como secadores continuos. Los secadores de flujos cruzados horizontales se pueden montar unos sobre otros, cuando se quiere secar una mayor cantidad de granos. Los módulos pueden funcionar a la misma temperatura o a temperaturas diferentes. Algunos módulos intermedios pueden servir de zonas de reposo, para lo cual basta con desconectar la fuente de movimiento del aire. El módulo de base se usa, generalmente, como enfriador. Se ve un esquema de este tipo de secador, en la Figura 20.

Figura 20. Esquema de un secador de flujos cruzados de construcción horizontal de varias etapas.

En el secador de flujos cruzados convencional, aire y granos se mueven en direcciones perpendiculares. Los granos próximos a la entrada de aire tienden a resecarse y recalentarse; los que quedan cerca de la salida, en la columna, tienden a quedar húmedos. La diferencia de humedad a través de una columna de 0,30 m. puede alcanzar puntos porcentuales de humedad elevados, dependiendo de los parámetros de secado.

La optimización de desempeño de un secador de flujos cruzados se puede obtener mediante el manejo adecuado de los parámetros del secador: altura, profundidad y espesor o ancho de la columna, flujo de masa, temperatura y velocidad del aire (BAUER et al., 1978). La profundidad del

secador influye solamente en su capacidad total, siempre que haya simetría, en esa dimensión, en cuanto a la temperatura y humedad de los granos. La altura de la columna y el flujo del producto determinan el tiempo de residencia de los granos dentro del secador. Así, en el proceso de optimización del secador de flujos cruzados hay cuatro parámetros principales que investigar: espesor de la columna, tiempo de residencia, flujo de aire y temperatura de secado.

Se han hecho algunas tentativas de reducir las diferencias de temperatura y humedad, pero sin influir significativamente en la capacidad y eficiencia del secador. Se investigaron, inicialmente, los efectos de invertir el sentido del flujo de aire en la mitad de la zona de secado. Aun cuando este cambio en el secador convencional dio como resultado una leve disminución en la eficiencia y capacidad del secador, se observó una reducción del 60 a 75 por ciento en la diferencia de humedad a través de la columna (CONVERSE, 1972; LEREW, et al., 1982; PAULSEN y THOMPSON, 1973; MOREY y CLOUD, 1973).

La recirculación de parte del aire del escape es un adelanto en los secadores de flujos cruzados. Generalmente se recircula cerca del 50 por ciento del aire total, en el secado de maíz. Por recirculación se entiende la reutilización total o parcial del aire de escape en el secado, pasando o no por una fuente de calentamiento. En los secadores que funcionan con esta técnica, el aire saturado proveniente de la primera etapa de secado sale al ambiente. El aire que sale de las etapas siguientes de secado se mezcla con el aire que pasa por la zona de enfriamiento y se dirige a la fuente de calentamiento, para usarse nuevamente. En la Figura 21 se presenta un esquema de secador de flujos cruzados modificado, con inversión del flujo de aire y recirculación de parte del aire de escape. El principal beneficio de la recirculación de una parte del aire está en el aumento de la eficiencia térmica del secado. Así, pues, se ha observado en un secador modificado, una

reducción del 50 por ciento en el consumo de energía por unidad de agua evaporada (LEREW et al., 1972). Otras Investigaciones señalaron una economía del orden de 30 a 42 por ciento, cuando recircula cerca del 50 por ciento del aire de escape (BAKKERARKEMA et al., 1972 y 1979; BAUER et al., 1977).

Figura 21. Diagrama de un secador de flujos cruzados con inversión y recirculación de aire (BROOKER et al., 1977).

La inversión de sentido del flujo de aire no es posible en ciertos secadores de flujos cruzados, porque las columnas de granos están situadas alrededor de la fuente de calor. En tales secadores se hace uso de un dispositivo que alterna la posición de los granos respecto del aire de secado; los granos más húmedos pasan hacia el interior del secador y los más secos pasan a la parte externa. En la Figura 22 se presente un esquema de este dispositivo.

Figura 22. Esquema del dispositivo para alternar la posición de los granos en las columnas de los secadores de flujos cruzados.

La utilización de zonas de reposo es recomendable en los secadores de flujos cruzados. En esas etapas, la humedad se redistribuye al interior de los granos, lo que facilita su evaporación en la etapa de secado siguiente. Con la introducción de zonas de reposo en un secador de flujos cruzados para secar soya, de 20,5 a 12,1%, se previene una reducción de alrededor de 40 por ciento en el consumo de energía específica (DALPASQUAL E, 1981). Aun así, los efectos del uso de zonas de descanso en los secadores de flujos cruzados no se conocen del todo, por lo que deberán ser objeto de investigaciones futuras. Un esquema de secador de flujos cruzados, con inversión del

sentido del flujo de aire de escape y etapas de descanso, aparece en la Figura 23.

[Figura 23. Diagrama de un secador de flujos cruzados con inversión y recirculación de parte del aire de secado y con zonas de descanso \(DALPASQUALE, 1981\).](#)

Secador de flujos paralelos

El secado de granos en flujos paralelos es una técnica que apareció en el comercio en los años setenta, aunque sus principios se conocían desde los años cincuenta. La introducción en el mercado de los secadores de flujos paralelos se retrasó a causa del bajo costo de la energía en la época de su desarrollo, además de la disponibilidad de secadores de construcción más barata. Con el advenimiento de la crisis energética mundial, a partir de 1973 la demanda de secadores de flujos paralelos aumentó notablemente en los países desarrollados. La razón de su popularidad es la elevada eficiencia energética característica de dichos secadores. En un secador de flujos paralelos, aire y granos fluyen en la misma dirección. Hay altas tasas de evaporación en la parte superior de la capa de granos, donde el aire caliente se encuentra con los granos más húmedos. Los intercambios intensos y simultáneos de energía y masa a la entrada de aire o de granos, causan un rápido descenso de la temperatura inicial del aire de secado, así como en el contenido de humedad de los granos. Por este motivo, la temperatura del producto permanece muy por debajo de la temperatura inicial del aire de secado. Dichas temperaturas alcanzan valores muy próximos, a medida que el aire y el producto se mueven hacia abajo por el secador. En consecuencia, el potencial de secado disminuye, en virtud de la reducción de temperatura del aire y del aumento de su humedad relativa, con el consiguiente aumento de la humedad de equilibrio del producto. En la Figura 24 se ve un esquema de un secador de flujos paralelos.

En el secador de flujos paralelos todos los granos se someten al mismo tratamiento de secado. En consecuencia, no hay diferencia de humedad entre los granos, como sucede con los secadores de flujos cruzados. La reducci3n continua de la temperatura del aire, hasta la parte inferior de la c3mara de secado, alivia la tensi3n impuesta a los granos durante el secado y disminuye la tendencia a los da3os mec3nicos durante el transporte posterior.

El secador b3sico de flujos paralelos se compone solamente de una secci3n de secado y una secci3n de enfriamiento en flujos contrarios. Los modelos de una sola etapa, que tienen una secci3n de secado 3nicamente, son de capacidad limitada, si se trata de eliminar m3s de ocho puntos de humedad. En tales casos, los secadores paralelos de una etapa someten al producto a un tratamiento de secado relativamente severo, por las bajas velocidades del producto dentro del secador.

