

CAPITULO IV

SECADO

151.

4.1. INTRODUCCION

El estudio del secado que se refiere en este Capítulo contiene la eliminación de agua de los materiales de proceso. El secado suele ser la etapa final de los procesos antes del empaque y permite que muchos materiales como los jabones en polvo y los colorantes sean mas adecuados para su manejo.

El secado o la deshidratación de materiales biológicos (en especial de alimentos) se usa también como técnica de preservación.

En este Capítulo se estudia en la Sección 4.2. algunas definiciones referentes al tema; en la 4.3. se clasifican los métodos de secado; en la 4.4. se trata sobre los tipos de secadores; aquí sólo se profundiza en las clases de secadores que se van a utilizar en la práctica; en las Secciones 4.5 y 4.6 están contenidos los cálculos para un secador por lotes y un continuo respectivamente; en la sección 4.7. se describen las prácticas de laboratorio, siendo la primera para un secador por lotes (de cabina) y la segunda para un secador continuo (de aspersión).

4.2. OBJETIVOS DE SECADO

El término secado se refiere por lo general a la eliminación de la humedad de una sustancia, indica también la remoción de otros líquidos orgánicos, tales como disolventes orgánicos de los materiales sólidos. Por ejemplo, una solución puede "secarse" esparciéndose en forma de pequeñas gotas en un gas caliente y seco, lo que provoca la evaporación del disolvente.

En la práctica el disolvente es con tanta frecuencia agua y el gas el aire, que ésta combinación proporcionará las bases para la mayor parte de este análisis.

4.2.1. Definiciones

Humedad Absoluta (Y). En una mezcla aire-agua la humedad absoluta se define como la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco. Esta definición sólo depende de la presión parcial (P_A) del vapor de agua en el aire y de la presión total (P). Si (A) es agua y (B) aire y M_A y M_B sus pesos moleculares respectivamente:

$$Y = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de aire seco}} = \frac{M_A (P_A)}{M_B (P - P_A)} \quad (4.2-1)$$

Humedad de Saturación (Y_s). Aire saturado es aquel en el cual el vapor de agua está en equilibrio con el agua líquida en las condiciones prevalecientes de presión y temperatura. En esta mezcla la presión parcial del vapor del agua en la mezcla aire - agua es igual a la presión de vapor (P_{v_A}) del agua para la temperatura establecida. Por consiguiente la humedad de saturación es:

$$Y_s = \frac{M_A (P_{vA})}{M_B (P - P_{vA})} \quad (4.2-2)$$

Porcentaje de humedad. Es la relación de la humedad real (Y) del aire y la humedad (Ys) que tendría el aire si estuviera saturado a las mismas condiciones de presión y temperatura

$$H_p = \frac{Y}{Y_s} \times 100 \quad (4.2-3)$$

Humedad relativa La cantidad de saturación de una mezcla aire-vapor de agua también puede expresarse como la relación de la presión parcial a la presión de vapor del agua, a la misma temperatura

$$H_r = \frac{P_A}{P_{vA}} \times 100 \quad (4.2-4)$$

Punto de rocío. La temperatura a la cual cierta mezcla de aire y vapor de agua debe estar saturada se llama temperatura de punto de rocío.

Temperatura de Bulbo Seco. Es la temperatura que tendría una mezcla aire-vapor expuesta en forma ordinaria al bulbo seco del termómetro.

Carta de humedad para mezclas aire-vapor de agua. La carta de humedad de la figura 4.1. o Apéndice C - 3, representa una gráfica muy conveniente de las propiedades de las mezclas aire-vapor de agua a 1 atm. abs. de presión. En esta figura se grafica la humedad (Y) en función de la temperatura real de la mezcla aire-vapor de agua (temperatura de bulbo seco).

Temperatura de Bulbo Húmedo. Es la temperatura de estado estable y no de equilibrio que se alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de agua con una corriente continua de gas en condiciones de estado estable. Se determina sumergiendo el termómetro con su bulbo recubierto en una gasa húmeda en una corriente de aire-vapor de agua cuya temperatura es (T), temperatura de bulbo seco.

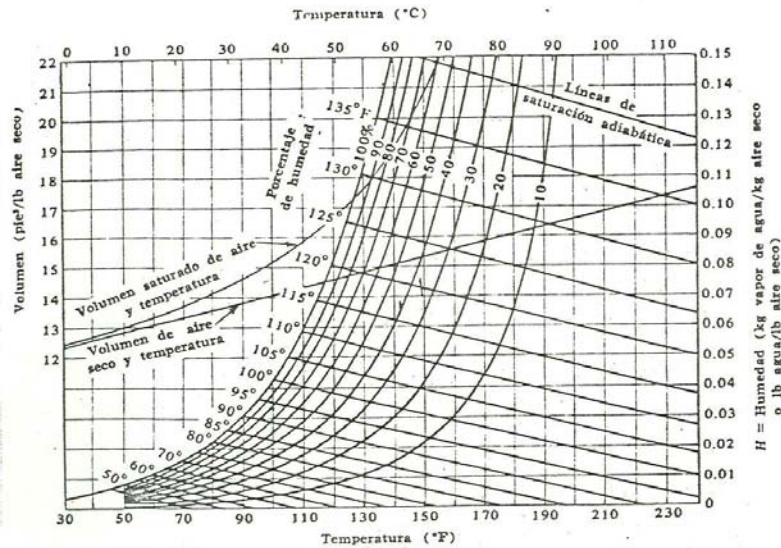


Fig. 4.1. Carta de humedad para mezclas de aire y vapor de agua a una presión total de 1 atm.

Humedad de Equilibrio. Supóngase un sólido húmedo que se pone en contacto con una corriente de aire, (Y) y temperatura constantes. Se usa un gran exceso de aire, por lo que las condiciones permanecen invariables. Después de haber expuesto el sólido por tiempo suficiente, para alcanzar el equilibrio, llegará el momento en que dicho sólido tendrá un contenido de humedad definido. A este valor se le conoce como contenido de humedad de equilibrio del material, X^* bajo las condiciones de humedad y temperatura del aire.

4.3. METODOS DE SECADO

La clasificación siguiente es útil para delinear las teorías de secado y los métodos de diseño.

1º Según el método de operación: Por lotes o continuo.

Secado por lotes. Cuando el material que se introduce en el equipo de secado, el proceso se verifica por un período de tiempo; es una operación relativamente cara, en consecuencia se limita a operaciones a pequeña escala, a plantas piloto y a trabajos de investigación.

