

N°146
2ES.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

DESARROLLO DE UNA PRACTICA DE LABORATORIO
DE OPERACIONES UNITARIAS FARMACEUTICAS
CON EL TEMA DE: SECADO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO
P R E S E N T A :
JOSE DE JESUS RUIZ DE LA ROSA



MEXICO, D. F.

1992

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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

INDICE

1.- INTRODUCCION	I
2.- GENERALIDADES	1
2.1.- CONCEPTOS RELATIVOS AL SECADO	1
2.2.- CINETICA DEL SECADO	6
2.3.- EQUIPOS DE SECADO	41
3.- PARTE EXPERIMENTAL	50
3.1.- MATERIAL Y EQUIPO	50
3.2.- PROCEDIMIENTOS	51
3.3.- TRATAMIENTO MATEMATICO	53
3.4.- EVALUACION ESTADISTICA	54
4.- RESULTADOS	58
4.1.- FORMULACION A	58
4.2.- FORMULACION B	62
4.3.- FORMULACION C	66
4.4.- GRAFICAS	69
4.5.- BALANCES DE MATERIA	73
4.6.- FORMATO DE PRACTICAS	76
5.- DISCUSION DE RESULTADOS	77
6.- CONCLUSIONES	79
7.- BIBLIOGRAFIA	80
8.- ANEXOS	81
ANEXO 1. FORMATO DE PRACTICAS	82
ANEXO 2. CARTA PSICROMETRICA, VARIABLES Y MANEJO	88

1-INTRODUCCION

El presente proyecto se propone como una alternativa para la modificación de los programas de laboratorio de la materia de Operaciones Unitarias Farmacéuticas tras el cambio en los planes de estudio en la Facultad de Química de la UNAM.

Por otro lado la operación de secado es una de las más importantes en la industria farmacéutica (la cual maneja materias primas, productos intermedios y terminados de diversos aspectos y características) ya que el control de la humedad es primordial para la manufactura y conservación de los productos farmacéuticos; algunos de los propósitos que tiene el secado son:

- a) Preparar ciertos materiales para su posterior uso ,como por ejemplo, los granulados usados para producir tabletas,
- b) Proveer a los materiales cierto grado de hidratación requerido por la regulación sanitaria,
- c) Reducir el peso y volumen de un material con lo que se reduce el costo de transporte y almacenamiento,
- d) Preservar ciertos materiales sensibles a la humedad, por ejemplo, el ácido acetil salicílico o el ascórbico,
- e) Además en algunos materiales se consigue evitar su contaminación con microorganismos tales como bacterias, hongos o levaduras.

de tal modo que resulta de gran utilidad el proveer al alumno de un conocimiento en este proceso.

Se propone el secado de distintos granulados de almidón, los cuales tienen diferentes humedades iniciales; se eligió el almidón por ser uno de los excipientes clásicos en la industria farmacéutica, además de ser una materia prima con un costo mínimo. El alumno tras la realización de la parte experimental elaborará un reporte que consiste en obtener los parámetros representativos de esta operación a partir de sus datos experimentales, con lo que se pretende que afirme los conocimientos adquiridos y tenga la

capacidad de analizar y dar soluciones a posibles problemas en su desempeño profesional.

Se decidió usar un secador de charolas para hacer más didáctica la práctica, ya que al usar un equipo un poco más sofisticado (como por ejemplo un secador de lecho fluidizado o uno de espreas), la atención del se fija en el uso del equipo en sí y no en el proceso mismo, así al tener un equipo sencillo de operar el alumno se enfoca a la operación unitaria. Otro punto por el cual se decidió el usar este tipo de secador es la facilidad de registrar los datos necesarios para obtener con un tratamiento matemático posterior (como ya se ha mencionado) los parámetros necesarios para la asimilación del concepto de secado.

Primeramente se presentan los conceptos necesarios para comenzar el estudio de la operación, posteriormente los mecanismos que se involucran, una introducción a los balances de materia y energía así como su aplicación en este proceso y finalmente se exponen brevemente las características de algunos equipos de secado.

2. GENERALIDADES

2.1. CONCEPTOS RELATIVOS AL SECADO.

Antes de comenzar a hablar de la operación unitaria de secado se expondrán algunas definiciones que se involucran en este proceso.

2.1.1. Definición del secado. Para distinguir el secado de otras operaciones usadas para eliminar algún líquido de un material sólido, tales como la expresión (compresión de un sólido para extraer el líquido), la extracción (se elimina el agua por mediante el uso de un solvente), la adsorción (se elimina el agua de un solvente por el uso de un desecante, como el sulfato de sodio anhidro por ejemplo) y la desecación (eliminar la humedad de un material al colocarlo en un recipiente sellado el cual contiene un material removente de la humedad); se ha definido como la remoción de un líquido existente en baja concentración, de un material sólido por la aplicación de calor, y que es acompañada por la transferencia del líquido existente en la superficie del sólido hacia un vapor o gas; es importante hacer notar que en esta definición se aclara que el líquido debe de encontrarse en pequeñas cantidades, ya que la cantidad de líquido es lo único que distingue ha este proceso de la evaporación.

2.1.2. Humedad.

Definición de humedad. La humedad (Y) de un material representa la masa de agua existente en una cierta cantidad de sólido seco, es decir,

$$\text{Humedad} = X = \frac{\text{Kg de agua}}{\text{Kg de sólido seco}}$$

Humedad de equilibrio (X_E). Cuando un material se expone a un aire de cierta temperatura y humedad, ganará o perderá humedad hasta alcanzar una situación de equilibrio en que ya no sufre cambios, entonces se dice que llegó a la *humedad de equilibrio*.

Humedad libre (X_L). Se define como la humedad que contiene un sólido en exceso sobre el valor de su humedad de equilibrio, es decir:

$$X_L = X - X_E$$

La humedad libre suele expresarse como humedad en base seca, que es un valor igual al denominado contenido de humedad (MC) que se tratará posteriormente.

Humedad ligada. Esta humedad es la que un sólido contiene puede y que esta ligada a él de tal manera, que la presión de vapor que ejerce es menor que la que corresponde al agua a esa temperatura; esta humedad puede estar de diversas maneras: adsorbida en superficies interiores, retenida en pequeños capilares, parcialmente combinada con el sólido o asociada a él por uniones del tipo hidrógeno, etc. Por encima de este valor de humedad ligada, tendremos la *humedad no ligada* que ejercerá una presión de vapor igual a la del agua pura a una cierta temperatura.

No se debe confundir el término humedad libre con el de humedad no ligada, ya que la distinción entre humedad libre y humedad de equilibrio resulta de las condiciones del proceso de secado, mientras que en el otro caso depende del material en sí mismo. En la figura 1 se presenta una gráfica para hacer más clara la diferencia.

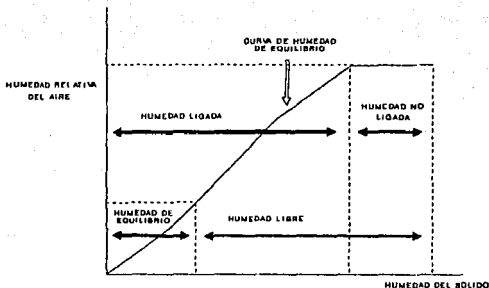


FIGURA 1.- COMPARACION DE LA HUMEDAD NO LIGADA
HUMEDAD LIBRE

En la industria farmacéutica se manejan para indicar el nivel de agua en algún producto los siguientes términos:

Pérdida al secado (LOD). Este término es una expresión de el contenido de humedad en base húmeda, que se calcula de la siguiente forma:

$$\% \text{ LOD} = \frac{\text{peso de agua en la muestra}}{\text{peso total de muestra humedad}} \times 100$$

La pérdida al secado se determina mediante el uso de una balanza de humedad, la cual tiene una parrilla de calentamiento rápido y una escala calibrada en por ciento de LOD; una muestra de peso conocido se coloca en la balanza y comienza el calentamiento hasta tener un peso constante, obteniéndose una lectura directa en la escala. En esta determinación se asume que no existen otros materiales volátiles además del agua.

Contenido de humedad (MC). Esta es una medida de la humedad en un sólido húmedo calculada en base seca, es decir:

$$\% MC = \frac{\text{peso de agua en la muestra}}{\text{peso de la muestra seca}} \times 100$$

Es importante dejar especificado que estos dos parámetros no pueden ser usados indistintamente ya que presentan variaciones muy importantes en valores numéricos, por ejemplo si se tuviesen 5 g exactamente pesados de un material y al llevarse a peso constante se tuvieran 3 g, al efectuar los cálculos tendríamos que:

$\% MC = 66.7\%$ mientras que $\% LOD = 40\%$ lo que representa una variación de más del 20% entre uno y otro valor.

2.1.3. Características de los sólidos secados en la industria farmacéutica. De manera general los sólidos existentes se pueden dividir en dos tipos principales:

- 1.- Los sólidos porosos.
- 2.- Los sólidos no porosos.

Sólidos porosos.

En la industria farmacéutica, los materiales que entran dentro de esta categoría son generalmente sustancias inorgánicas y por consecuencia, son más resistentes al calor que las orgánicas.

Como ejemplos de este tipo de sustancias se pueden mencionar el sulfato de calcio, óxido de zinc y óxido de magnesio. Por otro lado, las sustancias porosas tienen un contenido de humedad de equilibrio más bajo que las no porosas, y poseen un mecanismo de flujo, el cual se explicará posteriormente, que les confiere un tiempo de secado más corto que el de las últimas.

Sólidos no porosos.

Este tipo de sólidos son generalmente sustancias orgánicas, cuyas estructuras y propiedades fisiológicas se ven afectadas por altas temperaturas, por lo que el secado de este tipo de sustancias requiere en general el uso de equipos que operan a bajas temperaturas, presión reducida y gran flujo de aire; como ejemplo de este tipo de sustancias se pueden mencionar el almidón caseína, levadura, así como materiales inorgánicos gelatinosos como el hidróxido de aluminio.

Los sólidos no porosos tienen con frecuencia una humedad de equilibrio más alta que la de los sólidos porosos ya que, la mayor parte de su humedad esta situada en los espacios moleculares de la sustancia en cuestión.

2.2. CINÉTICA DEL SECADO.

En el secado están ocurriendo dos procesos simultáneos:

- 1) Transferencia de calor por el modo de aportar el calor necesario para la vaporización de la humedad, lo que puede efectuarse por convección (mecanismo de transmisión en el que un sólido se pone en contacto directo con gases calientes) y por conducción (mecanismo de transmisión en el que un sólido se encuentra en contacto con superficies calientes).
- 2) Transferencia de materia, agua, desde la superficie del sólido hacia la fase gaseosa como vapor y en el interior del sólido hacia la superficie como líquido para reponer aquella, o como vapor para liberar el formado en el interior del sólido.

De los dos procesos, el más complejo y menos conocido es el segundo, existiendo varios mecanismos igualmente posibles y quizá se den varios de ellos en forma simultánea, por lo que la solución cuantitativa es todavía una meta muy lejana.

Utilizando la regla de las fases cuya ecuación es la siguiente:

$$\phi = C - P + 2$$

donde:

ϕ = número de grados de libertad.

C = número de componentes.

P = número de fases.

Se enunciará la cantidad de grados de libertad que existen para los casos de dos y tres fases en el secado de un sólido.

Para el caso donde se tienen tres fases (vapor, sólido, líquido) y tres componentes, en el que el sólido húmedo contiene agua líquida libre en su superficie. Sustituyendo en la ecuación de la regla de las fases:

$$\phi = C - P + 2 = 3 - 3 + 2 = 2 ; \quad \phi = 2$$

A presión constante hay una única relación entre temperatura y concentración de líquido en la fase de vapor, lo mismo que ocurre en las operaciones de contacto aire-agua.

En el otro caso en donde no existe líquido libre (sólido higroscópico), es decir, donde el agua está retenida en el interior del sólido, hay dos fases y tres componentes, de modo que:

$$\phi = C - P + 2 = 3 - 2 + 2 = 3 ; \quad \phi = 3$$

Y en este caso, las variables son la temperatura, presión y concentración de agua en el sólido y en el vapor.

Ya que el secado implica que hay una transferencia de masa entre dos o tres fases, y esta transferencia cesará cuando se alcance el equilibrio entre dichas fases, el equilibrio se definirá como el punto en el que la transferencia neta de materia, cesa.

A fin de llevar un orden en la exposición de la teoría del secado desarrollada en este trabajo, se tratarán primero las curvas de velocidad de secado, períodos de velocidad constante, períodos de velocidad decreciente, secado de sólidos no porosos, segundo período de velocidad decreciente, secado de sólidos porosos, y por último, cálculo del tiempo de secado, en condiciones de secado constante.

2.2.1. CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO.

La velocidad de secado de una muestra puede ser determinado por la suspensión del material húmedo en una balanza en un secador y midiendo el peso de la muestra seca en función del tiempo. Para determinar acertadamente la velocidad de la curva de secado es importante que las condiciones de secado se mantengan fijas, es decir, conservar la constancia de la temperatura, humedad y velocidad y dirección del aire. En tales condiciones puede obtenerse una curva como la de la Fig. 2, en la que se representa humedad de sólido en función del tiempo. A partir de dicha curva se puede obtener la fig. 3 definiendo la velocidad de secado como la masa de humedad eliminada por unidad de tiempo y unidad de área de secado, kg agua/m² h:

$$N = - \frac{W \cdot dX}{A \cdot d\theta} \quad \text{EC. 1}$$

donde:

θ = tiempo.

W = peso sólido seco.

A = área ó superficie mojada expuesta a la evaporación.

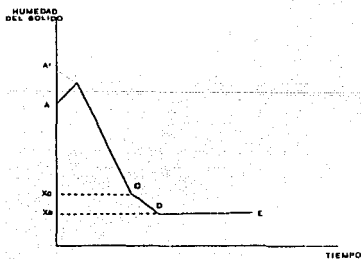


FIGURA 2- GRAFICA DE HUMEDAD DEL SOLIDO EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO

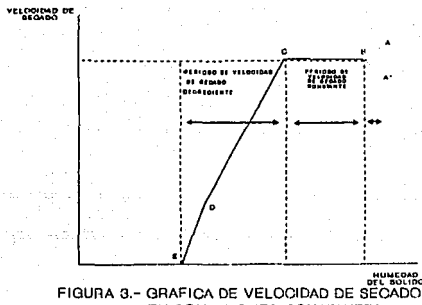


FIGURA 3.- GRAFICA DE VELOCIDAD DE SECADO EN CONDICIONES CONSTANTES

Se grafica nuevamente en las ordenadas de una nueva gráfica, contra la humedad libre (X_L) o contra el contenido de humedad por ciento en el sólido, obteniendo así la curva de velocidad de secado deseada.

Este tipo de curva varía según las características del sólido de que se trate, pero en general, los no porosos presentan un período de velocidad constante y, generalmente, un solo período de velocidad decreciente, y los sólidos porosos, en que además del período de velocidad constante, se presentan por lo general dos períodos de velocidad decreciente.

