

//



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**



**HORNO DE SECADO CONTINUO CON CALENTAMIENTO
POR CONVECCION FORZADA**

T E S I S

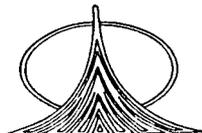
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

I N G E N I E R O Q U Í M I C O

P R E S E N T A

EDGARDO GUILLERMO CASTRO GARCIA

ASESOR : ING. JOSE ANTONIO ZAMORA PLATA



MEXICO, D.F.

OCTUBRE DEL 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/044/02

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: CASTRO GARCIA EDGARDO GUILLERMO

P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente:	Dr. Roberto Mendoza Serna
Vocal:	I.Q. José Antonio Zamora Plata
Secretario:	M. en C. Esteban Minor Pérez
Suplente:	I.Q. Balbina Patricia García Aguilar
Suplente:	I.Q. Cuauhtémoc Lágos Chávez

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., 29 de Abril de 2002

EL JEFE DE LA CARRERA

I.Q. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

AGRADECIMIENTOS

A DIOS NUESTRO SEÑOR,
POR PERMITIRME CULMINAR
UN GRAN ESFUERZO.

A MIS PADRES, POR INICIAR
MI FORMACION PROFESIONAL

A MI ESPOSA Y A MIS DOS HIJOS,
POR ESTAR CONMIGO EN LOS
MOMENTOS DIFICILES.

A MI ASESOR I.Q. JOSE ANTONIO ZAMORA P.
POR SU APOYO PARA LA REALIZACION DE
ESTA TESIS.

A LOS MIEMBROS DE MI JURADO,
POR SU PARTICIPACION PARA EL
ENRIQUECIMIENTO ACADEMICO
DE ESTE TRABAJO.

Dr. ROBERTO MENDOZA SERNA
M. en C. ESTEBAN MINOR PEREZ
I.Q. BALBINA PATRICIA GARCIA AGUILAR
I.Q. CUAUHTEMOC LAGOS CHAVEZ

INDICE

OBJETIVOS	Pag. 1
INTRODUCCIÓN	Pag. 2
PROCEDIMIENTO	Pag. 4

CAPITULO I

Generalidades de los procesos de secado.

1.1	Importancia de la transferencia de calor.	Pag. 5
1.2	Mecanismos de transferencia de calor.	Pag. 6
1.3	Equipos de Secado Industrial.	Pag. 10
1.4	Modelado del equipo.	Pag. 19

CAPITULO II

Criterios de diseño.

2.1	Criterios para la selección del equipo de secado.	Pag. 23
2.2	Aplicación de la psicometría al secado.	Pag. 25
2.3	Temperatura de bulbo húmedo.	Pag. 29
2.4	Velocidad de secado.	Pag. 31
2.5	Curvas de velocidad de secado.	Pag. 40
2.6	Comportamiento general del secado.	Pag. 41
2.7	La importancia de un diseño correcto del Horno de Secado.	Pag. 42

CAPITULO III

Resultados.

3.1	Descripción del equipo.	Pag. 46
3.2	Metodología de cálculo.	Pag. 50
3.3	Análisis de operación de un Horno de Secado Continuo con Calentamiento por Convección Forzada.	Pag. 56

3.4	Cálculo de la velocidad de secado en período constante, en un Horno Continuo con Calentamiento por Convección Forzada.	Pag. 67
3.5	Análisis de resultados.	Pag. 73
	Conclusiones.	Pag. 77
	Bibliografía.	Pag. 79

OBJETIVOS

- Desarrollar los balances de masa y energía, así como los cálculos termodinámicos y de secado de sólidos, para el diseño de un Horno de Secado Continuo por Convección Forzada, implementándolos en una hoja de cálculo.
- Aplicar conceptos sobre transferencia de calor, en el secado de sólidos a nivel industrial.

INTRODUCCION

Secar sólidos significa, en general, eliminar cantidades relativamente pequeñas de agua, o de otro líquido, contenidas en un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido hasta un valor aceptable.

El agua y los demás líquidos pueden retirarse de los sólidos mecánicamente, en prensas o centrifugas o térmicamente, por evaporación. Generalmente es más económico retirar el agua mecánicamente que por medios térmicos, y es conveniente reducir la humedad todo lo posible antes de introducir un material al Horno de Secado. De hecho es la mayoría de las ocasiones, la etapa final de una serie de operaciones para que el producto este listo para el envasado final

El contenido de humedad de una substancia seca varía de un producto a otro. En algunos casos el producto no contiene agua y se dice que esta totalmente seco. Sin embargo, en la mayoría de los casos, es habitual que el producto contenga algo de agua. Por ello, el término secado es relativo y significa solamente que hay una reducción en el contenido de humedad desde un valor inicial hasta otro final.

Con la excepción del secado parcial de un material prensado o la eliminación de agua por adsorción, casi todos los procesos de secado implican la eliminación de agua por evaporación, requiriendo por lo tanto de suministro de calor. Al evaluar la eficacia de un proceso de secado, uno de los criterios más importantes es la eficiente utilización del calor. Hoy día el secado de piezas en el ramo industrial, tiene una aplicación amplia y muy diversa en nuestro país. Es por este motivo, que es importante para el Ingeniero Químico tener conocimiento profundo de los mecanismos de transferencia de calor involucrados en el secado por convección forzada.

El proceso de secado por convección para sólidos es de considerable importancia práctica y económica en todas las industrias. La operación varía mucho según el material a secar, desde unos pocos segundos a algunos días. En gran parte su práctica es más un arte que una ciencia. Por lo tanto puede esperarse que en el futuro los progresos surjan de la cooperación entre "inventores" y científicos dedicados al tema. Las aplicaciones existentes para este tipo de proceso son múltiples, de hecho el uso de este proceso es muy importante en la industria. Los materiales tratados en estas áreas son diversos, es por ello la importancia de tener conocimiento sobre el funcionamiento de este tipo de Hornos.

A continuación se describe de manera sencilla lo que se realiza en este trabajo: Las piezas a secar son moldes de arena, los cuales se sumergen en pintura de alúmina base agua. Una vez impregnadas con la alúmina los moldes son puestos de manera manual, en la banda transportadora del Horno de Secado Continuo. Dicho Horno cuenta con tres zonas de control y una zona de enfriamiento. La velocidad de la banda se puede variar, debido a que cuenta con un motor con control de velocidad, lo cual permite realizar ajustes en la operación del Horno. Cada zona de control cuenta con un quemador de alta velocidad, con la capacidad suficiente para proporcionar un secado adecuado de los moldes. Es importante mencionar que cada zona de control tiene un ventilador llamado de "recirculación de aire caliente", los cuales cumplen precisamente con esa función, además de introducir aire fresco al sistema. Por otra parte, cada quemador recibe el aire primario para la combustión de un solo ventilador con la capacidad suficiente para tal efecto. Además, toda la instrumentación colocada para la automatización y control de cada quemador, llena todos los requisitos y normas de seguridad exigidas en México.

PROCEDIMIENTO

Considerando lo expuesto en los párrafos anteriores, se establece el siguiente procedimiento para el desarrollo de los cálculos:

1. Determinar de manera empírica, la masa y el flujo total de aire necesario, para el secado de los moldes de arena en el Horno.
2. Determinar la capacidad nominal del sistema de combustión para el Horno.
3. Calcular la Velocidad de Secado en periodo constante en el Horno.
4. Determinar el tiempo de secado de los moldes de arena, en el Horno.
5. Calcular la longitud teórica del Horno.
6. Determinar la velocidad de la banda transportadora, del Horno.
7. Comparar y discutir los resultados obtenidos al diseñar un Horno de Secado similar al que actualmente se encuentra en operación en una compañía del ramo automotriz.
8. Dejar un antecedente sobre cálculos de Psicometría y Velocidad de Secado en Período Constante, para un Horno de Secado Continuo, a los alumnos de la carrera de Ingeniería Química.

Todos los cálculos se efectúan para llegar a la determinación de la velocidad de secado en periodo constante, la longitud del equipo, el tiempo de residencia del material en el Horno, así como la velocidad de la banda. Lo anterior, permitirá manejar las condiciones de operación del Horno, con lo cual se podrán establecer los límites de operación del mismo.

CAPITULO I

GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE SECADO

La transferencia de calor se define como la transmisión de energía de una región a otra, siendo resultado de la diferencia de temperatura existente entre ellas. Debido a que las diferencias de temperatura existen sobre todo el universo, los fenómenos del flujo de calor son tan universales, como aquellos asociados con la atracción gravitacional. Por lo tanto, a diferencia de la gravedad, el flujo de calor no está regido por una sola relación, sino más bien por una combinación de varias leyes independientes de la física.

1.1. Importancia de la transferencia de calor.

El conocimiento sobre transferencia de calor admite tres modos distintos de transmisión de calor, los cuales son: Conducción, Radiación y Convección. Estrictamente hablando, únicamente la conducción y la radiación deberían ser clasificadas como procesos de transferencia de calor, debido a que solamente estos dos mecanismos dependen para su operación, sólo de la existencia de una diferencia de temperatura. El último modo de transferencia, es decir, la convección, no cumple estrictamente con la definición de transferencia de calor, porque para su operación también depende del transporte mecánico de masa. Pero, puesto que en la convección también se efectúa transmisión de energía desde regiones de temperatura más alta a regiones de temperatura mas baja, ha sido aceptado en forma común el término de "transferencia de calor por convección".

Por tanto, todavía debería enfatizarse que en muchas de las situaciones que se presentan en la naturaleza, el calor fluye no por uno, sino por varios de estos mecanismos que actúan en forma simultánea. Es particularmente importante en ingeniería conocer la intervención de los diferentes modos de transferencia del calor, en virtud de que en la práctica, cuando uno de los

mecanismos domina en gran parte, se obtienen soluciones útiles aproximadas, despreciando todos los mecanismos, excepto el que domina en el proceso. Sin embargo, un cambio de condiciones externas exigirá que uno o ambos de los mecanismos previamente despreciados sean tomados en cuenta.

Por último, se aclara que cuando dos objetos que están a temperaturas diferentes, se ponen en contacto térmico, el calor fluye desde el objeto de temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja. El flujo neto se produce siempre en el sentido de la temperatura decreciente.

1.2. Mecanismos de transferencia de calor.

1.2.1. Conducción.- La conducción es un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de alta temperatura a una región de baja temperatura dentro de un medio (sólido, líquido o gaseoso) o entre medios diferentes en contacto físico directo. En el flujo de calor por conducción, la energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas.

1.2.2. Radiación.- La radiación es un proceso por el cual fluye calor desde un cuerpo de alta temperatura a un cuerpo de baja temperatura, cuando éstos están separados por un espacio que incluso puede ser el vacío. El término "radiación" es generalmente aplicado a todas las clases de fenómenos de ondas electromagnéticas, pero en transferencia de calor únicamente son de interés los fenómenos que son resultado de la temperatura y por medio de los cuales se establece un transporte de energía a través de un medio transparente o a través del espacio. La energía transmitida en esta forma recibe el nombre de calor radiante.

1.2.3. Convección.- La convección es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de masa. La convección tiene gran importancia como mecanismo de

transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o un gas.

La transferencia de energía por convección, desde una superficie cuya temperatura es superior a la del fluido que lo rodea, se realiza en varias etapas. Primero, el calor fluirá por conducción desde la superficie hacia las partículas adyacentes al fluido. La energía así transferida servirá para incrementar la temperatura y la energía interna de esas partículas del fluido. Entonces, las partículas del fluido se moverán hacia una región del fluido con temperatura más baja, donde se mezclarán y transferirán una parte de su energía a otras partículas del fluido. El flujo, en este caso, es de fluido y de energía. Realmente la energía es almacenada en las partículas del fluido y transportada como resultado del movimiento de masa. Para su operación este mecanismo no depende únicamente de la diferencia de temperatura y, por lo tanto, no está estrictamente de acuerdo con la definición de transferencia de calor. Sin embargo, el efecto neto es un transporte de energía y, puesto que éste ocurre en la dirección de un gradiente de temperatura, está clasificado como un modo de transferencia de calor y conocido como flujo de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se clasifica, de acuerdo con la forma de inducir el flujo, en convección libre y convección forzada. Cuando el movimiento de mezclado tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causado por gradientes de temperatura, se habla de convección natural o convección libre. Cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, tal como una agitador o un ventilador, el proceso se conoce como convección forzada.

La eficiencia de la transferencia de calor por convección depende básicamente del movimiento de mezclado del fluido. Como consecuencia, un estudio de la transferencia de calor por convección se basa en el conocimiento de las características del flujo del fluido.

En la solución de problemas de transferencia de calor, es necesario, además de reconocer los modos de la transferencia de calor que juegan un papel importante en el proceso, determinar si ese proceso es, o no, estable. En el período de velocidad constante corresponde al caso en que la superficie del sólido está mojada con el líquido. En este caso, la velocidad de secado está totalmente controlada por las condiciones de secado, que, en el caso de convección forzada, son simplemente la velocidad, temperatura y humedad del aire de secado. Por lo tanto, si éstas son constantes, la velocidad de secado es constante. Entonces cuando la rapidez del flujo de calor en un sistema no varía con el tiempo (es decir, cuando es constante), la temperatura de cualquier punto no cambia y prevalecen condiciones del estado estable. Bajo las condiciones del estado estable, la rapidez del flujo de calor en cualquier punto del sistema debe ser igual a la rapidez con la que entra dicho flujo y no puede tener lugar ningún cambio de energía interna. La mayoría de los problemas de transferencia de calor en la ingeniería están relacionados con sistemas en estado estable. Ejemplos típicos de estos sistemas son: el flujo de calor procedente de los productos de la combustión hacia el agua en los tubos de una caldera, el enfriamiento de una lámpara de luz eléctrica por la atmósfera circundante, o la transferencia de calor de un fluido caliente a otro frío en un intercambiador de calor.

El flujo de calor en un sistema es transitorio o inestable, cuando las temperaturas de varios puntos del sistema cambian con el tiempo. Puesto que un cambio de la temperatura indica un cambio de la energía interna, se concluye que una parte de la energía se almacena y la otra constituye un flujo de calor inestable. Los problemas de flujo de calor en estado inestable, son más complejos que aquellos en estado estable y con frecuencia pueden resolverse únicamente por métodos aproximados. Los problemas de flujo de calor en estado inestable, se presentan durante el calentamiento de hornos, calderas y turbinas o en el tratamiento térmico y en la eliminación de esfuerzos de los metales fundidos.

Un caso especial de flujo de calor en estado inestable se presenta cuando

un sistema está sujeto a las variaciones cíclicas de la temperatura de sus alrededores. En tales problemas, la temperatura de un punto particular del sistema retorna periódicamente al mismo valor; también la rapidez del flujo de calor y la rapidez de almacenamiento de energía efectúan variaciones periódicas. Los problemas de este tipo se clasifican como periódicos o de transferencia de calor en estado semiestable. Entre los ejemplos típicos de este tipo de problemas, se pueden mencionar: la variación de temperatura de un edificio durante un período cualquiera de veinticuatro horas o el flujo de calor a través de las paredes de un cilindro de una maquina en movimiento, cuando la temperatura de los gases en el interior del cilindro cambia periódicamente

Hay que resaltar, que el modo de transferencia de calor que predominará en el proceso que se establece en este trabajo, es el de **Convección Forzada**. Lo anterior, se debe a que la masa de aire caliente, es transportada por medio de un dispositivo mecánico, es decir, por medio de un ventilador. Además, de que por el diseño del secador, los otros modos de transferencia de calor, se vuelven casi despreciables. Por tal motivo, los cálculos relacionados a la velocidad de secado y demás variables, se harán por este mecanismo.