[Figura 24. Esquema de secador de flujos paralelos.](#)

Se han construido secadores de flujos paralelos de dos y tres etapas. El aumento en el n3mero de etapas permite el uso de temperaturas m3s elevadas del aire de secado, adem3s de subir la velocidad del producto dentro del secador. Otra caracter3stica importante de este tipo de secador es la presencia de etapas de reposo, colocadas entre dos c3maras sucesivas de secado. En estas etapas de reposo, la humedad se redistribuye al interior de los granos calentados y la tensi3n t3rmica disminuye a3n m3s. Algunos estudios de simulaci3n matem3tica del secado senalaron la conveniencia de agregar una zona de descanso entre la 3ltima c3mara de secado y la de enfriamiento, para acrecentar la evaporaci3n de humedad en esta 3ltima c3mara. Para no elevar demasiado la altura del secador, se propuso reducir la altura de las zonas de reposo entre c3maras

de secado, en favor de la etapa de reposo instalada antes del enfriamiento. Queda en claro también que, si se trata de secadores de etapas múltiples, los granos se deben someter a períodos de reposo más prolongados, a medida que pasan por las sucesivas cámaras de secado, lo que indica la necesidad de contar con zonas de descanso de diferentes alturas en el secador de flujos paralelos y etapas múltiples (DALPASQUALE, 1981; QUEIROZ, 1984). En la Figura 25 se puede ver un esquema de un secador de flujos paralelos de tres etapas.

Figura 25. Esquema de secador de flujos paralelos de tres etapas, con enfriador en flujos contrarios.

Se ha observado que el uso de secadores de flujos paralelos y etapas múltiples aumenta la capacidad de secado del sistema, además de propiciar la obtención de un producto final de mejor calidad (BAKKER-ARKEMA et al., 1977). En los secadores de dos y tres etapas se observan las siguientes ventajas respecto de los de una sola etapa: a) mayor capacidad de secado; b) mejor calidad del producto final; c) mayor flexibilidad de adaptación a diferentes productos; y d) mayor eficiencia (WESTELAKEN y BAKKER-ARKEMA, 1978; MUHLBAUER et al., 1978).

Se usó varios productos para probar los secadores de flujos paralelos. Los estudios sobre secado de maíz con alto contenido de humedad, en secador de flujos paralelos, se demostró que el aire de secado a 220 °C no afectó significativamente el valor nutritivo del maíz. Se supone que a temperaturas superiores se podrá evitar el daño térmico con el uso de una proporción adecuada entre los flujos de granos y los de aire (MUHLBAUER et al., 1971). En experiencias realizadas con trigo se llegaron a resultados parecidos (AHMADNIA, 1977; BAKKER-ARKEMA et al., 1977).

Se secaron semillas de soya en modelos de secador de flujos paralelos, de una sola etapa y de etapas múltiples. En ninguno de los casos se observaron alteraciones significativas en la extracción y calidad del aceite, ni en el poder germinativa de las semillas, (KALCHIK, 1977; DALPASQUALE, 1979).

Secador de flujos contracorrientes

Los principios del secado en flujos contracorrientes se emplean en la industria para dimensionar los enfriadores de los secadores de flujos contrarios.

El enfriador de flujos contracorrientes se usa en los secadores paralelos, porque el método evita los choques térmicos indeseables en los granos, puesto que la diferencia de temperatura entre el aire y el producto permanece prácticamente constante en toda la cámara de enfriamiento.

El secado en silos se puede considerar secado en flujos contrarios, cuando se utiliza un tornillo sin fin que gira lentamente sobre el fondo perforado y retira los granos parcialmente secos, los que pasan a otro silo. La zona de secado permanece prácticamente estacionaria y próxima a la entrada del aire de secado en la masa de granos. El enfriamiento posterior de los granos se efectúa en otro silo, donde se termina el secado. En la Figura 26 hay un esquema de dicho sistema de secado.

[Figura 26. Secado en flujos contrarios, en silos.](#)

El secado de granos en silos provistos de este tipo de mecanismo representa un adelanto en relación con el secado de partidas en silos y presenta las siguientes características:

- a) no hay pérdida de energía en el secado de granos con humedad inferior a la deseada, puesto que no se permite que el producto llegue a la humedad de equilibrio;
- b) los granos están sujetos a temperaturas elevadas mientras pierden humedad a una tasa razonable. Con esto se evita que el producto alcance la temperatura del aire de secado. Comparado con el sistema de secado en partidas, en silos, el tiempo de exposición de los granos a las condiciones del aire de secado es menor; y
- c) como el producto no se reseca, los daños mecánicos debidos al transporte posterior se reducen.

Dicho sistema de secado en flujos contrarios presenta ciertos problemas, entre ellos la carga adicional que deben soportar las paredes del silo debido a los equipos que mueven los granos.

C. Secadores intermitentes

Los secadores continuos ya descritos se pueden usar como secadores intermitentes. Para ello, basta que el producto, al salir del secador, vuelva a entrar a él, ya que estos secadores no retiran la humedad deseada del producto en una sola pasada y exigen que aquí pase más de una vez por el secador.

Hay secadores hechos para el secado intermitente, los cuales poseen en su parte superior una cámara de reposo para los granos. En estos secadores, los granos permanecen en la cámara de reposo cerca de 90% del tiempo total y solamente el 10% en contacto con el aire de secado. El

propósito de la permanencia más prolongada en la cámara de reposo es que haya redistribución de humedad en los granos, lo que facilita el secado posterior. Al mismo tiempo, debido al breve periodo en que los granos quedan expuestos al aire de secado, la eliminación de humedad de los granos en cada pasada por la cámara de secado es pequeña y exige un elevado número de pasadas. En la Figura 27 aparece el esquema de un secador intermitente de flujos cruzados.

El uso de secadores en canal es muy común en países de América Latina; muchas veces se les ocupa como secadores intermitentes y sencillamente se hace pasar el producto varias veces por el secador. Es imponente destacar que, en tales casos, la capacidad nominal del secador disminuye proporcionalmente con el número de pasadas del producto por el secador y es preciso tenerlo presente al dimensionar sistemas de secado/almacenamiento que emplean dicha técnica.

Ciertos productos agrícolas no soportan el secado continuo hasta alcanzar el contenido de humedad final que se busca, sin sufrir considerables daños físicos y fisiológicos. Es el caso de las semillas en general, del arroz y de los productos que se cosechan con humedad muy elevada. Estos productos se deben secar de manera intermitente.

[Figura 27. Esquema de un secador intermitente de flujos cruzados.](#)

Quando el producto no está destinado a semilla, con excepción del arroz, la temperatura del aire de secado intermitente es la misma que se usa en los procesos continuos.

El secado intermitente no se realiza solamente en secadores adaptados para ello, pues los

secadores de etapas múltiples también ocupan esa técnica. Estos últimos se componen de diversas cámaras de secado intercaladas con cámaras de reposo. i-De este modo, los granos entran al secador húmedos y salen secos, en una única pasada, con lo que el secador funciona en flujo continuo. El producto, en cambio, se somete a secado en cada cámara y el secado es, por tanto, intermitente.

El uso de equipos de etapas múltiples para efectuar el secado intermitente es ventajoso, en relación con el de recirculación del producto en secadores que no tienen zonas de descanso, porque en los primeros es posible usar diferentes temperaturas y flujos de aire en cada cámara de secado, con lo que se optimiza el uso del secador.

Secado combinado

El secado combinado es una técnica que consiste en utilizar un sistema de secado a altas temperaturas cuando el producto presenta un contenido de humedad más elevado, sobre 16-18%, y a partir de ese punto, completar el secado con un sistema de secado a bajas temperaturas.

La eficiencia térmica de secado de los secadores de altas temperaturas aumenta significativamente cuando ellos forman parte de sistemas de secado combinado. Los motivos principales para ese aumento de eficiencia son los siguientes:

a) los secadores funcionan con productos en una faja de humedad en que la evaporación de agua

es más fácil; y

b) los enfriadores, en general no se usan, porque los granos normalmente deben llegar al sistema de secado a bajas temperaturas mientras están todavía calientes. Muchas veces los enfriadores se convierten en zonas de secado, lo que aumenta la capacidad de los secadores a altas temperaturas.

Hace falta explorar mejor los sistema de secado combinado, especialmente a nivel de granja.

Seca-aireación de granos

La seca-aireación de granos es un proceso en el cual el producto se seca, mediante un secador a altas temperaturas, hasta un contenido de humedad superior, en uno a tres puntos porcentuales, al contenido ideal para almacenarlo, sin someterse a enfriamiento mientras pasa por el secador. Luego, el producto pasa a un silo, donde permanece en reposo por un lapso de cuatro a seis horas y posteriormente se enfría, con el sistema de aireación del propio silo, que se debe proyectar para cumplir esa etapa en un período de 12 a 16 horas (Figura 28).