En la Fig. 3 para condiciones de secado constante a un tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior a la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación irá 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 pricipiar la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. este periodo inicial de ajuste con estado inestable suele ser bastante corto y generalmente se ignora en el análisis de los tiempos de secado.

La curva de la Fig. 2 es la recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. Este periodo de velocidad constante de secado corresponde a la línea BC en la Fig. 3.

En el punto C de ambas gráficas, la velocidad de secado comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente, hasta llegar al punto D. En este primer periodo de velocidad decreciente, la velocidad corresponde a la línea CD en la Fig. 3, y por lo general es lineal.

En el punto D, la velocidad de secado disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto E, donde el contenido de humedad libre (X_L) es igual a cero. En el secado de algunos materiales, la región CD puede no existir o bien constituir la totalidad del periodo de velocidad decreciente.

Este tipo de curva, podrán ser utilizadas para optimizar el tiempo de secado, que es lo que se busca en cualquier caso, según el contenido de humedad inicial.

2.2.2. PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Ya que para los dos tipos de sólidos mencionados (porosos y no porosos) existe un periodo de velocidad constante, nos ocuparemos de él en seguida.

Después de un lapso breve de tiempo, en el que la temperatura del material se ajusta a las condiciones de secado, segmento AB, parece un segmento horizontal BC (fig. 3) que corresponde al primer período de secado. éste es llamado período de velocidad constante y se caracteriza porque la velocidad de secado es independiente de la humedad del sólido. Durante este tiempo, el sólido está tan húmedo que existe una película continua de agua sobre toda la superficie de secado y el agua se comporta como si el sólido no existiera. Para el sólido de tipo poroso, la mayor parte del agua eliminada durante el período de velocidad constante, proviene del interior del mismo, y para el sólido no poroso será el agua que recubre la superficie del mismo. La mayoría de esta agua es agua no ligada, y por lo tanto, ejerce su presión de vapor íntegra y esta primera evaporación la consideraremos como la evaporación de una superficie líquida, la cual con el paso de aire llega a la temperatura del bulbo húmedo para las condiciones de temperatura y humedad del aire existente.

2.2.3. PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE.

Hasta este momento, se puede establecer un patrón de comportamiento para sólidos porosos y no porosos, pero después del período de velocidad constante y de haber alcanzado el contenido crítico de humedad, se presenta(n) período(s) de velocidad decreciente el cual (los cuales) difiere(n) para los tipos de sólido debido al mecanismo de flujo de humedad durante éste (éstos) período(s) y que se tratan a continuación:

Secado de Sólidos no porosos.

La distribución de humedad en un sólido no poroso, e insoluble en el líquido que lo humedece, da una curva de velocidad de secado como la de la figura 4, está dada por la línea discontinua de la figura 5, donde se representa la humedad local

frente a la distancia z la superficie, este tipo de curvas están cualitativamente de acuerdo con lo que exige la suposición de que la humedad fluye por difusión de acuerdo con la ley de Fick, para transferencia de masa a régimen no permanente pero alterada para este caso particular:

$$\frac{d X_T}{d \theta} = D_L^* \frac{\partial^2 X_T}{\partial z^2}$$

donde:

D_L^* = Coeficiente de difusión ó difusividad de la fase líquida aplicable para el movimiento a través de la fase sólida en m^2/hr .

z = Espesor en m

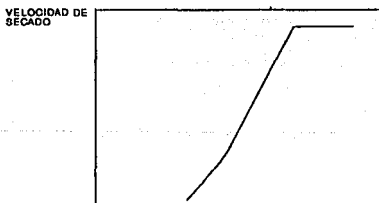


FIGURA 4.- CURVA DE SECADO DE MATERIALES NO POROSOS

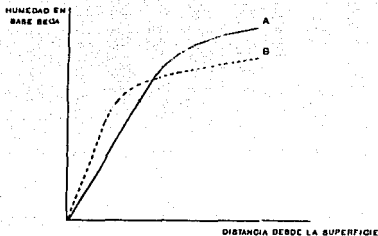


FIGURA 5.- FLUJO DIFUSIONAL. A, COEFICIENTE DE DIFUSION CONSTANTE; B, CURVA EXPERIMENTAL

Para el caso más simple, D_L^* se consideraría constante, y el secado se llevaría a cabo solamente a través de una de la superficies del sólido (condiciones de secado constante). Pero en la realidad varía con la humedad y más sensiblemente con la contracción del material. el valor de D_L^* es menor para contenidos pequeños de humedad que para grandes, y cerca de la superficie de secado puede ser muy pequeño.

Así la distribución de humedad que se predice mediante la teoría de difusión, viene dada por la línea continua de la figura 5. Debido a esto, se emplea en la práctica un valor de D_L^* determinado experimentalmente con el material que se va a secar, usando la ecuación siguiente (ec. 2):

$$\frac{X_T - X_E}{X_{Ti} - X_E} = \frac{X_L}{X_{Li}} = \frac{8}{\pi^2} (e^{-\alpha_1 \beta} + 1/9 e^{-9\alpha_1 \beta} + 1/25 e^{-25\alpha_1 \beta} + \dots) \quad \text{EC. 2}$$

donde:

$$\beta = D_L^* \theta / S^2$$

$$\alpha_1 = (\pi/2)^2$$

X_T = Humedad total media en el tiempo θ en horas.

X_L = Humedad libre media en el tiempo θ hora.

X_E = Humedad de equilibrio.

X_{Ti} = Humedad inicial al comienzo del secado para $\theta = 0$

X_{Li} = Humedad libre inicial.

S = Semiespesor de la lámina (m).

D_L^* = Coeficiente de difusión de la humedad a través del sólido $m^2/hr.$

Nota: Todas las humedades se dan en unidades dimensionales.

Esta ecuación se aplica a cuerpos sólidos con forma de paralelepípedos, en los que el largo es mayor que el espesor y , para secado desde ambas caras principales. Si el secado ocurriera desde una sola cara, en la ecuación 2, S correspondería a todo el espesor del cuerpo. Para otras formas, esferas, cilindros, hay ecuaciones de forma semejante, obtenidas también por analogía con transferencia de calor, las cuales se presentan a continuación. De manera esquemática se muestra en la figura 6.

$$\frac{X_T - X_E}{X_{T1} - X_E} = 0.692e^{-0.70\beta} + 0.131e^{-30.9\beta} + 0.0534e^{-71.9\beta} + \dots \quad \text{EC. 2a}$$

$$\frac{X_T - X_E}{X_{T1} - X_E} = 0.608e^{-0.70\beta} + 0.152e^{-30.9\beta} + 0.067e^{-80.0\beta} + \dots \quad \text{EC. 2b}$$

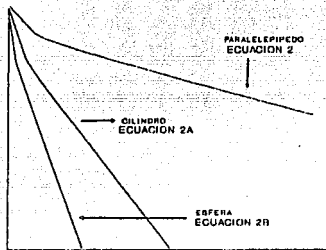


FIGURA 8.- REPRESENTACION GRAFICA DE DIFERENTES ECUACIONES PARA SECADO CON FLUJO DIFUSIONAL

Cuando β es mayor que aproximadamente 0.1, sólo es significativo el primer término del segundo miembro de la ecuación y pueden despreciarse los demás términos de la serie.

Despejando el tiempo de secado de la ecuación resultante, se obtiene:

$$\theta = \left[\frac{4 s^2}{\pi^2 D_L k} \right] \left[\frac{\ln 9 \frac{X_{L1}}{X}}{\pi^2} \right] \quad \text{EC. 3}$$

Diferenciando esta ecuación con respecto al tiempo se llega

a:

$$-\frac{d X_L}{d \theta} = (\pi/2)^2 \frac{D_L X_L}{S^2} \quad \text{EC. 4}$$

Ya que la resistencia a la transferencia de materia del vapor de H_2O desde la superficie del sólido al aire es generalmente despreciable, y la difusión dentro del sólido controla la velocidad global del secado.

Teniendo en cuenta esto según la anterior ecuación, la velocidad de secado es inversamente proporcional al cuadrado del espesor del lecho. Puesto que la difusividad aumenta con la temperatura, según la misma ecuación la velocidad de secado aumenta también con la temperatura del sólido.

Eventualmente, después del primer periodo de velocidad decreciente, la humedad líquida deja de fluir a la superficie del sólido y ésta se seca. El plano de evaporación se encuentra ahora en el interior del sólido, y el vapor alcanza la superficie por difusión a través de los pequeños poros de la cama.

Como se puede ver en la figura 7, la humedad de equilibrio se alcanza lentamente, siendo pues la difusión una característica de los materiales que secan lentamente. Debido a esto, los materiales no porosos deben ser tratados antes del secado por algún medio mecánico con el fin de eliminar la mayor cantidad de líquido posible y acortar la distancia que lo separa de la humedad de equilibrio.

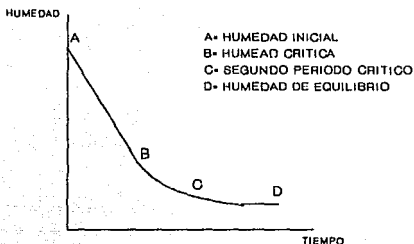


FIGURA 7.-CURVA DE SECADO PARA SÓLIDOS NO POROSOS

Secado de Sólidos porosos.

La curva de secado obtenida cuando las partículas que componen la cama son por sí mismas porosas, se muestra en la figura 8. Este tipo de curvas difiere de las curvas que dan los sólidos no porosos en que el periodo de velocidad constante es más corto y en que por lo general el segundo periodo de velocidad decreciente es más pronunciado.

Por otro lado, la velocidad de secado puede ser mayor que para los sólidos no porosos, y es casi independiente del tamaño de la partícula. En este caso, el contenido de humedad crítica depende principalmente del tamaño del poro.

Estas diferencias se presentan debido a que el mecanismo del flujo de humedad en el interior del sólido no es de difusión como

en los sólidos no porosos, sino que en este caso, la humedad fluye a través del sólido por capilaridad.

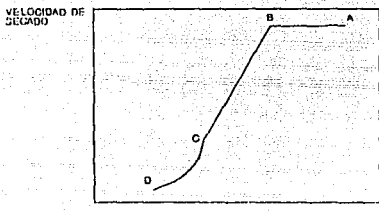


FIGURA 8.- CURVA DE SECADO DE MATERIALES POROSOS

La figura 9 nos muestra la distribución de la humedad en un sólido poroso durante el secado. Comparando la figura 5 que es para secado por difusión con la figura 9, veremos que difieren en que esta última curva presenta un punto de inflexión que la divide en dos partes, una cóncava hacia arriba y otra cóncava hacia abajo, mientras que para el mecanismo de flujo de humedad por difusión sólo se presenta una concavidad hacia abajo.

Para esta curva de distribución de humedad, las fuerzas capilares ofrecen una explicación coherente para el secado de las substancias porosas.

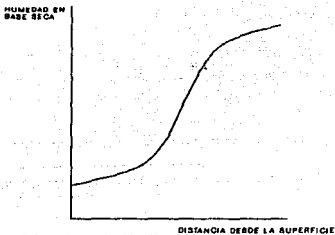


FIGURA 9.- DISTRIBUCION DE HUMEDAD EN CUERPOS POROSOS

Cuando se están secando sólidos granulares y porosos como arcillas, arena, tierra, pigmentos para pinturas y minerales, la humedad libre o sin combinar se desplaza a través de capilares y espacios vacíos de los sólidos.

Los poros y canales de un sólido poroso están interconectados y son de diversos tamaños, por ello a medida que se evapora el agua, se forma un menisco de líquido en cada poro en el interior del sólido. Esto origina las fuerzas capilares por la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas constituyen el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie. Los poros pequeños desarrollan fuerzas mayores que las producidas por poros más grandes.

Para sólidos de poro muy grande, la resistencia al flujo de humedad es baja, y las fuerzas capilares son pequeñas. Entonces, la fuerza de gravedad es tan grande en comparación con las fuerzas capilares que ejerce un efecto direccional.

Una curva para un sólido de este tipo se presenta en la figura 10. en la que se encuentran dos líneas. La línea ABCD se obtiene con una muestra que se seca por la parte superior y la discontinua AB'CD corresponde a una muestra que se seca por el fondo. En el secado por arriba, la gravedad se opone a la capilaridad y el primer punto crítico se alcanza antes (punto B).

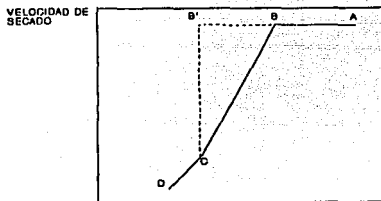


FIGURA 10.- CURVAS DE SECADO PARA SÓLIDOS DE PORO MUY GRANDE

Cuando un material se seca desde el fondo, las fuerzas capilares y de gravedad actúan en la misma dirección para mover el agua hasta la superficie del secado. Y el periodo de velocidad constante es mayor (segmento AB').

El agua puede fluir desde regiones de concentraciones elevadas hasta las de bajas concentraciones como resultado de una acción capilar en lugar de difusión, cuando los tamaños de los poros de los materiales granulares son adecuados para ello.

La teoría capilar ¹ supone que un lecho empacado de esferas no porosas contiene espacios vacíos entre dichas esferas que se llaman poros. A medida que se evapora el agua, las fuerzas capilares se ponen en acción debido a la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas proporcionan el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie de secado.

Para deducir una ecuación de la velocidad de secado cuando el flujo se efectúa por movimiento capilar, puede usarse una forma modificada de la ecuación de Poiseuille para flujo laminar, en combinación con la ecuación de fuerza capilar. Si el movimiento de la humedad obedece a las ecuaciones del flujo capilar la velocidad de secado N variará en forma lineal con X . Puesto que el mecanismo de evaporación durante este periodo es igual al que prevalece durante el periodo de velocidad constante, los efectos de las variables del gas de secado, tales como velocidad del gas, temperatura del gas, humedad del gas, etc., serán los mismos que para el periodo de secado de velocidad constante.

Cuando la velocidad N (ecuación 1) varía linealmente con X se establece que

$$N = N_c \frac{X}{X_c} \quad \text{EC. 5}$$

¹PERRY, R.H.; CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK; 1973.

$$t = \frac{W X_c}{AN_c} \ln \frac{X_c}{X_2} \quad \text{EC. 6}$$

Definiendo t como el tiempo entre $X = X_2$ y

$$W_s = z_1 A \rho_s \quad \text{EC. 7}$$

donde ρ_s = densidad del sólido en Kg sólido seco/m³, Sustituyendo la ecuación 7 y $X = X_2$, en la ecuación 6,

$$t = \frac{X_2 \rho_s X_c}{N_c} \ln \frac{X_c}{X} \quad \text{EC. 8}$$

Sustituyendo

$$N_c = \frac{h (T - T_w)}{\lambda_w} \quad \text{EC. 9}$$

se llega a:

$$t = \frac{X_2 \rho_s \lambda_w X_c}{h (T - T_w)} \ln \frac{X_c}{X} \quad \text{EC. 10}$$

donde:

h = es el coeficiente de transferencia de calor

λ_w = calor latente a T_w

T_w = temperatura del sólido

T = Temperatura del vapor secante

Por consiguiente, las ecuaciones 8 y 9 indican que, cuando el flujo capilar es el factor que controla durante el periodo de velocidad decreciente, la velocidad de secado es inversamente proporcional al espesor. El tiempo de secado entre límites fijos de humedad varía directamente con el espesor y depende de la velocidad, la temperatura y la humedad del gas.