1.2.4. Transferencia simultánea de calor y masa.- En todos los casos que relacionan a la transferencia de masa, necesariamente debe transmitirse también calor. Cuando se transfiere un componente de una fase gaseosa a una solución en fase líquida, se desprende el calor latente asociado con la condensación. Cuando se transfiere un componente de una solución en un disolvente a otra solución en otro, como en la extracción líquido - líquido, se desprende la diferencia entre los calores de disolución del soluto en los dos disolventes. Se presentan efectos caloríficos similares en destilación, adsorción, lixiviación, secado, etc.

En cada caso, la temperatura interfacial se ajustará por si misma, de manera que a estado estable, la velocidad de transferencia de calor establecerá

un equilibrio con la velocidad equivalente de transferencia de calor asociada con la transferencia de masa. En operaciones en donde la transferencia de masa se lleva a cabo por contradifusión equimolar, como en la destilación, o en operaciones donde los efectos del calor latente son pequeños, como en la extracción líquido – líquido, absorción gaseosa en soluciones diluidas y lixiviación, la transferencia de calor tiene menor importancia como mecanismo limitante de la velocidad. En otros, en especial donde existe una transferencia neta de masa desde la fase gaseosa a una fase condensada o viceversa, la velocidad de transferencia de calor es importante.

En estos casos, limita de manera significativa la velocidad a la que puede transferirse la masa. "Aun en otras operaciones tales como ebullición, condensación, evaporación y cristalización, las transferencias de masa y calor ocurren de manera simultanea en grandes cantidades, pero las velocidades a las que se presenta la transferencia simultánea de masa y calor puede determinarse considerando tan sólo la velocidad de transferencia de calor desde una fuente externa" (ver "Principios de Operaciones Unitarias" Autor: Alan S. Foust).

1.3. Equipos de Secado Industrial

En este trabajo, se consideran solamente los equipos de secado más importantes en el ámbito industrial. Existen varias maneras de clasificar los equipos de secado. Los más útiles se clasifican por el método de transmisión de calor a los sólidos húmedos o por las características y las propiedades físicas del material húmedo. La primera forma de clasificación revela las diferencias en el diseño y el funcionamiento del secado, la segunda es más útil para la selección de entre un grupo de secadores que se someten a un análisis en relación con un problema de secado específico.

A continuación se da una clasificación de los equipos de secado más comunes, tal clasificación los ubica principalmente en directos o indirectos.

1.3.1. Secadores Directos.

La transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado es arrastrado por los gases calientes. Los secadores directos se llaman también por convección.

A su vez, los secadores directos se clasifican en Continuos y por Lotes.

1.3.1.1 Secadores Directos Continuos.

La operación es continua, es decir, sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda. Como es notorio, cualquier secador continuo puede funcionar en forma de lotes, claro si el sistema y/o el proceso lo permiten.

También, existen varios tipos de equipos de secado directos continuos. A continuación se describen:

Secadores continuos de bandejas, los hay de bandejas metálicas continuas, de bandejas vibratorias que emplean gases calientes o los turbosecadores verticales.

Secadores continuos de material dosificado en una capa. Este tipo de secador hace pasar por el secador una capa o lámina continua de material, ya sea como festones o en una lámina tensa y distendida sobre una malla con clavijas.

Secadores de transportador neumático, en este tipo de equipos el secado se realiza con frecuencia en combinación con la trituración. El material se transporta dentro de gases a alta temperatura y velocidades elevadas hasta un colector de ciclón, figura 1.

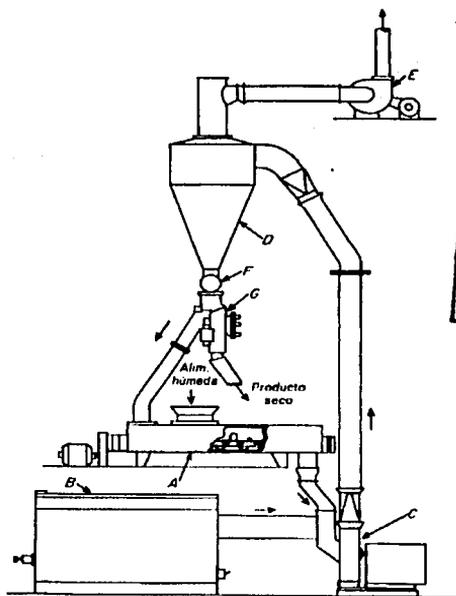


Fig. 1 Secador Neumático

Secadores rotatorios, en este secador el material se transporta y rocía dentro de un cilindro rotatorio por el que circulan gases calientes, a contra flujo ó en el sentido de producción, figura 2.

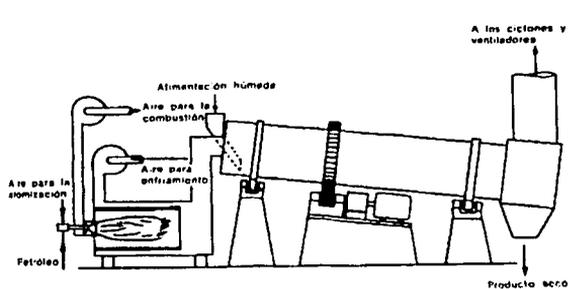


Fig. 2 Secador Rotatorio

Secadores por aspersión, la alimentación de este secador debe atomizarse, ya sea con un disco centrifugo o una boquilla.

Secadores de circulación directa, en donde el material se mantiene en un tamiz de transporte continuo, mientras se sopla aire caliente sobre él, figura 3.

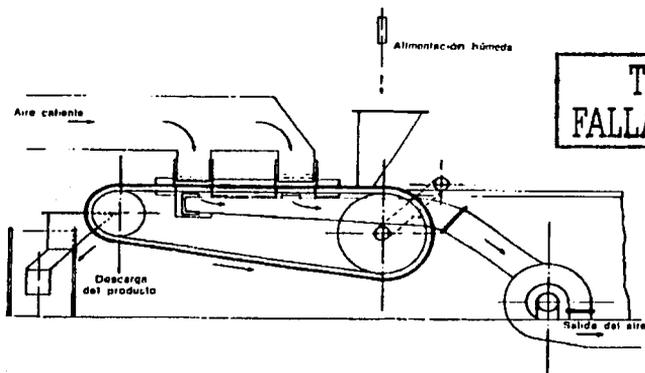


Fig. 3 Secador de Tamiz horizontal

Secadores de túnel, aquí el material es colocado en carretillas o banda, la cual se desplaza a través del túnel en contacto con los gases calientes.

Lechos fluidos, en este principio los sólidos se fluidifican en un tanque estacionario, También pueden tener bobinas de calor indirecto.

Secador Continuo con Banda Transportadora, en este equipo el material húmedo se coloca en un extremo del Horno y sale por el otro extremo ya seco, figura 4.

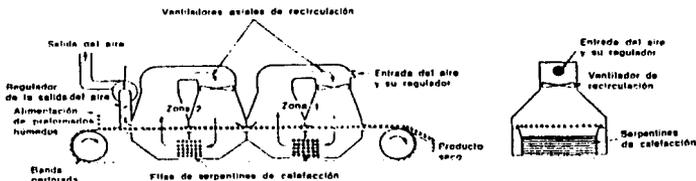


Fig. 4 Secador Continuo con Banda Transportadora

1.3.1.2. Secadores directos por lotes.

Los secadores son diseñados para operar con un tamaño específico de carga, es decir que el volumen o peso de la alimentación húmeda siempre esta ya predeterminada, por consecuencia, también el tiempo de residencia del material húmedo en el secador esta especificado.

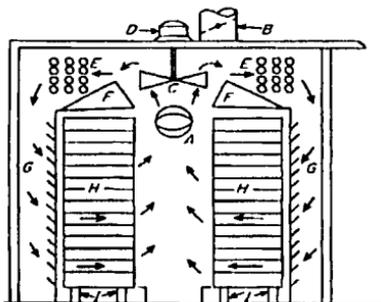
Los tipos de secadores directos por lotes son:

Secadores por lotes de circulación directa, en estos equipos el material se coloca en bandejas con base de tamiz a través de los cuales se sopla aire.

Secadores de bandejas y compartimientos, aquí la alimentación se coloca

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

en bandejas que pueden o no montarse en carretillas removibles. El aire se sopla sobre el material contenido en las bandejas, figura 5.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5 Secador de Bandejas

Secadores de lechos fluidos, el principio de este equipo es fluidificar los sólidos en un carro estacionario sobre el cual va montado un filtro de polvo.

1.3.2. Secadores indirectos.

En estos equipos el calor se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

1.3.2.1. Secadores indirectos continuos.

La operación de estos secadores se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador, colocándolo en contacto con las superficies calientes.

Los diferentes tipos se describen a continuación:

Secadores de cilindro para hojas continuas, como papel, celofán y piezas textiles. Por lo regular, los cilindros se calientan por vapor y son rotatorios.

Secadores de tambor, este tipo de secadores se pueden calentar con vapor o agua caliente, figura 6.

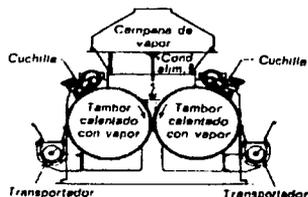


Fig. 6 Secador de Doble Tambor

Secadores de transportador de tornillo, regularmente estos equipos son continuos, sin embargo, pueden funcionar al vacío. Con estos equipos es posible recuperar disolventes durante el secado, figura 7.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

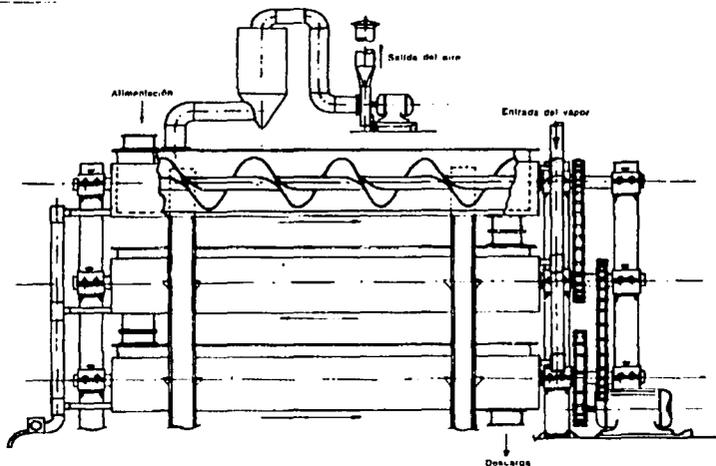


Fig. 7 Secador de Tornillo

Secadores rotatorios de tubo de vapor, estos secadores pueden utilizar vapor o agua caliente. Es posible que operen con una ligera presión negativa, lo anterior permite recuperar disolvente durante el secado, si así se requiere.

Tipos especiales, están implícitos secadores con bandas de tejido continuas que se mueven en contacto estrecho con un plato calentado al vapor. El material que se va a secar reposa sobre la banda y recibe el calor por contacto.

1.3.2.2. Secadores indirectos por lotes.

En general, los secadores indirectos por lotes se adaptan muy bien a operaciones al vacío. Se subdividen en tipos agitados y no agitados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Estos pueden operar atmosféricamente o al vacío, y manejan una producción pequeña de casi cualquier forma de sólidos húmedos. Es decir, líquidos, lechadas, pastas o sólidos granulares.

Secadores por congelación, En estos secadores el material se congela antes de secarse. A continuación se efectúa el secado en ese estado, al alto vacío.

Secadores rotatorios al vacío, aquí el material se agita bajo una cubierta horizontal y estacionaria y no siempre es necesario aplicar vacío. Además el agitador puede calentarse con vapor, así como también la cubierta.

Secadores de bandejas al vacío, en estos secadores el calentamiento se realiza por contacto con parrillas calentadas con vapor o agua caliente, sobre las cuales se coloca el material. Se debe hacer notar que aquí no interviene la agitación, figura 8.

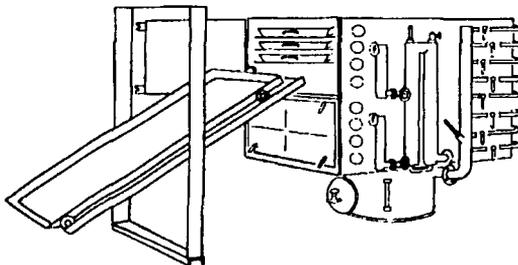


Fig. 8 Secador de Bandejas al Vacío

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.4. Modelado del equipo.

Parámetros que afectan al diseño del Horno de Secado y al comportamiento de los sólidos en el mismo.

Los ingenieros químicos encargados de elegir una instalación de secado o de diseñar una planta especial que reúna condiciones no probadas anteriormente, deben tener en cuenta los efectos de las múltiples variables para lograr el diseño de una planta de secado capaz de dar un producto de propiedades rigidamente especificadas. La importancia de dichas variables no es la misma para cada problema. Muchas de ellas interactúan durante todo el proceso; algunas durante el período inicial de velocidad constante y otras durante una o más etapas del periodo de velocidad decreciente. Para el estudio del secado de materiales complejos en equipos pequeños, puede resultar necesario considerar otros factores.

La lista de las variables que afectan al secado se describe a continuación:

Variables relacionadas a la Transferencia de calor

- 1.- Transferencia de calor desde el medio calefactor a la superficie líquida.
- 2.- Transferencia de calor en la película de líquido adherida al sólido.
- 3.- Transferencia de calor directa del sólido al líquido.
- 4.- Transferencia de calor del sólido al líquido a través de la película superficial y dentro de los intersticios y poros de la masa sólida.
- 5.- Transferencia de calor desde el medio calefactor a la zona de sólido seco.
- 6.- Conductividad térmica del líquido.
- 7.- Conductividad térmica del líquido húmedo.
- 8.- Conductividad térmica del sólido húmedo.
- 9.- Conductividad térmica de la zona cercana al sólido seco.
- 10.- Calor latente del líquido.
- 11.- Calor de hidratación, cuando se elimina agua combinada al finalizar el proceso de secado.

- 12.- Relación entre la temperatura y la licuefacción del material húmedo; algunos secadores se alimentan con material fundido antes que el líquido haya sido evaporado.
- 13.- Efectos de electrolitos presentes en el líquido sobre las características de secado del material, por ejemplo arcillas.

Variables relacionadas a la atmósfera de secado

- 14.- Presión y temperatura de la atmósfera de secado.
- 15.- Composición de la atmósfera de secado, incluyendo cambios en la presión parcial del líquido a través del proceso de secado.
- 16.- Velocidad relativa del líquido de la atmósfera de secado respecto de la superficie a secar.
- 17.- Presión de vapor efectiva del líquido, considerando los cambios en la elevación de la temperatura de ebullición durante el proceso de secado, por ejemplo el hidróxido de sodio.
- 18.- Grado de saturación de la atmósfera de secado dentro del lecho sólido.

Variables relacionadas con las propiedades físicas generales del sistema sólido - líquido.