El proceso de seca-aireación presenta tres ventajas en relación al proceso de secado a altas temperaturas, con enfriamiento en el propio secador: a) reducción del consumo de energía; b) producto final de mejor calidad; y c) aumento de la capacidad de secado del secador.

Durante el proceso de secado a altas temperaturas se desarrolla al interior de los granos una

diferencia en el contenido de humedad y la parte interna permanece más húmeda que la parte superficial. Durante el período de reposo, en el proceso de seca-aireación, el contenido de humedad al interior del grano se empareja y permite que se retire entre uno y tres puntos porcentuales de humedad durante el periodo de enfriamiento. Cuando el enfriamiento se efectúa en el mismo secador, no se consigue retirar la misma cantidad de humedad, porque el enfriamiento se efectúa inmediatamente después del secado, en un lapso muy corto, sin aprovechar la energía almacenada en el grano en forma de calor sensible. Por ello el consumo de energía es menor cuando se emplea el proceso de seca-aireación

Las tensiones internas que se desarrollan en el grano al final del proceso de secado a altas temperaturas y con enfriamiento rápido, se reducen al mínimo en el proceso de seca-aireación. Así, los granos están menos sujetos a fracturas y daños durante las operaciones posteriores al secado.

En el proceso de seca-aireación, el flujo de granos en el secador puede aumentar, ya que la cantidad de humedad que se ha de eliminar es menor. El aumento del flujo de granos permite utilizar temperaturas más elevadas en el aire de secado, en virtud del menor tiempo de residencia del producto en el secador. Con el aumento de temperatura, el aire gana más capacidad de secado, lo que permite aumentar aun más el flujo de granos. En esa forma, el secador pasa a tener mayor capacidad de secado y su eficiencia energética aumenta, debido a la elevación de la temperatura de secado. Se consiguen, generalmente, economías de 20 a 40% de energía y aumentos de la capacidad de secado entre 50 y 75%. El aumento real de la capacidad del secador y la economía de energía dependen del contenido de humedad inicial, de las condiciones climáticas del lugar y de la característica de la unidad almacenadora donde está instalado el

sistema.

Enfriamiento. la operaci^on de enfriamiento debe iniciarse cuatro a seis horas despu^es de que la primera partida de granos entre en el silo. Incluso, una vez iniciado el enfriamiento, se puede seguir agregando producto hasta completar la capacidad del silo, porque el sentido del movimiento de aire es de abajo hacia arriba. En tal caso, el ventilador escogido debe permitir que el producto quede en el silo por lo menos cuatro horas, sin someterlo a enfriamiento.

Si se trata de instalar sistemas de seca-aireaci^on en que el secador es de baja capacidad de secado, generalmente se deben destinar dos silos al enfriamiento. Cada silo debe tener capacidad para recibir todo el grano secado en un día, de modo que, mientras un silo se carga, el producto del otro se puede estar enfriando o descargando. En aquellas unidades de almacenamiento que poseen un secador de gran capacidad, es preciso emplear m^os de dos silos para enfriar el producto, para que la potencia de los ventiladores no sea demasiado elevada.

Equipos empleados en el proceso de seca-aireaci^on. En la instalaci^on de un sistema de seca-aireaci^on, es importante realizar un proyecto que incorpore todos los beneficios que el sistema puede proporcionar.

Los silos de enfriamiento deben tener capacidad compatible con la capacidad del secador. Cuando se usa un secador en un sistema de secaa^on, su capacidad de secado aumenta en 50 a 75%. Hay que considerar tambi^en la posibilidad de ampli^on futura del sistema, recordando que un silo sobredimensionado en un momento determinado no es problema, puesto que al final de la cosecha los silos de enfriamiento normalmente se transforman en silos de almacenamiento.

El ventilador se debe proyectar para que suministre la cantidad de aire necesaria para enfriar el producto durante el tiempo previsto. Si se tiene solo dos silos de enfriamiento, de modo que cada día el producto secado se destina a uno de ellos, es ideal que el ventilador entregue un flujo de aire suficiente para que el frente de enfriamiento se desplace dentro del silo, en la misma proporción en que este último se va cargando. De este modo, todo el producto permanecerá en reposo dentro del silo por un periodo de cuatro a seis horas. En tal situación, la cantidad mínima de aire recomendada es de 13 m³/min. por cada tonelada de capacidad horaria del secador empleado.

Si se ocupa la seca-aireación cuando la capacidad de secado del secador es elevada, el silo se repleta en corto tiempo. En tales condiciones, la cantidad de aire recomendada para el enfriamiento es de 0,5 a 1 m³/min. por tonelada de capacidad del silo.

Además de entregar la cantidad ideal de aire, el ventilador debe hacer que el aire venza todas las resistencias que el sistema impone a su paso. Es importante considerar la resistencia que impone la masa de granos y el sistema de distribución de aire.

La distribución del aire en los silos de enfriamiento se realiza normalmente mediante conductos de superficie perforada. La ubicación de estos conductos debe ser tal que el enfriamiento alcance a toda la masa de granos. Las velocidades ideales del aire en sistemas de aireación aparecen en NAVARRO y CALDERON (1984) (Figuras 29 y 30).

El sentido del movimiento del aire, en el enfriamiento del producto dentro del silo, debe ser de abajo hacia arriba, puesto que el enfriamiento normalmente comienza cuando el silo todavía no

se termina de cargar. Con este procedimiento, la primera partida de granos que entra en el silo será la primera en enfriarse. Así, el aire caliente y húmedo que sale del frente de enfriamiento no entra en contacto con el producto ya enfriado, lo que podría provocar condensación de la humedad y un nuevo calentamiento de los granos.

El proceso de seca-aireación exige un sistema eficiente de transporte de granos, puesto que el producto debe pasar por correas transportadoras más veces que en el proceso de secado con enfriamiento en el propio secador. Las principales operaciones de transporte en un sistema de seca-aireación son tres: a) carga del secador con producto húmedo; b) traslado del producto caliente del secador al silo de enfriamiento; y c) traslado del producto enfriado al sistema de almacenamiento.

Los determinadores de humedad que normalmente se emplean en las unidades de almacenamiento son los de método indirecto, es decir, que la determinación se hace correlacionando, generalmente, alguna propiedad eléctrica, con el contenido de humedad existente en el producto. Este tipo de aparato no entrega, generalmente, resultados satisfactorios en la determinación de la humedad del producto caliente que sale del secador. En vista de eso, es necesario establecer un factor de corrección para los valores que señala el determinador.

El secador de granos debe ofrecer dos opciones de uso: la operación tradicional y la operación en sistema de seca-aireación.

En la tradicional, el producto se seca y se enfría en el mismo secador. En la de seca-aireación, al producto se retira caliente del secador. Para esto, lo ideal es que el secador permita transformar la

sección de enfriamiento en sección de secado; el ello no fuera posible, sencillamente se debe suspender la entrada de aire por la sección de enfriamiento.

[Indice](#) - [◀Precedente](#) - [Siguiente▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

4. Calentamiento del aire

[Indice](#) - [◀Precedente](#) - [Siguiente▶](#)

Fuentes de energia

Combustibles

[Combustibles sólidos](#)

[Leña](#)

[Residuos agrícolas.](#)

[Combustibles líquidas](#)

[Combustibles gaseosos](#)

Combustion

[Cálculo del aire necesario para la combustión](#)

Exceso de aire

Control de la combustión

Hornos

Hornos para combustibles sólidos

Hornos para combustibles en polvo

La dificultad económica para adquirir derivados del petróleo con fines energéticos hizo que muchos países vieran a concentrar esfuerzos en el uso más intensivo de las fuentes renovables de energía, tales como la leña, los residuos agrícolas y la energía solar. Por ejemplo, la prohibición de usar derivados del petróleo para el secado de granos, decretada en el Brasil en 1981, obligó a la utilización de leña y de residuos agrícolas por parte de las empresas almacenadoras estatales y privadas.

