

36
2ej



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Química

DISEÑO DE UN SECADOR TIPO TUNEL

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a

REBECA GARCIA-PRICE VILLARREAL

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



[The text in this section is extremely faint and illegible due to heavy noise and low contrast.]

CONTENIDO

OBJETIVO	2
RESUMEN	4
INTRODUCCION	8
CAPITULO I.	
GENERALIDADES DEL PROCESO DE SECADO.	
CONCEPTOS FUNDAMENTALES	11
MENCANISMOS DE TRANSFERENCIA	13
PERIODOS DE SECADO	19
CLASIFICACION DE SECADORES	26
SELECCION DE SECADORES	30
CAPITULO II.	
DETERMINACION DEL AREA DE SECADO.	
FUNDAMENTOS TEORICOS	36
GLOSARIO DE ECUACIONES PARA EL CALCULO DEL AREA REQUERIDA PARA EL SECADO	41
CRITERIOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR	44
ALGORITOMO DE CALCULO	46
PROGRAMA DE CALCULADORA PARA CALCULAR EL AREA DE SECADO REQUERIDA	52

CAPITULO VI
EVALUACION ECONOMICA.

COSTOS DE INSTALACION	106
COSTOS FIJOS ANUALES	107
COSTOS DE OPERACION ANUALES	107
CONCLUSIONES	111
BIBLIOGRAFIA	114



OBJETIVO

La finalidad de esta tesis es presentar un método confiable y sencillo para el diseño de un secador tipo tunel, calculando el área expuesta requerida para el secado, integrando criterios de diseño recomendados, ecuaciones que calculan humedades del sistema aire-agua a condiciones variables de presión y temperatura y balances de calor y masa.

El procedimiento presentado es fácilmente implementable a una computadora o a una calculadora programable de bolsillo.

Con el deseo de presentar un bosquejo general de lo que es el proceso de secado y de aclarar algunos conceptos utilizados en el desarrollo de este trabajo, en el CAPITULO I, se describen los conceptos fundamentales y los mecanismos involucrados en esta operación. Se presentan los tipos de secadores existentes, con una clasificación estructurada de acuerdo al proceso de secado. Se considero de suma importancia, incluir algunos de los criterios para la selección de secadores, desde el punto de vista técnico y económico.

En el CAPITULO II, se expone el algoritmo de cálculo para la determinación del área de transferencia de calor y masa requerida para el secado, iniciando el mismo, con las ecuaciones básicas que describen la transferencia de calor y de masa, presentando un glosario de ecuaciones utilizadas para tal fin; integrando los criterios de diseño y las ecuaciones que calculan humedades en el sistema aire-agua a condiciones variables de presión y temperatura. Para facilitar los cálculos, se implementó la secuencia de cálculo a una calculadora programable.

El CAPITULO III, es la descripción de la determinación experimental de la humedad crítica del material seleccionado, para la exposición del método de diseño.

Las pruebas experimentales, se realizaron en el secador de charolas del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la U.N.A.M. Se incluyen tablas de resultados y gráficas en las que se observan los periodos de secado.

En el CAPITULO IV, se aplica el algoritmo de cálculo a un caso específico, manejando las variables temperatura y velocidad del aire de secado, dentro de los rangos recomendados y presentando los resultados de área de transferencia requerida, en tablas comparativas. Se seleccionó el área óptima, exponiéndose las bases de tal selección.

En la parte final de este capítulo, con el propósito de comprobar experimentalmente los resultados de la aplicación del método, se diseñó una prueba de evaluación cuya descripción y resultado se incluyen.

En forma general y como una introducción a la selección de los calentadores para los gases de secado y los ventiladores adecuados para los secadores tipo túnel, en el CAPITULO V, se describen los rangos de operación, así como los criterios de selección y evaluación.

Como ilustración de la aplicación de los mismos, se seleccionó el calentador y el ventilador para el secador propuesto en el capítulo anterior.

Por último y queriendo recalcar la importancia del factor económico, en el adecuado diseño y selección de las condiciones de operación de un secador tipo túnel, el CAPITULO VI, presenta datos - para su evaluación económica obtenidos en la bibliografía.

DEFINICION

La característica esencial del proceso de secado es la eliminación de un líquido por conversión en vapor, que se separa del sólido. En la práctica la energía necesaria para evaporar el líquido es suministrada en forma de calor. A veces se usan otras formas de energía como campos de radiofrecuencia, trabajo mecánico o reacciones químicas, éstos son, sin embargo, casos especiales; siendo el secado con aire el caso tratado en este trabajo.

APLICACION

Existen pocos procesos en la industria que no utilicen algún tipo de secado, o no tengan una necesidad potencial de utilizarlo. De aquí que sea de considerable importancia práctica y económica.

Algunas de las razones por las cuales el secado es empleado en operaciones industriales son:

1. Para reducir la carga en embarques de larga distancia
2. Para facilitar su manejo en subsecuentes equipos del proceso.
3. Para recuperar solventes costosos con el fin de recircularlos al proceso
4. Para alcanzar la capacidad máxima en otros puntos del proceso o reducir el consumo de combustible, reactantes, polvo y otros costos de operación en etapas anexas.
5. Para asegurar la conservación de la calidad del producto durante su embarque o almacenamiento.
6. Para acondicionar el material para tratamientos posteriores como cernido, separación electrostática, etc., que requieren de secado del material para una eficiencia máxima de proceso.

El secado es considerado a menudo como el paso final en procesos industriales sin embargo, es frecuentemente usado sobre materias primas o productos intermedios por razones económicas o por necesidad del proceso.

Una vez que se establece una buena razón para el secado la labor del ingeniero es doble, ya que debe seleccionar el equipo de secado que se integre mejor al proceso además de evaluar las ventajas y desventajas de las alternativas desde un punto de vista de factibilidad técnica y económica.

**GENERALIDADES
DEL PROCESO DE SECADO**

CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

El secado es el proceso que consiste en la eliminación de un líquido por conversión en vapor, que se separa del sólido. La energía necesaria para evaporar el líquido es suministrada en forma de calor. Hay que hacer notar que el secado se diferencia de la evaporación por el equipo empleado y en que la cantidad de líquido eliminado por evaporación en soluciones o suspensiones es mucho mayor.

Se ha aplicado también el término deshidratación a los procesos de secado, pero su uso se ha limitado casi por entero al secado de alimentos. Este término alude también a la eliminación del agua de combinación o formación de sales inorgánicas y a la eliminación simultánea del hidrógeno y grupos hidroxilos de los compuestos orgánicos.

El contenido de humedad en un sólido suele expresarse por la cantidad de humedad por unidad de peso o de volumen del sólido seco o húmedo. Se prefiere una base de peso (seco o húmedo).

Humedad en base seca indica el contenido de humedad de un sólido húmedo por unidad de peso de sólido completamente seco.

La ventaja de utilizar esta base es que la pérdida de humedad se obtiene restando los contenidos de humedad antes y después del secado.

La humedad en base peso húmedo es la que expresa la humedad de un material por un porcentaje del peso del sólido húmedo. Esta base es menos satisfactoria que la base de peso seco con la cual la variación del

porcentaje de humedad es constante para todos los contenidos de humedad. Contenido de humedad libre es el líquido que puede eliminarse para una temperatura y una humedad dadas. Puede incluir humedad aprisionada y sin aprisionar.

Humedad aprisionada es el líquido retenido por un sólido que ejerce una presión de vapor menor que la del líquido puro a la misma temperatura. El líquido puede estar aprisionado por su retención en pequeños tubos capilares, por formar soluciones fibrosas o celulares en las paredes, por formar solución homogénea en todo el sólido y por su adsorción química o física sobre superficies sólidas. La humedad aprisionada sólo puede eliminarse de un sólido en condiciones concretas de humedad del medio externo que le rodea.

Humedad no aprisionada de un material higroscópico es la que hay en exceso del contenido de humedad en equilibrio correspondiente a la saturación. Toda el agua de un material no higroscópico es humedad no aprisionada.

Contenido crítico de humedad es el que se obtiene cuando termina el período de velocidad de secado constante.

Contenido de humedad en equilibrio es aquel al cual puede secarse un material dado en condiciones concretas de temperatura y humedad del aire.

Humedad denota la cantidad de vapor de agua realmente presente en un gas.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA

El secado involucra los tres mecanismos de transferencia: momentum, calor y masa.

La circulación interna del líquido se produce por diversos mecanismos, según la estructura del sólido. Algunos de los mecanismos posibles son los siguientes:

- DIFUSION en sólidos homogéneos contínuos.
- CIRCULACION CAPILAR en sólidos granulares y porosos.
- CIRCULACION producida por el gradiente de presión
- CIRCULACION causada por la gravedad.
- CIRCULACION originada por una sucesión de vaporizaciones y condensaciones.

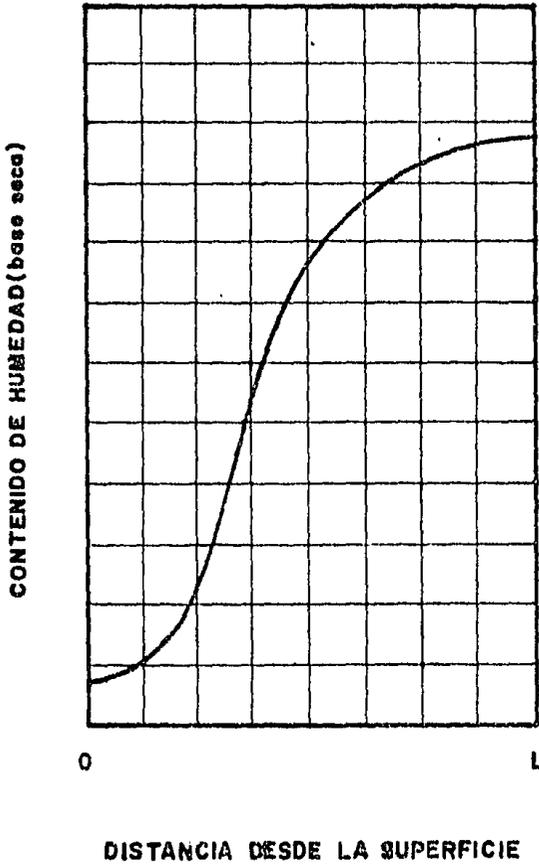
En general, uno de dichos mecanismos predomina en un momento dado en el sólido durante su , y no es raro encontrar diferentes mecanismos predominando en distintos momentos durante el ciclo de secado.

Hougen, McCauley y Marshall estudiaron las condiciones en las cuales es probable que se produzca la circulación capilar y difusional en un sólido, y presentaron y analizaron un resumen de los gradientes de humedad experimentales publicados para los dos casos. (Trans. Am. Inst. - Chem. Engrs., 36, 183). Sus curvas indicaron que la circulación capilar se caracteriza por un gradiente de humedad que comprende una doble curvatura y un punto de inflexión (fig. 1a) mientras que la difusional

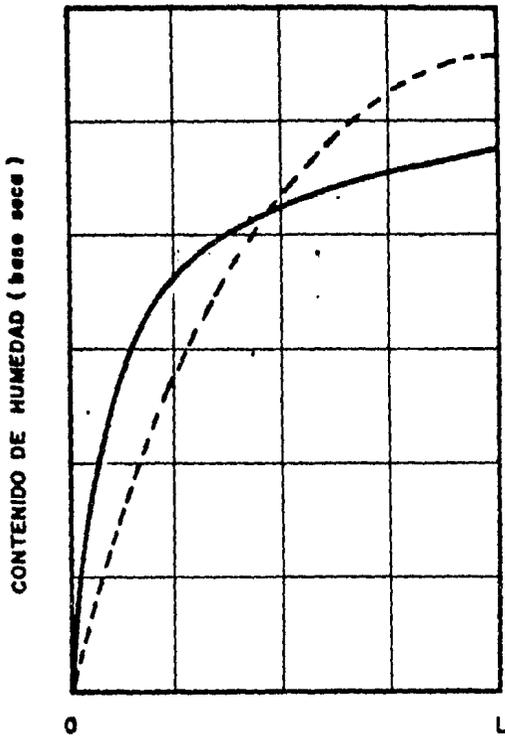
es una curva uniforme, con su concavidad hacia abajo (fig. 1b), como podría predecirse partiendo de las ecuaciones integradas de difusión. Demostraron también que para la circulación difusional, la difusividad del líquido, que por lo general se supone constante, no lo es, sino que decrece a medida que disminuye el contenido de humedad. La curva de trazos de la figura 1b es para una difusividad constante, y la curva llena es experimental, indicando una difusividad variable. Por consiguiente, las ecuaciones integradas de la difusión para la difusividad constante no son rigurosamente aplicables a la desecación, ni aún cuando la difusión líquida tenga lugar.

CIRCULACION CAPILAR. La humedad retenida en los intersticios de los sólidos bajo la forma de un líquido que cubre la superficie y como humedad libre en las cavidades celulares, está sometida a movimiento - por gravedad y capilaridad siempre que haya pasos para la circulación continua. En la desecación, la circulación del líquido a la capilaridad se aplica a los líquidos no retenidos en solución y a toda la humedad por encima del punto de saturación de las fibras, como en los tejidos, el papel y el cuero, y a toda la humedad por encima del contenido de humedad en equilibrio y la saturación atmosférica, como en los polvos finos y los sólidos granulados, tales como los pigmentos para pinturas, los minerales, las arcillas, la tierra vegetal y la arena.

CIRCULACION CAPILAR



CIRCULACION DIFUSIONAL



DIFUSION DE VAPOR. El vapor puede moverse por difusión a través del sólido, siempre que se establezca un gradiente de temperatura mediante un calentamiento que produzca un gradiente de presión de vapor. La vaporización y la difusión del vapor se produce en cualquier sólido en el que el calentamiento tiene lugar en una superficie mientras que en la otra se produce una desecación, y cuando el líquido está aislado entre gránulos de sólidos.

DIFUSION DEL LIQUIDO. El movimiento de los líquidos por difusión en los sólidos se limita al contenido de humedad en equilibrio por debajo del punto de saturación atmosférica, y a los sistemas sólidos de una sola fase en los cuales la humedad y el sólido son mutuamente solubles. La primera clase se aplica a las últimas fases del secado de arcillas, almidones, harinas, textiles, papel y madera; y la segunda clase incluye el secado de jabones, colas, gelatinas y pastas.

El conocimiento del mecanismo interno de la circulación de un líquido en un sólido durante el secado tiene un valor especial para analizar el funcionamiento de los secadores desde el punto de vista de mejorar los resultados y aumentar la capacidad. Es importante también para el desarrollo de nuevas técnicas de secado.

