

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Selección y diseño de un secador por lotes de
semillas de Cucurbitáceas y Solanáceas

Oscar Israel Guzmán Veliz

Guatemala
2009

Selección y diseño de un secador por lotes de
semillas de Cucurbitáceas y Solanáceas por
Oscar Israel Guzmán

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Selección y diseño de un secador por lotes de
semillas de Cucurbitáceas y Solanáceas

Trabajo de investigación presentado por Oscar
Israel Guzmán Veliz para optar al grado
académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala
2009

Asesor:

(f)

Ing. Jaime Horacio Rosales Solórzano
Colegiado No. 320
Asesor de Trabajo de Graduación

Terna Examinadora:

(f)

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano
Colegiado No. 686
Director de Departamento de Ingeniería Química

(f)

Ing. Jaime Horacio Rosales Solórzano
Colegiado No. 320

(f)

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
Colegiado No. 874

Fecha de aprobación: 9 de diciembre de 2009

PREFACIO

Este trabajo pretende brindar al lector un ejemplo de cómo diseñar un secador para algunos materiales especiales como lo son las semillas de frutas y hortalizas, tomando en cuenta las limitaciones del proceso. Se trata de mejorar una parte del proceso para obtener ventajas que beneficien su funcionamiento ya que ésta puede convertirse en una ventaja competitiva frente a empresas que se dedican a actividades similares.

El buen uso de la energía disponible juega un papel muy importante en la productividad de una empresa. El mal uso de los recursos, tanto energéticos como físicos, tiene un efecto negativo al medio ambiente como a los costos de operación de una actividad productiva por lo que aumentar al máximo la eficiencia de cada componente del proceso nos asegura obtener un mayor rendimiento y conversión de los recursos.

Este trabajo se realizó en una empresa que se dedica a la investigación y producción de semillas de solanáceas y cucurbitáceas. El proceso que se lleva a cabo actualmente es tardado y con baja uniformidad de secado en las bandejas donde se seca el material, debido al mal dimensionamiento del equipo, por lo que se analizó una mejor distribución de la semilla y aprovechar la energía del aire que circula en el ambiente.

Quisiera darle un profundo agradecimiento a mi madre que fue mi guía durante todo éste tiempo, a mis hermanos, ya que sin su apoyo este trabajo no existiría, a mi padre que desde que era niño me enseñó a luchar por lo que quería, a mi novia y a todos los que me inspiraron para seguir adelante cuando más lo necesitaba. También quiero agradecer al personal de Horticultura de Salamá por haberme abierto las puertas y por haber depositado en mí la confianza para realizar éste trabajo.

ÍNDICE

PREFACIO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE DIAGRAMAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	2
A. Secado.....	2
1. Equilibrio.....	2
2. Contacto gas-sólido.....	2
B. Condiciones generales de secado.....	3
C. Curva se secado.....	3
1. Periodo de rapidez constante.....	6
2. Periodo de rapidez decreciente.....	7
D. Operaciones de secado.....	
1. Secadores directos.....	7
2. Secadores indirectos.....	8
E. Mecanismo de secado por lotes.....	8
1. Secado por circulación transversal.....	8
2. Secado por circulación tangencial.....	9
F. Variables que afectan el secado.....	11
1. Efecto de la velocidad del gas.....	11
2. Efecto de la temperatura del gas.....	11
3. Efecto de la humedad del gas.....	11
4. Efecto del espesor del solido que se está secando.....	11
G. Movimiento de la humedad del gas dentro del sólido.....	12
H. Difusión del líquido.....	12
I. Movimiento capilar.....	12
J. Equipos discontinuos de circulación directa.....	13

1. Secador de bandejas con flujo transversal.....	13
2. Secador de bandejas con flujo paralelo.....	13
K. Pruebas de secado.....	14
L. Selección del equipo de secado.....	14
III. JUSTIFICACIÓN.....	17
IV. OBJETIVOS.....	18
A. GENERALES.....	18
B. ESPECÍFICOS.....	18
V. PROBLEMA A RESOLVER.....	19
VI. METODOLOGÍA.....	20
VII. RESULTADOS.....	21
VIII. DISCUSIÓN.....	28
IX. CONCLUSIONES.....	32
X. RECOMENDACIONES.....	33
XI. BIBLIOGRAFIA.....	34
XII. APÉNDICE.....	35
APÉNDICE A. Cálculos.....	36
APÉNDICE B. Gráficas obtenidas de pruebas de secado en planta piloto.....	38
APÉNDICE C. Tablas utilizadas para la selección del secador.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1; Descripción del secador seleccionado.....	24
Tabla No. 2; Descripción del mecanismo de control para la fuente de calor.....	26
Tabla No. 3; Velocidad de transferencia de masa para un lote de secado de semilla de chile en secador de planta piloto con una velocidad de aire de secado de 1m/s, humedad relativa de 55% a una temperatura de.....	26
Tabla No. 4; Modelo matemático para predecir el tiempo en minutos de secado con aire a 54.8% de humedad relativa y una presión atmosférica de 0.89 atmosferas de un lote de semillas de chile con un contenido de humedad inicial entre 18 y 9 kg humedad/kg de sólido seco.	26
Tabla No. 5; Costo del secador diseñado.....	26
Tabla No. 6; Densidades en gramos por centímetro cubico de semillas de distintas hortalizas y frutas.	37
Tabla No. 7; Clasificación de secadores basada en el método de transferencia de calor.....	39
Tabla No. 8; Clasificación de secadores basada en los materiales a secar.....	40

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama No. 1 Gráfica de concentración contra tiempo en condiciones de secado constantes.....	4
Diagrama No 2 Rapidez de secado contra concentración en condiciones de secado constantes.....	6
Diagrama No. 3 Secado por circulación transversal.....	10
Diagrama No. 4. Diagrama de flujo del equipo y balance de masa y energía para la operación del secador con aire a 54.8% de humedad relativa y una presión atmosférica de 0.89 atmosferas.....	21
Diagrama No. 5. Vista isométrica y cotas del secador.....	22
Diagrama No. 6. Dimensiones frontales, laterales y vista exterior del secador.....	22
Diagrama No. 7. Vista de planta de secador	23
Diagrama No. 8 Dimensiones de entradas y salidas de aire y descripción del interior del secador.....	23
Diagrama No. 9 Dimensiones de bandejas.....	24

ÍNDICE DE GRÁFICAS

- Gráfica No. 1 Contenido de humedad en función del tiempo para un lote de semillas de chile
con una velocidad de aire de secado de 1m/s, humedad relativa de 55% a una temperatura de 33°C 27
- Gráfica No. 2 Rapidez de secado en función del contenido de humedad para un lote de semillas de chile
con una velocidad de aire de secado de 1m/s, humedad relativa de 55% a una temperatura de 33°C..... 38

RESUMEN

El objetivo principal del trabajo de graduación es seleccionar y diseñar un secador para un proceso por lotes de secado de semillas de cucurbitáceas y solanáceas, utilizando un flujo turbulento de aire a una temperatura máxima de 30° C, por lo que se procedió a realizar el diseño de un secador por convección con circulación directa de aire a través de un mecanismo de tiro forzado en operación discontinua.