- 19.- Tensión interfacial entre el sólido y el líquido.
- 20.- Espesor de la película adherida al sólido.
- 21.- Relación entre el área superficial y el volumen de líquido contenido en los poros.
- 22.- Coeficiente de difusión de vapor entre los poros.
- 23.- Succión capilar de líquidos dentro de los poros.
- 24.- Gradientes de concentración de líquidos en los poros.
- 25.- Presencia de materiales fibrosos o cavidades en el seno del sólido.
- 26.- Tamaño de la molécula de líquido; importante en algunos líquidos orgánicos.
- 27.- Contenido máximo de impurezas solubles que pueden tolerarse en el líquido residual presente en el material húmedo, por ejemplo, torta de filtro lavada deficientemente; es importante cuando las impurezas aglutinan las partículas

del material seco.

Variables relacionadas a las propiedades del sólido.

- 28.- Tamaño de las partículas.
- 29.- Area efectiva del sólido.
- 30.- Porosidad, es decir, tamaño y longitud de los poros y la extensión en que están ramificados.
- 31.- Dureza superficial de barros al secar, cuando producen una superficie prácticamente no porosa, y la relación de este efecto con la velocidad de secado.
- 32.- Formación de tortas durante el secado de polvos; resistencia de los aglomerados.
- 33.- Solubilidad del sólido en el líquido cuando el líquido es parte de la estructura del sólido húmedo.
- 34.- Resistencia del material seco a la fricción.
- 35.- Máximo contenido de líquido tolerable en el producto seco, por ejemplo para prevenir la formación de tortas en depósito, en condiciones dadas o para asegurar un libre corrimiento de polvo cuando es transportado a granel en tanques.

Un análisis de las variables anotadas arriba muestran la imposibilidad de formular alguna predicción real acerca del rendimiento de un Horno de Secado a partir de datos físicos del material, obtenidos con un sistema similar que funcione en alguna industria química. Puede hacerse una predicción precisa si se trata de cuarzo limpio y húmedo, pero de inmediato aparecerán factores desconocidos si pretendemos aplicar los datos a arena sucia. Es por lo tanto obvio, que si bien pueden desarrollarse fórmulas empíricas para relacionar los numerosos parámetros, a menudo esto puede ser más largo y costoso que la obtención de las características de secado de un material en el laboratorio y en una planta piloto, y determinar el tiempo probable en dos o tres tipos de secadores cuidadosamente seleccionados por un especialista en secado.

Lo anterior no significa que la investigación no deba tender a una mejor comprensión del mecanismo de secado y de las interacciones que ocurren durante el mismo. Dicha investigación podría ser útil para reducir los costos operativos o para mejorar el producto.

CAPITULO II

CRITERIOS DE DISEÑO.

2.1 - Criterios para la selección del equipo de secado.

- 1.- Al diseñar un equipo de secado, es muy importante tomar en cuenta los parámetros que permitan especificar adecuadamente el tamaño del equipo. Estos parámetros se determinan a través de criterios de diseño, los cuales nos permiten realizar la selección de una manera adecuada.
- 2.- También puede seleccionarse el equipo de secado, apoyándonos en los datos de costo y funcionamiento. Partiendo de esta evaluación, los Hornos de Secado que parezcan ser menos económicos o poco apropiados desde el punto de vista de su funcionamiento, no se deberán someter a consideraciones posteriores.
- 3.- Las pruebas de secado se deben llevar a cabo en los Hornos de Secado que aún estén en estudio. Dichas pruebas determinarán las condiciones óptimas de operación y las características del producto, y constituirán la base para obtener información más concreta de las características del equipo en cuestión.
- 4.- Una vez que se hayan recopilado los resultados de las pruebas de secado y los informes concretos de los equipos, se hará la selección final del Horno de Secado más apropiado para el caso de que se trate.

Los factores más importantes que se deben tomar en cuenta para la selección preliminar de un Horno de Secado contemplan los siguientes puntos:

1.- Propiedades del material que se va a secar

- a) Características físicas en mojado
- b) Características físicas en seco
- c) Corrosividad
- d) Toxicidad

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

- e) Inflamabilidad
- f) Tamaño de la partícula
- g) Abrasividad

II.- Características de secado del material

- a) Tipo de humedad (ocluida, no ocluida, o ambas)
- b) Contenido inicial de humedad
- c) Contenido final de humedad (máxima)

III.- Circulación del material que entra y sale del Horno de Secado

- a) Cantidad que se va a tratar por hora
- b) Tiempo de operación continua por día, mes, etc.
- c) Proceso anterior al secado
- d) Proceso siguiente al secado

IV.- Cualidades del producto

- a) Contracción
- b) Contaminación
- c) Uniformidad del contenido final de humedad
- d) Descomposición del producto
- e) Secado excesivo
- f) Estado de subdivisión
- g) Temperatura del producto

V.- Problemas de recuperación

- a) Recuperación de polvos (si existen)
- b) Recuperación de disolvente (si existe)

VI.- Instalaciones disponibles en el sitio de ubicación del equipo

- a) Espacio
- b) Temperatura, humedad y limpieza del aire
- c) Combustibles disponibles
- d) Energía eléctrica disponible
- e) Ruido, vibración, polvos o pérdidas de calor permisibles
- f) Fuente de la alimentación mojada
- g) Salida de gases húmedos

Uno de los aspectos de primordial importancia es la naturaleza física del material que se va a manejar. Para nuestro caso particular, como ya sabemos se trata de moldes de arena impregnados de pintura de alúmina, por lo que se

requiere un tipo de Horno de Secado capaz de permitir una alimentación y descarga del material sin problemas.

Después de hacer la selección preliminar de las clases adecuadas de Hornos de Secado, debe realizarse una evaluación minuciosa del tamaño y el costo para eliminar los que sean evidentemente poco económicos. La información de esta evaluación se obtiene del material presentado para estudiar los diferentes tipos de Hornos de Secado. Cuando los datos son inadecuados, se acostumbra solicitar a los fabricantes de equipos informaciones preliminares sobre el costo y el resultado del funcionamiento de los mismos. Al comparar éstos, se deben evaluar con sumo cuidado todos los factores antes mencionados que afectan el desempeño del Horno de Secado. También se deben analizar con sumo cuidado la posibilidad de suprimir o simplificar pasos del procesamiento que anteceden o siguen al proceso de secado, como filtración, trituración o transporte.

2.2.- Aplicación de la psicometría al secado.

En cualquier proceso de secado, suponiendo un suministro adecuado de calor, la temperatura y la velocidad a las cuales se produce la vaporización del líquido dependen de la concentración de vapor en la atmósfera circundante. En el secado al vacío u otros procesos que implican atmósferas con 100% de vapor, la temperatura de vaporización del líquido será igual o mayor que la temperatura de saturación del mismo, a la presión del sistema. (Cuando está presente líquido libre o una superficie mojada, el secado ocurre a la temperatura de saturación, al igual que el agua a una atmósfera de presión absoluta se vaporiza en una atmósfera de vapor al 100%, a 100 °C).

Por otro lado, cuando el vapor desprendido se purga del medio del Horno de Secado utilizando un segundo gas (inerte), la temperatura a la que se produce la vaporización dependerá de la concentración del vapor en el gas que lo rodea. En efecto, el líquido se debe calentar a una temperatura a la que su presión de vapor sea igual o exceda a la presión parcial de vapor en el gas de purga. En la

situación opuesta se producirá una condensación.

En casi todas las operaciones de secado, el agua es el líquido evaporado y el aire es el gas de purga que se emplea comúnmente. Para fines de secado, se muestra en seguida la carta psicométrica de uso común, figura 9.

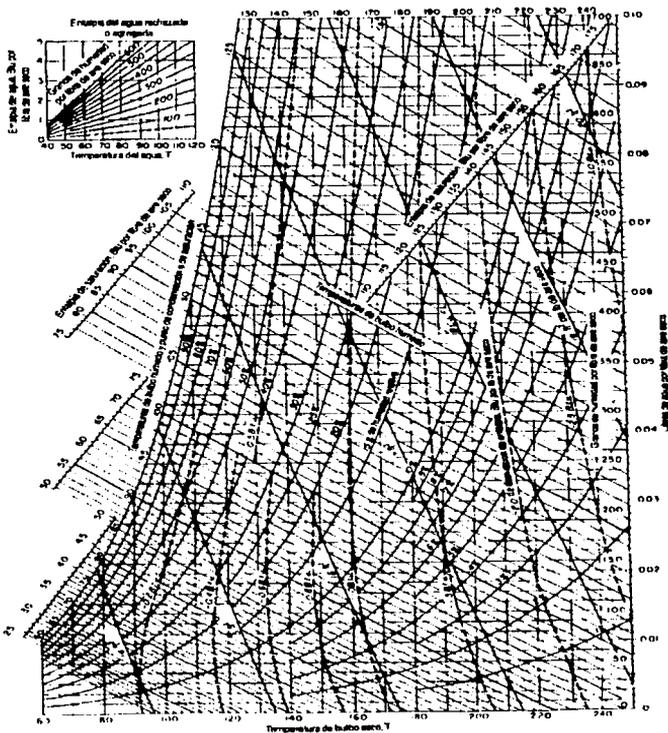


Fig. 9 Carta Psicométrica a 760 mm Hg.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

A continuación se define los parámetros involucrados en la curva.

- I.- La línea de saturación da el peso máximo de vapor de agua que puede llevar 1 lb de aire seco a la temperatura de intersección, a la humedad de saturación. La presión parcial del agua en el aire es igual que la presión de agua a dicha temperatura. (La presión de vapor de agua se representa gráficamente como una función de la temperatura, debajo de la abscisa). La humedad de saturación se define como la presión de vapor del agua entre la diferencia de la presión absoluta y la presión de vapor del agua, todo lo anterior multiplicado por la razón de los pesos moleculares del agua y el aire (18/28.9).

Las ecuaciones siguientes aparecen en el "Manual de Ingeniero Químico" tomo V.

$$\text{Es decir: } H_s = p_s / (P - p_s) * (18 / 28.9)$$

- II.- Las curvas de porcentaje de presión de vapor son las mismas que las de porcentaje de humedad relativa, y se define por el producto de la presión parcial de vapor de agua en el aire y el número 100, entre la presión de vapor del agua a la misma temperatura, y se expresa como:

$$H_r = 100 * p / p_s$$

- III.- El porcentaje de humedad absoluta se define como el producto de la humedad del aire por 100, entre la humedad de saturación. (Las unidades de las humedades absoluta y de saturación están expresadas en lb de agua / lb de aire seco).

$$H_a = (100 * w_a) / w_s$$

- IV.- Los volúmenes húmedos se identifican por medio de las curvas punteadas

denominadas "pies cúbicos de aire húmedo por libra de aire seco". Los volúmenes se representan gráficamente como funciones de la humedad absoluta y la temperatura. La diferencia entre el volumen específico de aire seco y el volumen de aire húmedo a una temperatura determinada, es el volumen de vapor de agua.

V.- Los datos de Entalpía se estipulan en la base de 1 lb de agua = "Btu por libra de agua evaporada", y no como una libra de aire seco. La base es Entalpía 0 en aire seco a 0 °F.

VI.- En está gráfica no aparecen líneas para los calores húmedos. Estos se pueden calcular por el producto de la humedad absoluta y 0.446, más 0.24.

$$\text{Entonces : } C_s = 0.24 + (0.446 * H)$$

Donde : 0.24 = Calor específico del aire seco Btu / lb °F

0.466 = Calor específico del vapor de agua Btu / lb °F

VII.- El volumen específico del aire se obtiene de la suma de 460 más la temperatura del aire multiplicado por la suma de 0.662 más la humedad de saturación, todo lo anterior se debe multiplicar por 0.0405.

El volumen específico de aire es:

$$V_s = 0.0405 * (460 + t) * (0.622 + H_s)$$

Donde: t = Temperatura del aire °F

H_s = Humedad de saturación, en lb / lb de aire seco

VIII.- Las líneas de temperatura de bulbo húmedo representan también las líneas de saturación adiabática sólo para el aire y el vapor de agua. Estas líneas expresan la relación entre la temperatura y la humedad del aire que pasa por

un secador continuo que funciona en forma adiabática.

La relación anterior se expresa:

$$H_s - H = C_s / \lambda^* (t - t_s)$$

Donde: H_s = Humedad de saturación adiabática

t_s = Temperatura de saturación adiabática

λ = Calor latente de evaporación a T_s

H = Humedad del aire

t = Temperatura del aire

2.3.- Temperatura de Bulbo Húmedo.

La temperatura de bulbo húmedo se establece gracias al equilibrio dinámico entre la transmisión de calor y la transferencia de masa, cuando el líquido se evapora de una masa pequeña, por ejemplo, el bulbo húmedo de un termómetro, hacia una masa de gas muy grande, de tal forma que está última no sufre ningún cambio de temperatura o humedad.

La temperatura de bulbo húmedo, es la temperatura estacionaria de no equilibrio que alcanza una pequeña masa de líquido sumergida en condiciones adiabáticas en una corriente continua de gas. La masa de líquido es tan pequeña en comparación con la masa de gas que las variaciones que se producen en las propiedades del gas son despreciables y el efecto del proceso se manifiesta solamente en el líquido. Generalmente, el mecanismo se representa de la siguiente manera, se trata de un termómetro u otro aparato equivalente de medida de la temperatura, tal como un termopar, se recubre con una muselina saturada de líquido y se sumerge en una corriente de gas de una determinada temperatura "T" y una humedad "H", Suponemos que la temperatura inicial del líquido es aproximadamente igual a la del gas, Como el gas no está saturado, evapora líquido, y, al ser el proceso adiabático, el calor latente es suministrado inicialmente por el enfriamiento del líquido. Una vez que la temperatura del líquido es menor

que la del gas, se produce una transmisión de calor sensible desde éste hacia el líquido. Se alcanza finalmente un estado estacionario, para una determinada temperatura del líquido, de forma que el calor que se necesita para evaporar el líquido y calentar el vapor hasta la temperatura del gas se equilibra exactamente por el calor sensible que se transmite desde el gas al líquido. Esta temperatura que se alcanza en el estado estacionario se representa por T_w y recibe el nombre de temperatura de bulbo húmedo. La temperatura de bulbo húmedo es una función de "T" y "H", para medir con precisión la temperatura húmeda es preciso tomar tres consideraciones:

- I La muselina debe de estar totalmente mojada de forma que no existan áreas secas de la misma en contacto con el gas.
- II La velocidad del aire tiene que ser suficientemente grande para asegurar que la velocidad de flujo de calor por radiación, desde los alrededores más calientes hacia el bulbo, sea despreciable en comparación con la velocidad de flujo de calor sensible por conducción y convección desde el gas hacia el bulbo del termómetro.
- III Si hay que suministrar líquido de reposición al bulbo, la temperatura del mismo ha de ser igual a la temperatura de bulbo húmedo. Cuando se toman estas precauciones, la temperatura de bulbo húmedo es independiente de la velocidad del gas en un amplio intervalo de velocidades de flujo.