2.2.4. CALCULO DEL TIEMPO DE SECADO.

Una variables importante para el diseño de secadores, es el tiempo de secado en las condiciones existentes en el secador, puesto que de él dependerá el tamaño necesario para obtener una capacidad determinada. Para el secado en condiciones constantes, se puede determinar el tiempo de secado a partir de la curva de velocidad de secado para esas mismas condiciones. Esto es, cuando se quiere determinar un tiempo de secado para llevar un sólido de una humedad inicial a una final en condiciones de secado iguales a las de la curva que se posee, se procede de la siguiente manera:

Considerando que en un cierto intervalo de tiempo la humedad cambia de un valor inicial (X_i) hasta uno final (X_f), tenemos posibilidad de integrar la ecuación 1 como se muestra a continuación:

$$\theta = \int_0^{\theta} d\theta = \frac{W}{A} \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{X N} \quad \text{EC. 11}$$

Ya que dentro de la ecuación 11 tanto X como N son variables, habrá que integrarla para cada uno de los segmentos identificables de la curva de velocidad de secado.

Periodo de Velocidad Constante.

Cuando X_i y $X_f \geq X_c$ (Humedad crítica), para este periodo $N = N_c = \text{constante}$, la ecuación 11 se transforma en:

$$\theta = \frac{W_s (X_I - X_F)}{A N_c}$$

EC. 12

Donde N_c se determina de la curva de velocidad de sacado para este periodo.

En caso de que $X_F = X_c$, o que la humedad final requerida sea menor que X_c , se sustituye en la X_F por X_c y se obtiene para $X_F = X_c$ el tiempo total de secado, y para $X_F < X_c$, un tiempo parcial de secado que se sumará después al tiempo que se obtenga durante el periodo de velocidad decreciente hasta alcanzar X_F .

Periodo de Velocidad Decreciente.

Para el segundo caso de los anotados arriba, en que $X_F < X_d$, utilizaremos la ecuación 2 considerando ahora que $X_I = X_c$ y $X_F \geq X_E$ cuando solo hay un periodo de velocidad decreciente y X_F este dentro de este primer periodo, o en caso de que haya un segundo periodo de velocidad decreciente y X_F deseada esté allí, $X_F = X_c'$ para calcular todo el tiempo que toma el secado en la totalidad del primer periodo de velocidad decreciente y tomarlo como otro tiempo parcial de secado, siendo X_c' el segundo valor de humedad crítica, y para determinar el último tiempo parcial tomando en cuenta que, para este último periodo, $X_F \geq X_E$ (humedad de equilibrio).

Por otro lado, en el o los periodos de velocidad decreciente N es variable y por lo tanto, podrán presentarse dos casos:

a) Caso general.- Este caso se presenta cuando el o los periodos de velocidad decreciente presentan una forma curva. En este caso, la integración de la curva tendrá que ser graficada, obteniendo de la curva los datos de $1/N$ como ordenada y X como abscisa.

Sacando promedio de ambos para intervalos lo más pequeños posibles, se obtiene:

$$\sum_{l=1}^n \Delta X (1/N) \text{ promedio}$$

y por lo tanto la ecuación 2 quedará:

$$\theta = \frac{W_s}{A} \int_{X_F}^{X_I} \frac{dX}{dN'} = \frac{W_s}{A} \left(\sum_{l=1}^n \Delta X (1/N') \text{ promedio} \right) \quad \text{EC. 13}$$

b) Caso particular.- n' es lineal con respecto a X , en este caso:

$$N' = mX + b \quad \text{EC. 14}$$

donde:

m = Pendiente de la línea.

b = Constante.

Sustituyendo en la ecuación 2 e integrando:

$$\theta = \frac{W_s}{A} \int_{X_F}^{X_I} \frac{dX}{mX + b} = \frac{W_s}{A} \ln \frac{m X_c + b}{m X_F + b} \quad \text{EC. 15}$$

Pero ya que,

$$N'_I = m X_c + b$$

$$N'_F = m X_F + b$$

Despejando m :

$$m = \frac{N'_c}{X_c} - \frac{N'_F}{X_c} - \frac{X_F}{X_c}$$

La ecuación 14 se convierte a:

$$\theta = -\frac{W}{A} \frac{(X_c - X_f)}{(N_c' - N_f')} \ln \frac{N_c'}{N_f'} - \frac{W}{A} \frac{(X_c - X_f)}{N_m'} \quad \text{EC. 16}$$

N_m' = media logarítmica en c y en F.

Para el caso en el que haya un segundo periodo de velocidad decreciente y sea recto, se sustituye en la ecuación 15 X_c por X_c' y N_c' por N_c'' .

El desarrollo anterior es útil de la manera enunciada, para cuando se dispone de una curva de velocidad de secado a las condiciones a las cuales se pretende determinar el tiempo, pero en caso de que no se tenga dicha curva, para otras condiciones, el tiempo de secado se podrá estimar de la misma forma, pero disponiendo de los siguientes datos y haciendo las siguientes consideraciones:

- 10.- Características del gas secador (Humedad Relativa y temperatura de entrada) para poder obtener de una carta psicométrica (ver anexo 2) $T_s = T_n$, para el periodo de velocidad constante, calculando N' de la siguiente forma: m^*/A de la fórmula,

$$m^* = M_B \text{ Kg } (H_i - H) A \quad \text{EC. 17}$$

donde:

- m^* = Velocidad de evaporación Kg H_2O evap/hr.
- M_B = Peso molecular del aire Kg A.S./Kg mol A.S.
- H_i = Humedad del aire en la interfase = Kg H_2O /Kg A.S.
- H = Humedad del aire = Kg H_2O /Kg A.S.
- Kg = Coeficiente de transferencia de masa
- A = Area de transferencia m^2 .

es igual a N'

$$N' = \frac{Q}{\lambda_s A} = \frac{h}{\lambda_s} (T_a - T_s)$$

donde:

λ_s = Conocida de tablas.

T_a = Temperatura del aire.

$T_s = T_b$ = Temperatura de bulbo húmedo.

Q = Calor trtransferido

h = coeficiente de transferencia de calor.

y se ha llegado a determinar que el coeficiente de transferencia de calor, h , es también una función de la velocidad del aire y del ángulo de incidencia y así cuando el aire fluye paralelamente a la superficie del sólido, se puede determinar por medio de la ecuación dimensional:

$$h_y = 0.0176 G^{0.8}$$

siendo G la velocidad másica en Kg/hm^2 . Cuando el flujo es perpendicular a la superficie, la ecuación es:

$$h_y = G^{0.37}$$

Para el caso en que se considere la radiación de los alrededores y para una determinación más exacta de h considerando la conducción a través del sólido y convección del gas.

$$Q_T = hA(T_a - T_s) = h_c A(T_a - T_s) + h_r A(T_a - T_s) + U_k A(T_a - T_s) \quad \text{EC. 19}$$

donde:

h_c = Coeficiente por convección.

h_r = Coeficiente por radiación.

U_k = Coeficiente total a la superficie por convección y conducción a través del sólido.

Si las paredes del secador están a la temperatura del aire:

$$h = h_c + h_r + U_k \quad \text{EC. 20}$$

20.- Contar con una gráfica como la de la figura 11 que da la humedad crítica en función de N_c' . Con N_c' y X_c determinamos mediante la ecuación 3 el tiempo de secado para el periodo de velocidad constante, ya que la humedad crítica depende también de las condiciones del aire, y para hacer un cálculo más exacto de ella, se debe disponer de una gráfica en que se dé la velocidad de secado en función de la humedad crítica y de la temperatura del tubo húmedo del aire, como la de la figura 12.

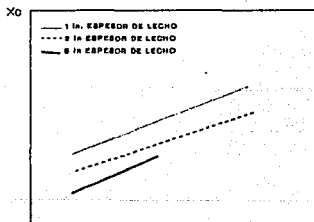


FIGURA 11.- GRÁFICA DE HUMEDAD CRÍTICA CONTRA VELOCIDAD CRÍTICA

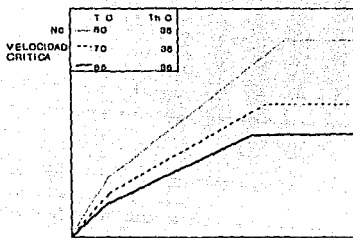


FIGURA 12.- GRÁFICA DE VELOCIDAD CRÍTICA A DISTINTAS TEMPERATURAS DE BULBO SECO

Si la humedad final que se quiere obtener está dentro del periodo de velocidad constante, el tiempo total de secado se podrá obtener con la ecuación 12.

3o.- En caso de que X_F vaya más allá de X_c (periodo de velocidad constante), se estimará que el (o los periodos descendientes, si se conoce por gráficas X_c') periodo de velocidad decreciente (o el segmento de curva hasta la humedad final) es una recta y que N' es lineal con respecto a X . Por lo tanto, el tiempo de secado referido desde X_c hasta $X_F \leq X_c$ se estimará mediante la ecuación 16.

4o.- Para utilizar dicha ecuación, lo que faltaría en última instancia, sería N_F y para estimarla se hace lo siguiente:

- a) Se representa en un diagrama el segmento de curva de velocidad conocida periodo de velocidad constante (fig.13).

- b) Se representa X_E (debe conocerse de una curva como la de la figura 1).
- c) Se traza una línea recta, desde X_c hasta X_E (línea punteada).
- d) Como una aproximación, se lee N en las ordenadas.

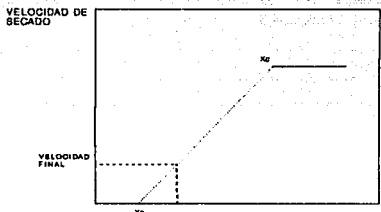


FIGURA 13.- CALCULO DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO

5o.- En caso de haber dos periodos de velocidad decreciente y conociendo X_c' , se procede de la misma manera indicada, desde el 2o. punto hasta el 4o.

Por último el tiempo total de secado, para una humedad final:

$X_F < X_c$, ó $X_F < X_c'$ será:

$$\theta_t = \theta_c + \theta_{i\downarrow} + \theta_{X_c' X_F}$$

donde:

θ_c = Tiempo de secado para periodo de velocidad constante.

$\theta_{1\downarrow}$ = Tiempo de secado para el primer periodo de velocidad decreciente.

$\theta_{X_c'}$
 X_c' = Tiempo de secado desde X_c' hasta X_F .

Quedando así concluida la estimación.

Comportamiento Global Durante el Secado.

A continuación se presenta una gráfica en la que se representan conjuntamente las variaciones de humedad del sólido, temperatura en la superficie del sólido y velocidad de secado conforme avanza el tiempo de secado.

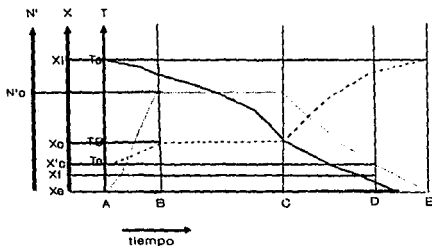


FIGURA 14.- COMPORTAMIENTO GLOBAL DURANTE EL SECADO

ABCISAS

\overline{AB}	Periodo Inestable.
\overline{BC}	Periodo de Velocidad Constante.
\overline{CD}	Primer Periodo de Velocidad Decreciente.
\overline{DE}	Segundo Periodo de Velocidad Decreciente.
T_c	Tiempo Cero de Secado.
T_t	Tiempo Total de Secado.

ORDENADAS (DE IZQUIERDA A DERECHA).

1. Temperatura. Curva: Temperatura de

T_a	Temperatura del Aire de Secado.	La Sup. Sólido
T_B	Temperatura del Bulbo Húmedo.	(- - - -)
T_e	Temperatura de Entrada del Sólido.	
2. Humedad Absoluta. Curva: Humedad Sólido

X_I	Humedad Inicial del Sólido.	(_____)
X_c	Humedad en el Primer Punto Crítico.	
X_c'	Humedad en el Segundo Punto Crítico.	
X_E	Humedad de Equilibrio.	
3. Velocidad de Secado. Curva: Velocidad de

N_o	Velocidad Inicial de Secado.	secado (.....)
N_c	Velocidad de Secado en \overline{BC} .	

2.2.5. Efecto de las Variables de Proceso Sobre el Periodo de Velocidad Constante.

Es preferible emplear mediciones experimentales de la velocidad de secado ignorando las ecuaciones de predicción, sin embargo, estas ecuaciones son bastante útiles para predecir el efecto de los cambios de las variables del proceso de secado, cuando se dispone de datos experimentales limitados.

1. *Efecto de la Velocidad del Aire.* Cuando no hay transferencia de calor por conducción y radiación, la velocidad N_c de secado en la región de velocidad constante es proporcional a h y, por lo tanto, a $G^{0.8}$, tal como lo expresa la ecuación:

$$h = 0.0176 G^{0.8}$$

El efecto de la velocidad del gas es menos importante cuando sí hay conducción y radiación.

2. *Efecto de la Humedad del Gas.* Si la humedad del gas H disminuye para determinado valor T en el gas, la temperatura del bulbo húmedo T_w , tal como se obtiene de la carta de humedad, también disminuirá. Entonces, al aplicar la ecuación 9 se ve que N_c aumenta. Por ejemplo, si las condiciones originales son N_{c1} , T_1 , T_{w1} , h_1 y h_{w1} , cambia a h_2 y h_{w2} varía a H_{w2} , N_{c2} será:

$$N_{c2} = N_{c1} \frac{T - T_{w2} \lambda_{w1}}{T - T_{w1} \lambda_{w2}} = N_{c1} \frac{h_{w2} - h_2}{h_{w1} - h_1} \quad \text{EC. 22}$$

Sin embargo, puesto que $\lambda_{w1} \cong \lambda_{w2}$

$$N_{c2} = N_{c1} \frac{T - T_{w2}}{T - T_{w1}} = N_{c1} \frac{h_{w2} - h_2}{h_{w1} - h_1} \quad \text{EC. 23}$$

3. *Efecto de la Temperatura del Gas.* Si se eleva la temperatura del gas T , T_w también aumenta algo, pero no tanto como el aumento de T . Por consiguiente, N_c aumenta como sigue:

$$N_{c2} = N_{c1} \frac{T_2 - T_{w2}}{T_1 - T_{w1}} = N_{c1} \frac{h_{w2} - h_2}{h_{w1} - h_1} \quad \text{EC. 24}$$

4. *Espesor del Lecho sólido que se está secando.* Cuando solo hay transferencia de calor por convección, la velocidad N_c es independiente del espesor z , del sólido. Sin embargo, el tiempo t necesario para secar entre los contenidos de humedad fijos X_1 y X_2 será directamente proporcional a este espesor z . La ecuación 25 muestra esta proporcionalidad, pues al aumentar el espesor con un valor constante de A , se elevará directamente la la cantidad W Kg de sólido seco.

$$t = \frac{W}{A N}$$

EC. 25

5. *Efecto Experimental de las Variables de Proceso.* Los resultados experimentales tienden a confirmar las conclusiones señaladas para los efectos de espesor de material, humedad, velocidad del aire y $T - T_v$.