En el secado de granos, el método más empleado es el de temperaturas elevadas. Con este método, el consumo de energía puede ser, en ciertos casos, superior al 60% del total de la energía consumida en la producción y tratamiento del grano.

Las exigencias actuales son, por tanto, de optimización del uso de las fuentes energéticas convencionales y, al mismo tiempo, de fomentar la elaboración de estudios en el uso de fuentes de energía renovables.

El estudio de la viabilidad del uso de la energía solar, e incluso el aprovechamiento de la biomasa para el calentamiento del aire, no ha recibido la atención debida. En la gran mayoría de los

casos, las investigaciones en este campo han llegado a soluciones tecnológicas adaptadas a las situaciones que se presentan en los países más desarrollados, ubicados en regiones en clima templado. En el Brasil, por ejemplo, las cuestiones relativas a posibles alteraciones del modelo energético global comenzaron a intensificarse a partir de fines de los años 70.

Fuentes de energía

El calentamiento del aire destinado al secado de productos agrícolas tiene como principales fuentes de energía:

- a) los combustibles, tales como la leña, los residuos agrícolas y los derivados del petróleo;
- b) la energía eléctrica, por medio de resistencias eléctricas; y c) la captación de energía solar.

Combustibles

Las sustancias que se pueden quemar, liberando calor, se llaman combustibles. La principal característica combustible es su poder calorífico. El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía que se produce en la combustión completa de una unidad de masa o de volumen. El poder calorífico depende de las características químicas del combustible y se clasifica como superior (Hs) e inferior (Hi). El poder calorífico superior tiene en cuenta el calor que proviene de la condensación del vapor de agua presente en los productos de combustión; el poder calorífico inferior no tiene en cuenta ese calor.

Por el hecho de que el agua está contenida en los productos de combustión en estado de vapor,

se usa generalmente el poder calorífico inferior, al que también se conoce como líquido o práctico. En el Cuadro 3 aparecen los valores de algunos combustibles.

Combustibles sólidos

Entre los principales combustibles sólidos se cuentan la leña, los residuos agrícolas, el carbón mineral y el carbón vegetal.

Leña.

La leña presenta una gran diversidad de características fisicoquímicas que es preciso estudiar, según la aplicación que se desee darle. El contenido de humedad, la composición química y el poder calorífico de la leña son aspectos que hay que conocer para la construcción y el funcionamiento de los hornos.

El contenido de humedad de la leña recién cortada varía entre el 40 y el 50%; luego de estar expuesta a la intemperie, en época no lluviosa, la humedad promedio de la leña baja aproximadamente al 25% (PENEDO, 1981).

La composición química porcentual de la leña aparece en el Cuadro 4. Se observa que el contenido de azufre de la leña es insignificante, lo que disminuye el riesgo de contaminación con este combustible. El Cuadro 5 presenta la composición aproximada de la leña. El elevado contenido de materias volátiles influye en la temperatura mínima exigida para la combustión completa. El contenido de ceniza de la corteza de la leña es mayor que en el interior del tronco y se sitúa alrededor del 3,0%. La temperatura de fusión de las cenizas es relativamente alta, es

decir de 1300 a 1500°C, y normalmente no constituye un factor limitante en el proceso de combustión, en vista de que las temperaturas necesarias son más bajas.

El poder calorífico de la leña (Hi) varía en función de la clase de leña utilizada (Cuadro 6) y del contenido de humedad de la leña (Cuadro 7).

Cuadro 3. Poder calorífico Inferior (Hi) de algunos combustibles por metro cúbico en condiciones normales de temperatura y presión

Combustión	Hi		Fuente
	kJ/kg	kJ/m ³	
Alcohol etílico	24388		(1)
Bagazo de caña	9200 a 13800		(2)
Biogás		17086	(3)
Caña de maíz			(1)
20 % de humedad	13400		(1)
Carbón mineral			
- antracita	21673 a 32312		(4)
- lignito	14666 a 19322		(4)
Carbón vegetal	27450		(5)

Cascaras de arroz	16218		(6)
Cascaras de babaçu	16720		(2)
Gas de oxígeno		5200	(7)
Gas natural		29313 a 70641	(4)
Gasolina	44000		(4)
GLP		49000 a 50150	(8)
Leña 20% de humedad 50% de humedad	15412		(9)
	8715		(9)
Petroleo diesel	47725		(1)
Querosén	43091		(4)
Olote (coronta) de maíz			
- 20% de humedad	15195		(1)
- 30% de humedad	13348		(1)

Fuente: (1) CLAAR II et al. (1981)

(2) DECOURT (1977)

(3) CETEC (1981)

- (4) MARK'S (1978)
- (5) JUVILLAR (1980)
- (6) PITAKARNNOP (1983)
- (7) GOSS et al. (1983)
- (8) ASHRAE (1985)
- (9) SIQUEIRA (1981)

Cuadro 4. Composición química porcentual de la leña en función del contenido de humedad, en porcentaje, en peso

Compuesto químico	Contenido de humedad (% b.h.)		
	0	20	40
Carbono	50,30	40,24	30,18
Hidrógeno	6,20	4,96	3,72
Oxígeno	43,08	34,46	25,85
Nitrógeno	0,04	0,03	0,02
Azufre	0,00	0,00	0,00
Cenizas	0,37	0,31	0,23

|| Total || 100,00 || 100,00 || 100,00 ||

Fuente: DINIZ (1981)

Cuadro 5. Analisis aproximado de la lena, en porcentaje, base seca

Materiales volátiles	80,0
Carbón fino	19,5
Cenizas	0,5

Fuente: MITRE (1982)

Cuadro 6. Poder calorífico inferior de la leña seca

Especie	Hi (KJ/Kg)	Fuente
Eucalipto	19228	(1)
Pino	20482	(1)
Cedro	18066	(2)
Ciprés	21443	(2)
Encino	19500	(2)
Media	19744	(2)

Fuente:

(1) MITRE (1982)

(2) DINIZ (1981)

Cuadro 7. Poder calorífico inferior de la lena* en función del contenido de humedad

Contenido de humedad	Hi (KJ/Kg)
0	19880
10	17644
20	15412
30	13180
40	10947
50	8715
60	6483

Fuente: DINIZ (1981)

***No se distingue la especie de lena.**

Una de las preocupaciones de los consumidores de lena es el abastecimiento seguro. El uso

exclusivo de leña procedente de las reservas naturales, sin tomar medidas para su racionalización, podrá provocar la escasez del producto. Una alternativa es la reforestación y otra el uso de reservas nativas de manera autosostenida. Una tercera opción sería la de mejorar el aprovechamiento de los residuos agrícolas, tanto los de la explotación de bosques como los de la actividad agropecuaria.

Residuos agrícolas.

El potencial energético de los residuos agrícolas es elevado. A título de ejemplo, se estima que el 12% de los residuos de la producción de arroz bastaría para el secado de este producto. Al mismo tiempo, el uso de residuos agrícolas con fines energéticos depende de la disponibilidad de dicho insumo a un costo económicamente viable y de la adaptación de los sistemas de calentamiento de aire al tipo de residuo utilizado, o de la adaptación del insumo energético utilizado a los sistemas de calentamiento existentes.

La fabricación de briquetas de combustibles en polvo se ocupa para el aprovechamiento de los hornos apropiados para leña. Para ello, se recurre al método de aglutinar este material en bloques prensados susceptibles de ser quemados (DECOURT, 1977).

Las briquetas se pueden fabricar con un aglutinante distinto del material combustible o, en caso necesario, mediante su propio poder aglutinante. Por ejemplo, la lignina, componente de la cáscara del arroz, se funde a temperaturas elevadas y se puede usar como aglutinante. Las sustancias aglutinantes deben cumplir los requisitos de bajo costo, bajo contenido de cenizas y alto poder calorífico. Se han utilizado como aglutinantes, entre otros, la goma de fécula de mandioca,

los residuos de matadero, la brea y el alquitrón vegetal.