Secado continuo, donde el material se añade sin interrupción al equipo de secado, se obtiene material seco con régimen continuo. Generalmente el equipo es pequeño en comparación con la cantidad de producto, la operación se integra fácilmente con la producción química continua, sin necesidad de almacenamiento intermedio, el producto final tiene un contenido mas uniforme de humedad y el costo de secado por unidad de producto es relativamente pequeño.

2º Según el método de obtención de calor necesario para la evaporación de la humedad es: directo o indirecto.

Secado directo. El calor se obtiene completamente por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el cual tiene lugar la evaporación. En muchos de los secadores directos continuos, el sólido se mueve a través del secador, mientras está en contacto con una corriente móvil de gas; el gas y el sólido pueden fluir en paralelo o a contra corriente; así mismo el gas puede fluir tangencialmente a la trayectoria del sólido. Si el calor no se proporciona dentro del secador ni se pierde hacia el entorno la operación es adiabática; entonces, el gas perderá calor sensible y se enfriará mientras la humedad evaporada absorbe calor latente de la evaporación.

Si el calor se proporciona dentro del secador, el gas puede mantenerse a temperatura constante.

En los secadores directos por lotes, el sólido puede arreglarse en lechos delgados sostenidos por mallas, de forma que aire u otros gases puedan pasarse a través de los lechos. Un aparato típico para este propósito es un secador por lotes de circulación transversal. Otro tipo de arreglo es el secado por lotes de circulación tangencial, donde el gas o aire caliente fluyen tangencialmente a la posición del sólido.

Secado indirecto. El calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para acarrear la humedad evaporada. Por ejemplo, el calor puede obtenerse por conducción a través de una pared metálica con contacto con la sustancia o, con menos frecuencia, por exposición de la sustancia a radiación infrarroja o calentamiento dieléctrico. En este último caso, el calor se genera dentro del sólido mediante un campo eléctrico de alta frecuencia.

Secado por congelación (secado por sublimación). Las sustancias que no pueden calentarse ni siquiera a temperaturas moderadas, como alimentos y ciertos fármacos, pueden secarse mediante este método. La sustancia que se va a secar generalmente se congela mediante exposición a aire muy frío y se coloca en una cámara de vacío, en donde la humedad se sublima y se bombea mediante eyectores de vapor o bombas mecánicas de vacío.

3º Según la naturaleza de la sustancia que se va a secar. La sustancia puede ser un sólido rígido, frágil o fuerte como madera; o un material flexible como tela o papel; un sólido granular como una masa de cristales; una pasta ligera o un lodo ligero o una solución. La forma física de la sustancia y los diferentes métodos de manejo necesarios tienen tal vez, la mayor influencia sobre el método de secado y el secador que se va a utilizar.

4.4. TIPOS DE SECADORES

La clasificación siguiente es de acuerdo al método de obtención de calor; sólo se mencionarán los tipos y sus aplicaciones principales

4.4.1. Secadores directos

TIPO	APLICACIONES PRINCIPALES
Secado de horno	- Para lúpulo y malta, rodajas de frutas
Secador de cabina	- Para frutas y vegetales
Bandejas o compartimientos	- trabajos a escala planta piloto
Secador de tunel	- Para futas y hortalizas troceados
Secador de cinta continua	- Para sólidos granulares
Secador de tolva	- "acabado" de productos secado en otras clases de secadores desde humedades de 15% hasta 3%.
Secado de lecho fluidizado	- Es aplicado tanto en escala comercial como experimental, para sólidos granulares o troceados.
Secado neumático	- Para productos sólidos y como equipo secundario en la preparación de lecho y productos del secado por atomización.
Secador rotatorio	- Aplicaciones limitadas con productos alimenticios, por ejemplo tratamiento de semillas.
Secador por atomización	- Para soluciones como leche, derivados de huevo, extractos de levadura, productos farmacéuticos, etc.

4.4.2 Secadores indirectos

TIPO	APLICACION
Secador de tambor (de película y de rodillos)	- para sustancias en forma líquida o puré.
Secador al vacío y cámara de calefacción	- Para productos muy sensibles al calor como jugos de frutas concentrados.

4.4.3 Otros Tipos

TIPO	APLICACION
Secador continuo de infrarrojo	Para pastas de pan, almidones, especias.
Calefacción con microondas y dieléctrica.	Secador de poca aplicación por ser antieconómico.
Secado por congelación	Alimentos sensibles al calor y fármacos

Sólo hemos mencionado los tipos de secadores; a continuación describiremos dos de ellos, siendo el secador por aspersión y el secador de cabina o compartimientos por ser éstos los que se van a utilizar para realizar las prácticas.

SECADOR POR ASPERSION

El principio de operación de este equipo es reducir la alimentación a una llovizna en presencia de una corriente de aire caliente; las pequeñas partículas por su tamaño presentan un área muy grande como superficie de evaporación, la solución en esta forma cede rápidamente su humedad al aire caliente cayendo al fondo de la cámara en forma de pequeños granos o conjuntos de partículas, y el aire húmedo es descargado a la atmósfera.

El uso del secador por aspersión está limitado a las sustancias que puedan ser asperjadas, como soluciones, suspensiones y pastas de baja viscosidad.

Las principales características de este secador son: Los tiempos de secado muy cortos del orden de 1 a 10 seg. y las temperaturas relativamente bajas.

Las partes del secador por aspersión se pueden englobar como:

- a) Un sistema de calefacción y circulación de aire
- b) Un mecanismo formador de la lluvia o rocío
- c) Una cámara de secado
- d) Un sistema para la recuperación de producto.

- a) Sistema de Calefacción y circulación de aire

Se utilizan calentadores de vapor de agua comúnmente o el uso directo de gases combustibles. Pocas veces se utiliza calefacción eléctrica, excepto en escala de planta piloto.

Para mover el aire a través del sistema se utiliza normalmente ventiladores centrífugos. Algunos secadores tienen un solo ventilador a la salida, mientras que otros tienen ventiladores a la entrada y a la salida. También se dispone de filtros para limpiar el aire que entre en la cámara.

- b) Mecanismos formadores de lluvia

La formación de una lluvia de alimentación que tenga gotas uniformes de las dimensiones deseadas y la distribución de esta lluvia a través del aire caliente es de mayor importancia para obtener un secado por aspersión satisfactorio.

Los secadores por aspersión utilizan tres mecanismos atomizadores.

- 1) Boquillas de aspersión
- 2) Atomizadores centrífugos
- 3) Boquillas de dos fluídos

c) Cámara de secado

Es la parte del secador donde se encuentra el aire caliente y la alimentación, produciendo el consiguiente secado.

El contacto del rocío con el aire queda determinada por la posición de la atomización, con respecto a la entrada del aire de secado, y este puede ser paralelo, contracorriente o mixto.