El trabajo consistió en realizar un análisis de los factores que afectan el secado de materiales como la velocidad del aire de secado, la temperatura máxima del aire, el espesor del material sobre las bandejas y sus características como la velocidad de transferencia de masa, densidad de material, entre otros.

El tipo de secador adecuado para el tipo de materiales es un secador de bandejas por convección con circulación transversal de aire a través de un mecanismo de tiro forzado en operación discontinua. Con el nuevo diseño se obtiene una ampliación de la capacidad de operación en un 25%, comparado con los secadores que actualmente se están operando, además se podrá ahorrar hasta un 97% de energía eléctrica si las condiciones del aire ambiental son las adecuadas para el secado.

Se recomienda contar con equipo adecuado para determinar con mayor precisión el contenido de humedad inicial y final de la semilla para garantizar un proceso eficiente. Entre las limitaciones de este trabajo está la poca experimentación con el material debido a que la época de secado y tratamiento de semillas no coincidió en su totalidad con la elaboración de esta tesis.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to select and design a dryer for a batch drying process of cucurbits and solanaceous seeds, using a turbulent flow of air at a maximum temperature of 30 ° C. Because of this, a design of convection dryer with direct circulation of air through a mechanism of forced draft in a discontinued operation was made.

The study included an analysis of the factors affecting the drying of materials such as drying air velocity, the maximum air temperature, the thickness of the material on the trays, and their characteristics such as mass transfer rate, material density, among others.

The type of dryer suitable for this type of material is a convection tray dryer with transverse circulation of air through a mechanism of forced draft in a discontinued operation. With the new design, an expansion of operating capacity by 25% compared to dryers that are currently operating is obtained. Moreover, there will be a 97% save up of power if the ambient air conditions are suitable for the drying process.

It is recommended to have proper equipment to determine more precisely the content of initial and final moisture of the seed to ensure an efficient process. Among the limitations of this study is the lack of experimentation with the material because the drying time and seed treatment did not coincide entirely with the elaboration of this thesis.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del trabajo de graduación es diseñar un secador para el secado de semillas de cucurbitáceas y solanáceas para un proceso por lotes utilizando flujo turbulento de aire a una temperatura máxima de 30° C, para la planta productora de semillas de Seminis ubicada en Salamá Baja Verapaz.

Los antecedentes constan de distintas secciones; en la introducción al secado se explica lo que significa dicho término y lo que implica, explica la diferencia de secado y una extracción mecánica de la humedad, luego en esta misma sección se explica el equilibrio entre la humedad de un sólido y el vapor de agua por medio de las presiones parciales. Luego se explican los diferentes tipos de contacto que pueden existir entre el sólido y el gas, como por ejemplo: flujo transversal del gas o flujo paralelo. También se explican las condiciones generales para el secado y las curvas de secado, en las cuales se distingue dos partes principales en la curva; una de secado constante que se da cuando se extrae toda la humedad de la superficie de la semilla y la otra que es la de secado decreciente la cual comienza al haber evaporado toda la humedad de la superficie y se empieza a extraer la humedad interna de la semilla. Con estas dos partes de la curva se pueden determinar los tiempos de secado para cada una de las dos condiciones.

En la parte de operación de secado se explican los dos tipos de secado: el secado directo el cual consta del contacto directo de los gases calientes y los sólidos, el cual se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor; y el secado indirecto en el cual el calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre metálica para lograr la evaporación de la humedad.

Por último se describen los efectos de la temperatura, la velocidad del gas y otros factores que alteran la transferencia de masa del sólido al gas y los pasos para la selección del equipo de secado tomando en cuenta una serie de variables importantes en el proceso.

En conclusión los antecedentes son un marco teórico de la realización del trabajo de graduación, los cuales son utilizados para obtener los fundamentos y principios necesarios para la realización de la práctica.

II. ANTECEDENTES

A. Secado

Por lo general, el término secado se refiere a la eliminación de humedad en una sustancia. Se aplica tan fácil e incongruentemente que es necesario restringir su significado en el análisis presente del tema. Por ejemplo, un sólido húmedo, como madera, tela o papel, puede secarse por evaporación de la humedad ya sea en una corriente de gas o sin el beneficio del gas para acarrear el vapor; sin embargo, generalmente no se considera como secado la eliminación mecánica de esta humedad mediante el exprimido o centrifugado. Una solución puede "secarse" esparciéndola en forma de pequeñas gotas en un gas caliente y seco, lo que provoca la evaporación del líquido; empero, la evaporación de la solución mediante ebullición en ausencia de un gas para arrastrar la humedad por lo común se considera una operación de secado. Cualquier contenido pequeño de agua presente en un líquido como benceno, puede "secarse" mediante una operación que en realidad es una destilación; no obstante, la eliminación de una pequeña cantidad de acetona mediante el mismo proceso, de ordinario no se llama secado. Los gases y líquidos que contienen pequeñas cantidades de agua pueden secarse mediante operaciones de adsorción (Treybal, R. 2007: 723).

1. Equilibrio. El grado de presión de vapor que ejerce la humedad contenida en un sólido húmedo o en una solución líquida depende de la naturaleza de la humedad, la naturaleza del sólido y la temperatura. Por tanto, si un sólido húmedo se expone a una corriente continua de gas fresco que contiene una presión parcial dada del vapor \bar{p} , el sólido o bien perderá humedad por evaporación o ganará humedad del gas, hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido sea igual a \bar{p} . Entonces, el sólido y el gas están en equilibrio, y el contenido de humedad del sólido se conoce como su contenido de humedad en el equilibrio en las condiciones predominantes (Treybal, R. 2007: 723).