2.2.6. Balances de energía.

2.2.6.1. PRINCIPIO DE CONSERVACION DE LA ENERGIA.

Balace de energía. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, también llamado primer principio de la termodinámica, la energía es indestructible y la cantidad total de energía que entra en un sistema debe ser exactamente igual a la que sale más cualquier aumento dentro del sistema. Una expresión matemática o numérica de este principio se denomina *Balace de Energía*, que en conjunción con un balance de materia es de capital importancia en problemas de diseño y operación de procesos.

En el establecimiento de un balance energético general para cualquier proceso, es conveniente utilizar como base una unidad de tiempo de operación, por ejemplo una hora para una operación continua y un ciclo para una operación discontinua o intermitente.

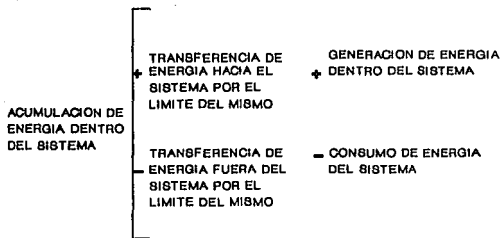


FIGURA 16.- BALANCE DE ENERGIA EN UN SISTEMA

Es necesario distinguir entre un proceso continuo, que es aquel en el que continuamente entran y salen del sistema corrientes de materia, y un proceso discontinuo, que es de carácter intermitente y en el que ni entran ni salen del sistema ninguna corriente continua de materia durante el transcurso de la operación. Un proceso continuo estacionario está también caracterizado por un régimen permanente de flujo, y por una constancia de temperatura y composiciones en cualquier punto dado del proceso, en contraste a las condiciones de temperatura y composición que cambian un proceso discontinuo.

En un balance energético las energías recibidas son iguales a las desprendidas más el aumento de energía recibida dentro del sistema por unidad de tiempo en un proceso continuo, o para un ciclo dado de operación en un proceso discontinuo. Las formas

separadas de energía se clasifican convenientemente como sigue, despreciando las energías electrostáticas y magnéticas, que ordinariamente son pequeñas:

- a) ENERGIA INTERNA.
- b) ENERGIA DEBIDA A LA RESISTENCIA DE LA PRESION.
- c) ENERGIA POTENCIAL.
- d) ENERGIA CINETICA.
- e) ENERGIA SUPERFICIAL.
- f) ENERGIA DE CALOR.
- g) ENERGIA DE TRABAJO.
- h) ENTALPIA.

Para la mayoría de los procesos industriales continuos, tales como en las operaciones de calderas, destilación, enfriamiento de agua, secado, etc., los términos de energía cinética, energía potencial y trabajo son despreciables y el calor añadido es igual al aumento de entalpía. De una forma similar, en procesos discontinuos a presión constante, donde cualquier trabajo, excepto la expansión, es despreciable el calor adicionado y es igual al aumento de entalpía.

Para aplicar el método que se presentará a continuación, es necesario que coincidan un número considerable de circunstancias.

Aunque esto limite mucho la aplicación de los cálculos, se cubre con ellos en la práctica el secado de muchos materiales.

Estas condiciones son:

- 1) No hay pérdidas de calor en el secador.
- 2) El calor que se aplica al material procede únicamente del aire y no por conducción de las paredes del secador.
- 3) Toda la humedad existente es humedad libre (humedad no ligada).
- 4) No hay evaporación de humedad durante el periodo preliminar de calentamiento.

- 5) El proceso de secado se efectúa a la temperatura constante húmeda, hasta que se ha eliminado la cantidad de agua deseada para los materiales que aquí particularmente se consideran. esto indica que se se ha efectuado prácticamente la eliminación de agua.
- 6) El periodo final en el secado sirve meramente para calentar el producto hasta la temperatura de descarga y no se efectúa secado alguno.

Los sólidos $L_s = L_b$ sólido seco/nft², son secados de X_1 a X_2 Lb humedad/Lb sólido seco y sufre un cambio en la temperatura de t_{L_1} a t_{L_2} .

El gas entra a una velocidad de $G_g = Lb$ gas seco/htf² y sufre un cambio en la humedad de Y_2 a Y_1 Lb humedad/Lb gas seco y un cambio en la temperatura de t_{O_2} a t_{O_1} .

BALANCE DE MATERIA:

$$L_s X_1 + G_g Y_2 = L_s X_2 + G_g Y_1 \quad \text{EC. 26}$$

$$L_s (X_1 - X_2) = G_g (Y_1 - Y_2) = M_{H_2O}$$

BALANCE DE ENTALPIA:

$$L_s H_{L_1} + G_g H_{O_2} = L_s H_{L_2} + G_g H_{O_1} \quad \text{EC. 27}$$

$$G_g (H_{O_2} - H_{O_1}) = L_s (H_{L_1} - H_{L_2})$$

siendo $Q = 0$ para operación adiabática.

donde:

H_L = Entalpía del sólido húmedo a T_L (BTU/Lb sólido seco)

H_G = Entalpía del gas a t_0 (BTU/Lb gas)

Si las entalpías son referidas a un sólido adsorbente, un gas no adsorbido y un líquido adsorbido todo referido a una temperatura base T_0 , entonces tenemos:

$$H_G = C_G (t_G - t_0) + Y C_A (t_G - t_0) + \lambda_{A_0}$$

donde:

C_G = Capacidad calorífica del gas (BTU/Lb °F)

C_A = Capacidad calorífica del vapor (BTU/Lb °F)

λ_{A_0} = Calor latente de vaporización de A a t_0 (BTU/Lb)

t_0 = Temperatura de referencia.

$$H_L = C_L (t_L - t_0) + X C_{AL} (t_L - t_0) + \Delta H_A$$

donde:

C_B = Capacidad calorífica del sólido seco (BTU/Lb °F)

C_{AL} = Capacidad calorífica de la humedad (BTU/Lb °F)

ΔH_A = Calor integral de humedad (o de adsorción, hidratación) referido al líquido puro y sólido a t_0 (BTU/Lb).

Si la ecuación general para obtener el coeficiente experimental de un equipo de secado es:

$$Q_s = U_a V \Delta T_{lm} \quad \text{EC. 28}$$

donde:

- Q_s = Calor utilizado para secar (BTU/h)
 V = Volúmen del secador (ft³)
 U_a = Coeficiente volumétrico de transferencia de calor (BTU/hgt² °F)
 ΔT_{lm} = Diferencia de temperatura logarítmica.

$$\Delta T = \frac{(t_1 - T_1) - (t_2 - T_2)}{\ln \frac{t_1 - T_1}{t_2 - T_2}} \quad \text{EC. 29}$$

Si un secador utiliza aire caliente como medio de calentamiento y secado, el calor dado por ese aire en el secador será igual a:

$$Q_T = G_a C_{H1} (t_1 - t_2) \quad \text{EC. 30}$$

donde:

- Q_T = Calor total.
 G_a = Flujo másico de aire (Lb/h)
 t_1 = Temperatura de entrada de aire (°F)
 t_2 = Temperatura de salida del aire (°F)
 T_1 = Temperatura de entrada del sólido (°F)
 T_2 = Temperatura de salida del sólido (°F)
 C_{H1} = Calor húmedo promedio del aire $\frac{\text{BTU}}{\text{L}^b \text{A.S. } ^\circ\text{F}}$

Parte de ese calor se utilizará para el secado propiamente dicho y parte de ese calor se perderá por radiación, conducción, etc.

$$Q_T = Q_p + Q_s \quad \text{EC. 31}$$

Para poder utilizar la ecuación (28) se necesita obtener el calor de secado. Este se puede calcular por medio de:

$$Q_1 = L_s (C_p + C_{p_{H_2O}} X_1) (t_w - T_1) \quad \text{EC. 32}$$

$$Q_2 = M_{H_2O} \lambda_{l_w} \quad \text{EC. 33}$$

$$Q_3 = L_s (C_{p_s} + C_{p_{H_2O}} X_2) (t_2 - t_w) + M_{H_2O} C_{p_v} (T_2 - t_w) \quad \text{EC. 34}$$

$$Q_s = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Q_1 = Calor de precalentamiento (BTU/h)

Q_2 = Calor de evaporación (BTU/h)

Q_3 = Calor de sobrecalentamiento (BTU/h)

L_s = Masa del sólido seco (Lb/h)

C_{p_s} = Capacidad calorífica del sólido seco (BTU/Lb °F)

$C_{p_{H_2O}}$ = Capacidad calorífica del agua líquida (BTU/Lb°F)

C_{p_v} = Capacidad calorífica del vapor de agua (BTU/Lb°F)

t_w = Temperatura del bulbo húmedo del aire (°F)

λ_{l_w} = Calor latente de vaporización del agua a la temperatura del bulbo húmedo

2.3. EQUIPOS DE SECADO.

Los secadores pueden clasificarse en diferentes formas, sin embargo existen dos clasificaciones que son las más usadas:

- Una se basa en el método de transferencia de calor que emplean, la cual es importante para el diseño de secadores, su operación y sus requerimientos de energía.
- La otra se basa en el manejo de sólidos en el secador y es adecuada cuando se le da atención especial a la naturaleza del sólido que se quiere someter al proceso de secado.

Cuando se clasifican los secadores, principalmente por el manejo de los sólidos en el secador, la clasificación se hace basándose en el criterio de la presencia o la ausencia de agitación de los sólidos, quedando organizados de la siguiente manera:

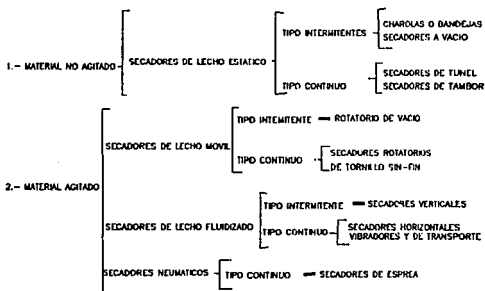


FIGURA 16.- CLASIFICACION DE SECADORES

A continuación se da una breve descripción de los tipos de secadores enunciados en el cuadro anterior, sin embargo no se describirán todos los secadores existentes debido a la gran variedad del equipo disponible, solo se enunciarán aquellos que se aplican con mayor frecuencia en la producción de los productos farmacéuticos en México. Así mismo es importante señalar que el proceso intermitente es el más empleado por tres razones principales:

1. Debido a que se puede hacer un mejor control de calidad y estabilidad del medicamento, efectuando la producción por lotes en lugar de un proceso continuo que no permitiría una identificación completa.
2. El tamaño de estos lotes en la industria farmacéutica, es relativamente pequeño (250 Kg o menos por lote) comparando con la producción en la industria química (aprox. 900 - 1000 Kg/hr).
3. La mayor parte del equipo para procesos intermitentes puede operar con una gran variedad de materiales, lo que representa una gran ventaja para la industria farmacéutica, ya que la investigación para el desarrollo de nuevos fármacos más eficaces es continua, por lo cual las características del medicamento pueden cambiar en un periodo muy corto de tiempo y esto representaría un costo muy grande para la modificación o el cambio de un equipo de proceso continuo.

Por otro lado, la demanda de un mismo producto farmacéutico no es constante, lo que podría dar como resultado:

- a) Tener un equipo de proceso continuo modificándose constantemente.
- b) La acumulación excesiva de un cierto medicamento.
- c) El paro incosteable del equipo por largos periodos de tiempo.

MATERIAL NO AGITADO.

Este apartado contempla los *SECADORES DE LECHO ESTÁTICO*, que son aquellos secadores en los que no hay movimiento relativo entre las partículas a secar, es decir, no hay cambio de posición de las partículas dentro del lecho.

En este caso, sólo una fracción de las partículas están en contacto directo con el gas de secado (partículas en la superficie).

Existen secadores de lecho estático de tipo intermitente y de tipo continuo. Entre los secadores de tipo intermitente se encuentran los siguientes:

SECADOR DE BANDEJAS O DE CAJAROLAS.

Este tipo de secadores también son llamados *secadores de anaqueles, de gabinete o de compartimiento*, el material, que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal con una profundidad de 10-100 mm. Un secador de bandejas como el que se muestra en la figura, contiene bandejas que se cargan y descargan de un gabinete.

Un ventilador recircula aire calentado con vapor sobre a superficie de las bandejas paralelamente a las mismas. También se usa calor obtenido con electricidad (cuando el calentamiento es bajo); el 10-20 % del aire que pasa sobre las bandejas es aire nuevo, siendo el resto aire recirculado.

Una de las modificaciones de este tipo de secador es el de bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en las carretillas rodantes que se introducen al secador. Esto ahorra tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador.

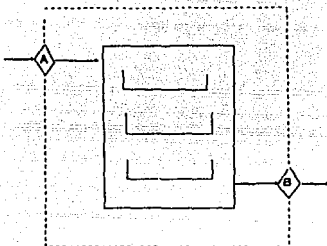


FIGURA 17.- ESQUEMA DE UN SECADOR DE CHAROLAS

En el caso de materiales granulares, el material puede colocarse sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, el aire pasa por un lecho permeable, obteniéndose tiempos de secado más cortos debido a la mayor área superficial expuesta al aire.

SECADORES INDIRECTOS DE VACIO CON ANAQUELES.

Este tipo de secadores se calientan indirectamente y son similares a los de bandejas. Esta clase de secador consta de un gabinete construido de hierro colado o plancha de acero con puertas herméticas, de tal manera que se pueda operar con vacío. Los anaqueles huecos de acero, dentro de la cámara, se conectan en paralelo con los colectores de vapor de entrada y de salida. Las bandejas que contienen los sólidos mojados se colocan sobre los anaqueles huecos. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles.

Estos secadores se usan para materiales costosos o sensibles a la temperatura o que se oxidan fácilmente. También son usados para manejar materiales con disolventes tóxicos o valiosos.

Entre los secadores de tipo continuo se mencionan los siguientes:

SECADORES DE TUNEL.

Suelen ser compartimientos de bandejas o de carretillas operando en serie.

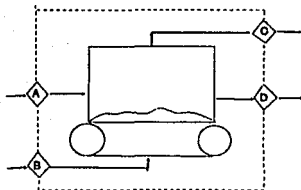


FIGURA 18.- ESQUEMA DE UN SECADOR DE TUNEL

Los sólidos se colocan sobre bandejas o carretillas que se mueven continuamente por un túnel con gases calientes pasando sobre la superficie de cada bandeja. El aire caliente puede ser a contracorriente, a cocorriente o una combinación de ambas.

Cuando se desean secar partículas sólidas granulares, pueden utilizarse transportadores perforados o de fondo de tamiz.

Los sólidos granulares se transportan en forma de una capa que tiene entre 25-150 mm de profundidad, sobre una superficie de tamiz o perforada a través de la cual se fuerza el paso de aire caliente, hacia arriba o hacia abajo. Este secador consta de diversas secciones en serie, cada una con un ventilador y serpentines de calentamiento. Un ventilador adicional extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera.