Paralelo: Cuando el atomizador entra en el mismo sentido que el aire caliente, la evaporación es rápida, las temperaturas de secado son bajas y el producto no está expuesto a las degradaciones por calor.

Contracorriente. El atomizado y el aire entran en sentidos opuestos a la cámara de secado. Este arreglo ofrece al secador una mejor utilización del calor, pero la alimentación está expuesta a recibir el calor más intensamente, por esto se puede trabajar con productos que no sean sensibles al calor.

Mixto, este tipo de flujo incorpora los dos arreglos anteriores, reduce la velocidad de caída de las gotas de secado, permitiendo suficiente tiempo de resistencia en la cámara de secado para una evaporación completa.

d) Sistema de recuperación de producto

En algunos secadores por aspersión, la mayor parte de los productos secos caen hasta el fondo de la cámara y se extraen con ayuda de rastrilleros, tornillos sin fin y válvulas rotatorias; en otros secadores todo el produc

to seco sale de la cámara con aire; para este fin se utilizan tres métodos normalmente: los separadores de ciclón en seco, los depuradores en húmedo y los filtros de saco.

Separador de ciclón. Se introduce la mezcla polvo-aire tangencialmente. Bajo la influencia de la fuerza centrífuga el polvo es expulsado hacia el exterior, mientras el aire escapa del secador con ayuda de un ventilador.

Separadores húmedos, consisten en llevar el aire procedente de la cámara de secado a un recipiente que se lava con un líquido que es el que se va a utilizar como alimentación al atomizador.

Filtros de tela. Se hace pasar el aire de salida por filtros, pueden ser de tipo membrana tubular o plana. Necesitan ser agitados a intervalos para desprender el producto.

SECADOR DE BANDEJA también llamados de anaqueles de gabinete o de compartimiento, consiste esencialmente en una cámara aislada que contiene un ventilador para circular el aire, haciendo pasar a través de un calentador y luego sobre placas ajustables que lo dirigen, bien horizontalmente entre bandejas que contienen el material a secar o bien verticalmente a través de las bandejas y el producto (flujo cruzado).

Se dispone de amortiguadores para regular la velocidad de entrada de aire seco y la cantidad de recirculación del aire según se precise.

Los calentadores del aire pueden ser:

- 1) Mecheros de gas
- 2) Cambiadores de serpentín de vapor de agua
- 3) Resistencias eléctricas de tamaño pequeño.

El material que puede ser un sólido en forma de gránulos, trozos o terrones o una pasta, se esparse uniformemente sobre una bandeja de metal

con una profundidad de 10 - 100 mm. En caso de materiales granulares, este puede colocarse sobre bandejas, cuyo fondo es un tamiz y en un secador de circulación cruzada el aire pasa por un lecho permeable, obteniéndose tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire.

Los secadores de este tipo son relativamente baratos de construir, sin embargo su operación es costosa debido a la baja economía calorífica y altos costos de trabajo. Cada vez que el secador se abre para descargar y cargar, la temperatura del interior baja; todas las partes metálicas del secador deben calentarse nuevamente a la temperatura de operación cuando esta se vuelve a realizar.

4.5. CALCULOS PARA UN SECADOR POR LOTES

4.5.1. Curvas de velocidad de Secado

Para reducir el contenido de humedad en el secado de diversos materiales de proceso, generalmente se desea estimar el tamaño del secador necesario, las diferentes condiciones de operación de humedad y temperatura para el aire empleado, y el tiempo requerido para lograr el grado de secado exigido. En muchos casos no es posible predecir el contenido de humedad de equilibrio de diversos materiales y puesto que nuestro conocimiento de los mecanismos básicos de las velocidades de secado es bastante incompleto, entonces resulta indispensable obtener algunas mediciones experimentales de las velocidades de secado.

Determinación experimental de la velocidad de secado

Para determinar experimentalmente la velocidad de secado de un material, se procede colocando una muestra sobre una bandeja dentro del comportamiento del secador de bandejas. Si se trata de un material sólido, debe llenar por completo la base de la bandeja de tal manera que sólo queda expuesta a la corriente de aire de secado la superficie de dicho sólido.

La pérdida de peso de humedad durante el secado puede determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación colgando la bandeja en una balanza adaptada al ducto a través del cual fluye el aire de secado.

Al realizar experimentos de secado por lotes, deben observarse ciertas precauciones para obtener datos útiles en condiciones que se asemejen lo más posible a las que imperan en las operaciones a gran escala. La muestra no debe ser demasiado pequeña y debe introducirse en una bandeja similar a la que se usará en producción. La relación de la superficie de secado a superficie de

secado a superficie de no secado (superficie aislada) así como la profundidad del lecho del sólido deben ser idénticas. La velocidad, humedad, temperatura y dirección del aire deben ser los mismos y constantes para simular un secado en condiciones invariables.

Curvas de velocidad de secado para condiciones de secado constante.

a) Conversión de los datos a curva de velocidad de secado.

Los datos que se obtienen de un secado por lotes generalmente se expresa como:

W = Peso de sólido húmedo (masa total de agua + sólido seco) a diferentes tiempos de (t) horas de secado.

W_s = Peso del sólido seco (cuando el peso de la muestra se mantiene constante, es decir, ya no pierde humedad).

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} = \frac{\text{Masa total de agua}}{\text{Masa total de sólido seco}} \quad (4.5-1)$$

Habiendo establecido las condiciones de velocidad constante, se determinan el contenido de humedad de equilibrio, X^*

$$X^* = \frac{\text{Masa humedad de equilibrio}}{\text{Masa de sólido seco}}$$

Con ésto se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre X en masa de agua libre/masa de sólido seco para cada valor de X_t

$$X = X_t - X^* \quad (4.5-2)$$

Usando los datos calculados con la ecuación (4.5-2) se traza una gráfica del contenido de humedad libre X en función del tiempo t en hrs, tal como se muestra en la figura 4.2.a. Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica, se miden las pendientes de las tangentes

de la curva, lo cual proporciona los valores de dx/dt para ciertos valores t .

Se calcula entonces, la velocidad R para cada punto con la expresión:

$$R = - \frac{L_s}{A} \frac{dx}{dt} \quad (4.5-3)$$

donde:

R = velocidad de secado, masa de H_2O /tiempo $\times$ área

L_s = masa de sólido seco usado.

A = área superficial expuesta al secado.