TRANSFERENCIA DE CALOR.

El calor debe ser aplicado al material con el propósito de vaporizar el líquido presente, vapor que será extraído por algún medio, ya sea por flujo de aire o por vacío.

Así pues, el calor debe ser transferido del gas de secado o de la superficie caliente hacia el centro del material, o al punto en que se encuentre la humedad del material.

La transferencia de calor se produce predominantemente por convección o por conducción, pues aunque es cierto que en todos los secadores se transfiere calor por radiación, es raro que sea éste el mecanismo que predomine. Este hecho se debe a que al suministrar medios para el calentamiento por convección o conducción, se proveen automáticamente los medios para eliminar el vapor; el transporte de calor por radiación no requiere ningún medio físico y no implica en sí mismo ninguna forma de eliminar el vapor. Esto hace de la radiación un efecto secundario, de debe tenerse en cuenta por corrección al mecanismo de transporte por convección o conducción.

El caso de secado por convección es distinto. El coeficiente de transferencia de calor suele ser grande y no varía mayormente durante el transcurso del secado. Ahora la limitación de la velocidad de secado está dada principalmente por el coeficiente de transferencia de materia.

El rango en que la transferencia de calor ocurre varía inversamente con la distancia entre la fuente de calor y el material. Este rango varía también con el área expuesta, la cantidad de movimientos del material y la turbulencia del gas de secado.

Podemos hablar de dos períodos de secado que son: período de velocidad de secado constante y período de velocidad de secado decreciente, siendo a grandes rasgos sus características las que se mencionan a continuación.

a) Período de velocidad de secado constante.

Todos los líquidos poseen una presión de vapor a una temperatura dada. La presión de vapor de la superficie húmeda de un sólido es muy similar a las del líquido puro a la misma temperatura.

Si la presión parcial del aire circundante es menor que la presión de vapor del líquido, la vaporización ocurre.

En las gráficas 1b, 1c, 1d, el período de velocidad de secado constante están indicadas en el intervalo B a C.

Si la superficie del material está completamente húmeda el secado será proporcional a la diferencia en las presiones de vapor.

Este mecanismo de secado ocurre a medida que el flujo de agua por difusión u otro medio (como se mencionó anteriormente) desde el interior del material es adecuado para mantener la superficie - - -

PERIODOS DE SECADO.

Podemos hablar de dos períodos de secado que son: período de velocidad de secado constante y período de velocidad de secado decreciente, siendo a grandes rasgos sus características las que se mencionan a continuación.

a) Período de velocidad de secado constante.

Todos los líquidos poseen una presión de vapor a una temperatura dada. La presión de vapor de la superficie húmeda de un sólido es muy similar a las del líquido puro a la misma temperatura.

Si la presión parcial del aire circundante es menor que la presión de vapor del líquido, la vaporización ocurre.

En las gráficas 1b, 1c, 1d, el período de velocidad de secado constante están indicadas en el intervalo B a C.

Si la superficie del material está completamente húmeda el secado será proporcional a la diferencia en las presiones de vapor.

Este mecanismo de secado ocurre a medida que el flujo de agua por difusión u otro medio (como se mencionó anteriormente) desde el interior del material es adecuado para mantener la superficie - - -

húmeda (el contenido de humedad en la superficie se reduce constantemente por evaporación). Si la temperatura, humedad y velocidad del aire caliente que pasa sobre la superficie húmeda se mantienen constantes el material llega a una temperatura de equilibrio también constante. A esta temperatura el calor sensible transferido del aire al material es igual al calor latente de absorbido por evaporación del agua. La velocidad de secado permanece constante porque las condiciones de secado lo son.

En este período a mayor temperatura de la superficie del material, mayor es la presión de vapor y mayor es la velocidad de secado.

Como el calor se recibe por convección del aire, la temperatura de la superficie se aproxima a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

b) Período de decremento en la velocidad de secado.

Durante el curso de cualquier proceso de secado se llega a un punto en que la superficie no está completamente húmeda.

La velocidad del movimiento de humedad por difusión -en lugar de la diferencia en presiones de vapor- viene a ser el factor que controla la velocidad a la que la humedad puede ser vapor

PERIODOS DEL SECADO

Tiempo y contenido de humedad

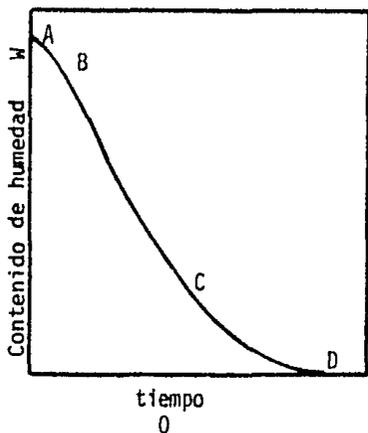


fig. 1c

Contenido de humedad e intensidad del secado

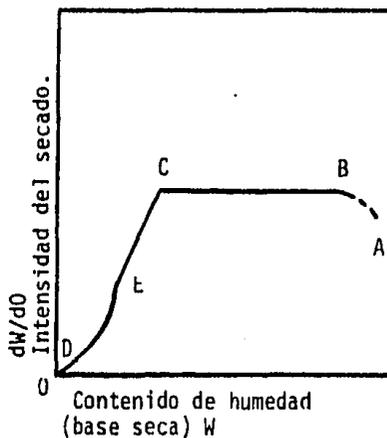


fig. 1d

Tiempo e intensidad del secado

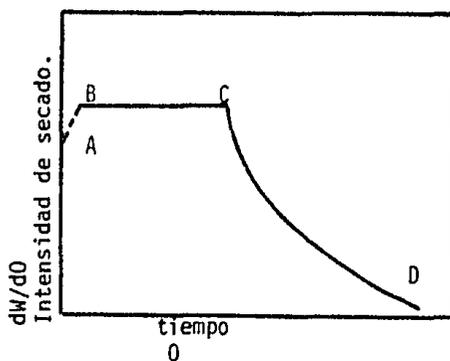


fig. 1e

INTERVALO

A-B período de calentamiento

B-C período de velocidad de secado constante

C-D período de velocidad de secado decreciente

PUNTO C contenido crítico de humedad

zada al aire.

El porcentaje de humedad en este punto del ciclo de secado se llama el punto de contenido crítico de humedad. Entonces la velocidad de secado decrece continuamente. La velocidad y humedad del aire no surten mucho efecto en la velocidad de secado. Otros factores como la temperatura y gradientes de humedad del material asumen un papel de relativa importancia.

Como el contenido de humedad disminuye en el material, su temperatura aumenta hasta aproximarse a la temperatura del aire. En otras palabras el contenido más bajo de humedad a la que un sólido puede ser secado con aire a una temperatura, humedad y presión se designa como contenido de humedad en el equilibrio.

Los factores principales que gobiernan la velocidad de secado son:

1. Dispersión de la humedad: un secado rápido requiere la exposición de una máxima superficie. Un conglomerado de materia tiene características poco favorables para el secado. En cambio las partículas suspendidas en el vapor son muy favorecidas.
2. Diferencial de temperatura; el tipo de secado es proporcional a la diferencia entre la temperatura del medio secante y la temperatura del material a secar.
3. Agitación; un movimiento rápido del material y del medio favorece un secado a mayor velocidad.
4. Tamaño de partícula; el secado se caracteriza por la evapora-

ción en la superficie de la partícula. Seguida de un secado de la humedad interna, operación que se lleva a cabo por difusión. Esta transferencia se lleva a cabo más rápidamente en partículas pequeñas.

5. Estructura de la partícula; materiales que poseen intersticios o capilares hacen el secado más fácil. Partículas densas, que no son porosas o que absorben humedad son difíciles de secar.

NIVEL DE TEMPERATURA Y DEMANDA DE CALOR.

La temperatura es el factor que más influye en la capacidad del secador. La temperatura del medio de calentamiento o del aire en el interior de los secadores por convección será siempre la más alta posible sin que esto tenga efectos posteriores sobre el material.

Pueden emplearse temperaturas bajas, pero hay que recordar como regla general que las pérdidas de calor sensible en los gases de salida se incrementará. Consecuentemente se necesita una gran cantidad de flujo de aire para proveer del calor necesario de evaporación. El combustible y poder requeridos se elevarán a la vez que el polvo en el secador aumentará.

Si se reduce la temperatura, se puede llegar al punto de condensación. Esta temperatura se conoce como punto de saturación

o punto de rocfo y corresponde a una cantidad definida de vapor de agua por unidad de peso de aire. Para cada temperatura existe un lfmite.

Desde el punto de vista de economfa de calor, es deseable des- cargar el aire de secado a su punto de saturación. Pero para evitar dificultades de condensación, generalmente se opera el - secador de forma tal que el aire a la salida tenga una humedad relativa que no exceda de 50 a 80%. (*2)

Otra manera de reducir las pérdidas de calor es recirculando - parte de los gases a la salida. Esta práctica es también una medida de controlar la humedad que es deseable para conseguir - la máxima capacidad de secado.

Cuando los requerimientos de temperatura no son impuestos por - el material a secar, temperaturas altas pueden ser utilizadas - si son toleradas por los materiales de construcción.

El acero al carbón por ejemplo pierde su fuerza rápidamente a temperaturas sobre 650 °F pero puede ser utilizado hasta 1000 °F si no está sujeto a esfuerzos mecánicos o atmósferas corrosi- vas.

El consumo de combustible en la operación de secado es normal-

mente el elemento de costo más importante. Los requerimientos de calor para la operación de secado pueden ser más fácilmente y mejor calculados por estimación sobre la base de un balance de calor. El calor involucrado en la operación de secado se utiliza en proveer el calor latente de vaporización, el calor perdido por radiación, y el calor sensible necesario para llevar la temperatura de cada componente del sistema a su temperatura de salida.

CLASIFICACION DE SECADORES.

Se propone una clasificación estructurada al proceso de secado; dos clases generales y cinco subclases. Las dos clases generales distinguen entre secadores adiabáticos y no adiabáticos.

Los secadores adiabáticos se distinguen de acuerdo a si los gases de secado pasan a través del material o sobre su superficie. Los procesos no adiabáticos se clasifican de acuerdo a si el calor se aplica a través de una superficie de transferencia o radiación y más tarde si la humedad vaporizada se expulsa por vacío o por purga de gases.

En procesos adiabáticos el calor de vaporización es proporcionado por el gas, que también transporta el vapor hacia el exterior.

El gas entra en una zona de equilibrio que incluye el gas, el sólido, el líquido que se va a vaporizar y el vapor. La superficie del sólido, es equivalente a una superficie de agua libre, que rápidamente tiende a igualar su temperatura a la temperatura de saturación adiabática del líquido puro, y permanecerá ahí mientras el sólido conserve su superficie húmeda.

En procesos no adiabáticos el calor fluye por los sólidos de alguna fuente que no es el gas. Por ejemplo, por contacto con la superficie de transferencia de calor o por radiación. La superficie del sólido expuesta a esa fuente de calor experimenta un incremento en su temperatura. El vapor es removido por vacío o purgando el gas.

Procesos adiabáticos.

El calor de evaporación es cedido por el calor sensible del gas

a) Secado de partículas.

El gas se mueve a través de partículas que son tan pequeñas que la resistencia a la difusión de la humedad es insignificante comparada con la resistencia a la transferencia de calor. El equipo puede ser:

- Secador de esparado
- Flash
- Lecho fluidizado
- Lecho móvil
- Rotatorios

b) Secado de placas o lechos.

El gas fluye sobre la superficie del material a secar, que está en un lecho tan delgado que la evaporación es controlada por la difusión de la humedad a la superficie. El equipo utilizado:

- Secadores de tunel
- Secadores de bandejas
- Secadores de anaqueles
- Secadores de banda transportadora.

Procesos no adiabáticos.

El calor de evaporación es proporcionado por radiación o por el calor transferido a través de paredes de intercambio en contacto con el material a secar.

a) Secado al vacfo.

El vapor es removido y la difusión de humedad es inducida por vacfo. El equipo utilizado es:

- Secador de anaqueles
- Secador rotatorio
- Secador cónico

b) Secado de purga.

El vapor se remueve al fluir el gas sobre o a través del material a secar. El equipo que entra en esta clasificación

es:

- Secador de transporte por tornillo sin fin.
- Secador enchaquetado vibratorio
- Secador rotatorio continuo
- Secador turbo o colector de vapor

c) Secadores radiantes.

La evaporación lograda mediante el calor electromagnético es transportada hacia el exterior por una purga de gas. El equipo utilizado es infrarrojo, o dieléctrico.

SELECCION DE SECADORES.

La selección preliminar de un secador generalmente requiere de los siguientes puntos a considerar:

1.- Propiedades del material a manejar:

- a) Características físicas cuando está húmedo.
- b) Características físicas cuando está seco.
- c) Corrosividad.
- d) Toxicidad.
- e) Flamabilidad.
- f) Tamaño de partícula.
- g) Abrasividad.

2.- Características de secado del material:

- a) Contenido inicial de humedad.
- b) Contenido de humedad final (máximo)
- c) Temperatura permisible de secado.
- d) Tiempo probable de secado en diferentes secadores.

3.- Flujo de material:

- a) Cantidad manejada por hora.
- b) Flujo intermitente o flujo continuo.
- c) Proceso anterior al secado.
- d) Proceso posterior al secado.

4.- Calidad del producto:

- a) Contracción.
- b) Contaminación.
- c) Uniformidad del contenido final de humedad.
- d) Descomposición del producto.
- e) Sobresecado.
- f) Estado o subdivisión.
- g) Temperatura del producto.
- h) Densidad.

5.- Problemas de recuperación:

- a) Recuperación de polvo.
- b) Recuperación de solvente.

6.- Facilidades disponibles:

- a) Espacio.
- b) Temperatura, humedad y limpieza del aire.
- c) Disponibilidad de combustible.
- d) Disponibilidad de energía eléctrica.
- e) Permisibilidad de ruido, vibración, polvo o pérdidas de calor.
- f) Origen de la alimentación.
- g) Salida de los gases.

7.- Listado de secadores que pueden manejar el material y condiciones en que lo descargan.**8.- Estimación del costo total**

Una selección final de este procedimiento preliminar requiere:

- a) Pruebas en planta piloto que nos proporcionarán datos sobre: Eficiencia de los secadores en el manejo de material, tamaño óptimo del secador y condiciones de operación.
- b) Hacer una selección final del secador sobre la base de los datos obtenidos en la planta piloto. Es aconsejable seleccionar el secador con los datos preliminares considerando el tiempo y las dificultades involucradas en obtener datos específicos en una planta piloto.