SECADORES DE TAMBOR.

Consta de un tambor de metal calentado, en cuyo exterior se evapora la capa delgada de un líquido o una suspensión hasta lograr secarla.

Los secadores de tambor son adecuados para el procesamiento de suspensiones o pastas de sólidos finos, así como para soluciones verdaderas. Funciona en parte como evaporador y en parte como secador. Existen otras variaciones de este tipo de secador, son los tambores dobles rotatorios con alimentación por inmersión, o alimentación superior.

MATERIAL AGITADO.

Incluye los secadores de *LECHO MOVIL*, *LECHO FLUIDIZADO* y *NEUMATICOS*.

Los secadores de *LECHO MOVIL*, son aquellos secadores en los cuales la distancia entre las partículas a secar es suficientemente grande para que puedan fluir unas sobre otras. El movimiento puede ser inducido por gravedad, por agitación mecánica o cualquier otro medio. Esta separación, da por resultado la exposición de nuevas superficies a cada momento, lo que aumenta la transferencia de masa y calor y reduce el tiempo de secado.

Los secadores de *LECHO FLUIDIZADO*, son aquellos en los cuales las partículas están suspendidas parcialmente en una corriente de gas moviéndose hacia arriba. Al moverse hacia arriba y hacia abajo, las partículas, con un movimiento caótico, establecen un contacto gas-sólido excelente, dando como resultado una mejor transferencia de masa y de calor que en los dos tipos anteriores.

Estos secadores pueden ser de tipo intermitente (p.e. secadores verticales) y de tipo continuo (p.e. secadores horizontales, vibradores y de transporte, secadores verticales).

Los secadores *NEUMATICOS* emplean un sistema mediante el cual transportan las partículas en una corriente de gas a alta velocidad, con lo cual la partícula queda rodeada de gas y debido a esto, son mejores que los secadores de lecho fluidizado en los cuales puede presentarse bloqueo al flujo de gas a través de la cama.

Esto redundo en una transferencia de masa y de calor extremadamente efectiva y rápida y los tiempos de secado son muy cortos.

Estos secadores solamente pueden ser de tipo continuo (p.e. secadores de esprea y de flash).

SECADORES DE ESPREA O POR PULVERIZACION.

En este tipo de secadores un líquido o una suspensión se pulveriza o se rocía con una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se vaporiza de dichas gotas con rapidez, obteniéndose partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. El flujo de gas y de líquido de la cámara de pulverización puede ser a contracorriente, a cocorriente o una combinación de ambas.

Las gotas finas se forman al introducir el líquido en toberas de pulverización o discos giratorios de rociado de alta velocidad en el interior de una cámara cilíndrica.

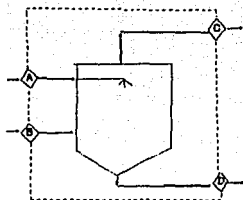


FIGURA 20.- ESQUEMA DE UN SECADOR DE ESPREAS

Es necesario que las gotas o partículas húmedas del sólido no choquen ni se adhieran a las superficies sólidas antes de que hayan secado. Por consiguiente, es necesario emplear cámaras bastante grandes. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo. Los gases de escape fluyen hacia un separador de ciclón para filtrar las partículas muy finas. Las partículas que se obtienen son muy ligeras y bastante porosas.

3.- PARTE EXPERIMENTAL

Puesto que este trabajo tiene como fin diseñar una práctica de secado, para ser aplicada como parte del programa del laboratorio de Operaciones Unitarias Farmacéuticas, se elaboraron diferentes formulaciones y se procesaron para observar su comportamiento y así determinar, con base en los resultados, si eran repetibles para poder entonces aplicarlo con resultados didácticos. Para llevar a cabo este proyecto se requirió del material y equipo siguiente, llevando a cabo el procedimiento descrito en páginas siguientes.

3.1. MATERIAL Y EQUIPO

Materiales:

Como el único parámetro que iba a manejarse como variable, para diseñar la práctica fue la humedad, se elaboraron diferentes formulaciones basadas en almidón y agua, conforme a la tabla siguiente:

Formulación	Agua	Almidón	Humedad inicial
A	80 g	100 g	0.8
B	60 g	100 g	0.6
C	40 g	100 g	0.4

Equipo:

Vasos para precipitado de 250 mL

Probetas graduadas a 100 mL

Espátulas

Cronómetro

Termómetros de -5°C a 150°C (para bulbo húmedo y para bulbo seco)
Balanza granataria
Charolas cuadradas de aluminio de 19.5 cm de lado.
Portacharolas
Secador de charolas con corriente de aire

Este equipo se facilita en el Laboratorio de Ingeniería Química (lugar donde se desarrollo este trabajo) de la Facultad de Química mediante la elaboración de un vale de prestamo.

Del secador de charolas se presenta un esquema en la figura 21.

3.2. PROCEDIMIENTO

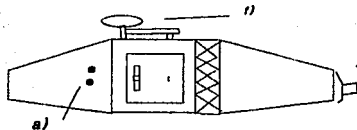
Se determinó que para que hubiera un mejor marco de comparación y con esto tener un criterio más válido para el diseño de la práctica, se efectuaría el secado de 5 granulados diferentes de cada una de las formulaciones mencionadas, en distintos días. Con este planteamiento guía se siguieron las manipulaciones mencionadas a continuación.

Dado que los cálculos posteriores al trabajo de laboratorio requieren, como ya se mencionó en las generalidades, el conocimiento del área de transferencia de masa, y como esta es igual al área de las charolas se procedió a medir las dimensiones de la charola, para conocer su área.

Los siguientes pasos se efectuaron para las formulaciones A, B y C, mencionadas anteriormente.

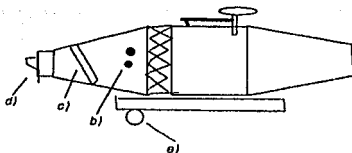
Se pesaron aproximadamente 100 g de almidón 5 veces distintas en diferentes días (con la intención de comprobar que no afecta en el proceso el día en que se lleve a cabo), anotándose para cada pesada la cantidad exacta que se midió; una vez pesado el almidón se pesó de igual forma la cantidad de agua requerida para según el granulado

VISTA FRONTAL



- a) Orificios para termómetros de bulbo húmedo
y bulbo seco para el aire de salida*
f) Balanza

VISTA POSTERIOR



- b) Orificios para termómetros de bulbo húmedo
y bulbo seco del aire de entrada*
c) Control de flujo de aire
c) Control del ventilador
e) Control de presión

FIGURA 21.- SECADOR DE CHAROLAS DEL LABORATORIO
DE INGENIERIA QUIMICA

que se tratara, y se adicionó al almidón procurando que la mezcla quedara húmeda en su totalidad. Este granulado se distribuyó de forma homogénea en la charola procurando tener siempre el mismo espesor de la capa, para esto es recomendable que se prepare una cantidad de producto con la que se llene todo el espesor de la charola. Ésta ya con el granulado se coloca en el portacharolas y su registra el peso que presenta, previamente se midió el peso del portacharolas con la charola y sin muestra (para poder efectuar los cálculos mencionados posteriormente); hasta este momento se colocaron en los orificios del secador los termómetros que midiran la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire de entrada y del aire de salida (ver la figura 21), datos que sirvieron para los balances de materia que se presentan en los resultados. Se preparó la corriente de vapor y la presión de éste entre 10 y 12 lb/in², el medidor de flujo de vapor se colocó en la posición de 0 (cero), se enciende después el ventilador y se tomó este tiempo como cero así como el peso del portacharolas con la charola y el granulado como peso cero y a partir de este momento se registran las lecturas de peso cada 5 minutos teniendo como punto final para el proceso de la formulación A los 80 minutos, para la formulación B los 60 minutos, y para la formulación C los 55 minutos, estos tiempos se escogieron a partir de la observación que indicaba que después de este tiempo el registro de humedad no presentaba grandes variaciones; a los valores obtenidos se les aplicó el tratamiento matemático y estadístico que se presenta a continuación, con lo que se pretendió detectar diferencias estadísticamente significativas para los procesos.

3.3. TRATAMIENTO MATEMATICO

A los resultados registrados en la práctica se les trató de la manera siguiente:

Se obtiene la humedad con base en la fórmula siguiente:

$$HUM = X = (\text{peso } j - \text{peso } 1) / \text{peso } 1$$

donde:

peso j: es el peso del granulado registrado en la balanza en el tiempo X

peso 1: es el peso del sólido seco usado

Se obtiene entonces la velocidad de secado para lo cual se emplea la fórmula:

$$W = (\text{PESO } 2/A) \cdot (-dX/d\theta)$$

donde:

W es la velocidad en KgAGUA/Hr m²

PESO 2 es la masa de sólido seco en Kg

A es el área de superficie de contacto en m²

X es la humedad en Kg AGUA/ Kg DE S.S.

θ es el tiempo en Hr

3.4. EVALUACION ESTADISTICA

Para demostrar la confiabilidad y repetibilidad de los resultados se decidió usar el estadigráfo de Ji-cuadrada (χ^2) (ya que se basa en las desviaciones estandar y varianzas tanto poblacionales como muestrales, datos que se pueden conocer facilmente) con un coeficiente de rechazo del 5%, es decir se tomó como región de aceptación el 95% de la población de datos de secado, teniendo como hipótesis de trabajo (H_0) que la varianza poblacional real de la población es igual a la varianza poblacional

calculada. $\sigma_o^2 = \sigma^2$; a su vez se determinaron otros parámetros estadísticos descriptivos que se mencionan enseguida:

$$\text{Media } (\bar{x}) = \frac{\sum (x)}{n}$$

$$\text{Desviación estandar } (s) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$\text{Coeficiente de Variación (CV)} = (s / \bar{x}) \times 100$$

$$\text{Error estandar (Es)} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Límite de Confianza Superior (L.C.S.) =

$$\bar{x} + t_{0.05} \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right)$$

Límite de Confianza Inferior (L.C.I.) =

$$\bar{x} - t_{0.05} \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right)$$

$$\text{Varianza } (s^2) = (s)^2$$

$$\text{Varianza de la población } (\sigma^2) = s^2 \left(\frac{n - 1}{n} \right)$$

$$\text{Estadigráfo de Ji-cuadrada } (\chi^2) = \frac{(n - 1) s^2}{\sigma^2}$$

para comprobar la hipótesis de trabajo debe encontrarse que el estadígrafo Ji-cuadrada calculado sea menor que el reportado en tablas.

Para evitar que la interferencia de factores personales en la interpretación de los resultados se procedió a efectuar una aleatorización de los tiempos, para cada formulación, en los cuales se aplicaría el tratamiento estadístico mencionado, para lo cual se uso la Tabla de Numeros Aleatorios; los resultados obtenidos de esta aleatorización se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 1.- Tiempos de prueba de parametros estadísticos para la curva de Humedad contra Tiempo

TIEMPOS DE PRUEBA (min)		
FORMULACION A	FORMULACION B	FORMULACION C
25	45	10
05	00	05
20	00	00
15	40	55
75	05	50

*Tabla 2.- Tiempos de prueba de parametros estadisticos
para la curva de Velocidad de secado contra Humedad promedio*

TIEMPOS DE PRUEBA (min)		
FORMULACION A	FORMULACION B	FORMULACION C
10	15	05
25	25	10
30	30	20
35	45	25
55	50	35

4.- RESULTADOS

Se presentan a continuación para cada formulación los resultados obtenidos, mostrándose primeramente las tablas de resultados experimentales, tratamiento estadístico; posteriormente se presentan las gráficas correspondiente, los balances de materia y finalmente la presentación del formato de practica.

4.1. FORMULACION A.

Tabla 3. - Humedad contra tiempo

Tiempo		HUMEDAD				
		Exp-1	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5
(min)	(Hr)	(Kg Agua/Kg S. S.)				
0	0.00	0.843	0.842	0.837	0.838	0.841
5	0.08	0.799	0.796	0.785	0.742	0.745
10	0.17	0.690	0.629	0.625	0.635	0.694
15	0.25	0.528	0.530	0.525	0.581	0.529
20	0.33	0.416	0.416	0.415	0.420	0.417
25	0.42	0.325	0.326	0.321	0.324	0.323
30	0.50	0.258	0.257	0.263	0.262	0.253
35	0.58	0.211	0.216	0.204	0.207	0.211
40	0.67	0.181	0.185	0.180	0.189	0.186
45	0.75	0.153	0.156	0.150	0.149	0.153
50	0.83	0.136	0.144	0.142	0.144	0.139
55	0.92	0.109	0.104	0.110	0.109	0.109
60	1.00	0.098	0.099	0.094	0.099	0.093
65	1.08	0.084	0.079	0.082	0.083	0.084
70	1.17	0.065	0.059	0.060	0.061	0.065
75	1.25	0.057	0.055	0.055	0.058	0.053
80	1.33	0.039	0.041	0.044	0.039	0.037

Tabla 4. - Velocidad de secado contra humedad

HUMEDAD PROMEDIO	VELOCIDAD DE SECADO				
	Exp-1	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5
(Kg AGUA / Kg S. S.)					
	(Kg Agua / m ² Hr)				
0.940	1.889	1.886	1.829	1.271	1.299
0.740	1.826	1.293	1.320	1.826	1.855
0.631	1.889	1.836	1.215	1.949	1.862
0.529	1.278	1.280	1.280	1.299	1.293
0.417	0.992	0.998	0.956	0.991	1.029
0.324	0.712	0.690	0.734	0.734	0.708
0.259	0.483	0.452	0.521	0.458	0.420
0.210	0.365	0.376	0.339	0.364	0.364
0.184	0.283	0.257	0.238	0.282	0.295
0.152	0.314	0.325	0.251	0.251	0.276
0.141	0.238	0.342	0.301	0.339	0.289
0.107	0.119	0.158	0.178	0.168	0.157
0.093	0.207	0.194	0.216	0.182	0.176
0.082	0.169	0.151	0.167	0.157	0.195
0.062	0.168	0.110	0.098	0.188	0.176

Tabla 5. - Parámetros estadísticos
para la curva de Humedad vs Tiempo

Tiempo	Media	Desviación estandar	Error estandar	Varianza de La muestra	Varianza de La población
(min)	(\bar{X})	(D.S.)	(E.S.)	(s^2)	(σ^2)
05	0.740	0.0041	0.0018	17.0×10^{-6}	13.6×10^{-6}
15	0.529	0.0029	0.0010	5.5×10^{-6}	4.4×10^{-6}
20	0.417	0.0018	0.0008	3.3×10^{-6}	2.6×10^{-6}
25	0.324	0.0019	0.0008	3.5×10^{-6}	2.8×10^{-6}
75	0.056	0.0019	0.0009	3.8×10^{-6}	3.0×10^{-6}

Tabla 5a. - Parámetros estadísticos para la
curva de Humedad vs. Tiempo (continuación).