La curva de velocidad de secado se obtiene graficando R en función del contenido de humedad, tal como se muestra en la figura 4.2.b

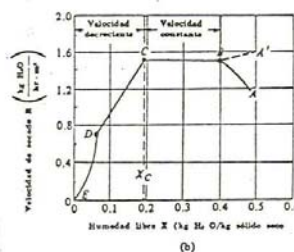
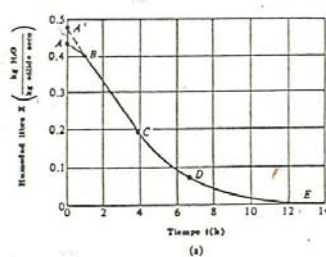


Fig. 4.2. Curva típica de velocidad de secado constante.

- Gráfica con los datos como humedad libre en función del tiempo.
- Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre.

b) Gráfica de la curva de velocidad de secado

En la figura 4.1.b. se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando con un tiempo cero, el contenido de humedad libre corresponde al punto A, la velocidad de evaporación va en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principiar la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en el punto A'. La curva de la figura 4.1.b. es recta entre los puntos B y C, la pendiente y la velocidad son constantes durante este período. Este es el período de velocidad constante de secado.

En el punto C de ambas gráficas, la velocidad de secado empieza a disminuir durante el período de velocidad decreciente hasta llegar al punto D. Después de ahí la velocidad disminuye con mayor rapidez aún hasta el punto E, donde el contenido de humedad de equilibrio es X^* y $X = X^* - X^* = 0$

4.5.2. Métodos de cálculo para el período de secado de velocidad constante

El factor más importante en los cálculos de secado es probablemente, la duración del tiempo requerido para secar un material a partir de un contenido de humedad libre X_1 , hasta alcanzar un contenido de humedad X_2 . Para el secado en el período de velocidad constante es posible estimar el tiempo necesario mediante curvas de secado obtenidas con lotes experimentales, o por predicciones de coeficientes de transferencia de masa y transferencia de calor.

1. Método que usa curva de secado. El tiempo requerido para el período de velocidad constante puede determinarse directamente con la curva

de secado de contenido de humedad libre en función del tiempo, a partir de los datos experimentales.

2. Método que usa la curva de velocidad de secado para el período de velocidad constante. En lugar de la curva de secado, es posible emplear la curva de velocidad de secado. La velocidad de secado R se define en la ecuación (4.5-3) de la siguiente manera:

$$R = \frac{Ls}{A} \frac{dX}{dt} \quad (4.5-3)$$

Esta expresión puede reordenarse e integrarse con respecto al intervalo para secar desde X_1 a $T = 0$, hasta X_2 a $t_2 = t$

$$t = \int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{Ls}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{R} \quad (4.5-4)$$

Si el secado se verifica dentro del período de velocidad constante, de tal manera que tanto X_1 como X_2 sean mayores que el contenido de humedad crítica X_c , entonces $R = \text{constante} = R_c$.

Al integrar la ecuación (4.5-4)

$$t = \frac{Ls}{A R_c} (X_1 - X_2) \quad (4.5-5)$$

3. Método que emplea predicciones de coeficientes de transferencia para el período de velocidad constante. El secado de un material se verifica por transferencia de masa del vapor de agua de la superficie saturada del material a través de una película ambiente circundante. La velocidad de secado está controlada por la velocidad de transferencia de calor hasta la superficie de evaporación que suministra el calor latente de evaporación para el líquido. Cuando se opera en estado

estable, la velocidad de transferencia de masa equivale a la velocidad de transferencia de calor.

Para deducir la ecuación de secado se supondrá que la transferencia de calor sólo se verifica del gas caliente a la superficie del sólido por convección y de la superficie al gas caliente por transferencia de masa.

La velocidad de transferencia convectiva de calor (q), desde el gas a una temperatura (T) a la superficie del sólido (T_w) es

$$q = hA(T - T_w) \quad (4.5-6)$$

donde:

h = Coeficiente de transferencia de calor

A = área de secado expuesta

El flujo específico del vapor de agua desde la superficie es igual a

$$N_A = K_y \frac{M_B}{M_A} (Y_w - Y) \quad (4.5-7)$$

donde:

K_y = Coeficiente de transferencia de masa en $\text{KgMol/s.M}^2 \text{ frac.mol}$ (en SI)

Y_w = Humedad en la superficie del sólido a T_w

Y = Humedad en el aire

La cantidad de calor necesario para vaporizar N_A Kg mol/s.m^2 (en SI) de agua, despreciando los pequeños cambios de calor sensible, es igual a

$$q = M_A N_A \lambda_w A \quad (4.5-8)$$

λ_w = Calor latente de vaporización a T_w

Igualando la ecuaciones (4.5-6) y (4.5-8) y sustituyendo N_A por la Ecuación (4.5-7),

$$R_c = \frac{q}{A \lambda_w} = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w} = K_y M_B (Y_w - Y) \quad (4.5-9)$$

De acuerdo con esto es posible calcular la velocidad de secado R_c mediante la ecuación de transferencia de calor $h(T - T_w)/\lambda_w$ o la ecuación de transferencia de masa $K_y M_B (Y_w - Y)$.

Sin embargo se ha determinado que es más confiable usar la ecuación de transferencia de calor (4.6-7) puesto que cualquier error en la determinación de la temperatura interfacial (T_w) en la superficie, afecta a la fuerza impulsora ($T - T_w$), pero es mucho menor que el efecto que produce sobre ($Y_w - Y$)

$$R_c = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w} \quad (4.5-10)$$

Para predecir el valor de R_c en la ecuación (4.6-7), debe conocerse el coeficiente de transferencia de calor.

Para el caso de que el aire fluya paralelo a la superficie de secado es posible usar la siguiente expresión para una temperatura del aire de $45 - 150^\circ\text{C}$ y una velocidad-masa G de 2450 a 29 300 Kg/hr.m^2

$$h = 0.0204 (G)^{0.8} \quad (4.5-11)$$

donde, una unidad de SI h esta en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y G es $\mathcal{V} \mathcal{P}$ (velocidad lineal X densidad del gas).

Cuando el aire fluye perpendicularmente a la superficie para un valor de G de 3900 a 19 500 Kg/hr.m^2 o una velocidad lineal de 0.9 - 4.6 m/seg

$$h = 1.17 (G)^{0.37} \quad (4.5-12)$$

Las ecuaciones (4.6-7) a (4.6-9) son útiles para determinar la velocidad de secado durante el período de velocidad constante. No obstante siempre que sea posible, es preferible realizar mediciones experimentales de velocidad de secado.

4.6. CALCULOS PARA UN SECADOR CONTINUO

Balance de materia y energía para secador continuo

En la figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo para un secado de tipo continuo donde el gas de secado fluye en paralelo con el flujo de alimentación. El gas es calentado previamente a ser introducido a la cámara de secado.