Comparación entre secadores intermitentes y contínuos.

En general se puede afirmar que un secador contínuo es preferible a un intermitente. Un secador contínuo de un tipo y capacidad dados requiere menos mano de obra, combustible y espacio, además de que el producto obtenido en la descarga es más uniforme que el obtenido en el correspondiente secador intermitente. Además hay que agregar que la mayoría de los procesos químicos son contínuos o serán contínuos en el futuro..

En contraparte, el secador intermitente tiene un costo inicial menor, con bajo costo de mantenimiento, fácil de operar, y extremadamente versátil en sus posibles aplicaciones.

De aquí que se prefieran los secadores intermitentes cuando el material a secar requiere de un tiempo de permanencia largo, y gracias a su facilidad de manejo cuando se requieren secar una gran variedad de materiales para trabajo de laboratorio, o para materiales que requieren un control riguroso durante el secado.

La cantidad de material por secar es una consideración importante que hacer durante la selección. Si sólo se requieren cantidades mínimas de producto, el costo de una operación intermitente será menor que el de un secador contínuo.

Para la selección final deben examinarse todos los factores que intervienen en el proceso, pero como regla general, se puede considerar que producciones menores de 10,000 lb/dfa son mejor manejadas en un secador intermitente, y producciones sobre 100,000 lb/dfa en un secador continuo. (8)

**DETERMINACION DEL
AREA DE SECADO REQUERIDA**

FUNDAMENTOS TEORICOS.

Los balances de materia y energía constituyen la base para los cálculos de secado.

Estas operaciones de transferencia pueden expresarse en la forma de una ecuación de velocidad.

$$\text{Velocidad} = \text{fuerza motriz} / \text{resistencia}$$

En el caso de la transferencia de calor la fuerza motriz es la caída de temperatura a través de la película de aire, mientras que para la transferencia de masa es el gradiente de la presión de vapor. Mientras mayor sea la diferencia de la temperatura o la presión de vapor, mayor será la velocidad de secado.

Por supuesto esta velocidad de secado es también directamente proporcional al área de superficie expuesta, por lo tanto, cuando se trata de sistemas de secado de circulación cruzada, es obvio que la velocidad de secado para un peso de sólido dado, varía inversamente como una función de tamaño de partícula.

En el periodo de velocidad de secado constante se puede establecer la siguiente expresión cuantitativa:

Para transferencia de masa :

$$- \frac{dW}{Ac d\theta c} = \frac{w}{Ac} = \frac{\Delta P}{1/kg} = \frac{P_s - P_o}{1/kg}$$

$$\delta \quad w = kg \cdot Ac (H_s - H_a)$$

Para transferencia de calor:

a) Convección:

$$q = hcA(t_a - t_s)$$

b) Conducción:

$$q = (k/x)A(t_h - t_s)$$

c) Radiación:

$$q = hrA(t_r - t_s)$$

donde:
$$hr = \frac{0.173(tr/100)^4 - (ts/100)^4}{tr - ts}$$

Para el período de velocidad de secado decreciente:

$$dW/Afd\theta f = -K(M - M_e) = -KF$$

donde: W - peso del líquido presente en el material

w - vaporización, lb/h

P - Presión de vapor del líquido puro, atm.

P_s - Presión de vapor del líquido a la temperatura de bulbo húmedo.

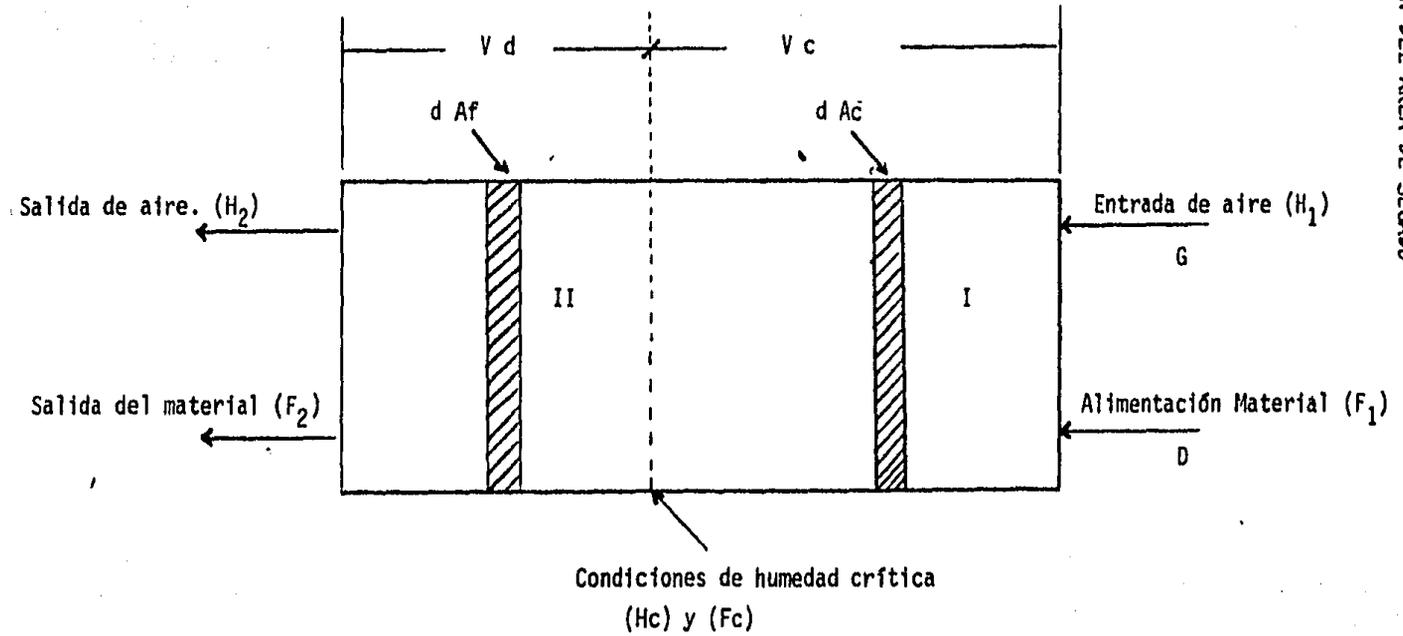
P_o - Presión parcial de vapor en el gas de secado.

Ac - área expuesta durante el período de velocidad de secado constante, ft².

- kg - coeficiente de transferencia de masa, basado en la diferencia de presiones parciales, lb/h ft² atm.
- q - flujo de calor, btu/h
- hc - coeficiente de transferencia de calor por convección, btu/h ft² °F
- hr - coeficiente de transferencia de calor por radiación btu/h ft² °F
- ta - temperatura de bulbo seco de gas de secado, °F
- ts - temperatura de la superficie húmeda, o temperatura de bulbo húmedo que es igual a la temperatura de saturación adiabática,
- tr - temperatura de superficie, °F
- Af - Area expuesta durante el periodo de velocidad de secado decreciente, ft².
- K - Rc/Fc función del período de secado constante.
- M - Contenido total de humedad, lb/lb s.seco.
- Me - Contenido de humedad en el equilibrio, base seca.

En la figura 2a se presenta un esquema de las zonas de velocidad de secado constante y de velocidad de secado decreciente.

FIGURA 2 a



CLAVE DE LA FIGURA 2

- V d Zona de velocidad de secado decreciente.
- V c Zona de velocidad de secado constante.
- I Zona en que el contenido de humedad del material está por arriba del valor crítico.
- II Zona en que el contenido de humedad está por abajo del valor crítico.
- H₁ Humedad inicial del aire.
- H₂ Humedad final del aire.
- F₁ Contenido libre de humedad del material a la entrada.
- F₂ Contenido libre de humedad del material a la salida.
- G Flujo del aire de secado.
- D Alimentación de material al secador.

ARRIBA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD CRITICA

ABAJO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD CRITICA

1.- Secado intermitente a condiciones constantes:

$$A_c = \frac{\lambda_c (W_1 - W_a)}{\theta c h c (t_a - t_s)}$$

$$A_f = \frac{\lambda_c F_c W_d}{\theta f h c (t_s - t_a)} \ln \frac{F_1}{F_a}$$

2.- Condiciones de secado variables.

a. Secado adiabático a contra corriente (R ≠ 1)

$$A_c = GR \left(\frac{C_s}{h c} \right) \ln \frac{1 - \left(\frac{D}{G} \right) \left(\frac{F_c - F_a}{t_1 - t_2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{\lambda_s}{C_s} \right)}{1 - \frac{D}{G} \left(\frac{F_1 - F_a}{t_1 - t_2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{\lambda_s}{C_s} \right)}$$

$$A_f = GR \left(\frac{C_s}{h c} \right) \frac{1}{\frac{F_a}{F_c} + \frac{G}{D} \left(\frac{t_1 - t_2}{t_c} \right) \left(\frac{R C_s}{\lambda_s} \right)}$$

$$\ln \frac{F_a}{F_c} \frac{1}{1 - \frac{D}{G} \left(\frac{F_a - F_1}{t_1 - t_2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{\lambda_s}{C_s} \right)}$$

ARRIBA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD CRITICA

ABAJO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD CRITICA

b. Secado adiabático con flujo paralelo ($R = 1$)

$$Ac = GR \left(\frac{C_s}{hc} \right) \ln \frac{1}{1 - \frac{D}{G} \left(\frac{F_1 - F_2}{t_1 - t_2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{\lambda_s}{C_s} \right)}$$

$$Af = GR \left(\frac{C_s}{hc} \right) \frac{1}{\frac{F_1}{F_2} - \frac{G}{D} \left(\frac{t_1 - t_2}{F_c} \right) \left(\frac{\lambda_s}{C_s} \right)}$$

$$\ln \left(\frac{F_1}{F_2} \right) \left[\frac{1 - \frac{D}{G} \left(\frac{F_1 - F_2}{t_1 - t_2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{\lambda_s}{C_s} \right)}{1 - \frac{D}{G} \left(\frac{F_1 - F_2}{t_1 - t_2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{\lambda_s}{C_s} \right)} \right]$$

c. Secado adiabático intermitente ($R = 1$ y suponiendo mezclado de carga completo)

$$Ac = GR \left(\frac{C_s}{hc} \right) \ln \frac{1}{1 - \frac{W_1 - W_2}{G \theta C} \left(\frac{1}{t_1 - t_2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{\lambda_s}{C_s} \right)}$$

Su solución involucra el uso de ecuaciones diferenciales parciales

ARRIBA DEL CONTENIDO
DE HUMEDAD CRITICA

ABAJO DEL CONTENIDO
DE HUMEDAD CRITICA

d. Secado no adiabático a contra corriente (R=1) y/o pendientes de líneas de operación y temperatura de bulbo húmedo diferentes.

$$Ac = \frac{G \lambda_s}{hc} \int_{H_1}^{H_2} \frac{1}{(t_a - t_s)} dHa$$

donde: $x = (D/G)(F_1 - F_2)$

$$Af = \frac{FcG\lambda_s}{hc} \int_{H_1}^{H_2} \frac{1}{\left[F_2 + \frac{G}{D} (Ha - H_1) \right] (t_a - t_s)} dH$$

y $= (D/G)(F_2 - F_1)$

c. Secado no adiabático con flujo paralelo (R=1)

$$Ac = \frac{G \lambda_s}{hc} \int_{H_1}^{H_2} \frac{1}{(t_a - t_s)} dHc$$

donde: $x = (D/G)(F_1 - F_2)$

$$Af = \frac{FcG\lambda_s}{hc} \int_{H_1}^{H_2} \frac{1}{\left[F_1 + \frac{G}{D} (Ha - H_1) \right] (t_a - t_s)} dH$$

z = (D/G)(F_1 - F_2)

CRITERIOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR EN EL CALCULO DEL AREA EXPUESTA REQUERIDA
PARA EL SECADO.

- La temperatura del medio de calentamiento o la temperatura del aire en la entrada de secadores por convección deberá ser siempre lo más alta posible sin que cause deterioro en el material.
Se pueden emplear temperaturas bajas, pero se debe recordar como regla general que así las pérdidas de calor en los gases de salida se verán muy incrementadas. Esto se debe a que se requiere un flujo mayor de gases con el fin de proveer el calor de evaporación. *(1)
- Cuando la temperatura no es limitada por el material a secar, se deben tomar en cuenta las temperaturas que toleran los materiales de construcción. *(1)
- El consumo de combustible es normalmente el elemento de costo de operación más significativo. *(2)
- Los valores de los coeficientes de transferencia de calor para secadores indirectos es del orden de $1 \text{ a } 5 \text{ Btu/h ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$ a condiciones de temperaturas ordinarias si el material no es agitado. *(8)
- Para secadores de flujo cruzado, las velocidades normales son de 4 a 6 ft/seg. Si la tendencia del material a formar polvo es grande, la velocidad en la superficie, particularmente en el punto de descarga se debe mantener de 1 a 2 ft/seg. *(10)

Desde el punto de vista de economía de calor, es deseable descargar el aire de secado a su punto de saturación. Pero para evitar dificultades de condensación, generalmente se opera el secador de forma tal que el aire a la salida tenga una humedad relativa que no exceda de 50 a 80%. *(2)

ALGORITMO DE CALCULO.

Para utilizar esta secuencia se deben tener los siguientes datos:

- t_s temperatura de bulbo húmedo del aire ambiental [°F]
- t temperatura de bulbo seco del aire [°F]
- D alimentación del producto al secador [lb/hr]
- M_1 contenido total de humedad del material en base seca a la entrada
[lb H_2O /lb de sólido seco]
- M_2 contenido de humedad del material a la salida del secador en
base seca [lb H_2O /lb sólido seco]
- P_T Presión atmosférica [lb/in²]
- M_c Humedad crítica [lb H_2O /lb s.s.]
- M_e Humedad de equilibrio [lb H_2O /lb s.s.]
- $t_{\text{máx.}}$ temperatura máxima que soporta el material [°F]

$$1) \quad P_v^* = \frac{1}{51.7} 10 [7.991 - 1686.877 / (212.22 + t_s / 1.8)]$$

$$2) \quad H_s = \frac{P_v}{(P_T - P_v)} \times \frac{18.02}{28.97}$$

$$3) \quad \lambda_{t_s} = 1097 - 0.6 t_s$$

$$4) \quad H = \frac{\lambda_{ts} H_s' - 0.24 (t - t_s)}{\lambda_{ts} + 0.46 (t - t_s)}$$

donde: P_v' = presión de vapor del agua [lb/in²]

H_s = humedad de bulbo húmedo [lb H₂O/lb Aire Seco]

λ_{ts} = calor latente de evaporación [Btu/lb]

H_1 = humedad del aire a la entrada [lb H₂O/lb A.S.]