2. Contacto gas-sólido. Los términos que se utilizan en esta sección para describir el método por el cual el gas entra en contacto con un lecho de sólidos se definen a continuación:

- a. Flujo paralelo: la dirección del flujo de gas es paralela a la superficie de la fase sólida. El contacto tiene lugar primordialmente en la entrecara comprendida entre dos fases, en donde se produce quizás, una leve penetración del gas en los vacíos comprendidos entre los sólidos cercanos a la superficie. El lecho de sólidos se encuentra generalmente en condición estática.
- b. Flujo perpendicular: La dirección de la corriente de gas es normal en la entrecara de las fases. El gas choca contra el lecho de sólidos, encontrándose también en este caso dicho lecho de manera estática.
- c. Circulación directa. El gas penetra y fluye directamente pasando a través de los intersticios de los sólidos, circulando de una manera más o menos libre en torno a las partículas individuales. Esto ocurre cuando los sólidos están en condición estática, móvil, fluidizada o diluida.

- d. Flujo de gas en contracorriente: La dirección de flujo del gas es exactamente opuesta a la que sigue el movimiento de los sólidos.
- e. Flujo transversal del gas: La dirección de la corriente de gas se realiza según ángulos rectos en relación con el movimiento de los sólidos, a través del lecho de sólidos.
- f. Flujo de gas en equicorriente: La fase gaseosa y las partículas sólidas se desplazan en la misma dirección (Perry, H, *et al*, 2001: 12-30).

B. Condiciones generales para el secado

El secado de sólidos incluye dos procesos fundamentales y simultáneos: a) se transmite calor para evaporar el líquido y b) se transmite masa en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor desde la superficie. Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la rapidez o el índice de secado (Perry, H, *et al*, 2001: 12-36).

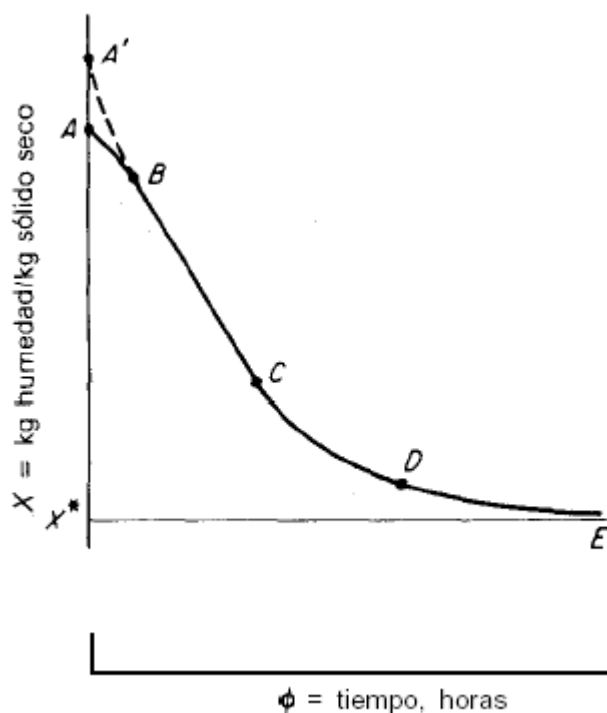
Los secadores comerciales difieren fundamentalmente en los métodos de transferencia de calor utilizados. Estas operaciones de secado industrial podrán utilizar transferencia de calor por convección, conducción, radiación o una combinación de estos. Sin embargo, en cada caso, el calor debe fluir hacia la superficie externa y luego al interior del sólido. La única excepción es el secado dieléctrico y de microondas, en donde la electricidad de alta frecuencia genera calor internamente, provocando una temperatura elevada dentro del material y en su superficie. La masa se transfiere durante el secado en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor que se desprende de las superficies expuestas. El movimiento dentro del sólido se debe a un gradiente de concentración que depende de las características del mismo. Un sólido a secar puede ser poroso o no poroso. También puede ser higroscópico o no higroscópico. Muchos sólidos se encuentran entre estos dos extremos, pero comúnmente se considera que el sólido puede ser lo uno o lo otro. Un estudio de la forma de cómo se seca un sólido se puede basar en el mecanismo interno de flujo del líquido o en el efecto de las condiciones externas de temperatura, humedad, flujo de aire, estado de subdivisión, etc., sobre la velocidad de secado del sólido. El primer procedimiento requiere por lo común un estudio básico de las condiciones internas. Aun cuando el segundo procedimiento es menos fundamental, generalmente es el más utilizado debido a los resultados que tienen una mayor aplicabilidad inmediata en el diseño y la evaluación de equipos (Perry, H, *et al*, 2001: 12-36).

C. Curvas de secado

A partir de los datos obtenidos durante las pruebas se puede graficar una curva de contenido de humedad como función del tiempo como en el diagrama número 1. Ésta será directamente útil para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes en las mismas condiciones de secado. Se puede obtener mucha información si los datos se convierten a rapidezces (*fluxes*) de secado, expresadas como N masa/tiempo(área) y se grafican contra contenido de humedad como se muestran en el diagrama número 2. El área es la

superficie húmeda sobre la cual sopla el gas y a través de la cual tiene lugar la evaporación, en el caso del secado por circulación cruzada. En el caso de secado por circulación transversal, A es la sección transversal del lecho medida a ángulos rectos a la dirección del flujo del gas (Treybal, R. 2007: 737).

Diagrama No. 1 Gráfica de concentración contra tiempo en condiciones de secado constantes