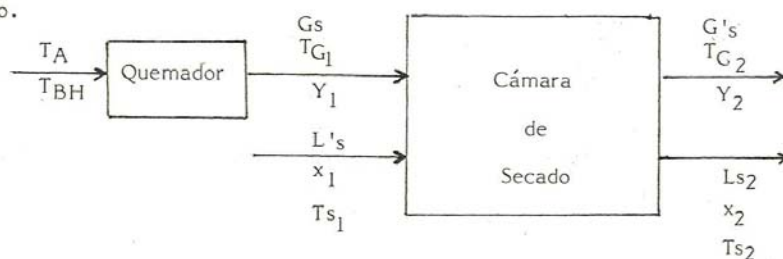


Fig. 4.3. Flujo del proceso para un secador continuo en paralelo

Nomenclatura : Unidad en SI

G_s = Flujo de aire seco Kg a.s./hr

$G's$ = Flujo de aire húmedo Kg/hr

L_s = Flujo de sólido seco Kg s.s./hr

$L's$ = Flujo de alimentación Kg/hr

Y = Humedad absoluta Kg H_2O /Kg a.s

x_1 = Humedad de la alimentación Kg H_2O /Kg soln

x_2 = Humedad del producto Kg H_2O /Kg prod

X = Humedad Kg H_2O /Kg s.s

T_G = Temperatura del aire $^{\circ}C$

T_s = Temperatura de la solución $^{\circ}C$

T_A = Temperatura ambiente $^{\circ}C$

T_{BH} = Temperatura de bulbo húmedo ambiente $^{\circ}\text{C}$

V_o = Volumen de alimentación lit

H_G = Entalpía del aire seco KJ/Kg a.s

H_s = Entalpía del sólido húmedo KJ/Kg s.s.

4.6.1. Balance de Materia

Suponiendo que no hay acumulación de polvo en la cámara de secado tenemos

$$\text{Balance de Humedad} \quad LsX_1 + Gs Y_1 = Ls X_2 + Gs Y_2 \quad (4.6-1)$$

$$\text{Balance de masa total} \quad L's_1 + G's_1 = L's_2 + G's_2 \quad (4.6-2)$$

masa húmeda = masa de sólido seco + masa de agua por unidad de tiempo

$$L's_1 = Ls + Ls X_1$$

$$Ls = \frac{L's_1}{1 + X_1} \quad (4.6-3)$$

además

$$X_1 = \frac{x_1}{1 + x_1} \quad (4.6-4)$$

masa de aire húmedo = masa de aire seco + masa de agua por unidad de tiempo

$$G's_1 = Gs + Gs Y_1 \quad (4.6-5)$$

Cálculo de Flujo Mínimo de Aire

Para calcular el flujo mínimo de aire, se supone que va a salir aire saturado del secador, es decir absorbiendo el máximo de humedad posible.

Balance de humedad

$$LsX_1 + Gs Y_1 = Ls X_2 + Gs_{min} Y_s$$

$$Gs_{min} = Ls \frac{(X_1 - X_2)}{Y_s - Y_1} \quad (4.6-6)$$

4.6.2. Balance de Energía

Calor de entrada - calor de salida + calor de pérdidas

$$G_s H_{G1} + L_s H_{s1} = G_s H_{G2} + L_s H_{s2} + Q \quad (4.6-7)$$

suponiendo un comportamiento adiabático del secador por aspersión, entonces

$$Q = 0$$

Cálculo de Entalpías

La entalpía del gas H_G en KJ/Kg s.s. es (ref. 4)

$$H_G = C_s (T_G - T_o) + Y \lambda_o \quad (4.6-8)$$

T_o es un valor básico elegido para el balance de calor, una temperatura conveniente es 0°C .

λ_o es el calor latente del agua a T_o

C_s es el calor húmedo en KJ/Kg a.s $^\circ\text{K}$, esta dado por:

$$C_s = 1.005 X 1.88 Y \quad (4.6-9)$$

La entalpía del sólido H_s esta constituida por la entalpía del sólido seco mas la del líquido como humedad libre:

$$H_s = C_{ps} (T_s - T_o) + X C_{pA} (T_s - T_o) \quad (4.6-10)$$

donde:

C_{ps} es la capacidad calorífica del sólido seco y

C_{pA} es la capacidad calorífica de la humedad líquida, se suponen ambas constantes.

4.6.3. Eficiencia Térmica

La eficiencia térmica es una expresión del funcionamiento del secador por aspersión y en términos prácticos relaciona el calor de entrada requerido para producir una unidad de peso de producto seco de especificaciones deseadas.

El diseño del secador está enfocado para obtener las propiedades del producto seco deseado a la más alta eficiencia térmica posible. La eficiencia térmica de un secador por aspersión depende de las temperaturas de operación y está definido por la relación:

$$\eta = \frac{\text{Calor usado en la evaporación}}{\text{Calor de entrada}}$$

Cálculo de eficiencia térmica

La eficiencia térmica del secador por aspersión puede ser expresado como (ref. 8).

$$\eta = \left[\frac{T_{G1} - T_{G2}}{T_{G1} - T_A} \right] 100 \quad (4.6-11)$$

donde:

η es la eficiencia térmica,

T_A es la temperatura ambiente.

T_{G1}, T_{G2} las temperaturas del aire a la entrada y a la salida del secador.

4.7. PRACTICAS DE LABORATORIO

4.7.1. Práctica No. 1. Determinación de las curvas de velocidad de secado

Introducción

Con el fin de fijar los horarios de secado y determinar el tamaño del equipo, tanto en la industria como en pruebas de laboratorio, es necesario saber el tiempo que se requerirá para secar una sustancia a partir de un contenido de humedad a otro en condiciones específicas. También es deseable calcular el efecto que tendrán las diferentes condiciones de secado en el tiempo de secado. Como el mecanismo de secado es tan incompleto que, salvo pocas excepciones, es necesario con este fin confiar al menos en algunas mediciones experimentales.

En esta práctica se muestra el procedimiento de operación del secador de cabina y el método de cálculo de las curvas de velocidad de secado y el período de velocidad de secado constante.

Equipo utilizado.

- Secador de cabina (Fig. 4.4.)

Procedimiento

1. Encender el quemador de gas
2. Arrancar el ventilador
3. Esperar un tiempo aproximado de 15 a 20 minutos para que se estabilicen las temperaturas.

4. Colocar el material a secar sobre la charola o malla dentro del compartimiento, rápidamente para evitar cambios bruscos en la temperatura del aire.
5. Cerrar el compartimiento y mantener constantes las temperaturas de entrada.
6. Tomar el peso de la muestra cada 5 minutos (sin sacar la muestra del compartimiento) hasta que el peso se mantenga constante.