La temperatura de bulbo húmedo recuerda en cierto modo a la temperatura de saturación adiabática T_s . Además, para las mezclas aire – agua ambas temperaturas son aproximadamente iguales. Sin embargo, esto es solamente una coincidencia y no se cumple para las mezclas distintas de aire – agua. En realidad, la temperatura de bulbo húmedo difiere fundamentalmente de la temperatura de saturación adiabática. En este último caso la temperatura y la humedad del gas varían durante el proceso, y el punto final del proceso corresponde a un verdadero equilibrio en vez de a un estado dinámico

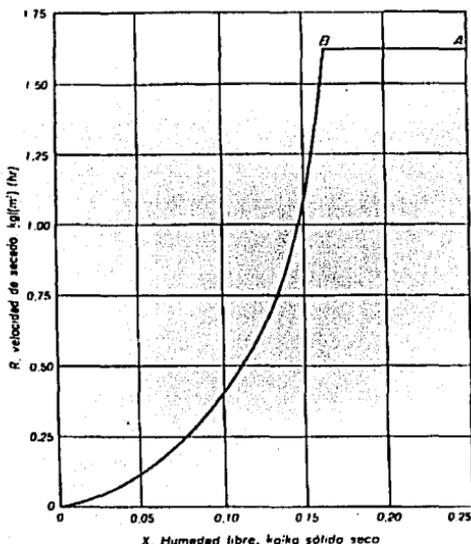
estacionario.

Generalmente se utiliza un termómetro desnudo para medir la temperatura del gas T, que recibe el nombre de temperatura del termómetro seco o simplemente temperatura seca.

2.4.- Velocidad de secado.

La capacidad de un Horno de Secado depende tanto de la velocidad de transmisión de calor como de la velocidad de transferencia de materia. Puesto que debe evaporarse agua, hay que suministrar el calor de vaporización a la zona de evaporación que puede estar en, o cerca de, la superficie del sólido, o bien dentro de él dependiendo del tipo de material y de las condiciones del proceso (esto último no es tema de este trabajo). La humedad debe fluir a través del sólido como líquido o vapor, y como vapor desde la superficie del sólido hasta la corriente de gas o de aire.

Cuando un sólido se seca experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo. Lo anterior se refleja casi siempre en una gráfica, la cual se obtiene de manera experimental, esta curva representa el caso general en que los sólidos mojados pierden humedad primero por evaporación debido a una superficie saturada del sólido, a lo cual sigue un período de evaporación de la superficie saturada que tiene un área gradualmente decreciente y, por último, cuando el agua se evapora en el interior del sólido (este último caso no es tema de este trabajo). Enseguida, se muestra una gráfica típica de secado en periodos constante y decreciente, figura 10.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 10 Curva de secado en periodo constante y decreciente

En algunos casos la curva de secado presenta varias etapas con respecto al tiempo, es decir que tienen durante el proceso distintos rangos de temperatura. Por ejemplos algunos procesos requieren una elevación de temperatura constante hasta llegar a una temperatura predeterminada, una vez alcanzada la temperatura anterior está se mantendrá así por un tiempo también establecido con anterioridad, finalmente la temperatura se baja de manera gradual y constante, todo lo anterior conlleva implícito un tiempo de proceso predeterminado.

Generalmente los periodos de tiempo mencionados se asocian con el termino "velocidad de secado", lo cual quiere decir que los periodos de tiempo de secado pueden ser mayores o menores para cada proceso en particular,

dependiendo de las características del material a secar. Finalmente mencionare que las velocidades de secado se definen como:

- 1.- Velocidad de secado creciente (calentamiento)
- 2.- Velocidad de secado constante (mantenimiento)
- 3.- Velocidad de secado decreciente (enfriamiento)

2.4.1.- Mecanismo de secado en los moldes de arena.

En la practica del secado se encuentran dos clases completamente diferentes de sólidos. Aunque muchos sólidos están comprendidos entre estos dos extremos, es conveniente suponer que el sólido es poroso o no poroso, y que, en cualquier caso, puede ser también higroscópico o no higroscópico. Es claro, que las características de nuestro proceso, los moldes de arena serían no higroscópicos y no poroso. Lo anterior, es solo posible debido, a que se utiliza una resina para darle forma y compactar la arena (aglutinante). Por tal motivo, todos los poros en la arena son "taponados" quedando un molde compacto, motivo por el cual no existe el riesgo de que la arena sea porosa y que tampoco pueda absorber agua.

Por lo tanto, las características del secado de los moldes de arena, pueden examinarse teniendo en cuenta solamente la velocidad de secado en periodo constante únicamente, pues como ya se ha dicho antes, no existe en este proceso eliminación de agua desde el interior de los moldes.

2.4.2.- Velocidad de secado constante

En este periodo el secado se desarrolla por difusión de vapor desde la superficie saturada del material, pasando por una capa de aire estancado hasta el medio que lo rodea. El movimiento de la humedad dentro del sólido es lo suficientemente rápido para mantener una condición saturada en la superficie, y la velocidad de secado se controla por medio de la velocidad de transmisión de calor a la superficie de evaporación. La velocidad de transferencia de masa se equilibra con la velocidad de transmisión de calor, y la temperatura de la superficie

saturada permanece constante. El mecanismo de supresión de humedad equivale a la evaporación de un cuerpo de agua y es esencialmente independiente de la naturaleza de los sólidos.

Si el calor se transfiere exclusivamente por convección, y en ausencia de otros efectos calóricos, la temperatura de la superficie se acerca a la de bulbo húmedo. Sin embargo, cuando el calor se transmite por radiación, conducción o por una combinación de ambas y por convección, la temperatura de la superficie saturada se ubica entre la del bulbo húmedo y la del punto de ebullición del agua. En estas condiciones, la velocidad de transmisión de calor se incrementa y se obtiene una mayor velocidad de secado.

Cuando el calor por evaporación durante el periodo de velocidad constante se suministra a través de un gas caliente, se establece un equilibrio dinámico entre la velocidad de transmisión de calor al material y la velocidad de eliminación de vapor de la superficie, lo anterior se conoce como velocidad de secado.

Para calcular la velocidad de secado en este periodo, se utiliza la expresión general para el secado en velocidad constante, la cual involucra al coeficiente total de transmisión de calor:

$$dw / A d\theta = h (T_g - t_i) / \lambda$$

La ecuación anterior aparece en "Introducción a la Ingeniería Química" del Autor: Walter L. Badger.

En donde:

$dw / A d\theta$ = Velocidad de secado por unidad de área, Kg / (hr) (m²).

h = Coeficiente total de transmisión de calor, Kcal / (hr) (m²)(°C).

λ = Calor latente de vaporización del agua a la temperatura t_i , Kcal / Kg.

T_g = Temperatura del aire de secado, °C.

t_i = Temperatura de la superficie mojada, °C.

G = Velocidad de masa del aire de secado, Kg / hr.

De lo anterior, se hace notar que el calor latente de vaporización del agua, se calcula de tablas. Por lo que respecta al coeficiente total de transmisión de calor, este se calcula de la siguiente manera: Molstad, Farevaag, y Farrell encontraron que, cuando el aire de un ducto se sopla en forma perpendicular a la superficie mojada a secar, el coeficiente de transferencia de calor está dado por la expresión:

$$h = 0.37 G^{0.37}$$

La ecuación anterior aparece en "Manual del Ingeniero Químico" Tomo V del Autor: Robert H. Perry.

2.4.3.-Cálculo del tiempo de secado en periodo de secado constante.

Una variable importante para el diseño de Hornos de Secado, es el tiempo requerido para secar los moldes de arena en las condiciones existentes en el equipo, ya que de él depende el tamaño necesario del mismo, para obtener la capacidad de producción adecuada. Para el secado en periodo constante, se puede determinar el tiempo de secado a partir de la curva de velocidad, la cual se obtiene de manera experimental, lo cual no aplica para este caso, pues este trabajo es totalmente teórico. Sin embargo, con frecuencia la única forma de construir la curva arriba mencionada, es debido a la obtención de datos experimentales con el material que se va a secar, lo cual implica a su vez, un conocimiento directo del tiempo de secado, pero como ya estableció anteriormente, este trabajo no es experimental. En general, las curvas de secado para una serie de condiciones, generalmente se modifican cuando se operan el equipo en otras condiciones y en este caso resulta conveniente calcular el tiempo a partir de la curva de velocidad ya establecida con anterioridad.

Durante el período de velocidad constante, el secado se inicia desde la humedad inicial "w1", hasta la humedad final "wf", generalmente en el secado en el período de velocidad constante, existe un término llamado humedad crítica "wc", el cual define el final del secado en período constante y el inicio del secado en período decreciente, sin embargo como ya se sabe en este trabajo solo existe el secado en período constante, por tal motivo "wc" se convierte en "wf".

Por lo que el cálculo del tiempo de secado en el período de velocidad constante esta dado por:

$$t = w1 - wf / ((dw / A d\theta) * A)$$

La ecuación anterior aparece en "Ingeniería Química" tomo II del Autor: J. M. Coulson.

Donde:

t = Tiempo de secado, en periodo de velocidad constante.

w1 = Humedad inicial, de los moldes de arena.

wf = Humedad final, de los moldes de arena.

dw / A dθ = Velocidad de secado por unidad de área, Kg / (hr) (m²).

A = Es el área de la superficie expuesta, en m².

Es importante mencionar, que una vez obtenido el tiempo de secado, se pueden calcular otras variables, las que de alguna manera, también son importantes tanto para el proceso de secado de los moldes de arena como para definir el tamaño del Horno de Secado. Tales variables son la velocidad de banda del Horno de Secado y la longitud del equipo.

2.4.4.- Secado a velocidad decreciente.

Los periodos de secado a velocidad decreciente principian al concluir los periodos de secado a velocidad constante, al contenido critico de humedad. Si el

contenido final de humedad es superior al contenido crítico, todo el proceso de secado se desarrollará en condiciones de velocidad constante. Por otro lado, si el contenido inicial de humedad es inferior al crítico, todo el proceso de secado se desarrollará en condiciones de velocidad decreciente. Por lo común, este período se divide en dos zonas una llamada de secado de superficie no saturada y la otra se le conoce a aquella en que el movimiento interno de la humedad es el que ejerce el control, lo anterior se refleja en la figura 11.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

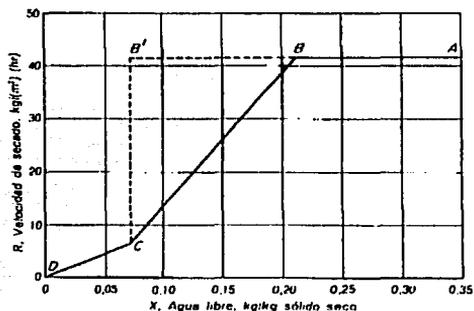


Fig. 11 Curva de velocidad en período decreciente

En la primera zona, no toda la superficie de evaporación se puede mantener saturada por el movimiento de humedad dentro del sólido. La velocidad de secado disminuye en la porción no saturada y, por ende, la velocidad de la superficie total se reduce. En algunos casos, la velocidad de secado es una función lineal del contenido de agua en el sólido. Sin embargo, en general, la velocidad de secado depende de factores que afectan la difusión de la humedad en una dirección que se aleja de la superficie de evaporación, y que los que afectan la velocidad de movimiento interno de la humedad.

Conforme prosigue el secado, se llega a un punto en el que la superficie de evaporación es insaturada. El plano de evaporación se desplaza dentro del sólido y el proceso de secado entra al segundo periodo de velocidad decreciente. La velocidad de secado está regida ahora por la velocidad del movimiento interno de la humedad, y la influencia de las variables externas va en disminución. Cuando se efectúa un secado en materiales con contenidos reducidos de humedad, este periodo predomina casi siempre en la determinación del tiempo total del secado. Algunos estudios del movimiento interno de la humedad indican la posibilidad de que se sigan varios mecanismos de control, y los más importantes son difusión, capilaridad y gradientes de presión producidos por la contracción o encogimiento.

Debido a que en este trabajo no existe este período de secado, no hablare ya mas sobre este tema.

2.4.5.-Contenido de humedad de equilibrio.

En el secado de los sólidos, es importante establecer una diferencia entre los materiales higroscópicos y los no higroscópicos. Si un material higroscópico se mantiene en contacto con aire a temperatura y humedad constantes hasta llegar al equilibrio, el material adquirirá un contenido de humedad específico.

Esta humedad se denomina contenido de humedad de equilibrio para las condiciones especificadas. La humedad de equilibrio se puede absorber como una película superficial, o bien condensarse dentro de los capilares finos del sólido a presión reducida, y su concentración variará con la temperatura y la humedad del aire que lo rodea. Sin embargo, a temperaturas bajas por ejemplo de 15.5 a 49 °C, la representación gráfica del contenido de humedad de equilibrio en función del porcentaje de humedad relativa es, casi siempre, independiente de la temperatura. A una humedad cero, el contenido de humedad de equilibrio de todos los materiales es cero.

El contenido de humedad de equilibrio depende fundamentalmente de la naturaleza del sólido. En el caso de materiales no porosos, es decir, no higroscópico, dicho contenido es prácticamente cero a todas las temperaturas y humedades (algunos inorgánicos). En el de materiales orgánicos, como madera, papel y jabón, los contenidos de humedad de equilibrio varían regularmente a lo largo de gamas amplias conforme cambia la temperatura y la humedad.

El contenido de humedad de equilibrio de un sólido es especialmente importante en el secado, porque representa el contenido de humedad limitante en ciertas condiciones de humedad y temperatura. Si el material se seca a un contenido de humedad inferior al que se posee normalmente en equilibrio con el aire atmosférico, volverá a su valor de equilibrio al almacenarse, a menos que tomen precauciones especiales.

El contenido de humedad de equilibrio de un material higroscópico se determina de diferentes maneras, y el único requisito consiste en una fuente de temperaturas constante y aire a una humedad constante. La determinación se puede realizar en condiciones estáticas o dinámicas, aunque casi siempre se prefiere esta última situación.

En el caso de muchos materiales, el valor del contenido de humedad de equilibrio depende de la dirección a la cual se tienda en dicho equilibrio. Se llega a un valor distinto cuando un material mojado pierde humedad por desadsorción, como sucede en el secado, del valor que se obtiene cuando un material seco lo adquiere por adsorción. Para hacer cálculos de secado, se prefiere utilizar valores de desadsorción. En el caso general, el contenido de humedad de equilibrio alcanzado al perder humedad es superior a la que se logra cuando se adsorbe.

El contenido de humedad de equilibrio se mide dinámicamente colocando una muestra en un tubo en "U" por el cual se extrae un flujo continuo de aire de humedad controlada. Una vez más, la muestra se pesa periódicamente hasta

llegar a un peso constante. El aire debidamente humidificado para este tipo de procedimientos se obtiene burbujeando aire seco a través de un volumen grande de solución salina saturada que produce una grado definido de saturación de aire. Es preciso asegurarse de que el aire y la solución salina lleguen al equilibrio.

2.5. Curvas de velocidad de secado.

Los datos experimentales que se obtienen en una investigación del efecto de las condiciones externas durante el secado de un sólido por una corriente de aire, son el contenido de humedad en función del tiempo en condiciones constantes de secado. El término condiciones de secado constantes indica que la temperatura, velocidad, humedad y presión del aire se mantienen constantes y que las condiciones de salida del aire son sustancialmente las mismas que las de entrada. La evaluación de los resultados por medios gráficos o en forma numérica da el valor de la velocidad de secado, que puede construirse gráficamente bien en función del contenido en humedad libre o bien en función del tiempo. La forma más utilizada es la del gráfico de velocidad de secado por unidad de área de secado en función del contenido de humedad libre.

Para estudiar el mecanismo de secado en condiciones constantes, es útil representar la velocidad instantánea de secado, en Kg de agua retirada por hora y metro cuadrado de área de secado, en función de la humedad libre instantánea, en kilogramos de agua por kilogramo de sólido seco.