Tiempo (min)	Límite superior de confianza	Límite inferior de confianza	Estadígrafo Ji-cuadrado
05	0.751	0.728	5.00
15	0.535	0.522	5.00
20	0.422	0.412	5.00
25	0.329	0.319	5.00
75	0.061	0.050	5.00

Tabla 6. - Parámetros estadísticos para la curva de Velocidad de secado vs Humedad promedio

Tiempo	Media	Desviación estandar	Error estandar	Varianza de la muestra	Varianza de la población
(min)	(\bar{X})	(D.S.)	(E.S.)	(s^2)	(σ^2)
10	1.340	0.0172	0.0077	2.9×10^{-4}	2.8×10^{-4}
25	0.715	0.0194	0.0087	3.8×10^{-4}	3.0×10^{-4}
30	0.467	0.0375	0.0168	14.1×10^{-4}	11.8×10^{-4}
35	0.362	0.0198	0.0082	1.9×10^{-4}	1.5×10^{-4}
55	0.155	0.0218	0.0097	4.7×10^{-4}	3.8×10^{-4}

Tabla 6a. - Parámetros estadísticos para la curva de Velocidad de secado vs Humedad promedio (continuación)

Tiempo (min)	Límite superior de confianza	Límite inferior de confianza	Estadígrafo Ji-cuadrado
10	1.308	1.293	5.00
25	0.786	0.661	5.00
30	0.571	0.363	5.00
35	0.400	0.328	5.00
55	0.216	0.095	5.00

4.2. FORMULACION B.

Tabla 7.- Humedad contra tiempo

Tiempo		HUMEDAD				
		Exp-1	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5
(min)	(Hr)	(Kg Agua/Kg S. S.)				
0	0.00	0.565	0.567	0.567	0.569	0.563
5	0.08	0.484	0.479	0.485	0.488	0.478
10	0.17	0.392	0.395	0.398	0.390	0.394
15	0.25	0.314	0.309	0.311	0.313	0.305
20	0.33	0.226	0.228	0.229	0.225	0.230
25	0.42	0.164	0.159	0.168	0.162	0.170
30	0.50	0.125	0.123	0.124	0.128	0.128
35	0.58	0.089	0.092	0.099	0.097	0.102
40	0.67	0.060	0.058	0.069	0.065	0.066
45	0.75	0.051	0.050	0.047	0.054	0.059
50	0.83	0.037	0.038	0.035	0.030	0.045
55	0.92	0.024	0.024	0.025	0.022	0.032
60	1.00	0.010	0.018	0.016	0.016	0.016

Tabla 8. - Velocidad de secado contra humedad

HUMEDAD PROMEDIO (KgAGUA/KgS.S.)	VELOCIDAD DE SECADO				
	Exp-1	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5
	(KgAgua/m ² hr)				
0.566	1.085	1.082	1.060	1.128	1.060
0.483	1.067	1.068	1.092	1.097	1.085
0.394	1.042	1.045	1.060	1.035	1.029
0.310	0.941	0.937	0.897	0.946	0.847
0.228	0.684	0.659	0.659	0.609	0.640
0.165	0.472	0.424	0.433	0.408	0.427
0.126	0.411	0.379	0.348	0.395	0.389
0.096	0.240	0.262	0.326	0.270	0.278
0.064	0.189	0.154	0.209	0.220	0.129
0.052	0.165	0.162	0.137	0.201	0.164
0.037	0.171	0.124	0.120	0.088	0.184

Tabla 9. - Parámetros estadísticos
para la curva de Humedad vs Tiempo

Tiempo (min)	Media (\bar{X})	Desviación estandar (D.S.)	Error estandar (E.S.)	Varianza de la muestra (s ²)	Varianza de la población (σ^2)
00	0.566	0.0028	0.0010	5.2 x 10 ⁻⁶	4.2 x 10 ⁻⁶
05	0.483	0.0041	0.0018	16.7 x 10 ⁻⁶	13.4 x 10 ⁻⁶
40	0.064	0.0035	0.0015	11.9 x 10 ⁻⁶	9.6 x 10 ⁻⁶
45	0.052	0.0044	0.0020	19.4 x 10 ⁻⁶	15.5 x 10 ⁻⁶
60	0.015	0.0031	0.0014	9.3 x 10 ⁻⁶	7.4 x 10 ⁻⁶

Tabla 9a. - Parámetros estadísticos para
la curva de Humedad vs Tiempo (continuación)

Tiempo (min)	Límite superior de confianza	Límite inferior de confianza	Estadígrafo Ji-cuadrado
00	0.572	0.560	5.00
05	0.494	0.471	5.00
40	0.074	0.055	5.00
45	0.064	0.040	5.00
50	0.024	0.007	5.00

Tabla 10. - Parámetros estadísticos para la
curva de Velocidad de secado vs Humedad promedio

Tiempo (min)	Media (\bar{X})	Desviación estandar (D.S.)	Error estandar (E.S.)	Varianza de la muestra (s^2)	Varianza de la población (σ^2)
15	0.214	0.0421	0.0188	17.7×10^{-4}	14.2×10^{-4}
25	0.433	0.0238	0.0106	5.7×10^{-4}	4.5×10^{-4}
30	0.384	0.0226	0.0106	5.6×10^{-4}	4.5×10^{-4}
45	0.166	0.0228	0.0102	5.2×10^{-4}	4.2×10^{-4}
50	0.137	0.0393	0.0176	15.4×10^{-4}	12.4×10^{-4}

Tabla 10a.- Parámetros estadísticos para la curva
de Velocidad de secado vs Humedad promedio (continuación)

Tiempo (min)	Límite superior de confianza	Límite inferior de confianza	Estadígrafo Ji-cuadrado
15	1.081	0.797	5.00
25	0.499	0.367	5.00
30	0.450	0.319	5.00
45	0.229	0.102	5.00
50	0.247	0.028	5.00

4.3. FORMULACION C.

Tabla 11.- Humedad contra tiempo

Tiempo		HUMEDAD				
		Exp-1	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5
(min)	(Hr)	(Kg Agua/Kg S. S.)				
0	0.00	0.409	0.401	0.408	0.414	0.410
5	0.08	0.328	0.324	0.321	0.325	0.328
10	0.17	0.272	0.271	0.273	0.275	0.270
15	0.25	0.187	0.185	0.188	0.186	0.185
20	0.33	0.134	0.134	0.139	0.136	0.133
25	0.42	0.100	0.102	0.096	0.098	0.105
30	0.50	0.062	0.065	0.059	0.061	0.068
35	0.58	0.051	0.053	0.048	0.052	0.056
40	0.67	0.030	0.037	0.037	0.035	0.033
45	0.75	0.025	0.020	0.019	0.022	0.016
50	0.83	0.016	0.013	0.010	0.013	0.015
55	0.92	0.015	0.010	0.010	0.013	0.010

Tabla 12.- Velocidad de secado contra humedad

HUMEDAD PROMEDIO	VELOCIDAD DE SECADO				
	Exp-1	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5
(KgAGUA / KgS.S.)	(KgAgua/m ² Hr)				
0.408	0.860	0.816	0.847	0.872	0.878
0.324	0.853	0.872	0.866	0.872	0.897
0.272	0.866	0.860	0.841	0.872	0.860
0.185	0.546	0.521	0.546	0.552	0.502
0.135	0.452	0.433	0.502	0.471	0.408
0.100	0.307	0.307	0.301	0.209	0.307
0.063	0.201	0.176	0.130	0.169	0.220
0.052	0.163	0.207	0.182	0.168	0.251
0.034	0.088	0.151	0.169	0.138	0.113
0.020	0.063	0.063	0.056	0.056	0.038

Tabla 13.- Parámetros estadísticos para la curva de Humedad contra Tiempo

Tiempo (min)	Media (\bar{X})	Desviación estandar (D.S.)	Error estandar (E.S.)	Varianza de la muestra (s^2)	Varianza de la población (σ^2)
00	0.408	0.0047	0.0021	22.3 x10 ⁻⁶	17.8 x10 ⁻⁶
05	0.324	0.0026	0.0012	6.7 x10 ⁻⁶	5.4 x10 ⁻⁶
10	0.272	0.0019	0.0009	3.7 x10 ⁻⁶	2.9 x10 ⁻⁶
50	0.013	0.0023	0.0010	11.3 x10 ⁻⁶	4.2 x10 ⁻⁶
55	0.012	0.0023	0.0010	5.3 x10 ⁻⁶	4.2 x10 ⁻⁶

Tabla 13a.- Parámetros estadísticos para la curva de Humedad contra Tiempo (continuación)

Tiempo (min)	Límite superior de confianza	Límite inferior de confianza	Estadígrafo Ji-cuadrado
00	0.422	0.395	5.00
05	0.381	0.317	5.00
10	0.278	0.207	5.00
50	0.020	0.007	5.00
55	0.018	0.005	5.00

Tabla 14.- Parámetros estadísticos para la curva de Velocidad de secado contra Humedad promedio

Tiempo (min)	Media (\bar{X})	Desviación estandar (D.S.)	Error estandar (E.S.)	Varianza de la muestra (s^2)	Varianza de la población (σ^2)
05	0.872	0.0160	0.0072	2.7×10^{-4}	2.1×10^{-4}
10	0.860	0.0117	0.0052	1.4×10^{-4}	1.1×10^{-4}
20	0.458	0.0359	0.0160	12.9×10^{-4}	10.3×10^{-4}
25	0.302	0.0082	0.0037	0.7×10^{-4}	0.5×10^{-4}
35	0.198	0.0334	0.0149	8.9×10^{-4}	11.1×10^{-4}

Tabla 14a.- Parámetros estadísticos para la curva de Velocidad de secado contra Humedad promedio (continuación)

Tiempo (min)	Límite superior de confianza	Límite inferior de confianza	Estadígrafo Ji-cuadrado
05	0.917	0.828	5.00
10	0.892	0.827	5.00
20	0.553	0.358	5.00
25	0.325	0.280	5.00
35	0.294	0.106	5.00

4.4. GRAFICAS

4.4.1. Curvas de Humedad contra tiempo para las formulaciones A,B y C.

En estas gráficas se muestran como puntos experimentales los resultados de los secados de cada uno de los 5 granulados elaborados para cada formulación, se muestran también en la gráfica los límites de confianza tanto inferiores (L.C.I.) como superiores (L.C.S.) calculados con base en los resultados obtenidos.

Se puede ver en la figura 24 que el proceso para la formulación C, con respecto a las otras 2 es la que presenta un proceso con mayor variación.

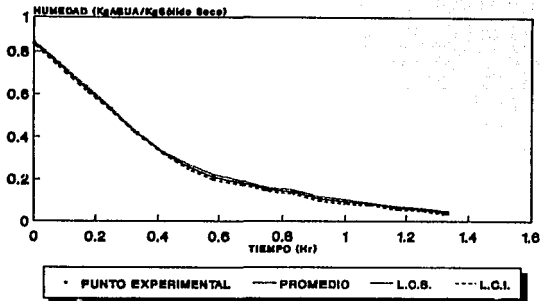


FIGURA 22.- GRAFICA DE LIMITES DE CONFIANZA PARA LA HUMEDAD EN EL PROCESO DE SECADO DE LA FORMULACION A.

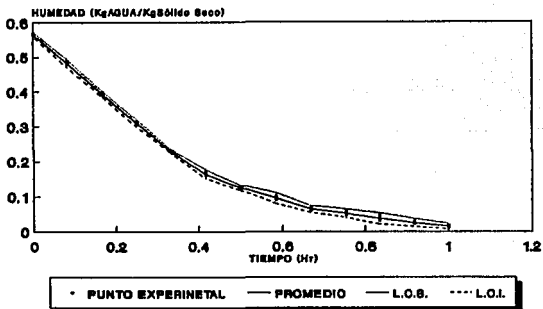


FIGURA 23.- GRAFICA DE LIMITES DE CONFIANZA PARA LA HUMEDAD EN EL PROCESO DE SECADO DE LA FORMULACION B.

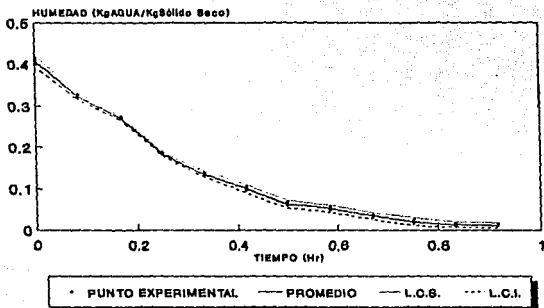


FIGURA 24.- GRAFICA DE LIMITES DE CONFIANZA DE LA HUMEDAD PARA EL PROCESO DE SECADO DE LA FORMULACION C.

4.4.2. Curvas de Velocidad de secado contra Humedad para las formulaciones A,B y C.

Así como en las gráficas de la sección anterior, en esta se muestran como puntos experimentales los resultados de los secados de cada uno de los 5 granulados elaborados para cada formulación, así como los límites de confianza tanto inferiores (L.C.I.) como superiores (L.C.S.) calculados con base en los resultados obtenidos.

En la figura 27 se comprueba nuevamente que la formulación con más variaciones es la C.

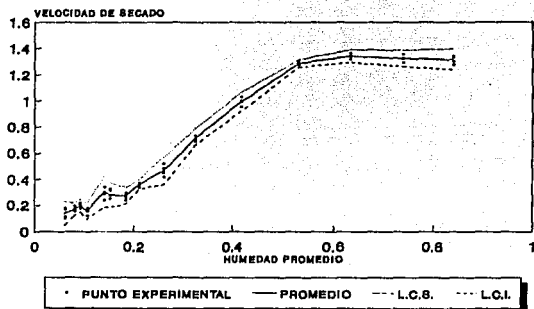


FIGURA 25.- GRAFICA DE LIMITES DE CONFIANZA DE LA VELOCIDAD DE SECADO PARA LA FORMULACION A.

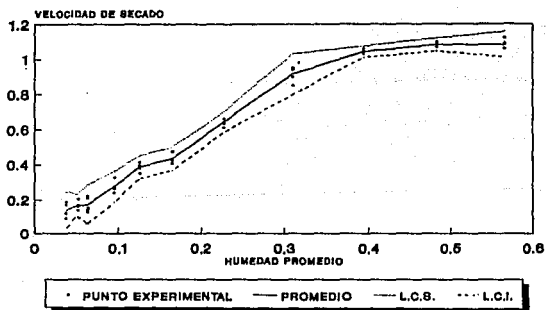


FIGURA 26.- GRAFICA DE LIMITES DE CONFIANZA DE LA VELOCIDAD DE SECADO PARA LA FORMULACION B.

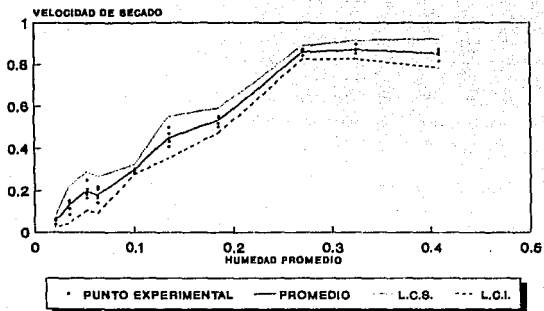


FIGURA 27.- GRAFICA DE LIMITES DE CONFIANZA DE LA VELOCIDAD DE SECADO PARA LA FORMULACION C.