- Para obtener la humedad del aire a la salida H_2 [lb H₂O/lb A.S.], se alimenta a la ecuación 1) la temperatura del aire a la salida del secador en lugar de t_s lo que nos dará una P_v' .

$$5) \quad H_2 = \frac{P_v' \cdot Hr}{(P_T - P_v \cdot Hr)} \times \frac{18.02}{28.97}$$

donde: Hr = humedad relativa recomendada x 0.01

La Hr recomendada es de 50 a 80% *(4)

$$6) \quad G = \frac{D (M_1 - M_2)}{(H_2 - H_1)}$$

donde: G = flujo de la corriente de aire secante [lb A.S./h²]

$$7) \quad hc = 0.0128 (V_p)^{0.8}$$

donde: hc = coeficiente de transferencia de calor para aire que fluye paralelamente al plano

V_p = velocidad del aire en la superficie [ft/h²]

La velocidad recomendada es de 14,400 a 21,600 ft/h *(1)

8) $C_s = 0.24 + 0.45 H_a$

donde C_s = calor húmedo [btu/lb A.S.°F]

H = humedad del aire [lb H₂O/lb A.S.]

9) $F_1 = M_1 - M_e$

donde: F_1 = contenido libre de humedad a la entrada

M_e = contenido de humedad en el equilibrio [lb H₂O/s.s.]

10) $F_c = M_c - M_e$

donde: F_c = contenido libre de humedad en el punto crítico.

11) $F_2 = M_2 - M_e$

donde: F_2 = contenido libre de humedad del material a la salida [lb H₂O/lb s.s.]

12)

$$A_c = GR(C_s/h_c) \ln \frac{1}{1 - \frac{D}{G} \frac{(F_1 - F_c)}{(H_s - H_1)}}$$

donde: A_c = área expuesta requerida durante el período de velocidad de secado constante [ft²].

R = radio psicrométrico, hc/kg'Cs $R = 1$ (*1)

$$13) \quad A_f = GR(C_s/h_c) \frac{1}{\frac{F}{F_c} - \frac{G}{D} \frac{(H_s - H_i)}{F_c}} \times$$

$$\times \ln \frac{F_c}{F} \frac{1 - \frac{D}{G} \frac{(F_c - F_i)}{(H_s - H_i)}}{1 - \frac{D}{G} \frac{(F - F_i)}{(H_s - H_i)}}$$

donde: A_f = área expuesta requerida durante el periodo de velocidad de secado decreciente [ft^2]

$$14) \quad A_t = A_c + A_f$$

donde: Area total de secado [ft^2]

- Se hace necesario efectuar una corrección por efectos de precalentamiento, pérdidas por radiación y efectos de sobrecalentamiento.

$$15) \quad J = (1 + r) \frac{\lambda_f}{\lambda_p} + \frac{(C_p + F_s)(t_p - t_f)}{\lambda_p (F_1 - F_2)}$$

donde: J = factor de corrección adimensional

r = pérdidas por radiación expresadas como una fracción del calor neto transferido al material a secar. ($r = 0.03$ a 0.1)(*1)

λ_f = calor latente de evaporación a t_f [btu/lb]

λ_p = calor latente de evaporación a t_p [btu/lb]

t_f = temperatura de alimentación [$^{\circ}F$]

t_p = temperatura del producto seco [$^{\circ}F$]

$$16) \quad A = A_t \cdot J$$

donde: A = área efectiva requerida para secar el material.

PROGRAMA PARA CALCULADORA HP-41CV, PARA CALCULAR EL AREA

DE SECADO REQUERIDA EN UN SECADOR TIPO TUNEL

DESCRIPCION:

Este Programa calcula el área expuesta requerida para el secado.

DATOS:

MEMORIAS

Temperatura de bulbo húmedo (°F)	00
Temperatura de bulbo seco (°F)	01
Temperatura del aire en el secador (°F)	02
Flujo de material para secar (lb/h)	03
Humedad inicial del material (lb H ₂ O/lb ss)	04
Humedad final del material (lb H ₂ O/lb ss)	05
Humedad de equilibrio del material (lb H ₂ O/lb ss)	06
Presión atmosférica (lb/in ²)	07
Humedad relativa del aire a la salida del secador (%/100)	08
Velocidad del aire (ft/seg)	09
Humedad crítica del material	19

RESULTADOS:

Humedad inicial del aire (lb H ₂ O/lb AS)	13
Humedad final del aire (lb H ₂ O/lb AS)	15

Aire necesario para el secado (lb/h)	16
Area de secado a velocidad de secado constante (ft ²)	23
Area de secado a velocidad de secado decreciente (ft ²)	26
Area total requerida (ft ²)	27

L I S T A D O

LBL A SECADO	HC = ?	*	*
TBH = ?	PROMT	CHS	CHS
PROMPT	STO 19	1097	7.991
STO 00	RCL 00	+	+
TBS = ?	1.8	STO 12	10 ^x
PROMT	%	RCL 01	51.7
STO 01	212.22	RCL 00	+
TAIR = ?	+	-	STO 14
PROMT	1/2x	0.46	RCL 14
STO 02	1686.877	*	RCL 08
FMAT = ?	*	1059.2	*
PROMT	CHS	+	CHS
STO 03	7.991	1/2x	RCL 07
M 1 = ?	+	1059.2	+
PROMT	10 ^x	RCL 11	28.97
STO 04	51.7	*	*
M 2 = ?	%	RCL 01	1/2x
PROMT	STO 10	RCL 00	RCL 14
STO 05	11.8	-	*
M E = ?	RCL 10	0.24	RCL 08
PROMT	-	*	*
STO 06	28.97	-	18.02
PT = ?	*	*	*
PROMT	1/2x	STO 13	STO 15
STO 07	RCL 10	RCL 02	RCL 15
HR = ?	*	1.8	RCL 13
PROMT	18.02	%	-
STO 08	*	212.22	1/2x
VELAIR = ?	STO 11	+	RCL 04
PROMT	RCL 00	1/2x	RCL 05
STO 09	0.6	1686.877	-

RLO 03	+	*	*
*	RCL 15	RCL 15	RCL 17
*	RCL 13	RCL 13	%
STO 16	-	-	RCL 16
RCL 09	+	%	*
3600	CHS	RCL 16	STO 26
*	1.0	%	RCL 23
0.8	+	CHS	RCL 26
y^x	\sqrt{x}	1.0	+
0.0128	ln	+	STO 27
*	RCL 18	RCL 24	STOP
STO 17	*	%	END
RCL 15	RCL 16	RCL 21	
0.45	*	*	
*	RCL 17	RCL 22	
0.24	+	%	
+	STO 23	ln	
STO 18	RCL 20	STO 25	
RCL 04	RCL 21	RCL 15	
RCL 06	-	RCL 13	
-	RCL 03	-	
STO 20	*	RCL 16	
RCL 19	RCL 15	*	
RCL 06	RCL 13	RCL 03	
-	-	%	
STO 21	%	RCL 21	
RCL 05	RCL 16	%	
RCL 06	%	CHS	
-	CHS	RCL 20	
STO 22	1.0	RCL 21	
RCL 20	+	%	
RCL 21	STO 24	+	
-	RCL 21	\sqrt{x}	
RCL 03	RCL 22	RCL 25	
*	-	*	
RCL 16	RCL 03	RCL 18	
+			

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA HUMEDAD CRITICA

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA HUMEDAD CRITICA.

La operación clave del secado es la transferencia de masa desde el sólido, cuyo mecanismo no está totalmente aclarado. Posiblemente es una función del tamaño, forma y disposición de las partículas componentes del material sólido y de la facilidad con que el vapor y el líquido puedan migrar a través de los poros y capilares del sólido a su superficie externa. Sin embargo en algunos secadores, y en algunas etapas, la velocidad de secado está limitada por la transferencia de calor más que por la transferencia de materia. En esas condiciones - la velocidad de secado está regida por los conocidos principios de - transferencia de calor, que, en alguna medida, son independientes de las propiedades del material a secar. Sin embargo, en el caso general, la velocidad depende de la transferencia de materia desde el sólido a secar y esta transferencia es poco conocida y no puede calcularse. Además, a medida que mejora el rendimiento de la transferencia de calor, aumenta la influencia relativa de la transferencia de materia, que no puede predecirse.

El efecto práctico de esta dicotomía y falta de conocimiento es:

La velocidad de secado de un material (lo que determina la humedad crítica) no se puede calcular, sólo puede ser determinada experimentalmente.

TRABAJO EXPERIMENTAL.

DETERMINACION DE LA HUMEDAD CRITICA.

Como se explicó anteriormente, en el proceso de secado la determinación de la Humedad Crítica representa un factor primordial para el diseño.

Es posible encontrar datos de humedades críticas aproximadas para algunos materiales, pero casi siempre se hace indispensable realizar el trabajo experimental, debido a las características del material que se manejará.

a. Material

- 1 trozo de cartón 1.5 ft^2
- 1 cronómetro
- 1 probeta
- Secador intermitente tipo tunel del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la U.N.A.M. (ver diagrama)
- Agua

b. Procedimiento

Se cortaron tres trozos de cartón de 0.327 ft^2 y se anotó su peso, se humedecieron y se anotó el peso de agua que absorbieron.

Previamente se comprobó que el secador trabajaba a régimen constante, En este caso la presión del vapor en el serpentín fue de 28.4 lb/in^2 que nos proporcionó una temperatura de aire de 140°F dejando la compuerta de entrada de aire abierta a $3/4$ del total.

El cartón se colocó en las bharolas del secador, las cuales están suspendidas de una balanza donde se obtendrán los resultados del peso del cartón húmedo conforme pase el tiempo.

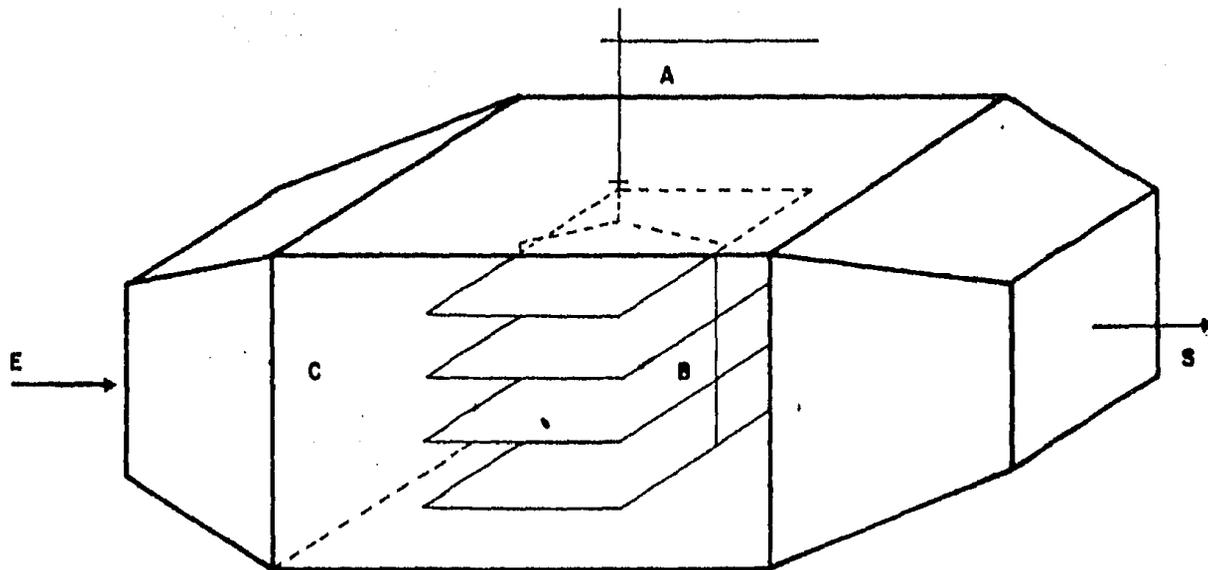


FIGURA 3

DIAGRAMA DEL SECADOR DE CHAROLAS INTERMITENTE
UTILIZADO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD CRITICA

CLAVE DE LA FIGURA 3.

A. Balanza granataria.

B. Charolas.

C. Serpentín de vapor.

E. Entrada del aire.

S. Salida del aire.

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

DETERMINACION DE LA HUMEDAD CRITICA.

Estos resultados se presentan en la gráfica 1 b y 2 b.