De lo anterior, es claro que las curvas nos sirven para analizar el proceso y para seleccionar el Horno de Secado más adecuado, no solamente para nuestro proceso, sino también para infinidad de procesos industriales. Es también claro, que las curvas nos ayudan a interpretar y analizar todas las variables implícitas en el proceso de secado de los moldes de arena.

Los datos que se extraen de estas curvas, generalmente expresan el contenido de humedad en función del tiempo transcurrido, ello nos permite

conocer la extensión y número de los períodos de secado en el proceso. En general, estas curvas representan también el comportamiento de la velocidad de secado en función del contenido de humedad. Es posible interpretar también la velocidad de secado en función del tiempo transcurrido. Como se observa las curvas permiten una fácil lectura y comprensión de las variables relacionadas con el proceso.

2.6. Comportamiento general del secado.

Al secar un sólido húmedo con un gas a una temperatura y humedad fijas, siempre aparece un patrón general de comportamiento, inmediatamente después del contacto entre la muestra y el medio de secado, la temperatura del sólido se ajusta hasta alcanzar el régimen permanente. La temperatura del sólido y la velocidad de secado pueden aumentar o disminuir para alcanzar esa condición de régimen permanente. A régimen permanente, un medidor de temperatura determinará que la temperatura de la superficie sólida húmeda es igual a la temperatura de bulbo húmedo del medio de secado. Las temperaturas dentro del sólido sometido al secado también tenderán a igualarse con la temperatura de bulbo húmedo del gas, pero en este caso, la concordancia puede ser imperfecta debido al retraso en el movimiento de masa y calor. Una vez que estas temperaturas alcanzan la temperatura de bulbo húmedo del gas, se mantienen casi estables y la velocidad de secado también permanece constante. Esto se conoce como período de velocidad constante de secado. Este período termina cuando el sólido alcanza el contenido crítico de humedad. Después de este punto, la temperatura de la superficie aumenta y la velocidad de secado disminuye con rapidez. El período de velocidad decreciente puede durar un tiempo mayor que el período de velocidad constante, aun cuando la eliminación de humedad puede ser sensiblemente menor. La velocidad de secado tiende a cero con cierto contenido de humedad de equilibrio, que el contenido de humedad más bajo que puede obtenerse con este sólido, bajo las condiciones del secado utilizadas.

2.6.1. Comportamiento en el secado de los moldes de arena.

Como ya se menciona anteriormente, el tipo de secado efectuado en este trabajo es el de velocidad constante, también se ha establecido que el secado de los moldes solo se realizará superficialmente. Es decir, se ha establecido que los moldes de arena no serán objeto de secado como tal, pues ya están secos. Lo anterior quiere decir, que solo será objeto de secado, la pintura de alúmina base agua, con la cual se impregnan los moldes de arena.

Debido a que el agua presente, solo se encuentra contenida en la pintura de alúmina impregnada en la superficie de los moldes de arena, la evaporación del líquido se efectuara solo en esa parte de dichos moldes. Por lo tanto, la evaporación del agua será en un tiempo relativamente corto, cuidando únicamente que las condiciones de temperatura, humedad y flujo del aire de recirculación no cambien.

Se debe de evitar, que los moldes de arena se sobrecalienten pues esto puede provocar desmoronamiento en ellos, en cuanto a la pintura de alúmina, está puede ser usada en cualquier sistema de moldeo y joyería, donde el secado se haga por el modo convectivo o por estufado. Por otra parte, se sabe que la alúmina es totalmente refractaria y contiene de un 4.5 – 5.5 % de orgánicos, los cuales se descomponen aproximadamente hasta unos 600 °C. Hay que recordar, que la temperatura del aire caliente de recirculación es de 120 °C, por lo que por ese lado no existe problema alguno.

Un punto importante que hay que remarcar, es el hecho de no calentar el aire caliente de recirculación, por arriba de la temperatura de operación pues esto puede reseca los moldes de arena, ocasionando con esto un desmoronamiento excesivo de los moldes, y con ello disminución de la producción y perdidas de dinero.

2.7. La importancia de un diseño correcto del Horno de Secado.

2.7.1. Diferencia de los mecanismos de transferencia de calor, para el secado de los moldes de arena.

La característica esencial del proceso de secado es la eliminación de un líquido por conversión en vapor, que se separa del sólido. En la industria, la energía necesaria para evaporar el líquido es suministrada en forma de calor. A veces se usan otras formas de energía como campos de radio frecuencia, trabajo mecánico o reacciones químicas; Estos métodos son, sin embargo, casos especiales que no serán considerados en este trabajo.

En este caso de estudio de este trabajo, la transferencia de calor se produce predominantemente por convección, pues aunque es cierto que en todos los equipos para secado se transfiere calor por radiación y conducción, es claro, que por el tipo de proceso en estudio, es la convección el mecanismo que predomina. Este hecho se debe a que al suministrar medios para el calentamiento por convección, se proveen automáticamente los medios para eliminar el vapor de manera más eficiente que por los otros dos medios. Sin embargo, hay que considerar que tanto la conducción como la radiación están presentes en casi todos los procesos, aunque para este caso de estudio ambos modos de transferencia de calor son despreciables.

El secado por conducción difiere del secado por convección. En el primer caso el sólido húmedo se sitúa en un recipiente calentado externamente, que tiene una salida para eliminar el vapor; de manera frecuente se mantiene el recipiente a presión reducida con el objeto de aumentar la fuerza impulsora térmica. En el caso de secado por convección el gas caliente se sopla sobre la superficie del sólido húmedo proporcionando los dos efectos, entregar calor y eliminar el vapor formado.

En un equipo para secado por conducción, la velocidad de secado disminuye a medida que el material se seca. Este efecto puede ser explicado por la disminución de la transferencia de calor de la pared al sólido que se está

secando. Para su estudio, la operación puede suponerse controlada por la transferencia de calor al material, y descrita mediante un coeficiente total de transferencia de calor desde el medio calefactor al sólido se está secando; la temperatura de este último se toma como igual a la temperatura de ebullición del líquido (con la corrección correspondiente para el caso en que el líquido sea una solución). Al final del secado este mecanismo deja de ser limitante, y el secado comienza a ser controlado por la velocidad de eliminación de agua desde el material, efecto que se evidencia por un aumento de temperatura por encima de la correspondiente a la de ebullición de la solución saturada. En los equipos de secado por conducción, este es, en general, un efecto secundario y puede ser incluido en el coeficiente total de transferencia de calor.

Por lo tanto la velocidad de secado en un equipo de secado por conducción es en gran parte independiente de la transferencia de materia desde la sustancia. Desafortunadamente esto no es lo mismo que decir que la velocidad de secado es independiente de las propiedades del material, pues el coeficiente de transferencia de calor depende en alguna proporción del material.

En el caso de secado por convección es distinto. El coeficiente de transferencia de calor suele ser grande y no varía mucho durante el transcurso del secado. Ahora la limitación de la velocidad de secado es suministrada principalmente por el coeficiente de transferencia de materia. Este hecho nos muestra la existencia de dos regímenes de secado muy diferentes denominados; secado o período de velocidad constante, y secado o período de velocidad decreciente. En el período de velocidad constante, la operación está limitada por la transferencia de calor al material; esta transferencia es previsible y más o menos independiente de la naturaleza del material. En el período de velocidad decreciente, la limitación está dada por el coeficiente de transferencia de materia, que depende de las propiedades del material a secar, y cuyo valor es predecible. En la industria, el período de velocidad decreciente implica una parte sustancial del tiempo de secado en un equipo de secado por convección. Este período de

velocidad decreciente es equivalente al período de elevación de la temperatura que ocurre en forma común al final del secado por conducción.

El punto en el cual se produce el cambio de período de velocidad constante a velocidad decreciente, llamado con frecuencia "de humedad crítica", es una función de la velocidad de secado a velocidad constante, que viene impuesta por las condiciones externas, la disposición del equipo de secado y de la transferencia de materia, que depende del material a secar. La humedad crítica está lejos de ser una constante física, como se cree generalmente.

Considerando este tema desde otro punto de vista, la operación clave del secado es la transferencia de masa desde el sólido, cuyo mecanismo no se encuentra 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 pueden migrar a través de los poros y capilares del sólido a su superficie externa. Esto es todo lo que puede decirse; sin embargo, en algunos equipos de secado, particularmente en los que operan por conducción, y en algunas etapas (generalmente las iniciales), 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 la 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, que no puede predecirse.

Los efectos prácticos de esta división y falta de conocimientos son dos que a continuación se exponen:

- a) La velocidad de secado de un material sólo puede ser determinada experimentalmente; no se puede calcular.
- b) Los experimentos deben hacerse con el tipo de equipo secador más adecuado.

CAPITULO III

Resultados.

Se hace hincapié que el Horno de Secado sujeto a análisis en este trabajo, es utilizado en la industria automotriz, para el secado de piezas, las cuales sirven posteriormente como moldes, es decir, que son usadas para la fabricación de partes automotrices. Los moldes son hechos de arena y que el objetivo del proceso no es secar propiamente los moldes, sino la pintura de alúmina con la cual son bañados.

3.1 Descripción del equipo.

El Horno de Secado diseñado, cuenta con una longitud total de 19 metros aproximadamente y un ancho exterior de 2.75 metros, la zona de calentamiento esta dividida en 3 secciones para lograr una mayor uniformidad de la temperatura del proceso. Cada sección, cuenta con un quemador de alta velocidad que proporciona la temperatura requerida por el proceso de secado, la cual es de 120 °C, debe quedar claro que las secciones son totalmente independientes una de la otra. Como se acaba de mencionar el sistema de combustión esta formado a base de tres quemadores de alta velocidad, mismos que permiten tener la flexibilidad en el Horno para poder operar a máxima y mínima carga (ver figura 12). Por lo tanto, existen 3 ventiladores de recirculación de aire caliente, uno por cada sección, los cuales se encargaran de mezclar los gases calientes de combustión con aire fresco. Los ventiladores de recirculación de aire caliente son los que se encargan de homogeneizar la temperatura en cada una de las secciones del Horno. Es importante mencionar que la mezcla de gases de combustión y aire, es alimentada a cada una de las secciones del Horno por la parte superior, para después dirigirse de manera perpendicular sobre la banda transportadora, la cual contiene los moldes, el aire sigue su paso hacia abajo del Horno, donde la mezcla es colectada en ductos generales destinados para tal fin.

De ahí, la mayor parte de la mezcla es transportada hasta la cámara de combustión, en donde es nuevamente calentada y enviada a proceso, una parte de este flujo es desechada mediante el sistema de extracción, para evitar su saturación.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 12 Quemador de alta velocidad, utilizado en el Horno

Tanto la alimentación y la descarga del Horno de Secado, tiene 1 metro de longitud aproximadamente y se encuentran en los extremos del equipo. Casi al final del Horno, es decir, antes de la zona de descarga, el Horno cuenta con una sección de enfriamiento, dicho enfriamiento se realiza por medio de ventiladores axiales colocados en la parte superior del equipo, la finalidad del enfriamiento es para bajar la temperatura de los moldes hasta unos 50 °C y así facilitar su manipulación por parte de los operadores.

Además el equipo cuenta también con sello de aire, tanto al inicio de la alimentación como al final de la zona de calentamiento, esto significa que existe una cortina de aire a la entrada y a la salida de zona de calentamiento, con lo cual se pretende evitar pérdidas de temperatura. Es importante señalar, que tanto a la entrada como a la salida de la zona de calentamiento, el tipo de puerta es una ranura de 211 mm de alto y es donde el sello de aire forma la cortina, evitando con esto pérdidas de calor.

El sistema motriz del Horno de Secado, el cual se encarga de mover la banda transportadora, es a base de un moto – reductor eléctrico, el cual transmite su movimiento al tambor motriz a través de un juego de sprockets y cadena. La velocidad de la banda ha sido diseñada de la siguiente manera:

Velocidad máxima: 1 m / min.

Velocidad mínima: 0.2 m / min.

El sistema de movimiento de la banda, cuenta con dos tambores uno denominado "loco", el cual se encuentra en el lado de alimentación y el llamado "motriz", este último se encuentra en el lado de la descarga. Ambos tambores, están recubiertos de caucho para asegurar una buena tracción de la banda transportadora. La banda utilizada en este equipo, es metálica ranurada hecha en acero al carbón de 1800 mm de ancho y 52000 mm de longitud, la cual tiene las orillas soldadas. La alineación de la banda, se realiza mediante tornillos tensores colocados lateralmente, en el lado de la alimentación, lo anterior ayuda para controlar su movimiento oscilante y para tensar la banda por supuesto. La banda transportadora, es soportada a todo lo largo del Horno de Secado mediante rodillos guía, los cuales están colocados tanto en la parte superior como inferior de su recorrido por el interior del equipo.

Es importante señalar, que todos los materiales que integran el Horno de Secado, fueron seleccionados por la experiencia previa en la fabricación de este tipo de equipos, principalmente se maneja material estructural tal como: ángulo, lámina, canal, vigueta, perfil, etc. La siguiente fotografía muestra el Horno descrito, figura 13.

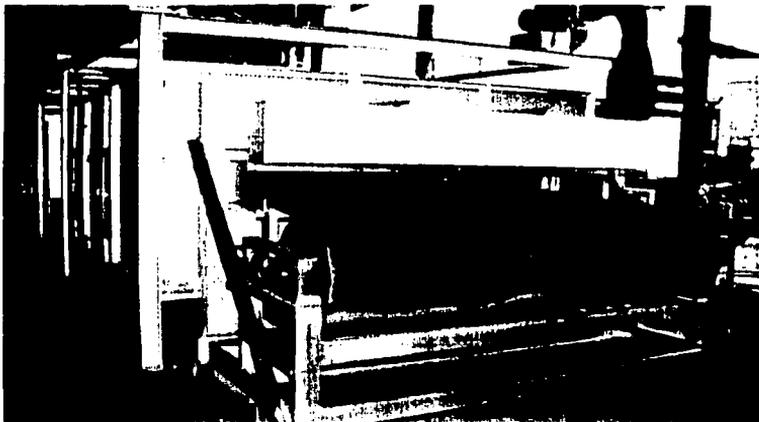


Fig. 13 Horno de Secado Continuo, listo para ser entregado

La descripción anterior del Horno de Secado, tiene por finalidad explicar sus características de operación básicas y permite visualizar de manera general su funcionamiento y las partes principales con que esta compuesto. Al final de esta sección, se anexa Plano general del Horno de Secado y diagrama mecánico del sistema de combustión. Con todo lo anterior, se pretende facilitar la comprensión del funcionamiento, operación y mantenimiento del equipo sujeto a estudio en este trabajo.

Este equipo puede trabajar en forma continua libre de problemas, siempre y cuando se sigan las recomendaciones de operación y mantenimiento preventivo indicadas para tal efecto.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Los cálculos que integran este trabajo sobre el Horno de Secado Continuo de Pintura de Alúmina en moldes de arena, han sido establecidos por mecanismos empíricos descritos en la literatura correspondiente, su integración no fue sencilla, motivo por el cual, pueden tener errores. A pesar de lo anterior, se considera que dichos cálculos proporcionen resultados aceptables, que bien puedan ser tomados como base para el diseñar un equipo de secado, con las características del que se trata en este trabajo.

3.2.- Metodología de cálculo.