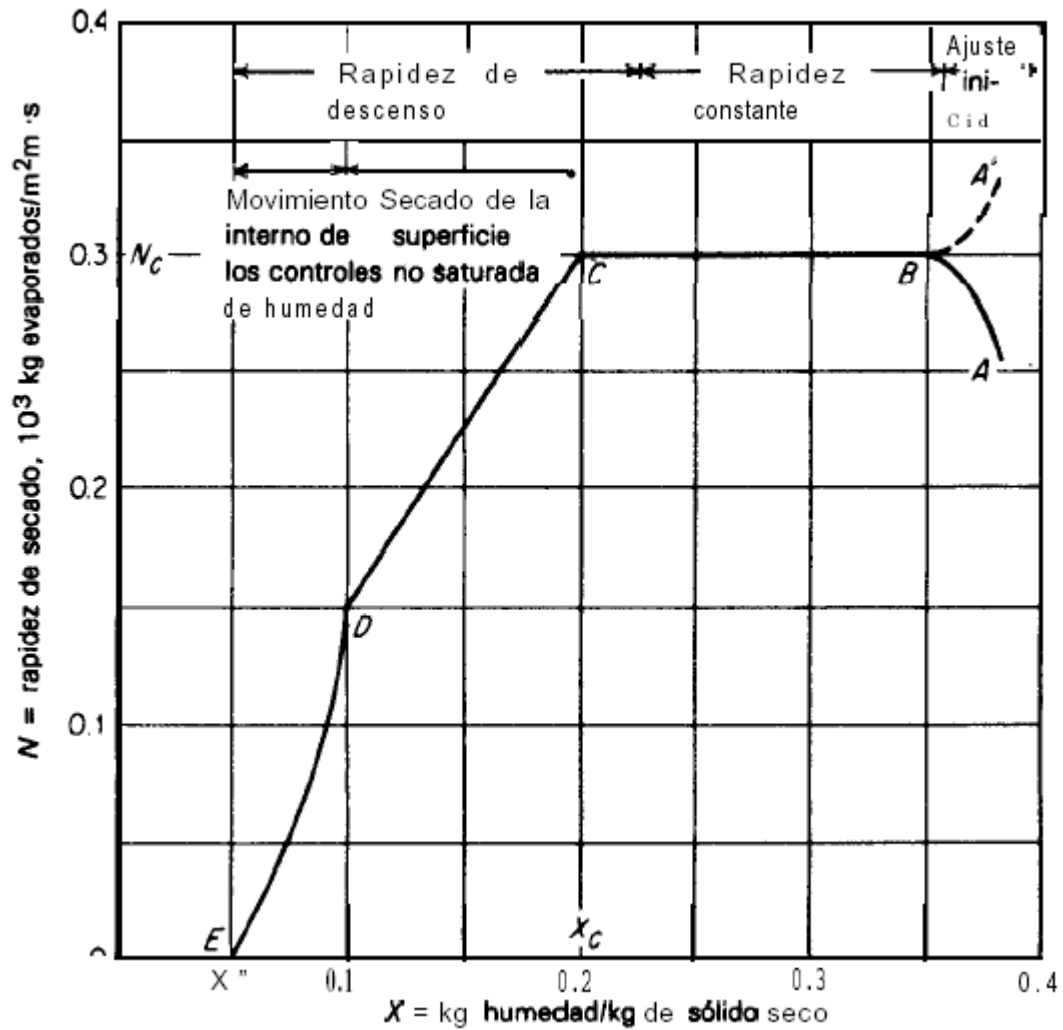
(Treybal, R. 2007: 738)

Generalmente hay dos partes principales en la curva de rapidez de secado, un periodo de rapidez constante y uno de rapidez decreciente. Si un sólido se encuentra inicialmente muy húmedo, la superficie estará cubierta con una delgada película de líquido, que se supondrá como humedad total no ligada. Cuando se expone a aire relativamente seco, la evaporación tendrá lugar desde la superficie. La rapidez a la cual se evapora la humedad puede describirse en función de k_y , un coeficiente de transferencia de masa del gas y de la diferencia de humedad entre el gas en la superficie líquida Y_s y en la corriente principal Y . Se puede prever que el coeficiente k_y permanecerá constante siempre y cuando no cambien la velocidad y dirección del flujo de gas sobre la superficie. La humedad Y_s es la humedad a saturación en la temperatura superficial del líquido t_s ; por lo tanto dependerá de esta temperatura. Puesto que la evaporación de humedad absorbe calor latente, la superficie líquida llega y permanece en una temperatura en el equilibrio tal que la rapidez del flujo de calor en el entorno de la superficie es exactamente igual a la rapidez de absorción de calor. Por lo tanto, Y_s permanece constante. Puesto que además Y permanece constante en las condiciones constantes

de secado, la rapidez de evaporación debe permanecer constante en el valor N_C , como se muestra en la figura 2 entre el punto B y C. Al principio, la superficie sólida y la líquida están generalmente más frías que la temperatura superficial final t_s , la rapidez de evaporación aumenta cuando la temperatura superficial aumenta hasta su valor final durante el periodo A sobre esta curva. En forma alternativa, la temperatura en el equilibrio t_s puede ser menor que el valor inicial, lo cual dará lugar a una curva A'B mientras ocurre el ajuste inicial. Generalmente el periodo inicial es tan corto que de ordinario se ignora en el análisis subsecuente de los tiempos de secado (Treybal, R. 2007: 738).

Cuando el contenido de humedad promedio del sólido alcanza un valor X_c , el contenido crítico de humedad la película superficial de humedad se reduce tanto por evaporación que el secado posterior produce puntos secos que aparecen sobre la superficie; éstos ocupan cada vez porciones más grandes de la superficie expuesta al continuar el secado. Sin embargo, puesto que la rapidez N se calcula mediante la superficie gruesa constante A , el valor de N debe descender aun cuando la rapidez por unidad de superficie húmeda permanezca constante. Esto da lugar a la primer parte del periodo decreciente de la rapidez, el periodo de secado superficial no saturado, desde el punto C hasta el D. Finalmente, la película superficial original de líquido se habrá evaporado completamente a un contenido de humedad promedio del sólido que corresponde al punto D. Esta parte de la curva puede faltar completamente o puede constituir el total del periodo decreciente de la rapidez. Al continuar el secado, la rapidez con la cual se puede mover la humedad a través del sólido es el paso controlante, a causa de los gradientes de concentración que existen entre las partes más profundas y la superficie. Como la concentración de humedad generalmente decrece mediante el secado, la rapidez de movimiento interno de la humedad decrece. En algunos casos, la evaporación puede tener lugar debajo de la superficie del sólido en un plano o zona que se va hundiendo más profundamente en el sólido al irse secando. En cualquier caso, la rapidez de secado decae aún más rápidamente que antes, como de D a E. En el punto E, el contenido de humedad del sólido ha caído hasta el valor en el equilibrio X^* para la humedad del aire predominante y el secado se detienen. La distribución de humedad dentro del sólido durante el periodo decreciente de la rapidez se calculó y se presentan gráficamente (Treybal, R. 2007: 739).

Diagrama No 2 Rapidez de secado contra concentración en condiciones de secado constantes



(Treybal, R. 2007: 739).

Tiempo de secado

1. Periodo de rapidez constante: Si el secado tiene lugar completamente dentro del periodo de rapidez constante de forma que $N = N_c$ y $X_1 > X_c$:

$$\theta = \frac{S_s(X_1 - X_c)}{AN_c}$$

(Ecuación No. 1)

Donde: S_s es la masa de sólido seco

X_1 es el contenido de humedad en el punto 1

2. El periodo decreciente de la rapidez: si tanto X_1 como X_2 son menores que X_C de forma que el secado ocurre bajo condiciones cambiantes de N , se puede realizar de la siguiente forma:

$$\theta = \frac{Ss(X_1 - X_2)}{A(N_1 - N_2)} \ln \frac{N_1}{N_2}$$

(Ecuación No. 2)

Con frecuencia, la curva decreciente de la rapidez total se puede tomar como una línea recta entre los puntos C y E, por lo que la ecuación se vuelve:

$$\theta = \frac{Ss(X_c - X^*)}{AN_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*}$$

(Ecuación No. 3)

(Treybal, R. 2007: 739).