Calculos

Los datos de la práctica se pueden presentar en forma de tablas, una como la siguiente

Peso de la muestra W	Tiempo θ	Humedad X_t

Cuando W es constante se trata de W_s

1. Calcular la humedad del sólido para cada tiempo

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (4.5-1)$$

2. Determinar la humedad de equilibrio X^*

$$X^* = \frac{\text{Masa de humedad de equilibrio}}{\text{Masa de sólido seco}}$$

3. Cálculo del contenido de humedad libre X

$$X = X_t - X^* \quad (4.5-2)$$

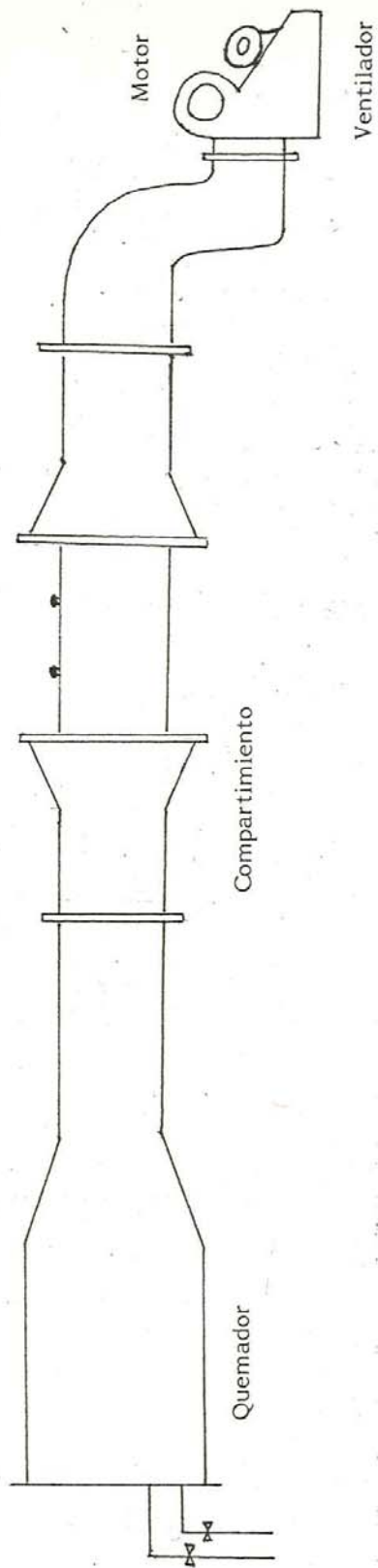


Fig. 4.4. Secador de Cabina

4. Construir una gráfica de contenido de humedad libre contra tiempo
5. Medir las pendientes de las tangentes de la curva, la cual proporcionará dx/dt para ciertos valores de tiempo. Se calcula entonces R , la velocidad de secado

$$R = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (4.5-3)$$

6. Determinar la velocidad de secado en el período de velocidad constante por medio de la gráfica y por medio de las predicciones del coeficiente de transferencia (Ec. 4.5-10) y (4.5-11) o (4.5-12).

Presentación de Resultados

Los datos calculados y los experimentales se pueden presentar tabulados

Contenido de Humedad X_t	Humedad Libre X	Tiempo de Secado θ	Velocidad de Secado

Tabla 2

- . Gráfica de la humedad libre contra tiempo
- . Gráfica de velocidad de secado contra contenido de humedad libre.
- . Comparar el valor de R_c , velocidad de secado en el período de velocidad constante que se obtuvo en la gráfica, con el valor determinado por medio de las ecuaciones que utilizan coeficientes de transferencia de calor.

4.7.2. Práctica No. 2. Secado en el secador por aspersión

Introducción

Una solución puede "secarse" esparciéndola en forma de pequeñas gotas en un gas caliente y seco lo que provoca la evaporación de la humedad. En el secador por aspersión se introduce la alimentación en la cámara de secado en forma de lluvia fina, donde se pone en contacto íntimo con una corriente de aire caliente. Tiene lugar así un secado muy rápido y la producción de un polvo seco.

En el secador por aspersión se trabajó con una solución de fácil adquisición y manejo, con bastante información bibliográfica acerca de sus propiedades físicas, pues la finalidad de esta práctica es mostrar el procedimiento de operación del equipo, así como la aplicación de los balances de materia y energía y no nos ocupamos de las propiedades de la solución alimentada o el producto.

Equipo utilizado

Secador por aspersión

Partes principales del secador por aspersión del laboratorio de Ingeniería Química.

- Sistema de calefacción y circulación de aire

Se usa sistema de gas combustible; el calentador de gas consiste en un quemador montado en la parte inferior de un cuerpo en forma cónica.

El aire caliente es impulsado dentro de la cámara de secado, por medio del borde levantado al final del cono y la tubería de gas es conectada al quemador.

La capacidad del gas es regulada por medio de la válvula de gas.

- Mecanismos formadores de lluvia

el atomizador es el disco centrífugo con orificios en la perifería.

La alimentación se introduce cerca del centro de rotación del atomizador; cuando es acelerado hasta la velocidad determinada el líquido se expande en forma de nube de lluvia fina.

- Cámara de secado

El contacto del aire caliente y alimentación es del tipo paralelo.

La alimentación entra en el centro por la parte superior de la cámara, mientras que el aire caliente asciende a través de un conducto que lo lleva hasta rodear la salida de la alimentación dispersándose a través de la cámara junto con la alimentación.

En la figura 4.5 se muestra el diagrama de flujo del secador por aspersión.

Procedimiento

El procedimiento que se muestra consiste únicamente en la operación del equipo (paro y arranque). No se habla de los tratamientos que se aplican a las soluciones, por lo general, antes de someterse al proceso de deshidratación.

Puntos de inspección

1. Los conductos de conexión deben estar sujetos con las uniones, con empaques de hule entre ellos.
2. La dirección de rotación del motor debe verificarse.
3. Proveer al centro del ciclón con empaques de hule colocados en el ciclón, el cual se levanta hasta el ventilador y se sujeta por medio de los discos de mano.