A continuación, se detallará todos los cálculos involucrados en este proceso de secado. Es importante aclarar, que tal desarrollo es la parte fundamental de este trabajo, pues de esta sección se extraerá toda la información necesaria, para fundamentar los resultados obtenidos sobre el Horno de Secado y de las partes que lo componen.

El desarrollo de dichos cálculos del Horno de Secado, esta descrito en dos secciones diferentes. En la primera, se calculan las variables correspondientes a la transferencia de calor, lo que nos llevara a conocer la capacidad calorífica del sistema de combustión, la masa y el flujo necesario de aire de recirculación, las perdidas de calor, etc. , en la segunda sección, se estiman valores tal como velocidad de secado en periodo constante, velocidad de la banda transportadora, tiempo de residencia del material en el Horno de Secado y longitud del mismo.

3.2.1.- Cálculo del tamaño de equipo de combustión, recirculación y extracción de aire.

a). Cálculo de los diferenciales de temperatura por evaporación del agua contenida en la pintura de alúmina y por el calentamiento de todo el sistema.

En esta sección se establece el flujo de aire de recirculación, también se determina el calor tomado del aire para la evaporación del agua en el molde, la

humedad del aire al final del proceso, la temperatura de salida de los gases, el calor tomado por la pintura de alúmina y el molde para alcanzar la temperatura de bulbo húmedo, la diferencia de temperatura provocada en el aire que se recircula por efecto del calentamiento de los moldes y la pintura de alúmina, el calor necesario para el calentamiento de la banda metálica, cálculo de la caída de temperatura provocada en el aire por efecto del calentamiento de la banda, calor perdido por radiación, etc. Todo lo anterior, fue necesario para poder determinar, la diferencia total de temperatura en el aire de recirculación y mediante esto poder calcular su temperatura de salida.

b). Cálculo del venteo mínimo para eliminar la humedad y la entrada mínima de aire fresco.

Los procedimientos para el cálculo del balance de masa, el flujo de entrada de aire fresco, de extracción y de recirculación se establecen aquí. Para lo anterior, se utilizan las humedades de las distintas corrientes.

c). Cálculo del calor requerido para operar con las condiciones de venteo mínimo.

En este apartado, se determina la capacidad calorífica del sistema de combustión, necesario para el calentamiento del aire de recirculación. De acuerdo a las condiciones del proceso y al sitio donde se ubica el Horno de Secado.

d). Cálculo final de la masa y flujo total del aire de recirculación, además de la capacidad nominal del equipo de combustión.

Aquí se realiza un cálculo final para determinar el tamaño de equipo de recirculación de aire caliente y del sistema de combustión. Para lo anterior, se utiliza las condiciones de temperatura y altitud, donde será instalado el Horno de Secado.

3.2.2.- Determinación de la velocidad de secado en período constante, la longitud del equipo, la velocidad de la banda transportadora y el tiempo de residencia del material en el Horno.

a). Características del sistema.

Aquí se realiza todo necesario, para la determinación de la velocidad de secado en período constante, la longitud del equipo, la velocidad de la banda transportadora y el tiempo de residencia del material, son incluidos en este inciso. Todas las ecuaciones empíricas, utilizadas para los cálculos realizados en este trabajo, se encuentran en las dos secciones siguientes.

b). Cálculo de la velocidad de secado.

Se establece que el secado efectuado en este trabajo, será considerado solo en período constante, para lo cual, únicamente se utiliza una ecuación empírica establecida en la literatura correspondiente. Como ya se dijo anteriormente, únicamente se extraerá la humedad contenida en la pintura de alúmina, con la que se impregnan los molde de arena, como también se menciona antes los moldes de arena se encuentra completamente secos.

Para el cálculo de la velocidad en secado constante, es necesario conocer y/o calcular el coeficiente total de transmisión de calor del sistema; el calor latente de vaporización del agua, a la temperatura de la superficie mojada (temperatura de bulbo húmedo); La temperatura del aire de secado, temperatura de la superficie mojada y la velocidad de masa del gas de secado.

c). Determinación del tiempo de secado.

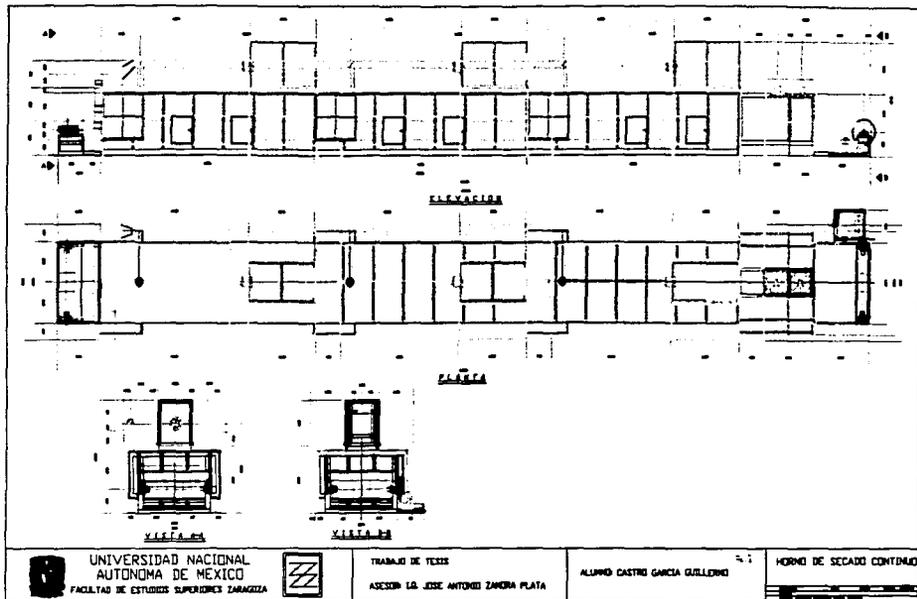
La ecuación empírica utilizada para el cálculo del tiempo de secado, también fue extraída de la literatura correspondiente, la cual es solo para secado constante. Es importante reiterar, que la determinación de esta variable del sistema es muy importante, pues de esto depende la obtención de un secado adecuado.

La ecuación mencionada en el párrafo anterior, involucra el cálculo del área de la superficie expuesta (área total de los moldes de arena), la velocidad de secado (conocida en el punto anterior), humedad inicial y final de los moldes de arena. Para este último punto, fue necesario establecer la humedad inicial y final de un solo molde, para después poder conocer la humedad inicial y final contenida en los moldes de arena por hora.

d). Cálculo de la longitud del Horno de Secado.

Por último se calcula la longitud del equipo, mediante la relación general que involucra a la velocidad, distancia y tiempo. La cual establece, que la longitud es igual al producto del tiempo por la velocidad.

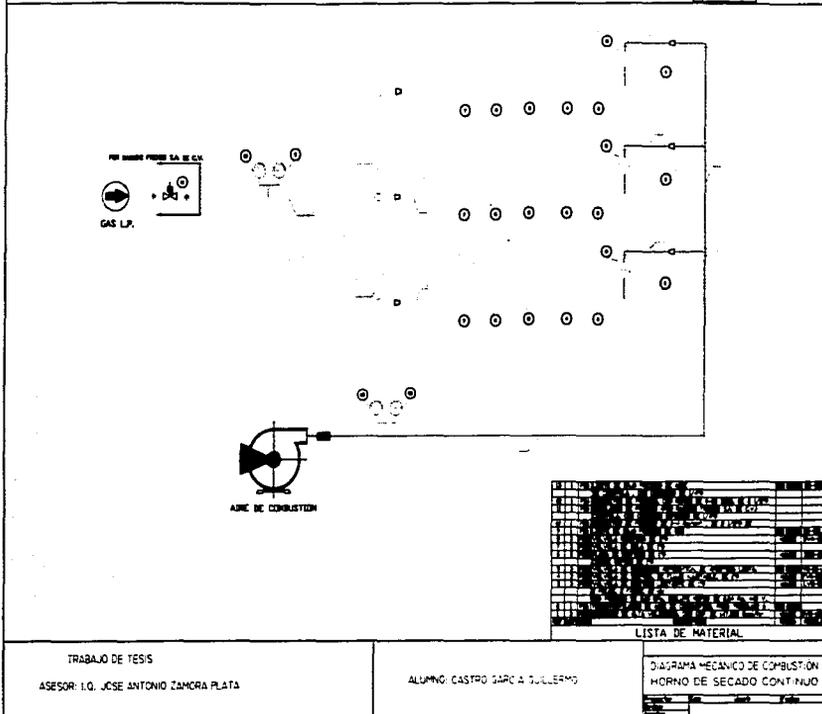
Enseguida se presentan las dos secciones donde se realizaron todos los cálculos, en la primera, se desarrollaron todos los cálculos correspondientes para conocer la cantidad del aire caliente de recirculación y la capacidad calorífica del sistema, todo, para lograr un secado adecuado de la pintura de alúmina impregnada en los moldes de arena. En la segunda, se determina la velocidad de secado en período constante, el tiempo de secado del material, la velocidad de la banda transportadora y la longitud del Horno de Secado, lo cual nos permitirá un análisis del equipo de estudio.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA



HORNO DE SECADO CONTINUO CON CALENTAMIENTO POR CONECCION TORZADA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3 ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE UN HORNO DE SECADO CONTINUO CON CALENTAMIENTO POR CONVECCIÓN FORZADA.

3.3.1 Cálculo de los diferenciales de temperatura por evaporación del agua contenida en la pintura de alúmina y el calentamiento de todo el sistema.

Peso del Producto(Húmedo):

Agua:	0.27	Kg/pza
Alumina:	0.35	Kg/pza
Arena:	2.70	Kg/pza

Peso del molde(Seco.) 2.70 Kg/pza

No. Pzas/hr = 576 Pza/Hr

Ancho de la banda: = 1.80 m

Velocidad de la banda: 1 m/min

Producción máxima: 1,555.20 Kg/hr

Masa del producto:

Agua:	155.5 Kg/hr
Alúmina:	201.6 Kg/hr
Arena:	1555.2 Kg/hr

Temperatura de proceso en el Horno de Secado: 120 °C

Presión barométrica en México, D.F. : 0.77 atm

Flujo de aire en el Horno (@ 120°C y 0.77 atm) : 283.52 m³/min (*)

(*) Se aclara, que se realizaron evaluaciones de este procedimiento con diferentes valores del flujo de aire en el Horno, encontrando que el valor que aquí se reporta, produce una caída de temperatura en el aire, acorde con las practicas recomendadas de diseño de este tipo de Hornos.

Por lo tanto:

$$V_a = 283.52 * (0.77 / ((120 + 273) / 273))$$

Esta ecuación fue tomada del "North American Combustion Handbook" editado por North American Mgf. Co.

$$\text{Flujo de aire @TPN : } 151.7 \text{ m}^3/\text{min} = 9099 \text{ m}^3/\text{hr}$$

(Este es el Volumen de aire de recirculación base de los cálculos)

Si se asume una Humedad del aire que se recircula. Hrec = 0.03 Kg aq/Kg as

La masa de aire seco estará dada por:

$$\text{Maire} = V_h / (((22.4 \text{ m}^3/1 \text{ Kg mol}) / (28.8 \text{ Kg Aire}/1 \text{ Kg mol})) + (((22.4 \text{ m}^3/1 \text{ Kg mol}) / (18 \text{ Kg H}_2\text{O} / 1 \text{ Kg mol}) * \text{Hrec}).$$

Esta ecuación fue tomada del "Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química" editado por David M. Himmelblau.

$$\text{Maire} = V_h / (0.77 + 1.24 * \text{Hrec})$$

$$\text{Maire} = 11272 \text{ Kg/hr de aire seco}$$

Calor tomado del aire para la evaporación del agua en el molde

$$\text{Calor sensible del liquido : } q_l = \text{Maq} * \text{Cp}(\text{liq}) * (\text{Teb} - \text{Tamb})$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de Transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern y de "Biblioteca de Aire Acondicionado y Refrigeración" Tomo I editado por Burgess H. Jennings.

$$\text{Calor de vaporización } q_{\text{vap}} = \text{Maq} * \text{Hvap}$$

$$\text{Calor sensible del vapor } q_v = \text{Maq} * \text{Cp}(\text{vap}) * (\text{T} - \text{Teb})$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de Transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern y de "Biblioteca de Aire Acondicionado y Refrigeración" Tomo I editado por Burgess H. Jennings.

Donde:

$$\text{Maq} = 155.54 \text{ Kg/hr}$$

$$\begin{aligned}C_p(\text{liq}) &= 1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \\C_p(\text{vap}) &= 0.46 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \\H_{\text{vap}} &= 544 \text{ Kcal/Kg} \\T_{\text{amb}} &= 21.1 \text{ } ^\circ\text{C} \\T_{\text{eb}} &= 94.0 \text{ } ^\circ\text{C} \\T &= 120.0 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Entonces se calcula q_l , q_{vap} y q_v :

$$\begin{aligned}q_l &= 11,327.20 \text{ Kcal/hr} \\q_{\text{vap}} &= 84,608.50 \text{ Kcal/hr} \\q_v &= 1,856.62 \text{ Kcal/hr}\end{aligned}$$

La suma de calor es:

$$Q_{\text{aq tot}} = 97,794.30 \text{ Kcal/hr}$$

La humedad del aire al final del proceso de secado será igual a:

$$H_{\text{sal}} = H_{\text{rec}} + M_a/M_{\text{aire}}$$

$$H_{\text{sal}} = 0.0438 \text{ Kg aq/Kg as}$$

El calor húmedo del aire a la salida es:

$$C_s = 0.24 + 0.45 \cdot H_{\text{rec}}$$

Esta ecuación fue tomada de "Transferencia de Calor" editado por B. V. Karlekar y de "Drying Design and Cost" editado por Chemical Engineering.

$$C_s = 0.260 \text{ Kcal/Kg as } ^\circ\text{C}$$

La diferencia de temperatura que tendrá el aire por la evaporación de agua contenida en el molde será:

$$dT_{\text{aq}} = Q_{\text{aq tot}} / (C_s \cdot M_{\text{aire}})$$

Esta ecuación fue tomada de "Transferencia de Calor" editado por B. V. Karlekar y de "Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración" editado por Hernandez Goribar Eduardo.

$$dT_{aq} = 33.41 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura de salida aproximada de los gases es:

$$T_{sal} \text{ aprox.} = T - dT_{aq}$$

$$T_{sal} \text{ aprox.} = 86.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Dadas las condiciones del sistema de secado constante, se establece que la temperatura de bulbo húmedo es igual o similar a la superficie a secar, es decir la superficie de los moldes, por lo que leyendo la carta psicometrica a 120 °C y una humedad de 0.044 Kg de agua por Kg de aire seco se tiene que:

$$T_{bh} = 47.94 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Ahora se evalúa el calor tomado por la resina y el molde para alcanzar la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}).