4.5. BALANCES DE MATERIA

A la vez que se efectuaba el registro del peso del granulado se procedía también a tomar las lecturas de temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco, tanto para el aire de entrada como para el de salida, estos datos usando la tabla psicrométrica nos proporcionan la humedad del aire en ese punto; los datos obtenidos se promediaron y se eligió como tiempo final para efectuar el balance los 15 minutos de proceso, ya que en esta zona las tres formulaciones presentan un comportamiento lineal. Los cálculos de los balances se efectuaron en base seca conforme a la fórmula siguiente:

$$S (X_1) + G (Y_1) = S (X_2) + G (Y_2)$$

donde :

- S representa la cantidad de sólido seco (Kg)
- X_1 representa la humedad inicial (Kg AGUA/Kg S.S.)
- X_2 representa la humedad a los 15 minutos (KgAGUA/KgS.S.)
- G representa la cantidad de vapor seco requerida (Kg A.S.)
- Y_1 representa la humedad inicial del aire (KgAGUA/KgA.S.)
- Y_2 representa la humedad a los 15 minutos (KgAGUA/KgA.S.)

Se presentan a continuación una gráfica donde se muestra la cantidad de vapor necesaria para cada formulación, y posteriormente la tabla de resultados obtenidos:

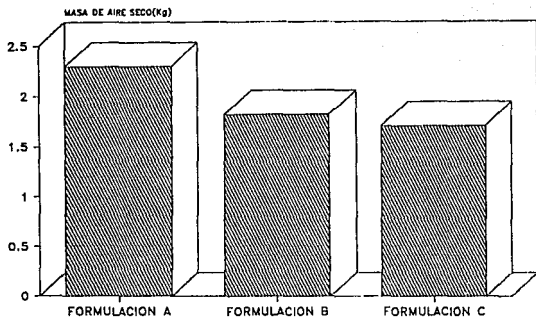


FIGURA 28.- COMPARACION DE LA MASA DE AIRE SECO REQUERIDO PARA LAS DIFERENTES FORMULACIONES EMPLEADAS

Tabla 15.- Resultados de los balances de materia en base seca para las formulaciones A, B y C.

	FORMULACION		
	A	B	C
AIRE DE ENTRADA	22	21	22
$t_{BH} (^{\circ})$ $t_{BS} (^{\circ})$	20	25	20
AIRE DE SALIDA	30	35	30
$t_{BH} (^{\circ})$ $t_{BS} (^{\circ})$	50	50	50
HUMEDAD PROMEDIO INICIAL DEL AIRE (KgH ₂ O/Kg A. S.)	0.016	0.014	0.016
HUMEDAD PROMEDIO DEL AIRE A LOS 15 MINUTOS (KgH ₂ O/Kg A. S.)	0.029	0.028	0.029
HUMEDAD PROMEDIO INICIAL DEL GRANULADO (KgH ₂ O/Kg A. S.)	0.840	0.566	0.408
HUMEDAD PROMEDIO DEL SOLIDO A LOS 15 MINUTOS (KgH ₂ O/Kg A. S.)	0.529	0.340	0.185
PESO PROMEDIO SOLIDO (Kg)	0.0961	0.0994	0.0992
MASA SE AIRE SECO (Kg)	2.299	1.818	1.702

4.6 FORMATO DE PRACTICAS

Como el principal motivo de este trabajo es la realización del diseño de una práctica de secado y contando con los resultados mostrados, se presenta el formato propuesto para esta práctica en el anexo 1.

5.- DISCUSION DE RESULTADOS

En la sección de resultados se aprecia que para la formulación A el estadígrafo Ji-cuadrada en todos los puntos elegidos tiene el valor numérico de 5.00, al mantenerse este valor constante se infiere que el proceso en todos las curvas presenta la misma variabilidad con lo que se comprueba que aún habiendose efectuado en distintas fechas los experimentos, el proceso es reproducible; así mismo en la figura 22 se puede ver que todos los puntos experimentales están dentro de los intervalos de confianza predichos, con lo que se demuestra nuevamente la reproducibilidad del proceso para esta formulación. También se ve que para la velocidad de secado los puntos de mayor variación son los terminales, este comportamiento se atribuye a una lectura imprecisa del peso del granulado ya que, las charolas del equipo quedan suspendidas por lo que al haber flujo de aire y al disminuir el peso, el registro de la balanza presenta mucha variación, pero a pesar de esto el parámetro estadístico Ji-cuadrado tiene también para todos los puntos de contraste el valor de 5.00, por lo que se vuelve a comprobar la reproducibilidad de la operación unitaria.

Después de un análisis similar al anterior, para la formulación B y C se encuentra que el secado de estas formulaciones es también reproducible puesto que para ambos procesos se encuentra un valor del estadígrafo Ji-cuadrado de 5.00 y este no varía en los distintos tiempos de prueba; además para las 3 formulaciones el valor del parámetro estadístico mencionado es menor que el reportado en las tablas (9.49), lo que indica que los procesos son confiables en un 95%, es decir, el 95% de los procesos realizados, poblacionalmente, para cada formulación tendrán valores dentro de los intervalos de confianza calculados.

En la figura se comparan los procesos de las 3 formulaciones y se encuentra que en las curvas que muestran diferencias entre sí más significativas son las de la formulación A con respecto a la B. siendo la curva de la formulación C la que presenta sus periodos de secado con menos diferenciación causando con esto que sea menos representativa desde el punto de vista pedagógico. Comparando las figuras 25, 26 y 27, que corresponden a las gráficas de velocidad de secado contra humedad, es claro que las curvas con menos variaciones en sus resultados son las de las formulaciones A y B.

Ahora en la figura 29 se compara la cantidad de aire seco necesaria para secar el granulado, este dato es el de mayor peso, puesto que el costo del proceso depende de la cantidad de aire que se necesite para el secado; como se puede apreciar la formulación A necesita la mayor cantidad de aire seco, esto a la vez que es una desventaja económica, es un punto importante, visto didácticamente, ya que los alumnos al hacer su balance notaran esta diferencia y será más significativo para su aprendizaje.

En las figuras que muestran las curvas de velocidad de secado contra humedad, que son las representativas del proceso, se observa que la formulación C (figura 27) tiene los periodos del proceso menos definidos que las otras 2 formulaciones (figuras 25 y 26).

Tomando todo esto en cuenta se decidió usar para el formato de práctica solo las formulaciones A y B.

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

6.- CONCLUSIONES

- * Puesto que se encontraron para el estadígrafo Ji-cuadrado valores menores (5.00) a los reportados en las tablas (9.49) se concluye que los procesos de secado efectuados en diferentes días por el mismo operador, para las formulaciones A, B y C son confiables y reproducibles en un 95%.
- * Las formulaciones A y B por presentar los períodos de secado más definidos y tener una diferencia notable en las cantidades de vapor necesarias para el proceso de secado son desde el punto de vista didáctico más representativos.
- * El uso de un equipo de secado fácil de operar produce resultados confiables, además de desviar en menor grado la atención del alumno en el manejo del equipo, favoreciendo con esto que el alumno se enfoque en la operación unitaria.
- * Puesto que los experimentos los realizó solo un operador se recomienda que otra persona realice todo el procedimiento planteado para tener la seguridad que no hay diferencias estadísticamente significativas cuando el experimento es realizado por varias personas.

7.- BIBLIOGRAFIA

- 1.- FOUST, S.A. et al.; Principles of unit operations; John Wiley & Sons, Inc.; New York, USA; 1962; pags. 299-304, 320-327.
- 2.- GEANKOPLIS, Ch.J.; Procesos de transporte y operaciones unitarias; ED. Continental S.A. de C.V.; México D.F., México; 1982; pags. 435-492.
- 3.- HABER, A; Estadística general; Addison-Wesley Iberoamericana; México D.F.; 1986; pags. 73-98, 222-240, 260-270.
- 4.- HERNANDEZ, A.R.; "Secado" en: Farmacotecnia teórica y práctica, tomo III, Helman, J. (ed.); ED. Continental S.A. de C.V.; México D.F., México; 1984; pags. 927-968.
- 5.- RANKELL, A.S. y cols.; "Drying" en: Theory and practice of industrial pharmacy, Lachman, L., Lieberman, H.A. y Kanig J.L. (eds.); Lea & Febiger; Philadelphia, USA; 1986; pags 47-65.
- 6.- RICKMERS, A.D. y TODD, H.N.; Introducción a la estadística; Compañía Editorial Continental S.A.; Barcelona, España; 1971; pags. 122-126.
- 7.- STEEL, R.G. y TORRIE, J.H.; Bioestadística: principios y procedimientos; McGraw-Hill de México; México D.F., México; 1985; pags. 56-58, 567.
- 8.- VALIENTE, A. y STIVALET, R.P.; Problemas de balances de energía; Alhambra Mexicana S.A.; México D.F., México; 1986; pags. 159-166.

8.- ANEXOS

ANEXO 1
FORMATO DE PRACTICA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
LABORATORIO DE TECNOLOGÍA FARMACÉUTICA I
PRÁCTICA # " SECADO "

OBJETIVO:

- * El alumno debe conocer la operación unitaria de secado así como sus aplicaciones en la industria farmacéutica.
- * El alumno debe efectuar el secado de 2 granulados con diferente humedad inicial.
- * El alumno debe realizar los cálculos, gráficas y determinaciones más representativas de esta operación basándose en sus datos experimentales.

INTRODUCCION TEORICA:

Basándose en la bibliografía citada y adicional sugerida por el profesor, el alumno debe elaborar una introducción que contemple los siguientes puntos:

- 1.- Definición de la operación tratada y aplicaciones.
- 2.- Mecanismos involucrados en esta operación, así como determinaciones teórico-prácticas que se efectúan (velocidad de secado, curvas humedad-tiempo, etc).
- 3.- Equipos más usados en la industria farmacéutica.

EQUIPO:

- | | |
|------------------------------|------------------------------------|
| 1 SECADOR DE CHAROLAS | 3 VASOS PARA PRECIPITADO DE 250 mL |
| 1 PORTACHAROLAS | 1 PROBETA GRADUADA DE 100 ml. |
| 2 CHAROLAS | 1 ESPATULA |
| 4 TERMOMETROS DE -5° A 150°C | 1 BALANZA |
| 1 CRONOMETRO | |

FORMULACIONES:

A) ALMIDON 100 g
AGUA 80 g

B) ALMIDON 100 g
AGUA 60 g

PROCEDIMIENTO:

- 1.-SE MIDEN LAS LONGITUDES DE LAS CHAROLAS , CON LAS CUALES SE OBTENDRA EL AREA DE SUPERFICIE DESPUES SE COLOCAN EN EL PORTACHAROLAS Y SE REGISTRA SU PESO COMO PESO 1.
- 2.-SE PESAN EN UN VASO DE PRECIPITADO 100 g DE ALMIDON (EL PESO MEDIDO SE REGISTRA COMO PESO 2).
- 3.-EL ALMIDON SE GRANULA CON 80 g DE AGUA, EL GRANULADO SE DISTRIBUYE EN LAS CHAROLAS PROCURANDO MANTENER UNA SUPERFICIE HOMOGENEA Y DELGADA.
- 4.-SE COLOCAN LAS CHAROLAS EN EL PORTACHAROLAS Y SE REGISTRA EL PESO INDICADO EN LA BALANZA (VER FIGURA 1) COMO PESO i.
- 5.-SE COLOCAN DOS TERMOMETROS, (UNO ACONDICIONADO CON UNA CINTA DE TELA (MECHA) QUE MEDIRA LA TEMPERATURA BULBO HUMEDO Y EL OTRO QUE MEDIRA LA TEMPERATURA DE BULBO SECO), EN LOS ORIFICIOS QUE SE ENCUENTRAN A UN LADO DE LA PUERTA DEL SECADOR (VER FIG 1) ESTOS MEDIRAN LAS TEMPERATURAS DEL AIRE DE SALIDA; OTROS DOS TERMOMETROS (ACONDICIONADOS DE LA MISMA FORMA) SE COLOCAN EN LOS ORIFICIOS QUE SE ENCUENTRAN ANTES DEL CALENTADOR (FIG. 2) ESTOS TERMOMETROS MEDIRAN LAS TEMPERATURAS DEL AIRE DE ENTRADA).
- 6.-SE ALINEAN LAS TUBERIAS DEL VAPOR Y SE DRENAN.
- 7.-EL MEDIDOR DE FLUJO SE COLOCA EN LA POSICION 0 (CERO), VER FIGURA 2.
- 8.-SE CONECTA EL VENTILADOR (VER FIGURA 2).

- 9.-EL CONTROL DE PRESION SE AJUSTA A UNA PRESION ENTRE 10-12 lb/in², ESTA PRESION NO DEBERA SALIR DE ESTOS LIMITES DURANTE TODO EL EXPERIMENTO (VER FIGURA 2).
- 10.-SE TOMA ESTE MOMENTO COMO EL TIEMPO CERO Y SE COMIENZA A TOMAR EL TIEMPO; CADA 5 MINUTOS SE TOMARA LECTURA DEL PESO DE LAS CHAROLAS EL CUAL ESTA INDICADO EN LA BALANZA (VER FIGURA 1) Y DICHO VALOR SE REGISTRARA COMO PESO i.
- 11.-AL TRANSCURRIR 80 MINUTOS SE DA POR TERMINADO EL EXPERIMENTO, LA VALVULA DE PRESION DE VAPOR SE CIERRA Y EL VENTILADOR SE APAGA.
- 12.-SE LIMPIAN LAS CHAROLAS Y SE PROCEDE DESDE EL PASO 1 HASTA EL 11 PARA LA FORMULACIONES (B).
- 13.-EL PROCESO DE SECADO DE LA FORMULACION (B) SE DETIENE A LOS 60 MINUTOS.
- 14.LOS DATOS DE CADA PROCESO SE ORDENAN EN UNA TABLA COMO LA SIGUIENTE:

FORMULACION:						
TIEMPO (θ) Hr.	PESO i Kg	AIRE DE ENTRADA		AIRE DE SALIDA		
		T _{bh} °C	T _{bs} °C	T _{bh} °C	T _{bs} °C	
						PESO 1=
						PESO 2=

- 15.-CON LOS DATOS DE LOS TRES PROCESOS SE EFECTUA EL SIGUIENTE TRATAMIENTO:
 - A) OBTENER EL PESO DE GRANULADO EN LOS DIFERENTES TIEMPOS (PESO j), A PARTIR DE LA DIFERENCIA ENTRE LOS PESOS i A LOS DISTINTOS TIEMPOS Y EL PESO 1.

B) SE OBTIENE LA HUMEDAD A PARTIR DE LA FORMULA SIGUIENTE:

$$\text{HUM} = X = (\text{peso } j - \text{peso } 2) / \text{peso } 2$$

DONDE:

PESO j - PESO 2 ES IGUAL AL PESO DE AGUA
Y LA HUMEDAD ESTA DADA EN Kg DE AGUA/Kg DE S.S., (S.S. ES SOLIDO SECO).