CORRIDA No. 1

$$m = 0.0561 \text{ lb}$$

$$A = 0.3279 \text{ ft}^2$$

minutos	$Y = \frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb sólido seco}}$	$W = \text{lb/h ft}^2$
0	1.9	
2	1.73	0.06
4	1.55	0.06
6	1.40	0.06
8	1.24	0.06
10	1.07	0.06
12	0.95	0.06
14	0.79	0.06
16	0.58	0.06
18	0.45	0.05
20	0.36	0.03
22	0.28	0.03
24	0.22	0.02
26	0.16	0.02
28	0.11	0.02
30	0.07	0.02
32	0.05	0.00

CORRIDA No. 2

$m = 0.0561 \text{ lb}$

$A = 0.3279 \text{ ft}^2$

minutos

$Y = \frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb sólido seco}}$

$W = \text{lb/h ft}^2$

0	1.85	
2	1.75	0.05
4	1.55	0.06
6	1.40	0.06
8	1.24	0.06
10	1.04	0.06
12	0.96	0.06
14	0.78	0.06
16	0.63	0.06
18	0.49	0.05
20	0.40	0.04
22	0.32	0.02
24	0.24	0.03
26	0.18	0.02
28	0.12	0.02
30	0.06	0.02
32	0.04	0.00

CORRIDA No. 3 *

$$m = 0.0561 \text{ lb}$$

$$A = 0.3279 \text{ ft}^2$$

minutos	$Y = \frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb sólido seco}}$	$W = \text{lb/h ft}^2$
0	1.77	
2	1.65	0.04
4	1.53	0.04
6	1.40	0.05
8	1.28	0.05
10	1.14	0.06
12	1.02	0.06
14	0.92	0.06
16	0.80	0.07
18	0.70	0.03
20	0.55	0.05
22	0.46	0.02
24	0.38	0.01
26	0.32	0.00

* NOTA: ESTA CORRIDA NO SE GRAFICO DEBIDO A LA INCONGRUENCIA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

CORRIDA No. 4

$$m = 0.0561 \text{ lb}$$

$$A = 0.3279 \text{ ft}^2$$

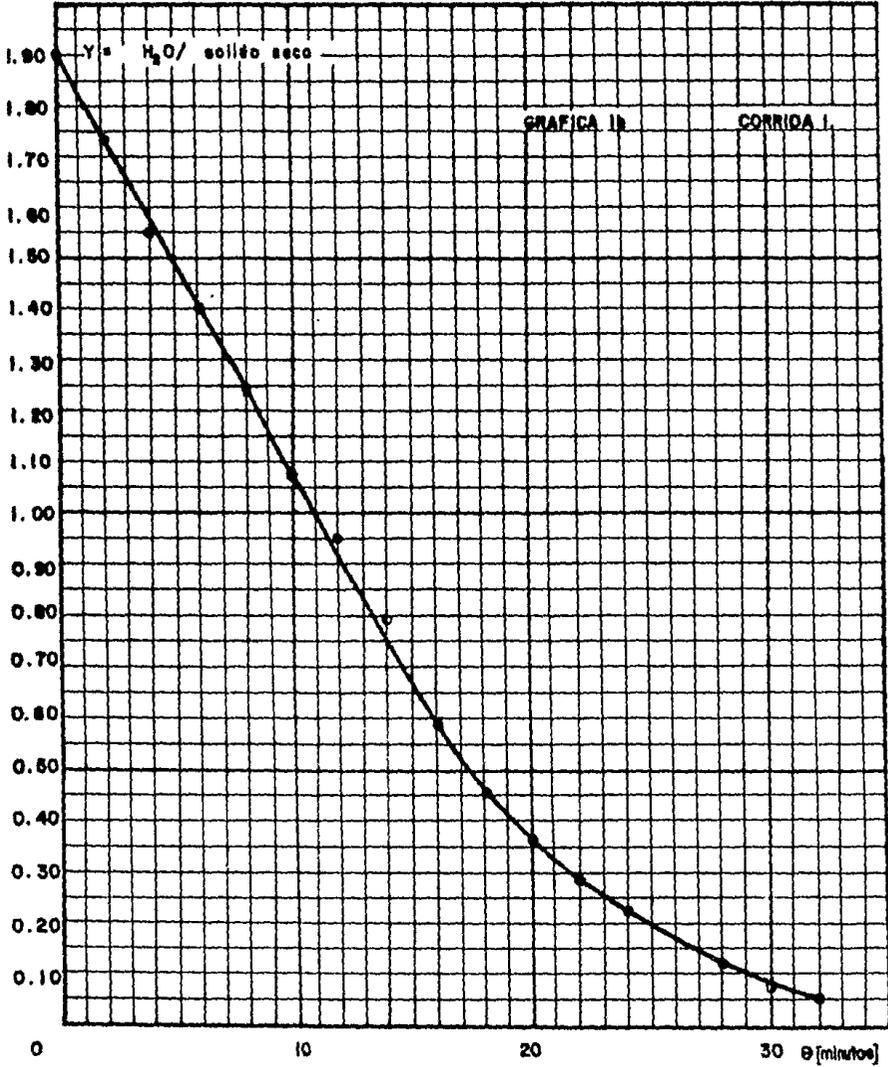
minutos	$Y = \frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb sólido seco}}$	$W = \text{lb/h ft}^2$
0	1.76	
2	1.64	0.05
4	1.48	0.05
6	1.44	0.05
8	1.42	0.05
10	1.16	0.05
12	1.04	0.05
14	0.85	0.05
16	0.73	0.05
18	0.60	0.05
20	0.51	0.03
22	0.46	0.02
24	0.36	0.03
26	0.24	0.02
28	0.11	0.02
30	0.05	0.00

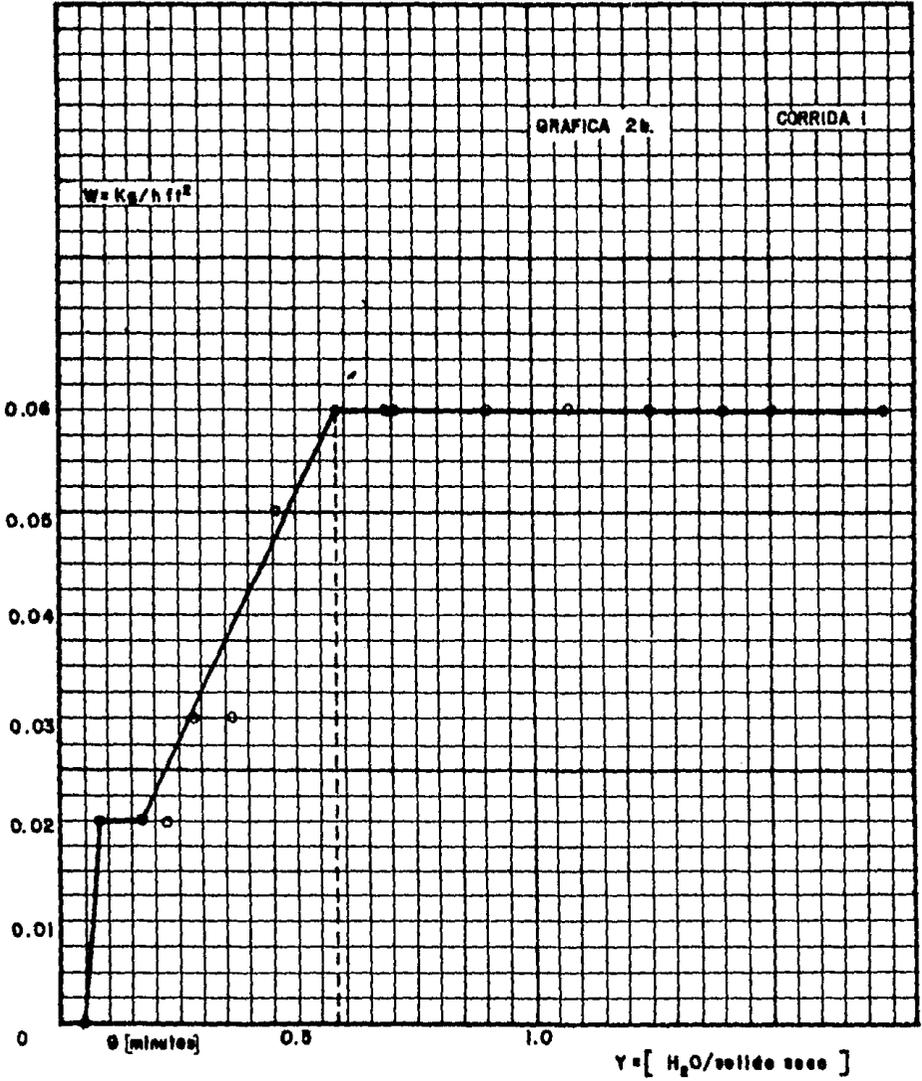
c. Conclusiones

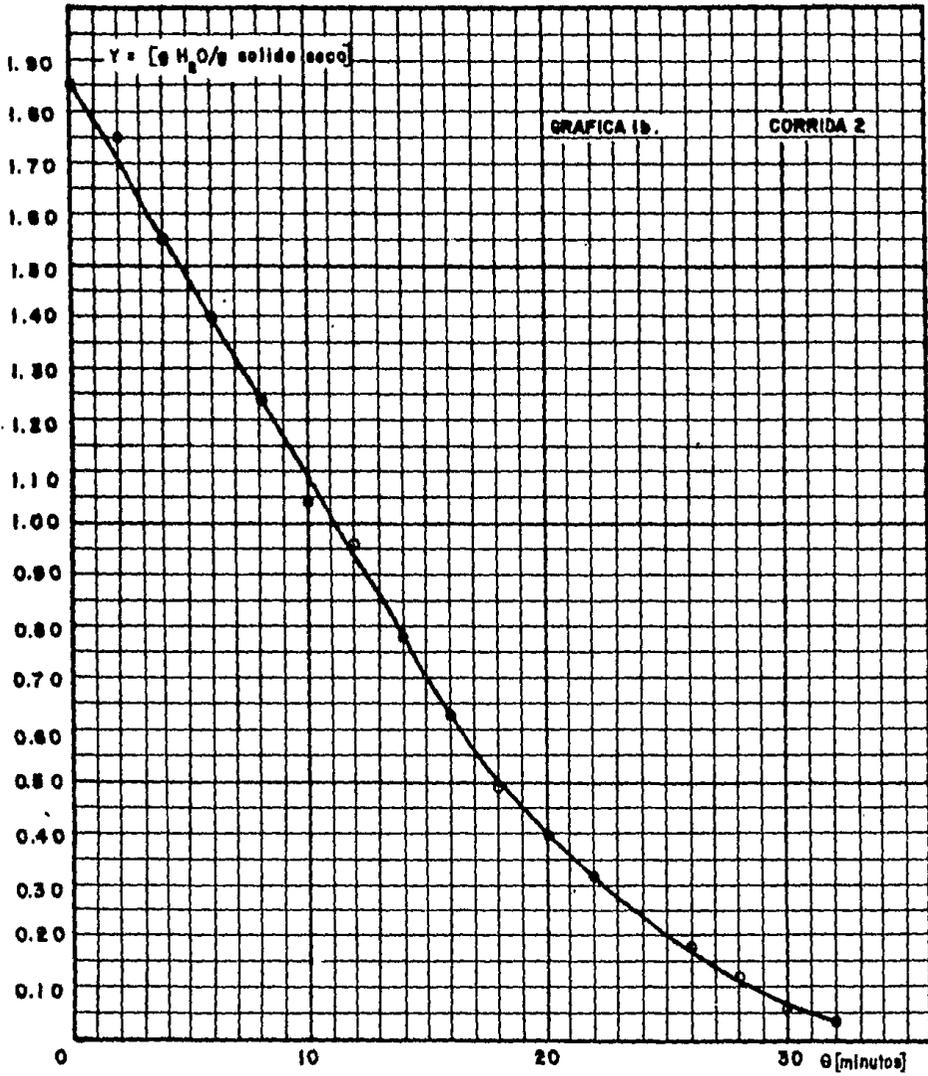
Se hicieron tres corridas anotando el peso del cartón cada minuto, graficándose los resultados (gráficas 1 b y 2 b) de aquí se concluyó que la humedad crítica es: $0.59 \text{ lb H}_2\text{O/lb sólido seco}$.