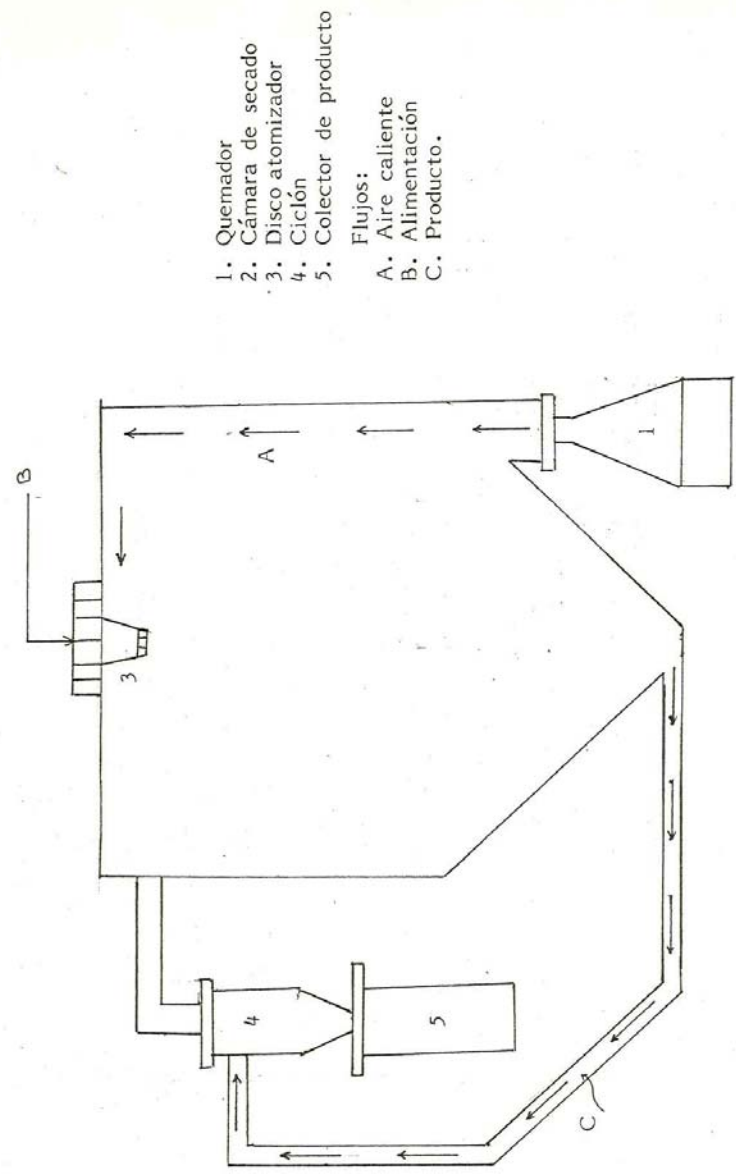


Fig. 4.5 Secador por Aspersión

4. Verificar que el colector de polvo esté bajo el ciclón con las juntas de bayonetas.
5. Verificar el nivel del aceite en el atomizador.
6. Controlar muy cuidadosamente la adhesión del disco atomizador.
7. Las puertas de vidrio y observación deberán estar cerradas.

ARRANQUE

1. Encender el quemador de gas
2. Arrancar el ventilador
3. Ajustar las válvulas en el quemador de gas de manera que se obtenga la temperatura de aire de entrada requerida.
4. Arrancar el atomizador
5. Cuando la temperatura del aire de salida ha alcanzado los 100°C , se alimenta agua destilada al atomizador. Inmediatamente se nota un cambio en la temperatura de salida, ésto es debido a la humedad que absorbe el aire caliente, por lo que éste valor tiende a ser menor a medida que el flujo de agua es grande y por consecuencia no se alcanza a evaporar totalmente. Así pues, se trata de encontrar el flujo adecuado para que la temperatura del aire a la salida se localice en un rango comprendido entre $80 - 100^{\circ}\text{C}$.
6. Aproximadamente después de 20 minutos, cuando el secador se ha calentado totalmente y las temperaturas están estacionarias se introduce la alimentación.

PARO DE LA OPERACION

1. Cierre la alimentación
2. Cierre el gas
3. parar el atomizador
4. Parar el atomizador y vacíe el colector de polvo.

5. Coloque el colector nuevamente, encienda el ventilador y alimente agua para limpiar los conductos.

6. Parar el atomizador y el ventilador.

LIMPIEZA DE EQUIPO

1. Lavar la cámara de secado

2. Desmontar los conductos conectados al ciclón y lavarlos

3. Retirar el ciclón y el colector de polvos para la limpieza

4. Limpieza del disco de aspersión. Dada la función que desempeña esta parte del secador, debe limpiarse perfectamente, pues de lo contrario los residuos van a obstruir el paso de la alimentación para ser dispersada. Para esta limpieza minuciosa es necesario desmontar el disco.

Cálculos

En el secador por aspersión se produjo leche en polvo con humedad de 4.5% en masa, los datos obtenidos durante la operación son los siguientes:

		Temperatura °C	
		Entrada	Salida
Ambiente	T_A	32	-
Bulbo húmedo	T_{BH}	24	-
Aire	T_G	180	80
Alimentación	T_S	8	71

- volumen de solución utilizada $V_o = 7.5$ lit

- tiempo de operación $\theta = 30$ min.

- masa de producto obtenido = 0.4337 Kg

Se requiere determinar:

- Flujo de aire seco
- Humedad absoluta de aire descargado
- Flujo de aire alimentado al secador
- Flujo de aire descargado
- Porcentaje de humedad del aire descargado
- Flujo de aire mínimo
- Pérdidas de producto
- Eficiencia térmica

Datos Adicionales (bibliográficos).

Densidad de la solución (leche) $\rho = 1.033 \text{ gr/ml}$

Contenido de agua de la leche $x_1 = 0.875 \text{ KgH}_2\text{O/Kg soln}$

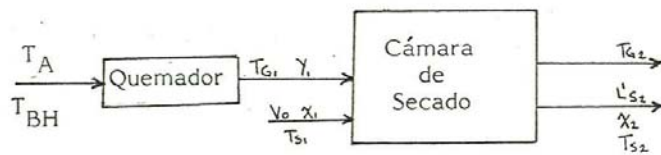
Calor latente de evaporación del agua $^{\circ}\text{C}$

$$\lambda = 2501 \text{ KJ/Kg}$$

Capacidad calorífica del sólido $C_{ps} = 1.464 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg s.s } ^{\circ}\text{K}}$

Capacidad calorífica del agua $C_{pA} = 4.184 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^{\circ}\text{K}}$