D. Operaciones de secado

Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente según que sean por lotes o continuas. Estos términos pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia que está secando. Así, la operación denominada secado por lotes, generalmente es un proceso en semilotes, en donde una cierta cantidad de sustancia que se va a secar se expone a una corriente de aire que fluye continuamente, en la cual se evapora la humedad. En las operaciones continuas, tanto la sustancia que se va a secar, como el gas pasan continuamente a través del equipo. El equipo que se utiliza para el secado se puede clasificar de acuerdo con el tipo del equipo y por la naturaleza del proceso de secado (Treybal, R. 2007: 729).

1. Secadores directos: Las características generales de operación de los secadores directos son:

- a. El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor.
- b. Las temperaturas de secado varían hasta 1,000K, que es la temperatura limitante para casi todos los metales estructurales de uso común. A mayores temperaturas, la radiación se convierte en un mecanismo de transmisión de calor de suma importancia.
- c. A temperaturas de gases inferiores al punto de ebullición, el contenido de vapor de un gas influye en la velocidad de secado y el contenido final de humedad del sólido. Con temperaturas de gas superiores al punto de ebullición en todos los puntos, el contenido de vapor del gas ejerce sólo un ligero efecto de retraso en la velocidad de secado y el contenido final de humedad. Por lo tanto los vapores supercalentados del líquido que se está separando pueden servir para secar.
- d. Para secados a temperaturas bajas y cuando las humedades atmosféricas son excesivamente elevadas, quizá sea necesario deshumidificar el aire de secado.
- e. Un secador directo consume más combustible por libra de agua evaporada cuanto más bajo sea el contenido final de humedad.

- f. La eficacia mejora al aumentar la temperatura del gas de entrada, para una temperatura de salida constante.
- g. Debido a las grandes cantidades de gas que se necesitan para proporcionar todo el calor de secado, el equipo de recuperación del polvo puede ser muy grande y costoso cuando se trata de secar partículas muy pequeñas (Perry, H, et al, 2001: 12-45).

2. Secadores indirectos: Difieren de los directos en la transmisión de calor y la separación del vapor:

- a. El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre metálica.
- b. Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación en el caso de secadores de congelación, hasta mayores de 800 K en el caso de secadores indirectos calentados por medio de productos de combustión.
- c. Los secadores indirectos son apropiados para secar a presiones reducidas y en atmósferas inertes, para poder recuperar los disolventes y evitar la formación de mezclas explosivas o la oxidación de materiales que se descomponen con facilidad.
- d. Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento son en general económicos, desde el punto de vista del consumo de calor, y que suministran calor sólo de acuerdo con la demanda hecha por el material que se está secando.
- e. La recuperación de los polvos y materiales finamente pulverizados se maneja en una manera más satisfactoria en los secadores indirectos que en los directos (Perry, H, *et al*, 2001: 12-45).

E. Mecanismo de secado por lotes

Se va a considerar ahora con mayor detalle las diferentes partes de la curva de rapidez de secado. Los conocimientos actuales respectivos permiten describir razonablemente bien el proceso de secado en el periodo de rapidez constante; sin embargo, aún falta mucho para comprender los periodos decrecientes de la rapidez (Treybal, R. 2007: 742).

1. Secado por circulación transversal. Cuando un gas pasa a través de un lecho de sólidos granulares húmedos, puede resultar tanto un periodo de rapidez constante como un periodo decreciente de la rapidez. Considérese el caso en que el lecho de sólidos tienen un espesor apreciable con respecto al tamaño de las partículas. La evaporación de la humedad no contenida hacia el gas ocurre en una zona relativamente estrecha que se mueve lentamente a través del lecho; a menos que el lecho se caliente internamente, el gas que sale de esta zona está, para todos los fines prácticos, saturado a la temperatura de saturación adiabática del gas entrante. Esta temperatura también es la temperatura superficial de las partículas húmedas. La rapidez de secado es constante mientras la zona esté completamente dentro del lecho. Cuando la zona alcanza al principio el final del lecho, la rapidez de secado empieza a decaer debido a que el gas ya no sale en una condición saturada. En otras palabras, una onda de desorción pasa a través del lecho. Sin embargo, lo

que interesa es el contenido de humedad del sólido y no los cambios de concentración que ocurren en el gas saliente. En el caso de lechos delgados compuestos de partículas grandes, desde el principio el gas sale insaturado del lecho; empero, mientras cada una de las superficies de las partículas permanezca completamente húmeda, se tendrá un periodo de rapidez constante, Entonces el periodo decreciente de la rapidez empieza cuando se termina la humedad superficial (Treybal, R. 2007: 753).

a. La rapidez de secado de la humedad no ligada: Considérese un lecho fijo de sección transversal uniforme, alimentado con un gas de humedad Y_1 a un flujo G_s masa gas seco/(tiempo)(área de sección transversal del lecho). La rapidez e secado N_{max} ocurrirá si el gas que sale del lecho está saturado a la temperatura de saturación adiabática, con humedad Y_s .

$$N_{max} = G_s(Y_s - Y_1)$$

(Ecuación No. 4)

(Treybal, R. 2007: 754)

b. La rapidez de secado de la humedad no ligada: Para describir ese tipo de secado, puede hacerse alguna adaptación de los métodos utilizados para la adsorción en lechos fijos, sin embargo, no hay datos experimentales que confirmen esas adaptaciones (Treybal, R, 2007. pp 756).

2. Secado por circulación tangencial. El periodo de rapidez constante. En este periodo, en el cual ocurre la evaporación superficial de la humedad no ligada, se ha demostrado que la rapidez de secado se establece mediante un balance de las necesidades caloríficas para la evaporación y la rapidez con la cual el calor alcanza la superficie. Considérese la sección de un material que se está secando en una corriente de gas, como se muestra en el diagrama número 3. El sólido de espesor z_s se coloca sobre un plato de espesor z_M . Todo el conjunto se sumerge en una corriente de gas secante con una temperatura T y una humedad Y masa humedad/masa gas seco, que fluye con una velocidad de masa G masa/tiempo(área). La evaporación de humedad tiene lugar desde la superficie superior, A, que está a una temperatura T_s . La superficie que se está secando recibe calor de diferentes fuentes: (1) q_c por convección desde la corriente gaseosa; (2) q_k por conducción a través del sólido; (3) q_R por radiación directa de una superficie caliente a la temperatura T_R , como se muestra, todos expresados como un flux, energía/tiempo(área del sólido para la transferencia de calor). De acuerdo con el mecanismo que se analizó antes, el calor que llega a la superficie por estos métodos se elimina mediante la humedad evaporada, de forma que la temperatura superficial permanece constante en T_s . Todo el mecanismo se parece al proceso de temperatura de bulbo húmedo, complicado por la fuente adicional de calor (Treybal, R. 2007: 742).