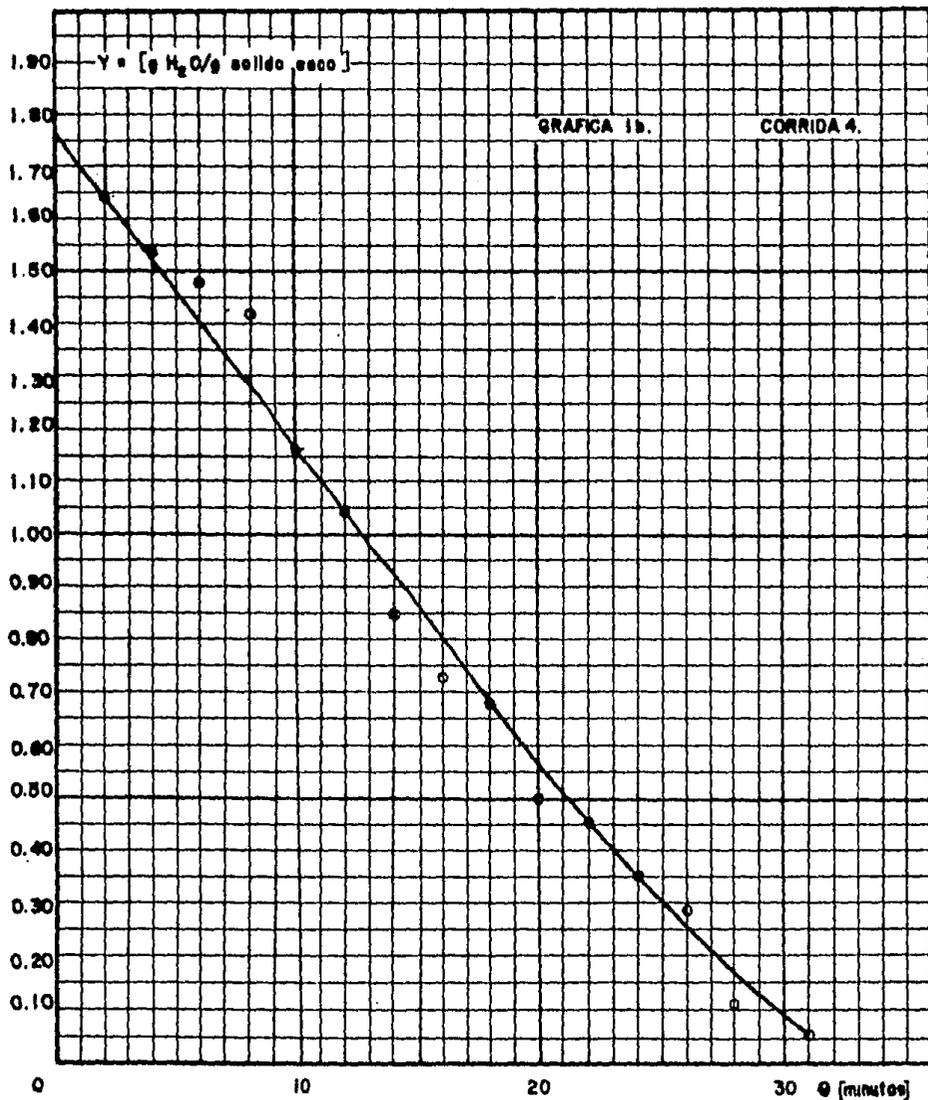
d. Posibles fuentes de error

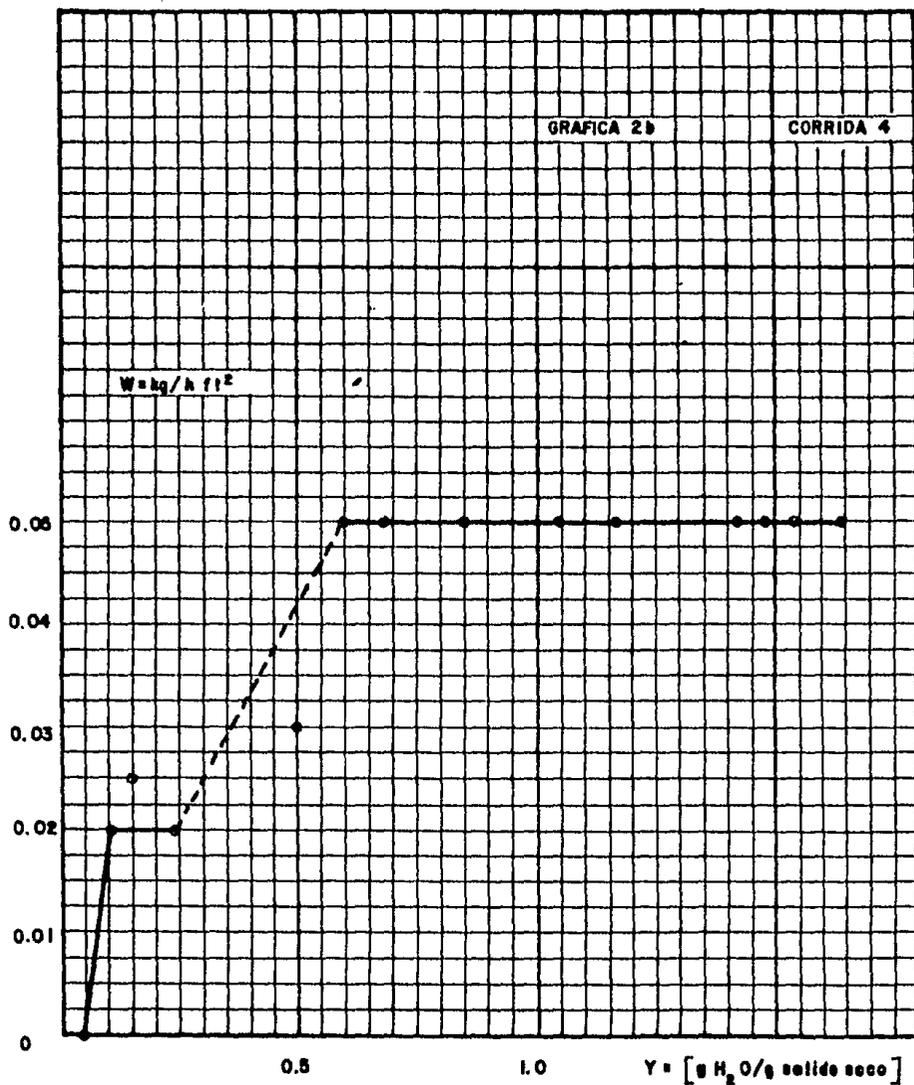
- Ligeras variaciones en la temperatura del aire, debido a fluctuaciones en la presión del vapor del serpentín.
- Errores en la lectura de peso a causa del movimiento producido por el aire en las charolas.











**APLICACION DEL
METODO DE CALCULO**

BASES DE DISEÑO

Con el fin de ilustrar el método se seleccionó como material de prueba placas de cartón del tipo que es utilizado para hacer láminas acanaladas, y que son fabricadas con desperdicio de papel. Estas placas después de su proceso de fabricación contienen una humedad promedio de 1.83 lb H₂O por cada libra de material seco; la que es necesario reducir al máximo. Las características del material son las siguientes:

Dimensiones: 6.56 x 8.53 espesor: 0.09 a 0.11 in

Peso: 0.1711 lb/ft² (peso de la lámina húmeda)

La temperatura máxima que soporta el material sin que sufra alteraciones que deterioren su calidad es de 240 °F.

Como base de cálculos se tomará 1000 lb/h de material a manejar.

Debido a que la evaluación del método se realizará en un secador de tunel localizado en Ramos Arizpe, Coahuila, se tomaron como base de cálculo las condiciones de temperaturas y presión en este lugar.

Temperatura de bulbo húmedo = 63 °F *

Temperatura de bulbo seco = 75 °F *

Presión atmosférica = 11.8 lb/in²

* Temperaturas promedio en el mes de septiembre, durante el cual se realizaron las pruebas.

EJEMPLO DE RESOLUCION NUMERICA

$$t_s = 63^\circ \text{ F}$$

$$t = 75^\circ \text{ F}$$

$$t_1 = 190^\circ \text{ F}$$

$$D = 1000 \text{ lb/h base de diseño}$$

$$M_1 = 1.83 \text{ lb H}_2\text{O/lb sólido seco}$$

$$M_2 = 0.23 \text{ lb H}_2\text{O/lb sólido seco}$$

$$M_e = 0 \text{ lb H}_2\text{O/lb sólido seco}$$

$$P_T = 11.8 \text{ atm}$$

$$1) \quad P_v^o = \frac{1}{51.7} \cdot 10 \left[7.991 - 1686.877 / (212.22 + 63/1.8) \right]$$

$$P_v^o = 0.2845 \text{ lb/in}^2$$

$$2) \quad H_s = \frac{0.2845}{11.8 - 0.2845} \cdot \frac{18.02}{28.97} = 0.01537$$

$$H_s = 0.01537 \frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb A.S.}}$$

$$3) \quad \lambda_{ts} = 1097 - 0.6 (63) = 1059.2 \text{ BTU/lb}$$

$$4) \quad H_1 = \frac{1059.2 (0.01537) - 0.24 (75 - 63)}{1059.2 + 0.46 (75 - 63)}$$

$$H_1 = 0.01259 \frac{\text{lb } H_2O}{\text{lb A.S.}}$$

$$P_{t_1}^o = \frac{1}{51.7} 10 \left[7.991 - 1686.877 / (212.22 + 190 / 1.8) \right]$$

$$P_{t_1}^o = 9.3136 \quad \text{Hr} = 0.8$$

$$5) \quad H_2 = \frac{9.3136 (0.8)}{(11.8 - 9.3136 (0.8))} \cdot \frac{18.02}{28.97} = 1.06564 \frac{\text{lb } H_2O}{\text{lb A.S.}}$$

$$6) \quad G = \frac{1000 (1.83 - 0.23)}{1.06564 - 0.01259} = 1519.39$$

$$7) \quad 6 \frac{\text{ft}}{\text{seg}} \times \frac{3600 \text{ seg}}{\text{hr}} = 21600 \text{ ft/h}$$

$$N_c = 0.0128 (21,600)^{0.8} = 37.564$$

$$8) \quad C_B = 0.24 + 0.45 (1.06564) = 0.71954$$

$$9) \quad F_1 = 1.83 - 0.05 = 1.78$$

$$10) \quad F_c = 0.59 - 0.05 = 0.54$$

$$11) F_2 = 0.23 - 0.05 = 0.18$$

$$R = 1$$

$$12) A_c = 1519.39 (1) \frac{(0.71954)}{37.564} \ln \frac{1}{1 - \frac{1000}{1519.39} \frac{(1.78 - 0.54)}{(1.0654 - 0.01259)}}$$

$$A_c = 43.44 \text{ ft}^2$$

$$13) A_f = 1519.39 (1) \frac{(0.71954)}{37.564} \frac{1.78}{0.54} - \frac{1519.39}{1000} \frac{1.0654 - 0.01259}{0.54}$$

$$-\ln \frac{0.54}{0.18} \left[\frac{1 - \frac{1000}{1519.39} \cdot \frac{(0.54 - 0.18)}{(1.0654 - 0.01259)}}{1 - \frac{1000}{1519.39} \cdot \frac{(1.78 - 0.54)}{(1.0654 - 0.01259)}} \right]$$

$$A_f = 203.55 \text{ ft}^2$$

$$A_t = 43.44 + 203.55 = 246.99$$

R E S U L T A D O S.

Con el propósito de analizar la influencia de los valores de los parámetros de diseño de un secador, se realizaron tablas comparativas de los resultados de área expuesta requerida para el secado variando:

- 1) La velocidad del aire de secado.
- 2) La temperatura del aire de secado.

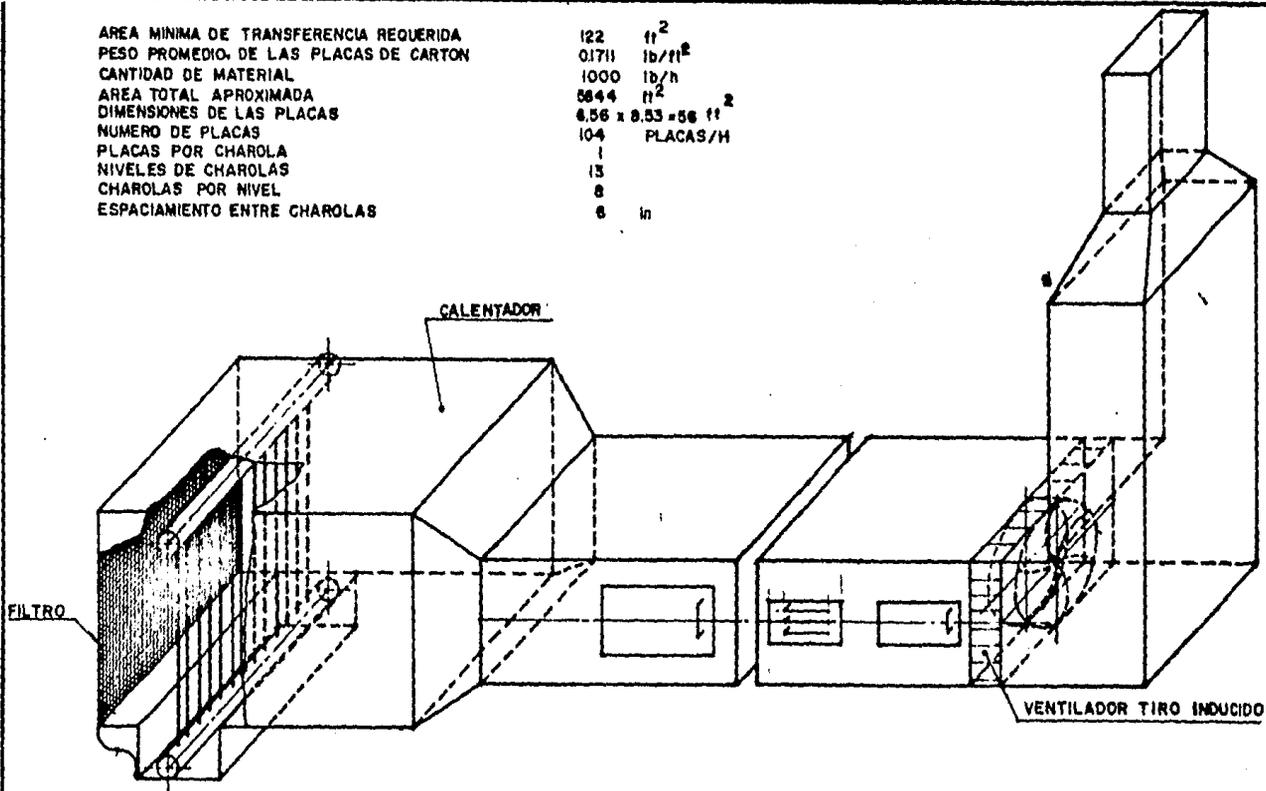
Todos estos valores fueron manejados en los rangos recomendados en los criterios de diseño.

Como resultado del análisis de estos resultados se puede concluir que dado que el material manejado en este caso no impone restricciones, se puede trabajar en las condiciones extremas dentro del rango recomendado de velocidad y temperatura.

En base a todo lo anterior se propone un diseño preliminar que es el siguiente (fig. 4a), que manejará 1000 lb/h de material a secar, un flujo de aire de 1519.3 lb/h, con una velocidad de 6 ft/s y a una temperatura de 230 °F. El espaciamiento entre charolas y sus dimensiones son recomendadas (* 9), el medio de calentamiento del aire y el ventilador fueron seleccionados de acuerdo a estas condiciones de operación y sus características se especifican en el capítulo correspondiente.

AREA MINIMA DE TRANSFERENCIA REQUERIDA
 PESO PROMEDIO DE LAS PLACAS DE CARTON
 CANTIDAD DE MATERIAL
 AREA TOTAL APROXIMADA
 DIMENSIONES DE LAS PLACAS
 NUMERO DE PLACAS
 PLACAS POR CHAROLA
 NIVELES DE CHAROLAS
 CHAROLAS POR NIVEL
 ESPACIAMIENTO ENTRE CHAROLAS

122	ft ²
0.1711	lb/ft ²
1000	lb/h
5644	ft ²
8.56 x 8.53	= 56 ft ²
104	PLACAS/H
1	
13	
8	
8	in



SECADOR DE TUNEL INTERMITENTE

T A B L A 1

Velocidad del aire = 6 ft/s Humedad relativa = 80%

TEMPERATURA DEL AIRE DE SECADO [°F]	AREA REQUERIDA [ft ²]
170	379.15
180	304.30
190	246.9
200	203.8
210	169.83
220	143.18
230	122.06

T A B L A 2

Velocidad del aire = 5 ft/s

Humedad relativa = 80%

TEMPERATURA DEL AIRE DE SECADO [°F]	AREA REQUERIDA [ft ²]
170	438.6
180	352.0
190	286.3
200	235.8
210	196.5
220	165.6
230	141.2

T A B L A 3

Velocidad del aire = 4 ft/s Humedad relativa = 80%

TEMPERATURA DEL AIRE DE SECADO [°F]	AREA REQUERIDA [ft ²]
170	524.4
180	420.9
190	342.3
200	281.8
210	234.9
220	198.0
230	168.8

EVALUACION EXPERIMENTAL DEL METODO DE CALCULO DEL AREA DE SECADO REQUERIDA.

a) PROCEDIMIENTO

Se utilizó un secador tipo tunel intermitente de charolas ; que posee las caracterfsticas siguientes:

Area disponible para el secado = 256.8 ft^2

Velocidad del aire = 1.3 ft/s

Flujo de aire = 5265 lb/h

Temperatura del aire = 120° F

En este secador el aire es calentado al pasar por una serie de tubos por los que circulan gases de combustión.

Se manejó una carga de 5.5 lb de material. Al extender las -- placas de cartón se requirió un área de 32 ft^2 .

Después de asegurar que el equipo trabajaba a régimen permanente se secaron las placas durante una hora, se pesaron y se obtuvo el contenido de humedad promedio.

b) RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.

Contenido de humedad promedio = $0.26 \text{ lb H}_2\text{O/lb sólido seco}$.

No se observaron alteraciones que afectaran la calidad final deseada del material.

Se pudo notar que el contenido de humedad promedio en las placas en el extremo final del secador era mayor.

c) RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE CALCULO.

Aplicando el método de cálculo con los mismos datos detallados en el procedimiento se obtuvieron los siguientes resultados:

Area requerida para el secado = 33 ft^2

Tiempo de permanencia = 1 h.

Humedad final = $0.23 \text{ lb H}_2\text{O}/\text{lb sólido seco}$

d) CONCLUSIONES

Como puede observarse las dimensiones de las placas suponen una restricción importante, Aunque en este caso la diferencia de áreas puede considerarse despreciable.