SE OBTIENE COMO SIGUIENTE PUNTO LA VELOCIDAD DE SECADO PARA LO CUAL SE EMPLEA LA FORMULA:

$$W = (\text{PESO } 2/A) * (-dX/d\theta)$$

DONDE:

W ES LA VELOCIDAD EN Kg/Hr m^2

PESO 2 ES LA MASA DE SOLIDO SECO EN Kg

A ES EL AREA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO EN m^2

X ES LA HUMEDAD EN Kg AGUA/ Kg DE S.S.

θ ES EL TIEMPO EN Hr

D) SE ELABORA ENTONCES LA TABLA SIGUIENTE:

FORMULACION:			
TIEMPO (θ) Hr.	PESO j Kg	HUMEDAD (X) Kg AGUA/Kg DE S.S.	VELOCIDAD DE SECADO (W) Kg AGUA/Hr m^2

E) CON LOS VALORES OBTENIDOS SE ELABORAN GRAFICAS DE HUMEDAD CONTRA TIEMPO, VELOCIDAD CONTRA TIEMPO Y VELOCIDAD CONTRA HUMEDAD.

EN LA GRAFICA DE VELOCIDAD CONTRA HUMEDAD SE SEÑALAN EL PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE, LA HUMEDAD CRITICA Y LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO.

RESULTADOS:

ELABORADOS POR EL ALUMNO COMO PARTE DEL REPORTE DE PRACTICA.

CUESTIONARIO:

- 1.-¿ COMO DEFINIRIA LA OPERACION DE SECADO ?
- 2.-¿ QUE APLICACIONES TIENE EN LA INDUSTRIA FARMACEUTICA ?
- 3.-¿ QUE EQUIPOS SE EMPLEAN PARA ESTA OPERACION UNITARIA ?
- 4.-¿ EN ESTA PRACTICA QUE VARIABLES MANEJA ?
- 5.-¿ QUE VARIACIONES SE ENCUENTRAN EN EL TIEMPO DE SECADO, HUMEDAD CRITICA Y VELOCIDAD DE SECADO PARA LOS DISTINTOS GRANULADOS ?
- 6.-¿ A QUE ATRIBUYE ESTAS DIFERENCIAS ?
- 7.-¿ QUE PROPUESTAS CREE QUE MEJORARIAN EL PROCESO EMPLEADO ?

BIBLIOGRAFIA:

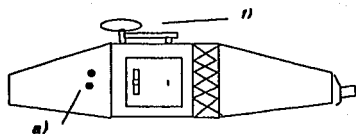
HELMAN, J.; FARMACOTECNIA TEORICA Y PRACTICA TOMO III; ED. CONTINENTAL S. A. DE C. V.; MEXICO ; 1984.

LACHMAN, L. LIEBERMAN, H.A. Y KANIG, J.L.; THE THEORY AND PRACTICE OF INDUSTRIAL PHARMACY; LEA & FEBIGER; FILADELFIA, USA; 1986.

FIGURAS:

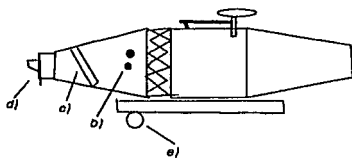
VER PAGINA SIGUIENTE.

FIGURA 1



- a) Orificios para termómetros de bulbo húmedo y bulbo seco para el aire de salida**
- f) Balanza**

FIGURA 2



- b) Orificios para termómetros de bulbo húmedo y bulbo seco del aire de entrada**
- c) Control de flujo de aire**
- d) Control del ventilador**
- e) Control de presión**

ANEXO 2
CARTA PSICOMETRICA, VARIABLES Y MANEJO

Los diagramas o cartas psicrométricas se han desarrollado con el fin de resolver rápidamente problemas de vaporización, condensación y acondicionamiento de aire, donde los procesos tienen lugar a presión atmosférica. Algunos de los procesos que pueden seguirse son:

- a) calentamiento o enfriamiento a humedad y presión constante (Figura 29).
- b) humidificación adiabática (Figura 30)

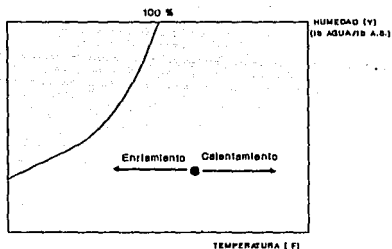


FIGURA 29.- PROCESOS DE ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO A PRESIÓN Y HUMEDAD CONSTANTES

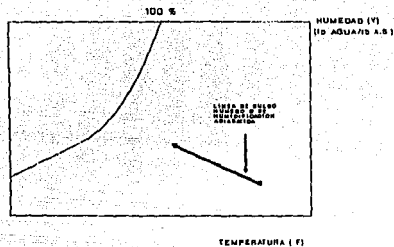


FIGURA 30.- PROCESO DE HUMIDIFICACION ADIABATICA

Los diagramas para sistemas líquido-gas están referidos generalmente a una atmósfera de presión y para la utilización de otras presiones es preciso aplicar las correlaciones convenientes ó construir un diagrama a la presión deseada.

Las variables que se manejan en la carta de humedad son las siguientes: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, humedad relativa, humedad absoluta, humedad de saturación, humedad por ciento, volumen húmedo, calor húmedo, entalpía total, temperatura de rocío.

Las definiciones de estas variables son las siguientes:

Temperatura de bulbo seco (t_s). Temperatura del aire ambiental medida con un termómetro.

Temperatura de bulbo húmedo (t_h). Temperatura a régimen permanente del no equilibrio que alcanza una pequeña cantidad de agua sumergida bajo condiciones adiabáticas en una corriente continua de aire.

Humedad absoluta (Y). Es la cantidad de agua contenida en la unidad de masa de aire seco, está expresada en lb agua/lb A.S., Kg agua/Kg A.S. (donde a.s. significa sólido seco). Se puede obtener por medio de la relación mol:

$$Y = \frac{Y_A}{Y_B} \times \frac{PM_A}{PM_B} = \frac{\text{lb mol}_A}{\text{lb mol}_B} \times \frac{\text{lb/lb mol}_A}{\text{lb/lb mol}_B}$$

ó función de las presiones parciales nos queda:

$$Y = \frac{Y_A}{Y_B} \times \frac{PM_A}{PM_B} \times \frac{\bar{P}_A}{P_t - P_A} \times \frac{PM_A}{PM_B}$$

donde:

\bar{P}_A = Presión parcial del componente A.

P_t = Presión total.

PM = Peso Molecular.

Humedad de Saturación (Y_s). Aire saturado es aquel aire en el cual el vapor del material condensable se encuentra en equilibrio con material condensable en el estado líquido a la temperatura del aire.

En este caso la presión parcial del vapor del material condensable en el incondensable es igual a la presión de vapor del material condensable a la temperatura del incondensable.

$$Y_s = \frac{P_A^*}{P_t - P_A^*}$$

$$Y \text{ en masa} = \frac{P_A^*}{P_t - P_A^*} \times \frac{PM_A}{PM_B}$$

donde:

P_A^* = Presión de componente A a una atmósfera de presión

Humedad Relativa (Yr). Es la relación de la humedad real de un sistema con la humedad de saturación posible a la temperatura del sistema:

$$Y_r = \frac{\bar{P}_A}{P_A^*} (100)$$

Cuando $Y_r = 100\%$ $\bar{P}_A = P_A^*$ y el aire está saturado.

Cuando $Y_r = 0\%$ $\bar{P}_A = 0$ Aire seco.

Humedad por ciento (Y %). Es igual a la humedad absoluta de un sistema en relación a la máxima humedad absoluta posible de un sistema.

$$Y \% = \frac{Y}{Y_s} = \frac{\frac{P_A}{P_L - P_A}}{\frac{P_A}{P_L - P_A}} \quad (100)$$

$$Y \% = Y_r \frac{P_L - P_A}{P_L - P_A}$$

Volumen Húmedo (V_h). Es el volumen de la unidad de masa del gas o del aire seco más el volumen del vapor que contenga el gas a la presión y temperatura a que se encuentra el sistema. Está expresado en $\text{ft}^3/\text{lb A.S.}$ ó $\text{m}^3/\text{Kg A.S.}$

$$V_h = 359 \left[\frac{1}{29} + \frac{1}{18} Y \right] \frac{T (R)}{492} \times \frac{1 \text{ Atm.}}{P (\text{atm})}$$

Temperatura de Rocío (T_r). Es la temperatura a la cual el aire se satura cuando se enfría, suponiendo que no hay aumento ni disminución de humedad, y está expresada en $^{\circ}\text{F}$ o cualquier otra unidad de temperatura.

Calor Húmedo (C_s). Es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura a la unidad de masa del gas, más todo el vapor que contenga.

$$C_s = (C_p)_B + (C_p)_A Y$$

Temperatura de Saturación Adiabática (T_s). Es la temperatura a la cual se enfría la unidad de masa de gas en contacto con el líquido cuando ese gas se satura con vapor del líquido, sin agregar ni quitar calor.

Cuando la entalpía del aire es igual a la de saturación, quiere decir que:

$$T_o = T_s$$

$$\text{Balance: } H_{\text{Aire Ent.}} + H_{\text{Agua Ent.}} = H_{\text{Aire Salida}}$$

$$H_{\text{Agua Ent.}} = m C_p (t_o - t_s) = m C_p (t_s - t_s) = 0$$

Por lo tanto:

$$H_{\text{Aire Ent.}} = H_{\text{Aire Salida}}$$

$$H_{\text{Aire Ent.}} = C_s (T_y - T_o) + \lambda_o Y = C_s (T_s - T_o) + \lambda_o Y$$

donde:

T_y = temperatura de entrada del aire.

T_o = temperatura de referencia.

T_s = temperatura de saturación adiabática.

Haciendo $T_o = T_s$

$$C_s (T_y - T_s) + \lambda_s Y_B = C_s (T_s - T_s) + \lambda_s Y_s$$

$$\lambda_a Y_a - \lambda_a Y_s = -C_a (T_y - T_s)$$

$$\frac{Y_a - Y_s}{T_y - T_s} = -\frac{C_a}{\lambda_a} \text{ Ec. de la línea de saturación.}$$

$$T_s = T_h$$

$$\frac{Y - Y_h}{T_y - T_h} = -\frac{C_a}{\lambda_h}$$

donde:

T_y = temperatura del aire (*F).

T_h = temperatura del bulbo húmedo (*F).

NOTA: En la carta psicrométrica para el aire y solamente para el aire, las líneas de enfriamiento adiabáticas son iguales a las psicrométricas.

El manejo de las cartas de humedad requieren por lo menos dos variables como dato, para encontrar el resto de las variables que se encuentran en la carta de humedad, para ilustrarlo se presentará el siguiente ejemplo:

Encontrar Y_s , Y , $Y\%$, v_h , C_a , H_y , T_x , a la temperatura $T_y = 90^\circ\text{F}$, $T_h = 70^\circ\text{F}$ a una presión de 1 atmósfera.

Cálculo de Y_s . Encontrar T_h en las abscisas, subir en ángulo recto hasta la curva de saturación o de 100% de humedad, virar a la derecha tomando la normal, hasta valores de humedad y el valor correspondiente es: $Y_s = 0.016$ lb Agua/lb A.S.

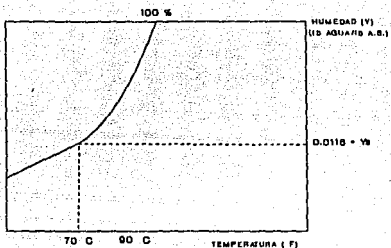


FIGURA 31.- CALCULO DE LA HUMEDAD DE SATURACION

Cálculo de Y . Encontrar T_h en las abscisas y subir hasta curva de saturación, bajar hasta T_y por la línea de enfriamiento adiabático que intersece con T_h y 100%, virar hacia la derecha tomando la normal hasta los valores de humedad.

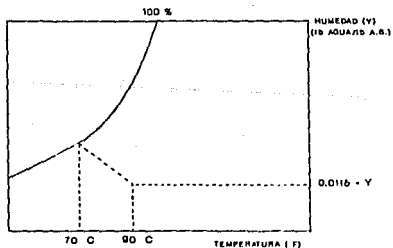


FIGURA 32.- CALCULO DE LA HUMEDAD ABSOLUTA

Cálculo de Y%. Se lee directamente en el punto de intersección de T_y y la línea de enfriamiento adiabático.

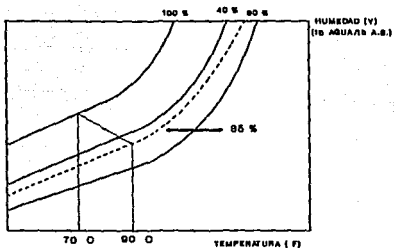


FIGURA 33.- CALCULO DE LA HUMEDAD PORCENTUAL

Cálculo de v_h . Subir con ángulo recto por T_y hasta los valores de v_h por el plano formado por la línea de volumen saturado y la línea de volumen específico de aire seco, virar a la izquierda tomando la normal hasta la escala de volumen húmedo.

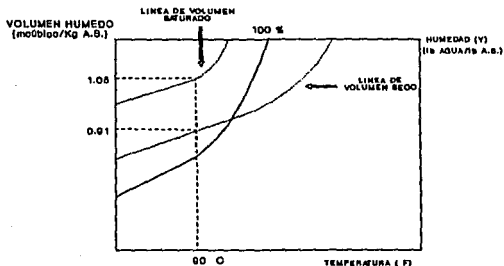


FIGURA 34.- CALCULO DEL VOLUMEN HUMEDO

Cálculo de C_y . Desplácese hacia la izquierda de Y por la normal, hasta la línea de calor húmedo, subir el ángulo recto hasta la escala de valores de calor húmedo.

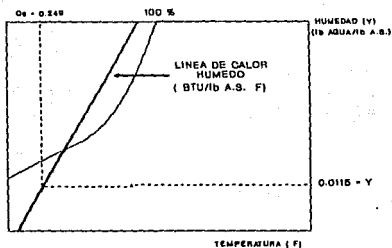
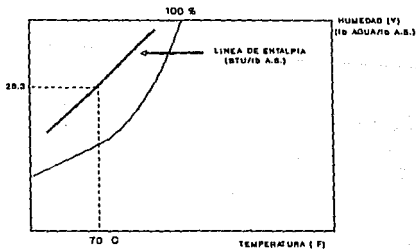


FIGURA 36.- CALCULO DEL CALOR HUMEDO

Cálculo de H_y . Subir por T_h en ángulo recto hasta la línea de entalpía de aire saturado, virar hacia la izquierda por la normal, hasta la escala de valores de entalpía.



IGURA 36.- CALCULO DE LA ENTALPIA
98

Cálculo de T_r . Desplácese hacia la izquierda con el valor de Y , por la normal, hasta la línea de 100% de humedad; bajar por la normal hasta los valores de la temperatura.

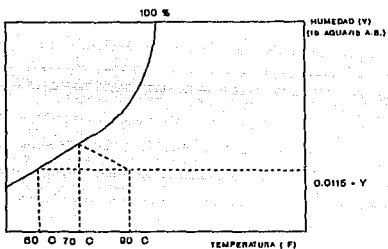


FIGURA 37.- CALCULO DE LA TEMPERATURA DE ROCIO