La rapidez de evaporación y la temperatura superficial pueden entonces tenerse mediante un balance de calor. Si q representa el calor total que llega a la superficie, entonces:

$$q = q_R + q_c + q_k$$

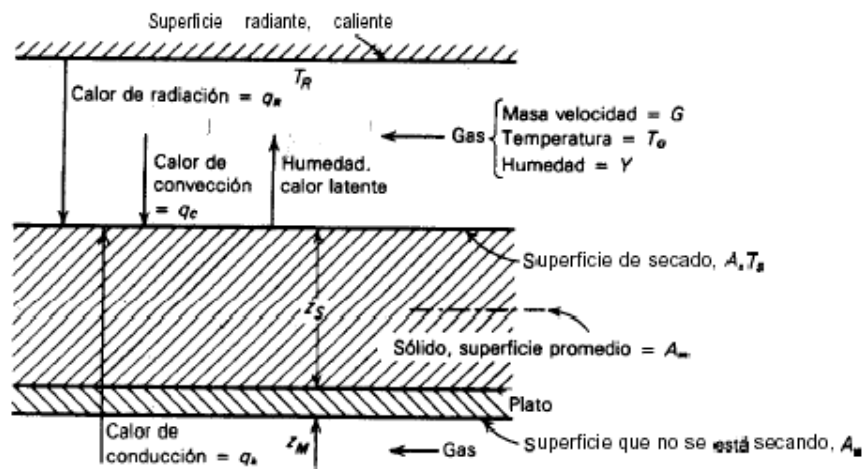
(Ecuación No. 5)

Despreciando el calor necesario para sobrecalentar la humedad evaporada hasta la temperatura del gas y considerando sólo el calor latente de evaporación λ_s entonces el flux de evaporación N_c y el flujo de calor están relacionados

$$N_c \lambda_s = q$$

(Ecuación No. 6)

Diagrama No. 3 Secado por circulación transversal



El calor recibido por convección en la superficie está controlado mediante el coeficiente correcto de transferencia de calor por convección h_c ,

$$q_c = h_c(T_G - T_s)$$

(Ecuación No. 7)

El calor recibido por radiación puede calcularse por los medios usuales, también puede expresarse como un coeficiente de transferencia de calor,

$$q_R = h_R(T_R - T_s)$$

(Ecuación No. 8)

Donde T_R y T_s son las temperatura absolutas de las superficies radiantes y de la que se está secando. El calor recibido por conducción puede expresarse como un coeficiente de transferencia de calor,

$$q_K = h_K(T_G - T_s)$$

(Ecuación No. 9)

Para el flujo de gas paralelo a una superficie y confinado entre platos paralelos, como entre los platos de un secador de platos, los coeficientes de transferencia h_c con las propiedades del aire a 95°C y $Re = 2,600$ a 22,000.

$$h_c = 5.90 \frac{G^{0.71}}{d_e^{0.29}}$$

(Ecuación No. 10)

En un sistema detallado del secado de arena sobre platos, h_c está dado, en el sistema SI, por

$$h_c = 14.3G^{0.8}$$

(Ecuación No. 11)

Para el flujo de aire perpendicular a la superficie, para $G = 1.08$ a $5.04 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ (0.9 A 4.5 m/s), en el sistema SI,

$$h_c = 24.2G^{0.37}$$

(Ecuación No. 12)
(Treybal, R. 2007: 742)

F. Variables que afectan el secado

1. Efecto de la velocidad del gas: Si la radiación y la conducción a través del sólido son despreciables, N_c es proporcional a $G^{0.71}$ para el flujo paralelo del gas y a $G^{0.37}$ para el flujo perpendicular. Si la radiación y la conducción están presentes, el efecto del flujo del gas será menos importante (Treybal, R. 2007: 745).

2. Efecto de la temperatura del gas: Al aumentar la temperatura del aire aumenta la cantidad $T_G - T_S$; por lo tanto, aumenta N_c . En ausencia de efectos de radiación, y despreciando la variación de λ en rangos moderados de temperatura, N_c es directamente proporcional a $T_G - T_S$ (Treybal, R. 2007: 746).

3. Efecto de la humedad del gas: N_c varía directamente con $Y_S - Y$; en consecuencia, al aumentar la humedad disminuye la rapidez de secado. Generalmente, en los cambios de Y y T_G intervienen cambios simultáneos de T_S y Y_S (Treybal, R. 2007: 746).

4. Efecto del espesor del sólido que se está secando: Si las superficies que no se están secando están bien aisladas, o si el secado ocurre en todas las superficies del sólido, N_c es independiente del espesor. El tiempo para el secado entre contenidos fijos de humedad dentro del periodo de rapidez constante será entonces directamente proporcional al espesor (Treybal, R. 2007: 746).

G. Movimiento de la humedad dentro del sólido.

Cuando ocurre la evaporación superficial, debe haber un movimiento de la humedad desde el interior del sólido hasta la superficie. La naturaleza del movimiento modifica el secado durante el periodo decreciente de la rapidez. Con el fin de apreciar la naturaleza diversa de las porciones observadas en el periodo decreciente de la rapidez de la curva de secado, se analizarán brevemente algunas de las teorías expuestas para explicar el movimiento de la humedad y la relación de éstas con las curvas de decaimiento de la rapidez (Treybal, R. 2007: 747).

H. Difusión del líquido.

La difusión de la humedad líquida puede derivarse de los gradientes de concentración entre el interior del sólido, donde la concentración es alta, y la superficie, donde es baja. Estos gradientes se fijan durante el secado de la superficie. Este método de transporte de la humedad se limita probablemente a los casos en que se forman soluciones sólidas de una sola fase con la humedad, como en el caso del jabón, goma, gelatina y similares, y en ciertos casos en que se está secando la humedad ligada, como en el secado de las últimas partes de agua en arcillas, harina, textiles, papel y madera. Se ha descubierto que la difusividad de la humedad generalmente decrece con rapidez al decrecer el contenido de humedad. Durante el periodo de rapidez constante de secado de estos sólidos, la concentración de humedad superficial se reduce, pero la concentración en el interior del sólido permanece elevada. Las altas difusividades resultantes permiten que la humedad se mueva hasta la superficie tan rápido como se evapora y la rapidez de secado permanece constante. Cuando aparecen manchas secas debido a la proyección de partes del sólido en la película gaseosa, se tiene un periodo de evaporación superficial no saturada. Al final, la superficie se seca hasta el contenido de humedad en el equilibrio para el gas predominante. El secado posterior sólo sucede a flujos que están completamente controlados por las rapidezces de difusión dentro del sólido, puesto que éstas son lentas a contenidos bajos de humedad. Si el secado inicial a rapidez constante es muy rápido, quizá no aparezca el periodo de evaporación superficial no saturada; el periodo decreciente de la rapidez controlado por la difusión empieza inmediatamente después de que termina el periodo de rapidez constante. En muchos casos de secado, en donde el mecanismo de difusión explica satisfactoriamente la rapidez de secado como función del contenido de humedad promedio, la distribución de humedad dentro del sólido en las diferentes etapas del secado no se asemeja a este mecanismo. La aplicabilidad superficial del mecanismo de difusión es entonces aparentemente accidental (Treybal, R. 2007: 748).