Por lo anterior y tomando como parámetro principal el contenido final de humedad:

Desviación entre resultados experimentales y del método = 13%

e) POSIBLES FUENTES DE ERROR

Variación de la temperatura del aire.

Diferencia entre el contenido de humedad de las placas utilizadas.

Condiciones climatológicas variables.

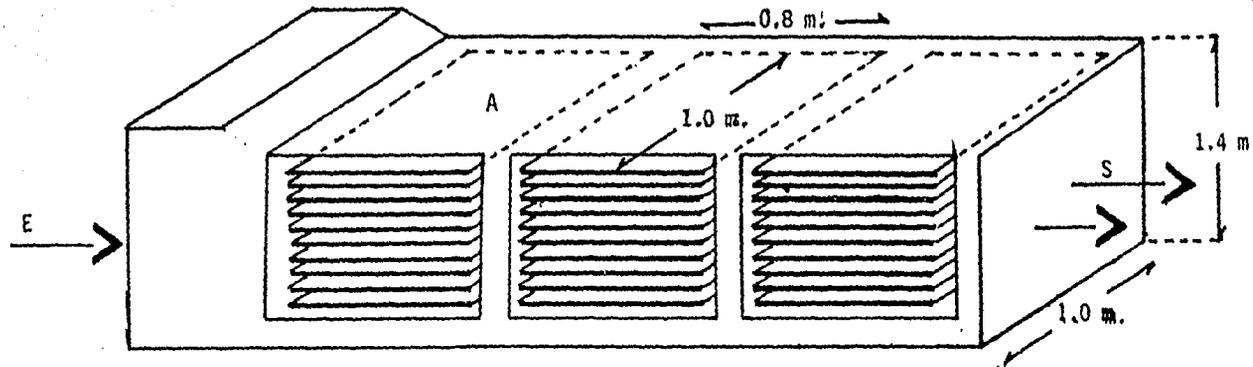


FIGURA 4

DIAGRAMA SIMPLIFICADO DEL SECADOR DE TUNEL
INTERMITENTE UTILIZADO EN LA EVALUACION DEL
METODO DE CALCULO.

CLAVE DE LA FIGURA 4

A CHAROLAS DE MALLA METALICA.

E ENTRADA DEL AIRE

S SALIDA DEL AIRE

EQUIPO AUXILIAR

El diseño global de un secador tipo tunel requiere además de la determinación de la superficie de contacto necesaria entre el material y el medio de secado, la apropiada selección del equipo auxiliar y materiales de construcción.

Se puede decir que, a veces, podría obtenerse un rendimiento poco satisfactorio de un proceso debido a deficiencias en el equipo auxiliar de la sección de secado de una planta.

El equipo auxiliar con que debe contar un secador tipo tunel es el siguiente:

- EQUIPO DE CALEFACCION: si este equipo es muy pequeño puede echar a perder el plan de producción, mientras que si es muy grande, aparte del derroche de capital, su funcionamiento puede ser irregular; el calentamiento fluctuante, difícil de controlar.

Es bien conocida la reducción sustancial del rendimiento en sistemas de calefacción a vapor, con purgas de aire mal ubicadas o con purgadores de vapor funcionando defectuosamente; por ello en instalaciones importantes es ventajoso someter los planos a la consideración de un especialista.

- VENTILADORES: la selección de estos se debe de hacer de acuerdo a las condiciones de velocidad del aire requerida y a la caída de presión que sufre el aire a través del secador.

- EQUIPO DE CONTROL: que incluye principalmente de control de temperatura y velocidad de la banda transportadora cuando la hay.

En este capítulo se pretende dar las características generales de estos equipos, así como algunas recomendaciones y rangos de operación, con el fin de facilitar su selección final.

CALENTADORES PARA EL AIRE DE SECADO.

Se pueden considerar cuatro tipos principales de calentadores para el aire de secado:

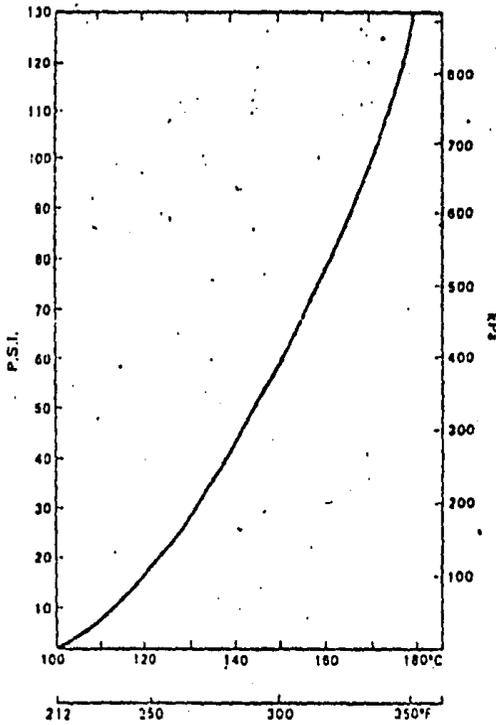
- Calentador indirecto con vapor.
- Calentador indirecto con combustible líquido o gaseoso.
- Calentador directo con gases de combustión.
- Resistencia eléctrica.

CALENTADORES DE VAPOR.

Este tipo de calentadores se utiliza cuando las temperaturas son de hasta 400 °F y se tiene disponible vapor a presiones alrededor de 350 psi. La temperatura del aire de secado depende de la presión del vapor (tabla 1.1) y es aproximadamente de 9 a 13 °F más baja que la temperatura del vapor. El vapor sobrecalentado no es recomendable desde el punto de vista de calentamiento, se utiliza vapor saturado con una temperatura de condensado de aproximadamente 178 °F.

El consumo de vapor se calcula conociendo el calor total contenido en el vapor a la entrada y a la salida. El tamaño del calentador depende de las propiedades de transferencia de los tubos y aletas; por ejemplo, para una velocidad de aire de 1,000 ft/min sobre los tubos, el coeficien-

TABLA 1.1



RELACION ENTRE LA PRESION DE VAPOR SATURADO Y SU TEMPERATURA.

te de transferencia es del orden de $10.5 \text{ Btu}/^\circ\text{F h ft}^2$.

Una forma común de construcción es usar tubos de acero con aletas galvanizadas, con un diámetro externo de 1.4 in incluyendo las aletas; se requieren entre 20 y 30 líneas de tubos para lograr una temperatura de aire de 400°F . Una velocidad de aire de $1,000 \text{ ft}/\text{min}$ sobre un calentador de este tipo provoca una caída de presión de $3 \text{ inH}_2\text{O}$.

El consumo de vapor se puede calcular por balance:

$$M_c = \frac{L_a \cdot C_p \cdot (T_o - T_i)}{(H_s - H_e) \cdot \eta}$$

donde: M_c - vapor requerido

L_a - flujo de aire

H_e - entalpía del vapor a la entrada del cambiador.

H_s - entalpía del vapor a la salida del cambiador.

η - eficiencia del calentador

C_p - calor específico del aire

T_o - Temperatura del aire a la salida del precalentador

T_i - Temperatura del aire a la entrada del precalentador.

CALENTADORES CON COMBUSTIBLE LIQUIDO

En este tipo de calentadores los gases de combustión pasan sobre o a través de tubos que actúan como superficie de transferencia de calor para el aire de secado. El calentador consiste en una sección de radiación y otra de convección. Se fabrican de acero resistente al calor. Para manejar el flujo de gases de combustión se utilizan tubos galvanizados. El cuerpo del calentador se fabrica de acero estándar, con acceso para limpieza de tubos. La temperatura máxima que se obtiene para el aire es de aproximadamente 750 °F. A continuación se muestra una tabla con las eficiencias (1.2)

Temperatura del aire To	Eficiencia
350-500 °F	80-85
525-610 °F	75-80
660-750 °F	70-75

En los calentadores directos con combustible líquido se pueden obtener temperaturas de aire de secado de 400 a 1100 °F. Su eficiencia es del orden del 95 a 98 %. Se construyen en medidas estándar una una capacidad de liberación de 2×10^5 a 2×10^7 btu/h.

Para calcular la cantidad de combustible necesaria se utiliza la siguiente ecuación:

$$W = \frac{L a. Cp. (T_o - T_i)}{Q_{cv} \cdot \eta}$$

- donde:
- W - cantidad de combustible
 - L - Flujo de aire
 - Q_{cv}- poder calorífico del combustible
 - η - eficiencia del calentador
 - T_o - temperatura final del aire
 - T_i - temperatura inicial del aire.

CALENTADORES CON COMBUSTIBLE GASEOSO.

La construcción y operación de calentadores indirectos de aire con gas, es similar a los de combustible líquidos. Son construídos en tamaños estándar, liberando de 4×10^5 a 2.5×10^7 Btu/h. La temperatura del aire a la salida del cambiador puede llegar a 1500 °F. Su eficiencia es comparable a los de combustible líquido. Se puede calcular la cantidad de gas necesaria utilizando la misma ecuación con su respectivo poder calorífico.

RESISTENCIA ELECTRICA.

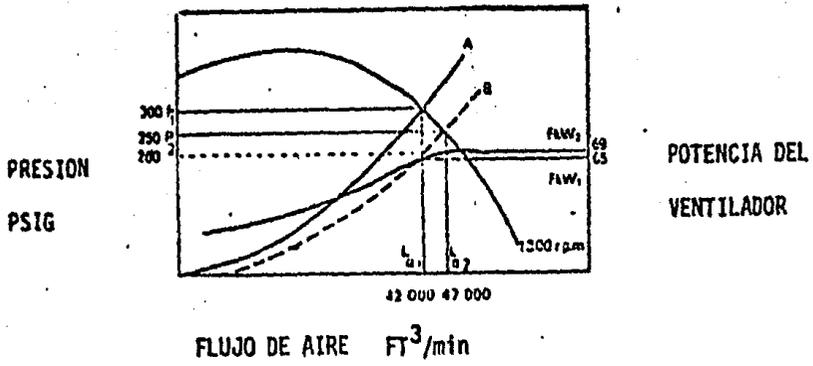
Este tipo de calentador para el aire de secado es común en laboratorios y plantas piloto. Este calentador es de fácil construcción pero con altos costos de operación. Se pueden obtener temperaturas del aire de 750 °F.

VENTILADORES.

Cuando se selecciona o instala un ventilador, las características de operación se pueden encontrar empleando las curvas de funcionamiento del ventilador. Estas características dependen de las resistencias al flujo o a la presión requerida para transportar el aire a través del sistema a la velocidad deseada. La característica del sistema se encuentra con el flujo de aire y la presión como coordenadas.

Las condiciones de operación del ventilador están representadas en el lugar donde se entersectan la curva característica del sistema y la curva del ventilador (figura 1.3)

FIGURA 1.3



BANDA TRANSPORTADORA.

La construcción de la banda es importante, puesto que debe ofrecer una baja pérdida de carga para permitir el paso del aire, poder curvarse sobre los rodillos impulsores de dimensiones razonables, no causar rotura o tamizado del producto y en muchos casos ser resistente a la corrosión.

Se ha usado con éxito una pesada cinta de malla de alambre en secadores de hasta 269 ft^2 de área..

También se usan bandas formadas por una sucesión de tablillas de chapa perforada o de malla de alambre sobre un soporte rígido. Esto permite construir bandas livianas y rígidas, la cuales pueden ser diseñadas con cualquier tamaño de aberturas requerido; esta disposición también ayuda la colocación de bordes laterales que eviten la caída del material fuera de los bordes de la banda. También se pueden utilizar para moverla cadenas situadas en el costado de la banda eliminándose con su uso los problemas de arrastre. Las bandas de tablillas requieren un diseño mecánico cuidadoso y detallado para evitar indebido desgaste y para prevenir que los gránulos de material queden atrapados entre las tablillas y evitar que se rompan cuando éstas pasan alrededor de los rodillos terminales.

Otro método de construcción de la banda consiste en formarla de dos capas con una banda transportadora de malla gruesa convenientemente conducida por cadenas laterales y ruedas dentadas sobre la cual está

fijada una liviana malla de alambre, una tela tejida o una banda plástica perforada. Por ejemplo se puede usar como transportador un encadenado grueso con malla del tipo usado en vallados con aberturas de 0.98 in recubierta con una gasa de alambre o con una tela de tamiz hecha de P.V.C. Este tipo de construcción da una banda liviana y económica, la cual es relativamente fácil de limpiar y permite usar materiales no metálicos en contacto con el producto. Pero una dificultad de este sistema está en la vinculación de la cubierta superior con la banda transportadora. Es posible operar esta banda suelta pero se corre peligro de deslizamiento de ésta respecto a la banda inferior

El material se encuentra estacionario respecto de la banda, de manera que el sistema es análogo al de soplado de aire sobre una capa estacionaria de material

El secado tiene lugar mediante el paso de gas o aire caliente sobre la superficie del material húmedo, es decir por convección y por ello se mantienen las ecuaciones básicas de transferencia instantánea de calor y materia. La superficie de secado es, en general idéntica a la de la banda de secado, de manera que la ecuación de trabajo para el período de velocidad constante.

INSTRUMENTACION

Los secadores de banda continua se controlan habitualmente variando la temperatura y la velocidad de la banda (la cual controla el tiempo de secado) manteniéndose constantes las demás variables. Por lo tanto los instrumentos básicos a utilizar son termómetros. Es conveniente medir la temperatura debajo de la banda) usándose ésta para controlar la alimentación de vapor al calentador respectivo.

Debe tenerse cuidado al disponer el elemento sensible a la temperatura para que proporcione un valor verdadero.

La velocidad de la banda debe ser variable y controlable en la operación de la planta entre una velocidad igual a la mitad y otro igual al doble de la velocidad nominal de proyecto.

SELECCION DEL CALENTADOR Y DEL VENTILADOR.

La selección del calentador y del ventilador para el secador, se realizó de acuerdo a las condiciones de operación del mismo que son:

- Flujo de material: 1,000 lb/h
- Flujo de aire: 1519.39 lb/h
- Temperatura del aire: 190 2F
- Velocidad del aire: 6 ft/s

CALENTADOR.

De acuerdo a los requerimientos de temperatura se decidió que un serpentín de vapor es adecuado como medio de calentamiento para el aire, siendo sus características las siguientes: (*10)

Tubos de aluminio, diámetro nominal de 0.75 in, diámetro externo de 1.05 in, con 3 aletas por pulgada y que tengan una altura de 0.375 in, con una separación entre tubos de tres veces el diámetro nominal, con tres tubos por hilera y cabezales de 4 in. de diámetro de acero al carbón. La caída de presión estimada para estos serpentines es de aproximadamente 1 in de H₂O.