La capacidad calorífica de los moldes de arena y de la pintura de alúmina, es de 0.191 y 0.2 Cal / g °C, por lo que hace un promedio de ambas.

$$C_p = 0.195 \text{ Kcal / Kg }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{res \text{ y moldes}} = M_{rb} \cdot C_p \cdot (T_{bh} - T_{amb})$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de Transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern y de "Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración" editado por Hernandez Goribar Eduardo.

$$Masa_{rm} = M_{resina} + M_{moldes} = 1756.8 \text{ Kg/hr}$$

$$Q_{res \text{ y moldes}} = 9191 \text{ Kcal/hr}$$

La diferencia de temperatura provocada en el aire que se recircula por efecto del calentamiento de los moldes y la resina será:

$$dT_{rm} = Q_{res \text{ y moldes}} / (C_s \cdot M_{aire})$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de Transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern y de "Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración" editado por Hernandez Goribar Eduardo.

$$dT_{rm} = 3.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ahora, se evalúa el calor necesario para el calentamiento de la banda metálica

$$\text{Peso de la banda: } 25 \text{ Kg/m}^2$$

$$\text{Ancho de la banda: } 1.8 \text{ m}$$

$$\text{Peso de la banda por m lineal: } 45.00 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Velocidad de la banda: } 1 \text{ m/min}$$

$$\text{Masa de acero a calentar: } 2700.0 \text{ Kg/hr}$$

$$\text{Cp del acero: } 0.125 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

Este dato fue tomado de "Manual del Ingeniero Químico" editado por Robert H. Perry.

$$T = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{bh} = 47.94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces:

$$Q_{banda} = \text{Macero} * \text{Cp acero} (T - T_{bh})$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de Transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern y de "Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración" editado por Hernandez Goribar Eduardo.

$$Q_{banda} = 24320 \text{ Kcal/hr}$$

Cálculo de la caída de temperatura provocada en el aire por efecto del calentamiento de la banda:

$$dT_{banda} = Q_{banda} / (Cs * \text{Maire})$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de Transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern y de "Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración" editado por Hernandez Goribar Eduardo.

$$dT_{banda} = 8.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ahora se calcula el calor perdido por radiación a través de las paredes del Horno
Cada sección del Horno tiene las siguientes medidas aproximadas:

Largo: 6.400 m
Ancho: 2.752 m
Altura: 2.000 m

Area total (sin considerar el techo, porque en el están los paneles de distribución de aire caliente):

$$A_{tot} = 54 \text{ m}^2$$

Si se considera tener un coeficiente de radiación y convección a través de las paredes de la cámara de $h_{rc} = 95 \text{ Kcal/m}^2 \text{ hr}$, entonces el calor perdido por radiación será:

$$Q_{\text{perd. rad}} = h_{rc} \cdot A_{tot}$$

$$Q_{\text{perd. rad}} = 5151 \text{ Kcal/hr}$$

De acuerdo con lo anterior, el aire sufrirá la siguiente caída de temperatura por efecto de pérdida de calor por radiación:

$$dT_{\text{perd}} = Q_{\text{perd rad}} / (C_s \cdot M_{\text{aire}})$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de Transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern y de "Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración" editado por Hernandez Goribar Eduardo.

$$dT_{\text{perd}} = 1.8 \text{ }^\circ\text{C}$$

La diferencia de temperatura total será:

$$dT_{\text{tot}} = dT_{\text{aq}} + dT_{\text{rm}} + dT_{\text{banda}} + dT_{\text{perd}}$$

$$dT_{\text{tot}} = 46.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

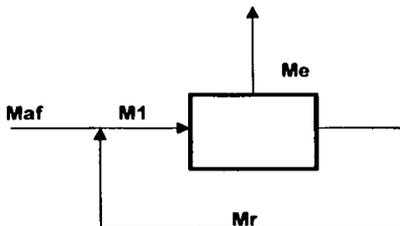
La temperatura de los gases a la salida será de:

$$T_{\text{sal}} = T - dT_{\text{tot}}$$

$$T_{\text{sal}} = 73.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

3.3.2 Cálculo del veeo mínimo para eliminar la humedad, y la entrada mínima de aire fresco.

Horno de Secado Continuo



Las humedades de las distintas corrientes son:

$$H_e = 0.044 \text{ Kg aq/Kg as}$$

$$H_r = 0.044 \text{ Kg aq/Kg as}$$

$$H_{af} = 0.008 \text{ Kg aq/Kg as}$$

$$H_1 = 0.030 \text{ Kg aq/Kg as}$$

Se considera una humedad de 0.008 Kg aq/Kg as para el aire fresco, considerando tener aire ambiente a 21.1 °C y 50 % de humedad relativa.

Se plantea un balance de masa para conocer M_{af} y M_e .

$$M_e = M_{af}$$

$$M_{af} + M_r = M_1$$

$$M_{af} \cdot H_{af} + M_r \cdot H_r = M_1 \cdot H_1$$

$$\begin{array}{rclclcl} 1 M_{af} & + & 1 M_r & = & 11272 \\ 0.008 M_{af} & + & 0.0438 M_r & = & 338.17 \end{array}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene:

$$M_{af} = 4344.5 \text{ Kg as/hr}$$

$$M_r = 6927.8 \text{ Kg as/hr}$$

$$\% \text{ de recirculación : } 61.46\%$$

$$\% \text{ de venteo: } 38.54\%$$

El Volumen húmedo en el venteo será:

$$V \text{ venteo} = M_e * (((22.4 \text{ m}^3/1 \text{ Kg mol}) / (28.8 \text{ Kg Aire}/1 \text{ Kg mol})) + (((22.4 \text{ m}^3/1 \text{ Kg mol}) / (18 \text{ Kg H}_2\text{O}/1 \text{ Kg mol}) * H_{rec}))$$

Esta ecuación fue tomada de "Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química" editado por David H. Himmelblau.

$$V \text{ venteo} = M_e * (0.77 + 1.24 * H_e)$$

$$V \text{ venteo} = 3581 \text{ m}^3/\text{hr} = 60 \text{ m}^3/\text{min} @ \text{ TPN}$$

A la temperatura de salida de los gases y la presión barométrica de México, D.F., el volumen corregido será:

$$T_{sal} = 73.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_{barom.} = 0.77 \text{ atm}$$

$$V \text{ venteo corr} = 60 \text{ m}^3/\text{min} * (((73.4 + 273)/273) * (1/0.77))$$

$$V \text{ venteo corr.} = 98 \text{ m}^3/\text{min}$$

El volumen de aire fresco que debe alimentarse al sistema será:

$$M_{af} = 4344.50 \text{ Kg as/hr}$$

$$V_{af \text{ corr}} = (4344.50 \text{ (Kg as/hr)}) * (1/28.8 \text{ (1 Kg mol/Kg H}_2\text{O)}) * (22.4 \text{ (m}^3/1 \text{ Kg mol)}) * (294.1/273) * (1/0.77) * (1/60 \text{ (hr/min)})$$

$$V_{af \text{ corr.}} = 79 \text{ m}^3/\text{min}$$

3.3.3 Evaluación del calor requerido para operar con las condiciones de venteo mínimo.

$$QT = Mr * Cs * dT \text{ sal} + Maf * Cp * (T - T_{amb})$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern; "Manual del Ingeniero Químico" editado por Robert H. Perry y "North American Combustion Handbook" editado por North American Mfg. Co.

$$\begin{aligned} Mr &= 6927.8 \text{ Kg as/hr} \\ Cs &= 0.260 \text{ Kcal/Kg as } ^\circ\text{C} \\ dT \text{ sal} &= 46.60 \text{ } ^\circ\text{C} \\ Maf &= 4344.55 \text{ Kg as/hr} \\ Cp &= 0.245 \text{ Kcal/Kg as } ^\circ\text{C} \\ T &= 120 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_{amb} &= 21.1 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$QT = 189,122 \text{ Kcal/hr}$$

La capacidad nominal del quemador será:

$$Q_{quem} = QT * (P1/P2)^{0.5}$$

Esta ecuación fue tomada de "Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración" editado por Hernandez Goribar Eduardo.

donde:

$$P1 = \text{Presión atmosférica a nivel del mar} = 1 \text{ atm}$$

$$P2 = \text{Presión atmosférica en México, D.F.} = 0.77 \text{ atm}$$

$$Q_{quem} = 215,525 \text{ Kcal/hr}$$

3.3.4 Rechequeo de la masa y flujo total de aire, además de la capacidad nominal del equipo de combustión.

$$Ma = Q_{total} \text{ req} / (C_{paire} * (T2 - T1))$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern y "Manual del Ingeniero Químico" editado por Robert H. Perry.

$$T2 = \text{Temperatura de entrada del aire al horno} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$T_1 =$ Temperatura de salida del aire del horno = $73.4\text{ }^\circ\text{C}$

$$Ma = 16,561 \text{ Kg/hr}$$

Volumen de aire requerido es:

$$Ma * (22.4(\text{m}^3/\text{Kg mol}) / 28.8 (\text{Kg H}_2\text{O}/1 \text{ Kg mol}))$$

Esta ecuación fue tomada de "Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química" editado por David M. Himmelblau.

$$Va = 12,881 \text{ m}^3/\text{h} @ \text{STP}$$

Para obtener el volumen de aire necesario a temperatura y presión de operación, se tiene que corregir de acuerdo a lo siguiente:

$$Va * ((273 + 120) / 273) * (1 / 0.77)$$

Esta ecuación fue tomada de "North American Combustion Handbook" editado por North American Mfg. Co.

$$Va = 24,081 \text{ m}^3/\text{h} @ \text{T y P de operación.}$$

$$Va = 401 \text{ m}^3/\text{min} @ \text{T y P de operación.}$$

Cálculo De La Capacidad Térmica a Instalar.

$$Q \text{ a instalar} = Ma * (1 - \% \text{Vent}) * C_{\text{paire}} * (T_2 - T_1) + Ma * \% \text{Vent} * C_{\text{paire}} * (T_2 - T_{\text{amb}})$$

Esta ecuación fue tomada de "Procesos de transferencia de Calor" editado por Donal Q. Kern; "Manual del Ingeniero Químico" editado por Robert H. Perry y "Drying Design and Cost" editado por Chemical Engineering.

$$Q \text{ a instalar} = 851,318 \text{ Kcal/h}$$

Cálculo de la Capacidad Nominal Del Quemador Requerido, a la presión del sistema.

$$Q \text{ a instalar} / (0.77)^{1/2}$$

Esta ecuación fue tomada de "North American Combustion Handbook" editado por North American Mfg. Co.

$$Q \text{ nom} = 970,167 \text{ Kcal/hr}$$

3.4 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO EN PERIODO CONSTANTE, EN UN HORNO CONTINUO CON CALENTAMIENTO POR CONVECCIÓN FORZADA.

3.4.1 datos de los moldes de arena a secar.

Espesor de los moldes: 25.4mm = 0.0254m
Diámetro de los moldes: 300mm = 0.3000m
Peso del molde seco: 2.70Kg/pza

Producción máxima: 1555Kg/hr

Velocidad máxima de la banda: 1.0m/min

Velocidad mínima de la banda: 0.2m/min

Humedad máxima de entrada: 1.50%

Humedad máxima de salida: 0.10%

Temperatura máxima de diseño: 300 °C

Temperatura normal de operación: 120 °C

Temperatura de la superficie mojada (Tbh): 48 °C

Flujo de aire en el Horno: 284 m³/min *

(@ T y P de operación) 17,011 m³/hr

Masa de aire de secado:

$$Va = 17,011 \text{ m}^3/\text{hr} (273/(273 + 120)) * (0.77/1))$$

$$Va = 9,099 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Humedad del aire que se recircula Hrec = 0.03 Kg aq/Kg as

Entonces:

$$\text{Mas} = \text{Vas} / ((22.4 \text{ m}^3/1 \text{ Kg} - \text{mol}) / (28.8 \text{ Kg aire} - 1 \text{ Kg mol})) + ((22.4 \text{ m}^3/1 \text{ Kg} - \text{mol}) / (18 \text{ Kg H}_2\text{O} / 1 \text{ Kg} - \text{mol}) * \text{Hrec})$$

$$\text{Mas} = 11,272 \text{ Kg as/hr}$$

(*) Datos ya determinados anteriormente

3.4.2 Cálculo de la velocidad de secado considerada como secado en velocidad constante.

La expresión general para el secado en velocidad constante la cual involucra al coeficiente total de transmisión de calor es la siguiente:

$$dW/Adt = h(Tg - Tbh) / \lambda$$

Esta ecuación fue tomada de "Introducción a la Ingeniería Química" editado por Walter L. Badger.

donde:

- dW/Adt = Velocidad de secado por unidad de área, Kg / (hr) (m²).
- h = Coeficiente total de transmisión de calor, Kcal / (hr) (m²) (°C).
- λ = Calor latente de vaporización del agua a la temperatura t_i , Kcal / Kg.
- Tg = Temperatura del aire de secado, °C.
- Tbh = Temperatura de la superficie mojada, °C.
- G = Velocidad de masa del gas de secado, Kg / hr.

Se calcula cada uno de los parámetros involucrados en la expresión anterior:

Calcula de h :

Molstad, Farevaag y Farrell encontraron que, cuando el aire de un ducto se sopla perpendicularmente a la superficie mojada a secar, el coeficiente de transferencia de calor está dado por la siguiente expresión.

$$h = 0.37 G^{0.37}$$

Esta ecuación fue tomada de "Manual del Ingeniero Químico" Tomo V editado por Robert H. Perry.

entonces $h = 0.37(11272)^{0.37}$

por lo tanto $h = 11.68$

Cálculo de λ :

de tablas el valor de $\lambda = 570 \text{ Kcal/Kg}$

(a 48 °C)

Este valor fue tomado de "Operaciones Básicas de Ingeniería Química" editado por Warren L. Mc Cabe.

Temperatura del aire de secado :

la temperatura del aire es = 120 °C

Temperatura de la superficie mojada:

está temperatura es = 48 °C

Velocidad de masa del aire de secado:

está velocidad de masa es = 11,272 Kg as/hr

Por lo tanto la velocidad de secado en periodo constante es:

$$dW/Adq = 1.48 \text{ Kg}/(\text{hr})(\text{m}^2)$$

3.4.3. Determinación del tiempo de secado.

Durante el periodo de secado desde la humedad inicial w_1 hasta la humedad final w_f , la velocidad de secado es constante, de manera que el tiempo de secado t_c , viene dado por :

$$t_c = w_1 - w_f / (dw / Ad_0 * A)$$

Este valor fue tomado de "Ingeniería Química" editado por J. M. Coulson.

Donde:

t_c = Tiempo de Secado

w_1 = Humedad inicial

w_f = Humedad final

dw / Ad_0 = Velocidad de secado por unidad de área, Kg / (hr) (m^2)

A = Es el área de la superficie expuesta

Cálculo de A =

Primero se determina el número de piezas secadas en una hora :

$$\text{No. de pzas.} = 576$$

Se procede a calcular el área de cada molde circular por medio de:

$$A = \pi * r^2$$

donde : $\pi = 3.1416$

$$r^2 = 0.0225$$

entonces: $A = .071 \text{ m}^2$

Ahora para 576 moldes el área será:

$$A \text{ total} = 40.72 \text{ m}^2$$

Velocidad de secado por unidad de área ya se calculó:

$$dw / Ad\theta = 1.48$$

Cálculo de las humedades:

Humedad máxima de entrada(w1): 1.50%

Humedad máxima de salida(wf): 0.10%

Para el cálculo de las humedades se harán las siguientes consideraciones:

Primera: En nuestro proceso el secado se realiza únicamente en periodo de velocidad constante.

Segunda: El contenido de humedad que se utilizará será el contenido de humedad del sólido, (humedad máxima de entrada y humedad máxima de salida).

Contenido inicial de H2O en el molde = 0.0405 Kg de H2O / por molde

Contenido final de H2O en el molde = 0.0027 Kg de H2O / por molde

Humedad máxima de entrada = 0.0150 Kg de H₂O / Kg de molde seco

Humedad máxima de salida = 0.0010 Kg de H₂O / Kg de molde seco

Las humedades calculadas arriba son para un solo molde, por lo tanto, se debe estimar la humedad de toda la producción por hora de trabajo para así conocer lo cantidad total de agua a eliminar.