I. Movimiento capilar:

La humedad no ligada en sólidos granulares y porosos como arcillas, arena, pigmentos para pinturas y similares, se mueve a través de los capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo en que interviene la tensión superficial; además, se mueve de la misma forma que el aceite se mueve a través de la mecha de una lámpara. Los capilares se extienden desde pequeños recipientes de la humedad en el sólido hasta la superficie que se está secando. Conforme el secado continúa, al principio la humedad se mueve por

capilaridad hasta la superficie, con la suficiente rapidez para mantener una superficie uniformemente húmeda; la rapidez de secado es constante. El agua es reemplazada por aire que entra en el sólido a través de las relativamente pocas aberturas y rupturas. Finalmente, la humedad superficial se lleva hasta los espacios entre los gránulos de la superficie, el área húmeda en la superficie decrece y continúa el periodo de secado de la superficie no saturada. Al final, los recipientes abajo de la superficie se secan, la superficie líquida queda en los capilares, la evaporación sucede abajo de la superficie en una zona o plano que gradualmente se va haciendo mas profunda en el solido y ocurre el segundo periodo decreciente de la rapidez. Durante este periodo la difusión del vapor dentro del sólido ocurre desde el lugar de la evaporación hasta la superficie (Treybal, R. 2007: 749).

J. Equipos discontinuos de circulación directa

1. Secador de bandejas con flujo transversal: En un tipo de secador discontinuo de circulación directa, el aire caliente pasa por un lecho permeable estacionario de material mojado que se coloca sobre bandejas eliminables de fondo perforado sostenidas en forma adecuada dentro del secador. Esta clase es similar al secador de bandejas estándar, excepto que el aire caliente atraviesa el sólido humedecido en lugar de deslizarse sobre él. La caída de presión por el lecho de material no sobrepasa usualmente 2 cm de agua, más o menos. En otro tipo se colocan bandejas profundas de bases perforadas en la parte superior de las cámaras de pleno en un sistema de circuito cerrado con circulación de aire caliente. En algunas plantas de secado de alimentos el material se coloca en depósitos de acabado con bases perforadas; el aire caliente se hace pasar por el material extrayéndose por la parte superior del depósito, se recalienta y se hace circular una vez más. Estos últimos tipos implican una caída de presión en el lecho de material de 1 a 8 cm de agua con velocidades de aire relativamente bajas. En lo que respecta a su aplicación los secadores discontinuos de circulación directa se restringen a materiales granulares que permiten la libre circulación del aire. Los tiempos de secado son, en general, mucho más cortos que en los secadores de bandeja de flujo paralelo (Perry, H, *et al*, 2001: 12-56).

2. Secador de bandejas con flujo paralelo: Un secador de bandejas o compartimientos es un equipo totalmente cerrado y aislado en el cual los sólidos se colocan en grupos de bandejas, en el caso de sólidos particulados, o amontonados en pilas o en repisas, en el caso de objetos grandes. La transmisión de calor puede ser directa del gas a los sólidos, utilizando la circulación de grandes volúmenes de gas caliente, o indirecta, utilizando repisas o bases calentadas, serpentines de calefacción o paredes refractarias en el interior de la cubierta. En unidades de calor indirecto, exceptuando los equipos de repisas al vacio, casi siempre se necesita la circulación de una pequeña cantidad de gas para eliminar el vapor húmedo del compartimiento y evitar la saturación y condensación del gas. Las unidades de compartimientos se emplean para calentar y secar madera, cerámica, materiales en hojas, objetos pintados y metálicos y todas las formas de sólidos particulados (Perry, H, *et al*, 2001: 12-47).

K. Pruebas de secado

Con respecto a la muestra de una sustancia, la rapidez de secado puede determinarse suspendiendo la muestra en un gabinete o tubería, en una corriente de aire, para un balance. Entonces, el peso de la muestra secada puede medirse como una función del tiempo. Deben observarse ciertas precauciones para que los datos sean de máxima utilidad. La muestra no debe ser muy pequeña. Más aún, las siguientes condiciones deben parecerse lo más posible a las condiciones que, según se prevé, predominarán en la operación a gran escala: (1) la muestra debe soportarse en forma similar sobre un plato o estructura; (2) debe tener la misma relación de superficie que se seca a la que no se seca; (3) debe sujetarse a condiciones similares de transferencia de calor por radiación; (4) el aire debe tener la misma temperatura, humedad y velocidad (con la misma velocidad y dirección con respecto a la muestra). Si es posible, se deben realizar varias pruebas sobre muestras de diferente espesor. También deben obtenerse el peso seco de la muestra. La exposición de la muestra a aire de temperatura, humedad y velocidad constantes constituye el secado en condiciones constantes de secado (Treybal, R. 2007: 736).

L. Selección del equipo de secado

1. Selección inicial de los secadores. Se deben seleccionar los secadores que sean más adecuados para manejar el material mojado y el producto seco que se adapten a la continuidad del proceso como un todo y generen un producto con las propiedades físicas deseadas. Esta selección preliminar se puede realizar con la ayuda de tablas, que clasifica a los diversos tipos de secadores basándose en los materiales manipulados.

2. Comparación inicial de los secadores. Los secadores seleccionados de esta manera se evaluarán en forma aproximada, basándose en los datos de coste y funcionamiento. Partiendo de esta evaluación, los secadores que parezcan ser menos económicos o poco apropiados desde el punto de vista de su funcionamiento no se deberán someter a consideraciones posteriores.

3. Pruebas de secado. Estas pruebas se deben llevar a cabo en los secadores que aún estén en estudio. Dichas pruebas determinarán las condiciones óptimas de operación y las características del producto, y construirán la base para obtener presupuestos rigurosos de los distribuidores de este tipo de equipo.

4. Selección final del secador. Una vez que e hayan recopilado los resultados de las pruebas de secado y las cotizaciones sobre los equipos, se hará la selección final del secador más apropiadamente para el caso (Perry, H, *et al*, 2001: 12-45).