Se consideró adecuado determinar la capacidad real en btu/h del serpentín, para este fin se utilizó un programa de calculadora descrito al final de este capítulo y cuyo resultado fue de 261,705.42 btu/h con un gasto de vapor de 230 lb/h.

VENTILADOR.

El ventilador se seleccionó de acuerdo al flujo de aire manejado y a la caída de presión estimada (a través del calentador y del secador), que fue de 20 in H_2O .

Las características del ventilador son las siguientes:

Ventilador axial Flåkt modelo: FZCM-6-031
2100 rpm
0.25 HP potencia efectiva

ESTIMACION DEL FUNCIONAMIENTO DE SERPENTINES DE VAPOR CON
UNA CALCULADORA PROGRAMABLE.

El método descrito aquí plantea la determinación de la capacidad real en btu/h de un serpentín de vapor en el cual se calienta el aire para el secado, este programa está hecho para una calculadora HP41C pero se puede adaptar fácilmente a una TI59 u otra calculadora programable similar.

Esta estimación es una herramienta muy útil para la selección del tipo de serpentín de vapor que sea más adecuado para los requerimientos del secador seleccionado, siempre que se posean datos sobre el tamaño del serpentín, número de líneas, tipo y espaciamiento de aletas de acuerdo a datos de catálogo.

PROGRAMA KD (4)

D A T O S :

	MEMORIA
Flujo de vapor [gpm]	00
Diámetro interno de la tuberfa [in]	35
Número de circuitos	01
Constante del fluido [btuh/gpm](tabla a)	02
Longitud de las aletas [in]	04
Altura de las aletas [in]	05
Número de aletas por pulgada	06
Número de líneas	07
Factor Kw (si se conoce, de otra manera se introduce el valor 0 y el programa lo estima tabla b)	08
Temperatura de bulbo seco [°F]	17
Temperatura de bulbo húmedo [°F]	09
Temperatura del vapor, [°F]	10
Flujo de aire [ft ³ /min] :	03

RESULTADOS:

Temperatura del aire a la salida	LDB
Capacidad del serpentín btu/h	BTUH
Factor de fricción para el aire	APD
Caída de presión total del vapor	TWPD

LISTADO:

LBL KD	AVIEW	FPI=?	RCL 00	RCL 02
XEQ INPUT	XEQ NTU	PROMPT	RCL 01	/
XEQ FAV	PSE	STO 06	/	STO 14
RCL 08	<u>END</u>	ROWS=?	RCL 35	LBL 03
X ≠ 0?	LBL INPUT	PROMPT	X 1 2	RCL 14
GTO 01	CLRG	STO 07	/	RCL 12
RCL 24	CF 00	K=?	.408	*
0.350	CF 01	PROMPT	*	RCL 12
Y 1 X	CF 02	STO 08	STO 11	-
5.778	GPM=?	EDB=?	<u>END</u>	E 1 X
*	PROMPT	PROMPT	LBL NTU	STO 15
RCL 00	STO 00	STO 17	RCL 08	CHS
RCL 01	ID=?	EWB=?	RCL 07	1
/	PROMPT	PROMPT	*	+
.13	STO 35	STO 09	1.085	RCL 15
Y 1 X	NC=?	EWT=?	/	RCL 14
*	PROMPT	PROMPT	RCL 24	*
RCL 06	STO 01	STO 10	/	CHS
.510	FLDF=?	<u>END</u>	STO 12	1
Y 1 X	PROMPT	LBL FAV	RCL 10	+
*	STO 02	RCL 04	RCL 17	/
RCL 10	CFM=?	RCL 05	-	STO 26
3.079 E-4	PROMPT	*	STO 13	RCL 13
*	STO 03	144	FS? 00	*
0.984	FINL=?	/	GTO 03	STO 31
+	PROMPT	STO 16	RCL 03	RCL 17
STO 08	STO 04	RCL 03	1.085	+
LBL 01	FINH=?	/	*	STO 18
K=	PROMPT	1/X	RCL 00	LDB=?
ARCL 08	STO 05	STO 24	/	ARCL 18

AVIEW	LBL APD	*	RCL 35	+
LBL LMD	RCL 24	RCL 25	-1.228	STO 31
RCL 10	1.74914	*	Y 1 X	LBL 02
RCL 17	Y 1 X	STO 25	*	RCL 31
-	RCL 07	LBL 01	STO 34	RCL 10
STO 20	*	APD=	RCL 30	RCL 19
RCL 10	1.0648 E-6	ARCL 25	*	+
RCL 18	*	AVIEW	STO 31	2
-	STO 34	PSE	RCL 01	/
STO 21	RCL 24	CLX	1	.002927
RCL 20	-10000	RCL 05	X = Y?	*
RCL 21	/	1.5	GTO 02	.8244
-	.15	/	LBL HPD	+
RCL 20	+	RCL 07	RCL 00	/
RCL 21	RCL 06	*	.3927	STO 32
/	*	RCL 01	Y 1 X	TWPD=
LN	RCL 24	/	.3815	ARCL 32
ABS	8 E-4	RCL 04	*	AVIEW
STO 22	*	16.2	STO 33	<u>STOP</u>
RCL 08	.23	+	-2.56	
*	-	*	Y 1 X	
RCL 16	+	16.2	RCL 00	
*	RCL 34	-	1.977	
RCL 07	*	0.0833	Y 1 X	
*	STO 25	*	*	
STO 23	RCL 30	STO 30	RCL 01	
BTUH=	X = 0?	LBL WPD	-1.38	
ARCL 23	GTO 01	RCL 11	Y 1 X	
AVIEW	RCL 06	1.772	*	
PSE	.2793	Y 1 X	.12	
XEQ APD	Y 1 X	0.007	*	
END	.8967	*	RCL 31	

TABLA a)

CARACTERISTICAS DEL FLUIDO DEL LADO DE LA TUBERIA

FLUIDO	PESO ESPECIFICO lb/gal	CALOR ESPECIFICO	BTUh por gpm
SOLUCION DE ETILEN-GLICOL 30 %	8.6	0.91	470
SOLUCION DE ETILEN -GLICOL 40 %	8.7	0.86	450
SOLUCION DE ETILEN-GLICOL 50 %	8.8	0.82	433
AGUA	8.33	1.00	500
ACEITE DE PETROLEO,30°API	7.1	0.47	200
ACEITE DE PETROLEO,50°API	6.45	0.51	197

TABLA b

FACTOR K

(K=Btuh por grado MTD por ft²)

gpm por circuito	Velocidad del Aire, fpm							
	400	500	600	700	800	1000	1200	1400
1.0	125	132	140	148	155	160	172	185
1.5	138	155	166	175	182	185	195	208
2.0	144	160	175	185	190	198	205	221
2.5	152	168	181	194	205	210	220	228
3.0	153	172	186	198	215	222	230	239
4.0	156	175	190	204	216	235	238	250

FACTOR DE CORRECCION POR ALETAS POR in.

fpi

6	8	10	12	14
---	---	----	----	----

MULTIPLICAR	0.85	1.0	1.13	1.22	1.31
-------------	------	-----	------	------	------

EVALUACION ECONOMICA

En el diseño de cualquier equipo el factor económico es uno de los de los parámetros de más peso para el análisis final del mismo.

En general podemos mencionar que los costos de secadores varían inversamente con relación al aumento de temperatura del medio de secado y directamente con la capacidad de evaporación.

A continuación se presenta un método de estimación de costos, los datos que aparecen en el mismo fueron proporcionados por compañías relacionadas con el ramo en junio de 1985. Moneda nacional.

CALCULO DE LA INVERSION FIJA.

$$I_f = \text{COSTOS DEL EQUIPO} + \text{COSTOS DE ERECCION}$$

Estimación de acuerdo a los costos de material habilitado en el país.

Costo del túnel: \$9810.95/m² acero al carbón habilitado

Costo de las charolas: \$4000.00/m² malla metálica

Costo de los calentadores: de acuerdo con el tipo y capacidad.

Costo de ventiladores \$39096.0/HP

y motores:

Instrumentación: 1% costo demás equipo

Costo de erección: 15% costo del equipo

COSTOS FIJOS ANUALES.

<u>CARGO</u>	<u>% DE LOS COSTOS DE INSTALACION</u>
Depreciación	8 (8)
Seguridad	1
Mantenimiento	3 - 5
Total	11½ - 13½

COSTOS DE OPERACION ANUALES .

Mano de obra	\$513.28/(m ² /dfa)
Supervisión directa	15% del costo de mano de obra
Servicios:	
a. Agua	No necesaria para operación
b. Combustible	\$6.89/lb (nacional)
c. Electricidad	\$6.0/KW-H
d. Vapor	\$900.0/TON
e. Aire	De los requerimientos de proceso e instrumentos.
Mantenimiento correctivo	3 - 5 % costo de instalación
Control de laboratorio	5 % del costo de mano de obra

Para el secador seleccionado los costos fueron los siguientes:

INVERSION FIJA:

Costo del tunel:	5 491 739.1
Costo de las charolas:	2 165 377.8
Costo del serpentín de vapor:	150 000.0
Costo de ventiladores y motores:	20 000.0
Instrumentación:	78 271.16
Costo de erección:	1 174 067.5

TOTAL: \$ 9 079 454.60

COSTOS FIJOS ANUALES:

Seguridad	44 672.27
Mantenimiento	363 178.18

TOTAL \$ 407 850.45

COSTOS DE OPERACION ANUALES

Mano de obra	553 385.19
Supervisión directa	1 183 307.77

Servicios:

Vapor . . .	741 812.73
-------------	------------

Electricidad	10 887.22
--------------	-----------

Mantenimiento correctivo	363 178.18
--------------------------	------------

Control de laboratorio	27 769.25
------------------------	-----------

TOTAL:	\$ 1 780 340.3
--------	----------------

CONCLUSIONES

El secado es una operación unitaria altamente empírica y de hecho puede decirse que aún no se ha podido encontrar un método de diseño válido para todos los casos y materiales posibles. Es después de haber aplicado durante muchos años esta operación, cuando han podido generarse ciertos métodos y procedimientos basados en consideraciones de tipo teórico que intentan describir adecuadamente el fenómeno.

El algoritmo de cálculo presentado en este trabajo sigue esta tendencia; su desviación con respecto a la evaluación experimental es de alrededor del 13%, lo que permite su utilización para efectuar una estimación de la superficie de contacto necesaria para el secado. Sin embargo, para lograr buenos resultados a escala industrial, deberá siempre complementarse con un estudio a escala planta piloto.

Por otro lado, es importante señalar que el diseño final de un secador industrial debe cubrir aspectos que no han sido presentados en esta tesis. Tales aspectos incluyen: el diseño mecánico-estructural, la especificación de los materiales de construcción, la selección e implementación de componentes eléctricos, y el sistema de instrumentación y control del proceso.

Finalmente se considera que los resultados obtenidos de la aplicación de este método pueden ser una herramienta valiosa para los siguientes fines:

- Determinación del efecto de los diferentes métodos de operación del secador y determinación de las condiciones óptimas para el secador bajo estudio.
- Estimación de los efectos de estos cambios, en la capacidad del secador.
- Evaluación del tamaño relativo y costos de secadores en una selección preliminar.
- Establecimiento de una base para el diseño de nuevos tipos de secadores, cuando los existentes no cumplen con los requisitos.

B I B L I O G R A F I A .

1. BABCOCK & WILCOX
STEAM/ ITS GENERATION AND USE
ED 39, USA 1978
p. 14-2
2. DITTMAN, F.W.
HOW TO CLASSIFY A DRYING PROCESS
CHEMICAL ENGINEERING: 84(2); 1977
3. GONZALEZ, ANGEL M.; VALIENTE, ANTONIO B.
MANUAL DEL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE MASA
FACULTAD DE QUIMICA
U.N.A.M.; 1980
p. 81
4. KERN, D.K.
PROCESS HEAT TRANSFER
NEW YORK, MC. GRAW HILL; 1950
p. 370
5. KLEIN, H.
TROCKENKANALE FÜR DIE BESCHICHTUNG VON
THERMOPLASTISCHEN FEINFOLIEN.
PLASTVERARBEITER 33, JAHRGANG; 1982 Nr. 4
p. 409-411
6. KOCH, D.; SCHOEN, E.
WIRTSCHAFTLICHE ERDGASANWENDUNG IN DER
ZIEGELINDUSTRIE. OPTIMIERTER ENERGIEEISATZ
FÜR TUNNELOFEN UND TROCKENANLAGEN.
SPRECHSAAL, VOL 115, No. 10; 1982
p. 941-946

7. KRAMER, H.R.
BREIBESATZ-TUNNELOFEN FUR SPALTPLATTEN
KERAMISCHE ZEITSCHRIFT; NR. 3; 1976
p. 135

8. LAPPLE, WALTER C.; CLARCK, W.E.
DRYING. DESIGN & COSTS
CHEMICAL ENGINEERING REPORT. NOV. 1965
p. 177-197

9. MASTERS, K.
SPRAY DRYING
IND. ENG CHEM., 50, No. 109; 1969

10. NUSSBAUM, OTTO J.
CALCULATE COUNTERFLOW COIL PERFORMANCE WITH
A PROGRAMABLE CALCULATOR
HEATING PIPING/AIR CONDITIONING. DEC. 1983
p. 49-57

11. PERRY, R.H.; GREEN D.
PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK
6a. ED. Mc GRAW HILL, 1984
p.p. 10-16; 20-19; 3-146

12. PETERS, MAX S.; TIMMERHAUS KLAUS D.
PLANT DESIGN AN ECONOMICS FOR CHEMICAL
ENGINEERS.
3a. ED. MCGRAW HILL, 1980
p. 774

13. RUB F.
TROCKNUNGSANLAGEN FUR KERAMISCHE FORMTEILE
KERAMISCHE ZEITSCHRIFT. 21 JAHRGANG.
NR. 2, 1969
p. 98-101

14. SLOAN, C.E.
DRYING SYSTEMS AND EQUIPMENT
CHEMICAL ENGINEERING: 74(13); 1967
p. 169-173

15. FOUST, A.S.: WENZEL, L.A.
PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS
CIA. EDITORIAL CONTINENTAL
11a. ED. MEXICO: 1978
p. 419-422

16. NONHEBEL, G.M.A.
EL SECADO DE SOLIDOS EN LA INDUSTRIA QUIMICA.
ED. REVERTE; ESPANA:1979
p.p. 9, 164, 131, 5, 309