Humedad total máx de entrada = 8.6400 Kg de H₂O / Kg tot de moldes secos

Humedad total máx de salida = 0.5760 Kg de H₂O / Kg tot de moldes secos

Se procede ahora al cálculo del tiempo de secado:

$$t_c = 0.1340 \text{ hr}$$

Este valor fue tomado de "Ingeniería Química" editado por J. M. Coulson.

$$t_c = 8.40 \text{ min}$$

3.4.4 Cálculo de la longitud teórica del horno de secado.

La relación que involucra a la velocidad, distancia y tiempo viene dada por:

$$L = t_c \cdot \text{vel.}$$

Donde: L = Longitud teórica del Horno de secado.

t_c = Tiempo de secado

vel. = Velocidad de la banda del Horno de Secado.

Por lo tanto:

$$L = 8.40 \text{ m}$$

Nota: La fórmula para determinar el tiempo de secado utilizada, maneja "humedad inicial" (w_1) y "humedad final" w_f . Lo anterior, se debe a que se estableció desde el inicio de los cálculos, que en nuestro sistema, existe únicamente secado a velocidad constante.

Por lo tanto, no existe en este proceso humedad crítica, entonces únicamente se maneja "humedad final".

Es importante recalcar, que los resultados obtenidos, son producto de ecuaciones empíricas. Razón por la cual, éstos, tienen un cierto grado de incertidumbre, dichas ecuaciones fueron tomadas de la literatura correspondiente a este proceso de estudio, además, se incluyen las fuentes de donde se extrajeron. También, se aclara que a pesar de la investigación realizada, no fue encontrado algún método ya establecido para la determinación de los parámetros involucrados en los cálculos de este trabajo.

3.5 Análisis de resultados.

Uno de los parámetros más importantes de este proceso, es conocer como se comporta la humedad durante el tiempo de secado de los moldes de arena. Por tal motivo, se hará uso de la siguiente ecuación:

$$t = w_i - w_f / (dw / A d\theta * A)$$

Este valor fue tomado de "Ingeniería Química" editado por J. M. Coulson.

Donde:

t	=	Tiempo de Secado en Periodo Constante
w _i	=	Humedad inicial
w _f	=	Humedad final
dw / A dθ	=	Velocidad de Secado en Periodo Constante
A	=	Area total de secado

Ahora es necesario despejar "w_f", para conocer sus valores a diferentes tiempos, por lo tanto:

$$w_f = w_i - ((dw / A d\theta * A) * t)$$

Como se sabe, el tiempo de residencia de los moldes de arena en el Horno, es de:

$$t = 8.40 \text{ minutos}$$

Ahora, se da como ejemplo el cálculo para un tiempo de 0.5 minutos.

$$w_f = 8.64 - ((1.48 * 40.72) * 0.00833)$$

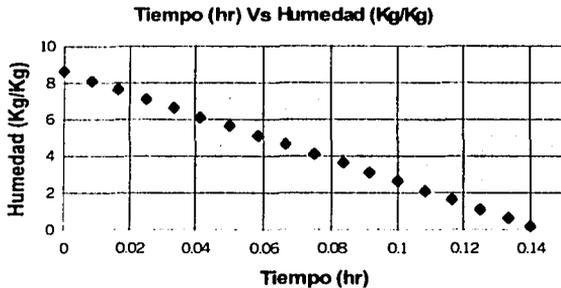
$$w_f = 8.13 \text{ Kg / kg}$$

A continuación se expone la tabla completa de resultados, para tal efecto, se tomo un intervalo de tiempo: de 0.5 hasta 8.40 minutos.

TABLA DE RESULTADOS

Tiempo (min)	Tiempo (hr)	Contenido de Humedad Kg / Kg
0	0	8.64
0.5	0.00833	8.13
1.0	0.01666	7.63
1.5	0.025	7.13
2.0	0.03333	6.63
2.5	0.04166	6.12
3.0	0.05	5.62
3.5	0.05833	5.12
4.0	0.06666	4.62
4.5	0.075	4.12
5.0	0.08333	3.61
5.5	0.09166	3.11
6.0	0.1	2.61
6.5	0.1083	2.11
7.0	0.1166	1.61
7.5	0.125	1.10
8.0	0.1333	0.60
8.4	0.14	0.20

Los resultados anteriores, reflejan la disminución del contenido de humedad, conforme el tiempo avanza. Esto define también, la disminución de la humedad, conforme el material avanza a través de la longitud del Horno, la gráfica correspondiente se anexa enseguida. Lo anterior es importante, pues da una idea de cómo se va perdiendo humedad a lo largo del Horno.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Como se recordará, uno de los objetivos es someter al análisis los resultados obtenidos en este trabajo, con los de un Horno con características similares al analizado en este trabajo, dicho Horno se encuentra actualmente operando desde hace ya algunos años en una empresa automotriz. Actualmente, este Horno trabaja en forma regular, para el secado de moldes de arena, sin embargo este Horno presenta durante su operación, una serie de desajustes en su diseño. Es importante hacer notar, que se tomaron los datos de operación de dicho Horno, como base de los cálculos en este trabajo, razón por la cual, se realiza la comparación de los resultados de ambos casos.

En primer lugar, el Horno fabricado para la empresa automotriz antes mencionada, tiene una longitud en su zona de calentamiento de alrededor de 19 metros, como se recordará los cálculos realizados en este trabajo, arrojaron un Horno de un poco más de 7 metros de longitud. Es claro, que hay una diferencia notoria entre ambos casos, sin embargo, como ya menciono los resultados obtenidos en este trabajo se establecieron mediante ecuaciones empíricas, por lo

que hay que tomar con cierta reserva su veracidad. Aunque, hay que resaltar que una gran parte de la bibliografía referente a este tema, hace uso de dichas ecuaciones para la realización de los cálculos ahí reportados. También, es importante mencionar que no fue encontrada durante la investigación hecha, una metodología ya definida, para la realización de los cálculos encontrados aquí. Por lo cual, se aclara que los cálculos y resultados obtenidos, fueron obtenidos aplicando lo más correctamente posible, las ecuaciones empíricas antes mencionadas.

Lo anterior es de suma importancia, debido a que por los resultados aquí reportados, consideran que el Horno que fue construido en la realidad, pudo ser sobrediseñado, lo cual para la compañía compradora significo un gasto innecesario y oneroso, no así para la compañía que lo vendió, pues para esta última, represento una ganancia mucho mayor.

Razón por la cual, de debe considerar una estrecha relación y comunicación entre los departamentos de ingeniería de ambas compañías, con la finalidad de adquirir y fabricar, un Horno que cubra solo las exigencias de calidad establecidas y requeridas para el material a procesar, evitando así que el equipo se construya "chico" o "grande".

Conclusiones.

Los efectos de un diseño incorrecto del Horno de Secado por convección, son varios, en primer lugar, si la selección del sistema de combustión del Horno de Secado no es adecuada, se pueden presentar dos casos: Cuando el sistema de combustión es pequeño, los problemas que se tienen son que el equipo no tenga la capacidad requerida y establecida en el inicio del proyecto. Lo anterior ocasiona también que los moldes no cumplan con las especificaciones requeridas de humedad. En caso contrario, si el sistema de combustión es demasiado grande, este operará de manera poco eficiente por estar restringido en su capacidad, lo anterior, además de causar problemas en la calidad del material, puede ser causa de problemas de emisiones contaminantes a la atmósfera. En este último caso, pudiera darse el caso de un gasto excesivo de combustible y por consecuencia de dinero.

En segundo lugar, el hecho de colocar un sistema motriz que no sea el adecuado, implicará problemas diversos, dichos problemas se reflejarán cuando la banda no sea arrastrada o puesta en movimiento por dicho sistema. Además, se debe de seleccionar un buen sistema tensor de la banda, lo anterior evitará también que la banda patine o deje de moverse. Cuando se coloca la banda sin catarinas guía, está oscila de un lado a otro del Horno de Secado, lo cual produce que las orillas de la banda se maltraten y deterioren paulatinamente.

En tercer lugar, las secciones de enfriamiento y calentamiento deben estar bien definidas y separadas, en caso de colocar una de ellas junto a la otra, implica un descontrol de temperatura al final y al inicio de las zonas de calentamiento y enfriamiento respectivamente, aún si existe cortina de aire.

Por último, los tambores de tracción y loco, deben ser recubiertos de un material tal que, permitan el máximo agarre con la banda transportadora, para así evitar patinaje y/o falta de movimiento.

Estos son algunos puntos que hay que tomar en consideración cuando se selecciona un Horno de Secado Continuo con Banda Transportadora.

Hay muchas clases de Hornos de Secado en el mercado. La mayoría, pero no todos, pueden ser útiles para secar más de uno de los tipos generales de material húmedo ya descritos. Se debe entender que él o los encargados del departamento de ingeniería son responsables del diseño de cualquier tipo de Horno, y que sobre la base de su selección, deben proponer el equipo más económico, pero, que a su vez, cumpla con producción y calidad requerida del material. Como ya se mencionó, una vez diseñado el Horno de Secado, se debe hacer un análisis, para determinar si este es adecuado, para el secado de otros tipos de materiales distintos para los cuales fue diseñado. Es claro, que si aplican los métodos convenientes de control, lo lógico es que el equipo funcione normalmente, salvo que se alteren las características de la alimentación deliberadamente, como por ejemplo una humedad excesiva, lo que no permitiría un secado adecuado del material o que se trate de secar un materia! no adecuado para ese equipo. Por lo tanto, es recomendable que exista una estrecha comunicación entre el o los diseñadores del Horno y el usuario final.

El aplicar adecuadamente los balances de masa y energía, así como las ecuaciones de secado, nos permiten lograr un diseño óptimo y que el equipo tenga un uso eficiente de la energía suministrada, sin embargo, se debe ser muy cuidadoso en el diseño, ya que un cálculo incorrecto conduciría a la construcción de un equipo que no realizará la función de secado de forma adecuada. El seleccionar la humedad crítica correcta, es sumamente importante, por lo que es altamente recomendable, contar con datos experimentales sobre el secado del material en particular, para tener un diseño más confiable.

Bibliografía

- I- G. Nonhebel; A. A. H. Moss "El Secado de Sólidos en la Industria Química" Editorial Reverte, S.A. España 1979
- II- Walter L. Badger; Julius T. Banchemo "Introducción a la Ingeniería Química" Mc Graw – Hill, México 1978
- III- Dr. Ing. Friedrich Kneule; "Enciclopedia de la Tecnología Química" (Técnicas de Procesos en las Industrias Químicas y Derivados; Tomo 1 – El Secado) Urmo, S.A. de Ediciones, 1982
- IV- J. M. Coulson; J.F. Richardson "Ingeniería Química" Tomo II, Editorial Reverte, S.A. España 1979
- V- B. V. Karlekar; R. M. Desmond; "Transferencia de Calor" Editorial Mc Graw Hill. Segunda Edición, México 1995
- VI- Ernest J. Henley; Edward M. Rosen "Calculo de Balances de Materia y Energía" Editorial Reverte, S.A. 1993
- VII- Donald Q. Kern; "Procesos de Transferencia de Calor" Editorial Continental, S.A. De C.V. , Decimaprimerapresión, México 1997
- VIII- Robert H. Perry ; Don W. Green; James O. Maloney "Manual del Ingeniero Químico" Sexta edición (Tercera en español), Mc Graw – Hill, 1994
- IX- Alan S. Foust; Curtis W. Clump; Leonard A. Wenzel; Louis Maus "Principios De Operaciones Unitarias" Segunda Edición, Cia. Editorial Continental, S.A. De C.V. México 1987.
- X- Frank Kreit; "Principios de Transferencia de Calor" Primera Edición en Español, Herrero Hermanos, Sucesores, S.A. México 1970
- XI- J.L. Conde del Tejo; José Manuel Pertierra "Tecnología Química" Primera Parte, Urmo, S.A.
- XII- Warren L. Mc Cabe; Julian C. Smith "Operaciones Básicas de Ingeniería Química" Volumen II Editorial Reverte, S.A. España 1981
- XIII- David M. Himmelblau; "Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química" Decimotercera reimpresión, Compañía Editorial Continental, S.A. De C.V. México 1992
- XIV- R. B. Keey; "Drying Principles and Practice" Editorial Pergamon Press" New York 1972

- XV-** Arun S. Mujumbar; "Handbook of Industrial Drying" Second Edition, Editorial Marcel Dekker, Inc. U.S.A. 1995
- XVI-** David M. Himmelblau; "Balances de Materia y Energia" Cuarta Edición, Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A. 1998
- XVII-** Burgess H. Jennings; Samuel R. Lewis "Biblioteca de Aire Acondicionado y Refrigeración" Tomo I, Cia. Editorial Continental, S.A. De C.V. México 1970
- XVIII-** Lester Haar; Jhon S. Gallagher; George S. Kell "Tablas de Vapor" Editorial Interamericana, S.A. De C. V. México, D.F. 1985
- XIX-** Fred Porges; Jhon Porges "Prontuario de Calefacción Ventilación y Aire Acondicionado" Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, España 1992
- XX-** Carrier Air Conditioning Company "Handbook of Air Conditioning System Design" Editorial Mc Graw – Hill Book Company, 1995
- XXI-** Roy J. Dossat; "Principios de Refrigeración" Decimoquinta Edición, Compañía Editorial Continental, S.A. De C.V. México 1995
- XXII-** P. C. Koclet; "Industrial Refrigeration Priciples, Design and Applications" Editorial Mc Millan 1992
- XXIII-** Billy C. Langley; "Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration" Editorial Prentice Hall, 1990
- XXIV-** Eugene Stamper; Richard L. Kokal; "Handbook of Air Conditioning Heating and Ventilating" Industrial Press Inc. 1979
- XXV-** James R. Welty; "Transferencia de Calor Aplicada a la Ingenieria" Segunda Reimpresión, Editorial Limusa, S.A. De C.V. 1988
- XXVI-** Keith Cornwell; "Transferencia de Calor" Primera Edición, Editorial Limusa, S. A, México 1981
- XXVII-** Hernandez Goribar Eduardo; "Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración" Editorial Limusa, 1988
- XXVIII** Christie J. Geankoptis; "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias" Segunda Edición, Compañía Editorial Continental, S.A. De C.V. México 1995

- XXIX-** C.t. Kiranoudis; Z. B. Maroulis; D. Marinos – Kouris "Computers Chemical Engineering. Vol. 20 Suppl. Pp. S177 – S182" 1996 (Drying of Solids: Selection of Some Continuous Operation Dryer Types)
- XXX-** Arnold L. Weiner; "Drying Gases and Liquids" Chemical Engineering, September 16, 1974. p. p. 92 –101
- XXXI-** Karl G. Davis and Krishan D. Manchanda; "Unit Operations for Drying Fluids" Chemical Engineering, September 16, 1974. p. p. 102 - 110
- XXXII-**Walter C. Lapple; William E. Clark and Ernest C. Dybdal; "Drying Design and Cost" Chemical Engineering, November 1955. p. p. 177 – 200
- XXXIII**Segunda Edición "North American COMBUSTION HANDBOOK" NORTH AMERICAN Mfg. Co., Cleveland Ohio, U.S.A. 1978