Las briquetas de carbón están en uso hace largo tiempo y su estudio data de varios decenios atrás. Las briquetas de residuos agrícolas vienen mereciendo mayor atención debido a la crisis energética mundial.

Combustibles líquidas

El petróleo es una sustancia oleaginosa constituida por una mezcla de compuestos orgánicos (hidrocarburos). El petróleo crudo no tiene utilización práctica, pero luego de su destilación se obtienen subproductos tales como la gasolina, el querosén, el petróleo diesel y el petróleo combustible, los cuales, pese a ser combustibles excelentes, en algunos países no son de uso general en el secado de granos, por su elevado costo.

El petróleo de esquisto se asemeja al petróleo y se obtiene de ciertas rocas petrolíferas llamadas esquistos. El alcohol etílico es una sustancia que se obtiene por la destilación del caldo fermentado de varias materias primas, principalmente caña de azúcar, mandioca y betarraga, etc. Es un producto renovable, al contrario del petróleo y los esquistos.

Combustibles gaseosos

Los combustibles gaseosos se obtienen de la mezcla de gases. Entre ellos, se cuentan el gas licuado de petróleo (GLP) y el gas natural. Por ser subproductos del petróleo, en varios de los países en desarrollo el uso de estos combustibles en el secado de productos agrícolas está bastante limitado por razones económicas.

El biogás derivado de la fermentación de residuos orgánicos no está indicado para el secado de granos, porque el biodigestor tendría que ser de dimensiones muy grandes para atender la demanda energética en el proceso de secado.

El gas de gaségeno es un gas pobre, producto de la combustión incompleta de combustibles y sendos, tales como el carbón vegetal y la leña. El gas resultante contiene monóxido de carbono e hidrógeno como sustancias combustibles. Este gas se puede usar como combustible para mover motores estacionarios, los cuales impulsan ventiladores. No obstante, es preciso estudiar la viabilidad técnica y económica del uso del gas de gaségeno con este fin. El aire que sirve para refrigerar el motor y el que se emplea para enfriar el gaségeno se pueden usar en el secado de granos (Figura 31), lo que aumenta la eficiencia del procedimiento.

[Figura 31. Esquema del uso del gaségeno para mover un motor estacionario y calentar el aire para secar granos.](#)

Combustion

La combustión es el conjunto de reacciones químicas exotérmicas en las que interviene el oxígeno, produciendo energía aprovechable, luego de que el combustible se calienta hasta la temperatura de ignición. En el Cuadro 8 aparecen las temperaturas de ignición de algunos combustibles, al nivel del mar.

La temperatura de ignición es aquella a la cual la energía que se genera en la reacción es superior a la energía que se pierde en el ambiente, lo cual permite mantener la combustión. La

temperatura de ignición depende de la presión ambiental, del comburente (aire u oxígeno puro) y del combustible que se emplee.

Cuadro 8. Temperaturas de ignición al nivel del mar

Combustible	Temperatura (°C)
Carbon mineral	
-antracita	500
-lignita	250-450
Carbon vegetal	240-400
Coque	700
Etano	470-630
Gas de gasógeno	700-800
Gasolina	266-427
GLP	500
Madera (seca)	300
Metano	640-750
Monóxido de carbono	655

Fuente: DINIZ (1981)

Calculo del aire necesario para la combusti3n

Para calcular la cantidad te3rica de aire necesario para la combusti3n m_{at} , hay que conocer las proporciones de carbono x_C , hidr3geno x_{H_2} , oxigeno x_{O_2} y azufre x_S presentes en el combustible, y la masa especifica del aire ρ_a , de acuerdo con la ecuaci3n:

$$m_{at} = \frac{1,37931}{\rho_a} \cdot \left(\frac{x_C}{12} + \frac{x_{H_2}}{4} + \frac{x_S}{32} - \frac{x_{O_2}}{32} \right) \quad \text{ec.3}$$

La masa especifica del aire se calcula sobre la base del volumen especifico v_e y la raz3n de humedad W , seg3n la ecuaci3n:

$$\rho_a = \frac{1+W}{v_e} \quad \text{ec.4}$$

A titulo de ilustraci3n se propone el siguiente ejercicio:

Qu3 cantidad te3rica de aire se necesita para la combusti3n de le3a, suponiendo que su humedad es del 20% Y que el aire de combusti3n tiene una raz3n de humedad $W = 0,20$ kg/kg y el volumen especifico $V_e = 0,87$ m /kg ?

Los valores de x_C , x_{H_2} y x_{O_2} se pueden obtener en el Cuadro 3. Entonces, por la ecuación 4:

$$\rho_a = \frac{1+0,020}{0,87}$$

$$\rho_a = 1,17 \text{ kg} / \text{m}^3$$

y por la ecuación 3:

$$m_{at} = \frac{1,3731}{1,17} \cdot \left(\frac{40,24}{12} + \frac{4,91}{4} - \frac{34,46}{32} \right)$$

$$m_{at} = 4,15 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Exceso de aire

El exceso de aire, n , en la combustión, significa que la cantidad de aire es mayor que el que se necesita para la combustión completa. El exceso de aire en la combustión sirve para asegurar la mezcla perfecta e íntima del combustible con el aire, debido al breve lapso en que ambos permanecen juntos. La cantidad de aire en exceso depende básicamente del tipo de combustible.

Los combustibles sólidos son los que más exigen exceso de aire, esto es, del 30 al 60% más que

la cantidad calculada para la combustión. Los combustibles líquidos exigen un exceso del 10 al 30% y los gaseosos, del 5 al 20%. El exceso de aire, n , se puede expresar en función de la cantidad de aire calculada, m' y de la cantidad real de aire, m , de manera que:

$$n = 100 \cdot \left(\frac{m}{m_{at}} - 1 \right) \quad \text{ec.5}$$

Para la leña con 20% de humedad y con un 50% de exceso de aire, resulta que la cantidad de aire necesario para la combustión sería de:

$$m_{at} = 1,50 \times 4,15$$

$$m_{at} = 6,23 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Control de la combustión

El control de la combustión se debe efectuar mediante el análisis de la variación en el contenido de CO_2 de los gases de combustión, el cual varía según el exceso de aire que se utiliza en la combustión. Por eso, cuando se necesita vigilar el exceso de aire en un proceso de combustión, se analiza el contenido de CO_2 presente en los gases de combustión. El Cuadro 9 ilustra la variación en el contenido de CO_2 en los gases de combustión, de acuerdo con el exceso de aire empleado. El contenido de CO_2 se puede medir con analizadores del tipo ORSAT.

Hornos

El horno es el lugar donde se quema el combustible, es decir, donde la energía química potencial del combustible se transforma en energía térmica. En el horno se quema el combustible en contacto con cierta cantidad recomendada de aire en exceso; puede haber una pequeña pérdida de energía al ambiente. La energía liberada se incorpora a los gases antes de salir del horno y todos los compuestos volátiles se deben quemar antes de salir de éste.

Cuadro 9. Variación del contenido de gas carbónico, CO₂, en los gases de combustión con diferentes proporciones de exceso de aire, n

n (%)	CO ₂ (%)
0	20,0
10	18,4
20	16,8
30	15,5
40	14,4
50	13,4
60	12,6
70	11,8
80	11,2

90	10,6
100	10,1

Fuente: DINIZ (1981)

El tamaño y la forma del horno dependen del tipo de combustible, del dispositivo que se use para quemarlo y de la cantidad de energía que se debe liberar en un lapso determinado.

El volumen del horno depende de la tasa de liberación de energía. Dicha tasa en función del tipo de horno, de la longitud y temperatura de la llama, del exceso de aire y de la turbulencia. En general, la tasa de liberación de energía varía entre 120 y 580 kW/m² (100.000 a 500.000 kcal/h m²).