Diagrama de Flujo



Base de cálculo: 1 hora de operación

a) Cálculo del flujo de aire seco Gs

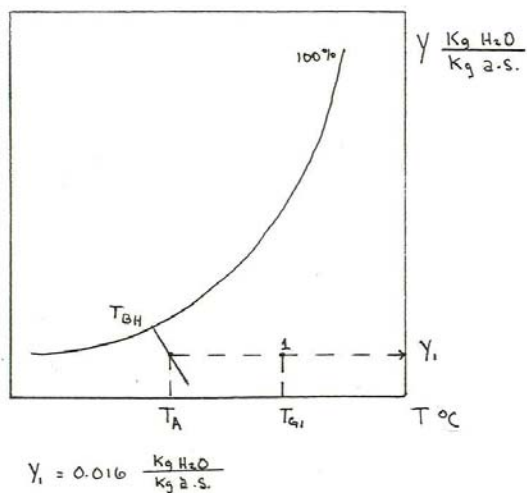
$$L's_1 = \frac{7500 \text{ ml}}{0.5 \text{ hr}} \times 1.035 \text{ gr/ml} = 15\,495 \text{ gr/ml} = 15.495 \text{ Kg/hr}$$

$$X_1 = \frac{0.875 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg soln}}{(1-0.875) \text{ Kg s.s/Kg soln}} = \frac{7 \text{ Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg s.s}} \quad (4.6-4)$$

$$Ls = \frac{15.495}{1 + 7} = 1.935 \text{ Kg s.s/hr} \quad (4.6-3)$$

$$X_2 = \frac{0.045}{(1-0.045)} = \frac{0.047 \text{ Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg s.s}} \quad (4.6-4)$$

De la carta psicrométrica obtenemos Y_1 con T_A y T_{BH} , luego el aire pasa a un calentamiento a presión constante y por consiguiente a humedad absoluta constante hasta la T_{G1} , nos situamos en el punto 1.



Sustituyendo en la ecuación (4.6-1) y ordenando los términos, se tiene:

$$G_s Y_2 = 13.454 + 0.016 G_s \quad \text{Ec (1)}$$

Para efectuar el balance de entalpías es necesario calcular cada una de las entalpías.

La entalpía del gas H_G se calcula con la ecuación (4.6-8), pero antes con la ecuación (4.6-9) se calcula el calor húmedo C_s

$$C_s = 1.005 + 1.88 (0.016) = 1.035 \frac{\text{K J}}{\text{Kg a.s.}^\circ\text{K}}$$

$$H_{G1} = 1.035 \frac{\text{K J}}{\text{Kg a.s.}^\circ\text{K}} (453-273)^\circ\text{K} + 0.016 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg a.s.}} \left(2501 \frac{\text{K J}}{\text{Kg H}_2\text{O}} \right)$$

$$H_{G1} = 226.316 \frac{\text{K J}}{\text{Kg a.s.}}$$

Para aire descargado, como no se conoce Y_2 , queda:

$$C_s = 1.005 + 1.88 Y_2$$

$$H_{G2} = 2651.4 Y_2 + 80.4 \quad \text{Ec (2)}$$

La entalpía de la alimentación y producto es con la ecuación (4.6-10)

$$H_{s1} = 1.464 \frac{\text{K J}}{\text{Kg s.s.}^\circ\text{K}} (281-273)^\circ\text{K} + 7 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg s.s.}} \left(4.184 \frac{\text{K J}}{\text{Kg H}_2\text{O}} \right) \cdot (281-273)^\circ\text{K}$$

$$H_{s1} = 246.016 \frac{\text{K J}}{\text{Kg s.s.}}$$

$$H_{s2} = 117.9 \frac{\text{K J}}{\text{Kg s.s.}}$$

Sustituyendo en la ecuación (4.6-7) y ordenando los términos, tenemos

$$G_s (226.316 - H_{G2}) = 247.9 \quad \text{Ec. (3)}$$

Sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (3) y ordenando los términos:

$$G_s Y_2 = \frac{247.9 - 145.9 G_s}{-2651.4} \quad \text{Ec. (4)}$$

igualando las ecuaciones (1) y (4), se despeja G_s

$$G_s = 347.38 \text{ Kg a.s./hr} \quad \text{flujo de aire seco}$$

b) Humedad absoluta del aire descargado Y_2

sustituyendo en la ecuación (1)

$$Y_2 = 0.0547 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg a.s.}$$

c) Flujo de aire alimentado al secador $G's_1$ Utilizando la Ec. (4.6-5)

$$G's_1 = 347.38 \frac{\text{Kg a.s.}}{\text{hr}} + 347.38 \frac{\text{Kg a.s.}}{\text{Hr}} (0.016 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg a.s.}})$$

$$G's_1 = 352.93 \text{ Kg/hr}$$

d) Flujo de aire descargado $G's_2$. Sustituyendo en la Ec. (4.6-5)

$$G's_2 = 347.38 + 347.38(0.0547)$$

$$G's_2 = 366.38 \text{ Kg/hr}$$

e) Porcentaje de humedad del aire descargado. Una vez que en la carta psicométrica hemos localizado el punto 1 que son las condiciones del aire a la entrada del secador, con la humedad absoluta del aire descargado Y_2 y con la temperatura de bulbo seco T_{G2} localizamos el punto 2 y ahí leemos el porcentaje de humedad.

Utilizando la ecuación (4.6-5) para calcular el flujo mínimo de aire húmedo.

$$G's_{\min} = 26.16 \frac{\text{Kg a.s}}{\text{hr}} + 26.16 \frac{\text{Kg a.s}}{\text{hr}} \cdot 0.53 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg a.s}}$$

$$G's_{\min} = 26.57 \text{ Kg/hr}$$

g) Determinación de pérdidas de producto

Del balance de masa total se calcula $L's_2$ que es la cantidad teórica de producto que debió obtenerse. Con la ecuación (4.6-2) tenemos.

$$L's_2 = (15.495 + 352.93 - 366.30) \text{ Kg/hr}$$

$$L's_{2_{\text{teórica}}} = 2.125 \text{ Kg/hr}$$

como la cantidad de producto obtenido realmente es 0.4337 Kg en el tiempo de operación de 30 min, entonces

$$L's_{2_{\text{real}}} = \frac{0.4337 \text{ Kg}}{0.5 \text{ hr}} = 0.8674 \text{ Kg/hr}$$

$$\text{Pérdidas de producto} = (2.125 - 0.8674) \text{ Kg/hr}$$

h) Eficiencia térmica

Se calcula sustituyendo en la ecuación (4.6-11)

$$\eta = \left[\frac{(180 - 80)^{\circ}\text{C}}{(180 - 32)^{\circ}\text{C}} \right] \times 100$$

$$\eta = 67.5\%$$

Análisis de Resultados

En el aspecto de manejo y operación del equipo sólo se dificultó establecer las condiciones de temperatura deseadas debido a que los flujos de alimentación deben ser muy pequeños para lograr que el tamaño de la nube del líquido asperjado tenga buena distribución y para ésto se necesita un bomba adecuada.

Por otra parte, los cálculos de balance de materia no son los esperados teóricamente, pues además de los errores de medición tales como determinar la humedad del producto y coleccionar la masa total, existen fugas del producto en el aire de salida y acumulaciones en el aparato que son apreciables en pequeña escala.