En cuanto a la naturaleza de los combustibles, los hornos se clasifican en:

- hornos para combustible sólido;
- hornos para combustible sólido pulverizado;
- hornos para combustible líquido; y
- hornos para combustible gaseoso.

El primer tipo se analizará con más detalle en este trabajo, en vista del potencial de su empleo en el secado de granos.

Hornos para combustibles sólidos

-Horno de fuego directo

La quema de leña en troncos ofrece dificultades de contacto íntimo entre el aire y el combustible, pues la combustión es un fenómeno de superficie. Esta deficiencia se puede obviar aumentando la turbulencia y trozando la leña, con lo cual se eleva el costo operativo.

La Figura 32 es un esquema de un tipo de horno adecuado para quemar leña trozada. En los hornos de carga manual las parrillas no deben tener más de 2 m. de largo. Deben estar dotadas de una puerta de carga por cada metro de ancho, para facilitar la carga de leña.

Dimensiones

El primer paso para calcular las dimensiones de los hornos para combustibles sólidos consiste en calcular la potencia N necesaria para calentar el aire, la cual es función de la cantidad de aire que hay que calentar, Q , de la masa específica del aire P_a , del incremento de temperatura buscado ΔT , del calor específico del aire, c_p , y del rendimiento térmico estimado del horno, η , de acuerdo con la ecuación 6:

$$N = \frac{P_a Q c_p \Delta T}{\eta} \quad \text{ec.6}$$

También se puede estimar la potencia N mediante datos obtenidos del gráfico psicrométrico. Si

se conoce el punto de estado Inicial del aire, antes de calentarlo, y el Incremento de temperatura buscado, se puede determinar en el gráfico psicrométrico la entalpia inicial del aire, h_i , la entalpia final, h_f , y el volumen especifica del aire, V_e , en las condiciones iniciales. Así, se puede calcular la potencia por medio de la expresión siguiente:

$$N = \frac{Q(h_f - h_i)}{V_e \eta} \quad \text{ec.7}$$

y la masa de combustible m_c en kg h^{-1} que se ha de consumir será:

$$m_c = 3600N/H_i \quad \text{ec.8}$$

Figura 32. Horno de leña, del tipo de fuego directo.

A continuación, se mostrará un método empírico que consiste en calcular la superficie de la parrilla y el volumen del horno.

El cálculo de la superficie de la parrilla del horno se puede hacer en función de la tasa de combustión. La tasa de combustión S_c , que es el valor de la cantidad de combustible que se va a quemar por unidad de área de la parrilla, es variable entre los diversos tipos de combustibles y se expresa en kg/hm^2 . Si se trata de leña, paja, bagazo de caña, quemados en horno con parrilla plana, con carga manual y aire forzado, la tasa de combustión varía entre 150 y 300 kg/h m^2 . Si

se trata de carbón, quemado en horno con parrilla plana, con carga manual y aire forzado, la tasa de combustión varía entre 200 y 300 kg/h m². Por tanto, la tasa de combustión es un valor estimado. Luego de haber estimado la tasa de combustión, se calcula la superficie de la parrilla S, sobre la base de la masa de combustible que se ha de consumir m_c, mediante la expresión:

$$S = \frac{m_c}{S_c} \text{ ec.9}$$

La razón entre la superficie libre de la parrilla y la superficie total fluctúa entre 0,2 y 0,5, si se trata de parrilla con carga manual, y entre 0,1 y 0,3, si se trata de parrilla con carga mecánica.

El cálculo del volumen útil del horno V_F depende de la potencia necesaria para calentar el aire N, y de la tasa de liberación de energía K, que varía entre 175 y 233 kW/m², en el caso de leñas, pajas, bagazo de caña y carbón. Se tiene, entonces:

$$V_F = \frac{N}{K} \text{ ec.10}$$

El volumen calculado de un horno corresponde a la zona de combustión. En hornos para combustibles sólidos hay normalmente dos zonas de combustión, esto es, el lugar de carga del combustible y el lugar de combustión de las materias volátiles.

Como ejemplo, se calcula el área de la parrilla y el volumen de un horno para leña, con carga

manual y parrilla plana, sabiendo que:

$$Q = 4,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$c_p = 1,0 \text{ kJ/kg} \cdot \text{C}$$

$$\Delta T = 60 \text{ C} \quad T = 20 \text{ C}$$

$$\eta = 0,70 \quad W = 0,012 \text{ kg/kg}$$

$$h_i = 13.500 \text{ kJ/kg}$$

$$V_e = 0,845 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Por la ecuación 4, la masa específica del aire es:

$$\rho_a = (1 + 0,012) / 0,845 = 1,198 \text{ kg/m}^3$$

Por la ecuación 6, la potencia necesaria para calentar el aire es:

$$N = \frac{1,198 \times 4 \times 1 \times 60}{0,7} = 1,198 \text{ kg/m}^3$$

La masa de combustible que se ha de consumir será:

$$m_c = 410,7 \times 3600 / 13.500 = 109,5 \text{ kg.de lena/hora}$$

El área de la parrilla se podrá calcular mediante la ecuación 9, suponiendo que $N_c = 250 \text{ kg/h m}^2$:

$$S = 109,5/250 = 0,44 \text{ m}^2$$

El volumen útil del horno se puede calcular por medio de la ecuación 10, suponiendo que $K = 200 \text{ kW/m}^3$:

$$V_F = 410,7/200 = 2,05 \text{ m}^3$$

Hornos para combustibles en polvo

Los hornos para combustibles en polvo, como por ejemplo la cascara de arroz y la cascara de café, presentan una mayor velocidad de reacción, debido a la reducción de tamaño de las partículas.

En estos hornos el combustible pulverizado se quema en suspensión, con menor cantidad de aire en exceso (15 a 20%), lo que permite una mayor temperatura de la llama. El tipo más simple de estos hornos es el de parrilla inclinada (Figura 33), con alimentación por eje giratorio con ranuras. La rotación del eje y el tamaño de las ranuras se deben calcular de acuerdo con la cantidad de combustible que se ha de quemar (véase el cálculo del horno para combustibles sólidos).

La tasa de liberación de energía de esos hornos varía entre $420 \text{ y } 840 \text{ kW/m}^3$ ($100.000 \text{ a } 200.000 \text{ kcal/h/m}^3$), lo que corresponde, aproximadamente, a un consumo de combustible de 15 a 25

kg/h/m².**Figura 33. Horno para combustibles en polvo.**[Indice](#) - [◀Precedente](#) - [Siguiente▶](#)[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">**5. Lista de símbolos**[Indice](#) - [◀Precedente](#) - [Siguiente▶](#)

c_p	entalpia especifica del aire	(kJ/kg ^o C)
h_i	entalpia inicial	(kJ/kg)
H_j	poder calorífico inferior	(kJ/kg)
h_f	entalpia final	(kJ/kg)
H_s	poder calorífico superior	(kJ/kg ³)
k	tasa de liberación de calor	(kJ/m)
m	cantidad real de aire necesario para la	(m ³ /kg ¹)

	combustión	
m_{at}	cantidad teórica de aire necesario para la combustión	(m^3/kg)
m_c	consumo de combustible que se ha de quemar	(kg/h)
n	exceso de aire	(decimal)
N	potencia necesaria para calentar el aire	(kW)
Q	cantidad de aire que se ha de calentar	(m^3/s)
S	superficie total de la parrilla	(m^2)
S_c	tasa de combustión	(kg/h m^2)
T	temperatura ambiente	($^{\circ}C$)
v_e	volumen específico del aire	(m^3/kJ)
V_F	volumen útil del horno	(m^3)
x_c	proporción de carbono en el combustible, en peso	(%)
X_{H2}	proporción de hidrógeno en el combustible, en peso	(%)

X_{O_2}	proporción de oxígeno en el combustible, en peso	(%)
X_s	proporción de azufre en el combustible, en peso	(%)
W	razón de mezcla del aire	(kg H ₂ O/kg aire seco)
ΔT	incremento de temperatura	(°C)
ρ_a	masa específica del aire	(kg/m ³)
η	rendimiento	(decimal)

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

6. Referencias bibliográficas

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

Secado de granos a altas temperaturas

1. ADEYMO, T.L *Development of a natural convection dryer for use in developing countries.*

Manhattan, Kansas State University, 1979.68 p. (M.S. Thesis).

- 2. AHMADNIA, A. *The quality of soft wheat dried in a concurrent dryer.* East Lansing, Michigan State University, 1977 (Relatorio Especial).**
- 3. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Resistance of airflow through grains, seeds, and perforated metal sheets. in: AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK OF STANDARDS. St. Joseph, 1983-1984. Manual, St. Joseph, ASAE, 1983-1984. ASAE D272.1. pp. 302-306.**
- 4. BAKKER-ARKEMA, F.W.; BROOK, R.C.; BROOKER, D.B. *Energy and capacity performance evaluation of grain dryers.* St. Joseph, ASAE, 1978. (Trabajo no. 78-3523).**
- 5. BAKKER-ARKEMA, F.W.; BROOKER, D.B.; HALL, C.W. *Comparison evaluation of crossflow and concurrentflow grain dryers.* St. Joseph, ASAE, 1972. (Trabajo no. 72-849).**
- 6. BAKKER-ARKEMA, F.W.; FOSDICK, S.; NAYLOR, J.L. *Testing of commercial crossflow grain dryers.* St. Joseph, ASAE, 1979. (trabalho no. 79-3521).**
- 7. BAKKER-ARKEMA, F.W.; SOKHANSANJ, A.A.; GREEN, R. *High temperatura wheat drying.* St. Joseph, ASAE, 1977 (Trabajo no. 77-3572).**
- 8. BAUER, W.W.; WALTER, L.P.; BAKKER-ARKEMA, F.W. *Testing of a commercial sized conventional crossflow and modified crossflow grain dryers.* St. Joseph, ASAE, 1977. (trabalho no. 77-3014).**
- 9. BERNAL, H.R.G. *Construcao e avaliaao de um secador de graos com ar movimentado por***

convecao natural. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 59 p. (Tese M.S.).

10. BOLDUC, F. *Development of a natural convection dryer for on farm use in developing countries*. Manhattan, Kansas State University, 1978.99 p. (M.S. Thesis).

11. BROOK, J.A. A cheap crop dryer for the farmer. *Trop. Stored Prod. Inst.*, (7): 257-68, 1964a.

12. BROOK, J.A. A cheap crop dryer for the farmer: results and recomendad design. *Trop. StoredProd. Inst.*, (8): 301-7, 1964b.

13. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. *Drying cereal grains*. Westport, AVI, 1974. 265 p.

14. CONVERSE, J.O. *A commercial crossflow grain dryer: the Hart-Carter dryer*. St. Joseph, ASAE, 1972 (Trabajo no. 72-828).

15. DALPASQUALE, V.A. *Continous-flow drying of soybeans*. East Lansing, Michigan State University, 1979.108 p. (M.S. Thesis).

16. DALPASQUALE, V.A. *Drying of soybeans in continous-flow and dixed-bed drying systems*. East Lansing, Michigan State University, 1981,154 p. (M.S. Thesis).

17. HALL, C.W. *Drying and storage of agricultural crops*. Westport, AVI, 1980.381 PP

18. HAWK, A.L.; NOYES, R.T.; WESTELAKEN, C.M.; FOSTER, G.H.; BAKKERARKEMA, F.W. *The present*

status of commercial grain drying. St. Joseph, ASAE, 1978 (Trabajo no. 78-3008).

19. KALCHIK, S.V. *Drying soybeans in a pilot scale concurrent flow dryer.* East Lansing, Michigan State University, 1977. (M.S. Thesis).

20. KEENER, H.M. & GLENN, T.L. *Measuring performance of grain drying systems.* St. Joseph, ASAE, 1978. (Trabajo no. 78-3521).

21. LEREW, L.E.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; BROOKER, R.C. *Simulation of a commercial crossflow dryer - the Hart-Carter modal.* St. Joseph, ASAE, 1972. (Trabajo no. 72-829).

22. LINDBLAND, C. & DRUBEN, L. *Almacenamiento del grano.* Mexico, 13 D.F., Editorial Concepto S.A., 1979. 332 p.

23. MCKENZIE, B.A.; FOSTER, G.H.; NOYES, R.T.; THOMPSON, R.A. *Dryeration-Better Corn Quality With High Speed Drying. Cooperative Extension Service, Bulletin AE-72, Purdue University, Lafayette, Indiana, 1972.*

24. MOREY, R.V. & CLOUD, H.A. *Simulation and evaluation of a multiple column crossflow dryer. Transactions of the ASAE, 16(5):984-7, 1973.*

25. MOREY, R.V.; GUSTAFSON, R.J.; CLOUD, H.A.; WALTER, K.L. *Energy conservation in grain (corn) drying with combination high-temperature, low-temperature methods. U.S. Department of Energy, Division of Industrial Energy Conservation, Final Report, 1978.*

26. MUHLBAUER, W.; KUPPINGER, H.; ISMCS, G.W. *Design and operating conditions of single stege concurrent flow and two-stege concurrent-counter flow grain dryers*. St. Joseph, ASAE, 1978. (Apendice B2).
27. MUHLBAUER, W.; SCHEUERMANN, A.; BLUMEL. *Drying of corn in a concurrentflow dryer at high air temperatures*. *Grundlagen Landtechnik*, 21(1): 1-5,1971.
28. PAULSEN, M.R. & THOMPSON, T.L. Effects of reversing the airflow in a crossflow grain dryer. *Transactions of the ASAE*, 16(3): 541-5,1970.
29. PEREIRA, J.A.M.; QUEIROZ, D.M.; RIBEIRO, A.L. Secador de granos com aire movimentado por conveccion natural. *Post-cosecha*, Vicosa-MC, no. 5, marzoljunio, 1985.
30. QUEIROZ, D.M. *Simulacao de Secagem de Milho (Zea mays L.) em secadores de fluxos concorrentes*. Vicosa, Universidade Federal de Viccosa, 1 984. 69 p. (Tese M.S.).
31. RIU, K.H. Factors effecting drying performance of a natural convection dryer for developing countries. Manhattan, Kansas State University, std. 88 p. (M.S. Thesis).
32. SHEDD, C.K. *Resistence of grains and seeds to airflow*. *Agr. Eng.*, 34: 616-9, 1953.
33. SILVA, J.S.; LACERDA FILHO, A.F. Construcao de secador pare produtos agricolas. Vicosa-MG, Universidade Federal de Vicosa. *Informe Tecnico*, 5(41): 17,1984.
34. WESTELAKEN, C. M. & BAKKER-ARKEEMA, F.W. *Concurrent-flow grain drying*. St. Joseph, ASAE,

1978. (Trabajo no. 78-0712).

Calentamiento del aire

- 1. ALMEIDA NETO, J.T.P. Equipamentos. CENTREINAR. (Mimeografado). 45 p. 1980.**
- 2. ANDRADE, E.B. Combustiveis e Fornalhas. CENTREINAR. (Mimeografado). Vicoso-MG. 78 p.1982.**
- 3. ANDRADE, E.B.; SASSERON, J.L.; OLIVEIRA FILHO, D. Principios sobre Combustiveis, Combustao e Fornalhas. (Mimeografado). p. 32, 1984. Vicoso-MG, CENTREINAR.**
- 4. ASHRAE HANDBOOK- FUNDAMENTAL, USA, 1985.**
- 5. CLAR II, P.W.; BUCHELE, W.F.; MARLEY, S.J. Crop. Residue Fired Furnace for Drying Grain, ASAE, St. Joseph, Michigan, USA, pp. 450.1981.**
- 6. CLAR II, P.W.; COLVIN, T.S.; MARLEY, S.J. Economic and Energy Analysis of Potential Corn Residue Harvesting Systems. *Agricultural Energy*, ASAE, pp. 273279. 1981.**
- 7. DECOURT, R.R. Combustiveis e edificios. *Manual de Engenheiro*. Globo Editora, Porto Alegre (RS) 3 (2) pp. 179-237. 1977.**
- 8. DINIZ, V.Y. Caldeiras a Lenha. En: *Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal*. CTEC Belo Horizonte, pp.116-131.1981.**

9. **FUNDAC, AO CENTRO TECNOLOGICO DE MINAS GERAIS - CETEC - Manual para Construcao e Operaao de Biodigestores, Belo Horizonte. p.37.1981.**
10. **FUNDAO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA FIBGE. Anuário Estatístico do Brasil. p. 795.1981.**
11. **GONZALES, M. Combustiveis e Fornalhas. CIENTEC, Porto Alegre (RS). (Notas de Aulas). p. 20. 1980.**
12. **GOSS, J.R. Producer Gas: Another Fuel for MotorTransport National Academy. Washington, E.U.A. 101 p.19-3.**
13. **JUVILLAR, J.B. Tecnologias de Transformao da Madeira em Carvao. *Uso da Madeira para Fins Energticos*. Fundao Centro Tecnolgico de Minas Gerais - CETEC, SPT-001 pp. 67-82.**
14. **KREITH, F. Principios de Transmissao de Calor. Ed. Edgard Blucher, Sao Paulo (SP). p. 550.1977.**
15. **LASSERAN, J.C. Combustiveis e Geradores de Ar O quente. *Revista Brasileira de Armazenamento*. CENTREINAR. Viosa - Minas Gerais, 4 (2), pp. 75-88. 1977.**
16. **LIMA, L.R. Elementos de Engenharia Qu(mica. Sao Paulo (SP) Mc Graw Hill do Brasil, pp. 55-142. 1978.**
17. **MAGALHAES, J.G.R. Tecnologia na Obtenao de Madeira, Uso da Madeira para Fins Energticos. Fundao Centro Tecnolgico de Minas Gerais (CETEC). Belo Horizonte (MG). pp.**

55-66.1980.

18. **MANUAL DO ENGENHEIRO**. Editora Globo, Porto Alegre (RS), 7 (2) pp. 581-624.1979.

19. **MARK'S**. Standard Handbook for Mechanical Engineers McGrawill.8a ed.1978.

20. **MARTINS, H.** Madeira como Fonte de Energia. *Uso da Madeira para Fins Energéticos*. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. SPT-001. pp. 10-26.1980.

21. **MITRE, M.N.** Caldeiras para a Queima de Madeira e Bagagem. En: *Produção e Utilização de Carvão Vegetal*, CETEC - Belo Horizonte, pp. 319-348.1982.

22. **PENEDO, W.R.** Madeira, Carvão e Gás. En: *Uso da Madeira para Fins Energéticos*. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, pp. 113-142. Belo Horizonte, MG,1980.

23. **PITAKARNNOP, N.** Production and Evaluation of Rice Husk Briguettes in Thailand. In: *Agricultural Wastes and Solar Technologies For Energy Needs in Farms*. FAO, Bangkok Thailand, pp.120-128.1983.

24. **RENAUD, G.** Cylindres et Chambres à Poussière, Journées Techniques, pp. 9-18.1979.

25. **RIBEIRO, M.A.** 8 **OLIVEIRA FILHO, D.** Florestas Sociais. Problemas, Perspectivas e Tarefas. *Fundação João Pinheiro*. Belo Horizonte (MG), 10 (1). pp. 2-18.1980.

26. **SILVA, J.S.** Adaptação da Forno de Fogo Direto Descendente, UFV III, pás secagem de

Cereais. Universidade Federal de Viçosa. *Informe Técnico*, no. 28. p. 8. 1982.

27. SIQUEIRA, B.A. Gasogenio para Motores. En: *Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal*. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, pp. 103112. Belo Horizonte, MG, 1981.

[Índice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/">

7. Sistema internacional de Unidades (SI)

[Índice](#) - [◀ Precedente](#)

Unidades Básicas	
Longitud	- metros (m)
Masa	- Kilogramos (Kg)
Tiempo	- segundos (s)
Temperatura	- grados (K) (temperatura termodinámica)
Unidades Derivadas	
Fuerza	- newton (N)

Trabajo, energía calórica Poder	- Joule (J) - watt (W)
Presión	- Pascal (Pa)
Unidades de Conversión (los valores exactos están en negras)	
Longitud	
1,0 m	= 100 cm = 1000 mm
	= 1,094 yardas = 39,37 pulgadas
	= 3,2808 pies
1 Pie	= 0,3048 m
1 Pulgada	= 2,54 cm = 25,4 mm
Area	
1m ²	= 10,76pies ² = 1550,15pulgadas ²
1 pie ²	= 0,09290304 m ²
1 Pulgada ²	= 6,4516 cm ² = 645,16 mm ²
Volumen	
1m ³	= 1.000 litros,
1 Pie ³	= 0,0283168 m ³ = 28,3168 litros
1 U.S. bushel (bu)	= 0,035239 m ³ = 1,244 pies ³

1 British bushel	= 1,032 U.S. bushel
Masa	
1,0 kg	= 1.000 g = 2,2048 lb
1 lb	= 0,45359237 kg
1 metric	= 1 tonelada (Terminologia (SI)
1 tonelada corta	= 20 U.S. cwt(hundredweight)
	= 2.000 lb = 907,18474 kg = 0,90719 toneladas
1 tonelada larga	= 20 British cwt (hundredweight)
	= 2.240 lb = 1016,046908 kg
	= 1,01605 toneladas
1 cwt (U.S.)	= 100 lb
1 cwt	= 112lb
Temperatura	
°C	= °K - 273,15
°K	= °C + 273,15
°C	= (°F-32)/1,8
	= (1,8x°C) + 32

Terminico, Poder, Calor, Energh	
1 J	= 0,239 cal
1 cal	= 4,1888J
1 thermo -chemical cal	= 4,184 J
1 Kj/Kg	= 0,23884 Kcat/kg = 0,4299 Btu/lb
1 Btu	= 1,0551 KJ = 0,2520 Kcal
1 Kcal	= 3,9683 Btu
1 Kcal/kg	= 1,8 Btu/lb
1 Kcal/kg 0c	= 4,1868 Kj/kg 0c = 1 Btu/lb \diamond F
1 KW hr	= 3.600 KJ
1 W	= 1 J/s
	= 0,0569 Btu/min = 3,412 Btu/hr
	= 0,239 cal/s
	= 0,00134 hP
1 Kcal	= 1,163W
1 hP	= 0,745700 KW
1 KW	= 1,3410 hP = 1 Kj/s
1 Btu/hr/Pie ² /Pulgada °F	= 0,08333 Btu/hr/Pie ² /Pie \diamond F

	= 0,0003444 g. cal/sec cm $^{\circ}$ C
	= 0,144228 W/m $^{\circ}$ C
Presión	
1 Pa	= 1 N/m 2
N	= Kg m/s 2
1 mm H ₂ O	= 9,80665 Pa = 1 mm de columna de agua (mm C.A.)
1 atm	= 760 mm Hg= 101,325 Kpa = 29,92 Pulgadas Hg
1 bar	= 750 Hg
Densidad	
1 lb/Pie 3	= 16,022 Kg/m 3
1 Kg/m 3	= 0,0624 lb/Pie 3
Caudal	
1 cfm/bu	= 0,80356 m 3 /m 3 mio = 48,214 m 3 /m 3 hr
1 cfm/Pie 3	= 1,0 m 3 /m 3 mio
1 Pie 3 /min	= 1,699 m 3 /hr

1 m ³ /m ³ mio	= 1 24446 cfm/bu
1 m ³ /m ³ hr	= 0 020741 cfm/bu
Temperatura normal T y Presión P (NTP)	
T	= 273,15 K = 0 °C
P	= 101,325 KPa = 760 mm Hg

[Indice](#) - [Precedente](#)