Los factores importantes que se deben tomar en cuenta para selección preliminar de un secador son los siguientes:

1. Propiedades del material que se va a manejar
 - a. Características físicas en mojado
 - b. Características físicas en seco
 - c. Corrosividad
 - d. Toxicidad

- e. Inflamabilidad
 - f. Tamaño de la partícula
 - g. Abrasividad
2. Características de secado del material
 - a. Tipo de humedad (ligada, no ligada, ambas)
 - b. Contenido inicial de humedad
 - c. Contenido final de humedad
 - d. Temperatura permisible de secado
 - e. Tiempo probable de secado para diferentes secadores
 3. Flujo del material que entra y sale del secador
 - a. Cantidad que se va a tratar por hora
 - b. Operación continua o discontinua
 - c. Proceso anterior al secado
 - d. Proceso posterior al secado
 4. Cualidades del producto
 - a. Contracción
 - b. Contaminación
 - c. Uniformidad del contenido final de humedad
 - d. Descomposición del producto
 - e. Secado excesivo
 - f. Estado de subdivisión
 - g. Temperatura del producto
 - h. Densidad
 5. Problemas de recuperación
 - a. Recuperación de polvos
 - b. Recuperación de disolvente
 6. Instalaciones disponibles en el sitio de ubicación propuesto
 - a. Espacio
 - b. Temperatura, humedad y limpieza del aire
 - c. Combustibles disponibles
 - d. Energía eléctrica disponible
 - e. Ruido, vibración, polvo o pérdidas de calor permisibles
 - f. Fuente de la alimentación húmeda
 - g. Salidas de gases de escape (Perry, H, *et al*, 2001: 12-47).

Uno de los aspectos de importancia fundamental es la naturaleza física del material que se va a manejar. Cuando se trata de una lechada, se requiere un tipo distinto de secador al que se utiliza cuando se tiene un sólido cristalino áspero, que, a su vez, diferirá del requerido por un material en hojas. Después de hacer la

selección preliminar de las clases adecuadas de secadores, debe realizarse una evaluación minuciosa del tamaño y el coste para eliminar los que sean evidentes poco económicos. La información para esta evaluación se obtiene del material presentado para estudiar los diferentes tipos de secadores. Cuando los datos son inadecuados, se acostumbra solicitar a los fabricantes de equipos informaciones preliminares sobre el coste y el resultado de funcionamiento de los mismos. Al comparar el comportamiento de secadores, se deben evaluar con sumo cuidado todos los factores antes mencionados que afectan la operación del secador. También se debe analizar con gran cuidado la posibilidad de suprimir o simplificar pasos del proceso que anteceden o siguen al secado, como filtración, trituración o transporte (Perry, H, *et al*, 2001: 12-47).

III. JUSTIFICACIÓN

El secado de semillas es un proceso en el cual se debe mantener un estricto control durante su realización, debido que a temperaturas superiores a 30° C las semillas sufren daños que pueden afectar la germinación en el campo. Al poseer un proceso de secado eficiente no solo se obtienen beneficios económicos sino también de calidad del producto, ya que mientras menos estrés se le cause a la semilla el porcentaje de germinación aumenta. Una de las ventajas o beneficios de poseer un tiempo corto de residencia de las semillas en el secador es que se disminuyen los costos de operación y de procesamiento, debido a que se utiliza menos energía para procesar una mayor cantidad de material haciendo el proceso amigable con el ambiente. Al utilizar un mecanismo de control para la temperatura interior del secador y la temperatura ambiente podemos aprovechar la energía que posee el aire en las horas cálidas del día, ya que si el aire se encuentra a una temperatura comprendida entre 27 y 30° C se puede desconectar el sistema de calentamiento del gas de secado y utilizar el aire que se encuentra en el ambiente convirtiendo el proceso más eficiente.

IV. OBJETIVOS

A. General

- Diseñar un secador para el secado de semillas de cucurbitáceas y solanáceas para un proceso por lotes utilizando flujo turbulento de aire a una temperatura máxima de 30° C.

B. Específico

1. Seleccionar el tipo de secador por lotes adecuado para que el secado de las semillas sea uniforme.
2. Dimensionar un secador para poder procesar un *batch* de aproximadamente 7 kilogramos de semilla.
3. Determinar las curvas de rapidez de secado en función del contenido de humedad de la semilla.
4. Diseñar un sistema de transferencia de calor eficiente para el calentamiento del gas de secado por medio de convección y radiación.
5. Seleccionar un mecanismo de control para la transferencia de calor y así aprovechar la energía que posee el aire del ambiente y así disminuir los costos de operación.
6. Desarrollar un modelo matemático por medio de pruebas para predecir el tiempo de secado de una muestra con cierto porcentaje de humedad.
7. Determinar el costo de construcción del secador.
8. Realizar balance de masa y energía del secador.

V. PROBLEMA A RESOLVER

Se desea diseñar un secador de semillas para mejorar la eficiencia energética y de secado comparada con la de un secador de flujo transversal que actualmente se utiliza para realizar este proceso en la planta de Seminis ubicada en Salamá Baja Verapaz. Debido a que el secador con que actualmente se cuenta no se obtiene un secado uniforme de la semilla, la eficiencia de este no es aceptable por lo que se desea dimensionar un nuevo secador para procesar una mayor cantidad de semilla por lote utilizando de forma eficiente la fuente de calor para obtener con esto una disminución del tiempo de residencia de la semilla dentro del secador y así disminuir los costos de operación en esta parte del proceso.

VI. METODOLOGÍA

Selección del tipo de secador: Esta etapa se realizará con base a las propiedades de la semilla tales como diámetro de partícula, humedad inicial y final de la semilla y peso seco de la misma, luego de obtener estos datos se procederá a la selección; ésta se llevará a cabo por medio de la teoría que se presenta en los antecedentes y en el apéndice.

Pruebas realizadas a las semillas: Se realizarán pruebas en un túnel de secado para poder determinar la curva de secado, y así poder determinar el *flux* de secado de la semilla (masa de humedad evaporada/tiempo(área)) en condiciones similares a las del secador a diseñar. Las pruebas se realizaran en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Diseño del secador: El diseño del secador se hará luego de conocer todas las características de secado del material, en esta parte del proyecto se determinara la capacidad de la fuente de calor para el secador, el tipo de ventilador, el material de construcción, se definirá la capacidad másica de secado, las dimensiones del secador, el tiempo de secado, entre otros.

VII. RESULTADOS

Diagrama No. 4 Diagrama de flujo del equipo y balance de masa y energía para la operación del secador con aire a 54.8% de humedad relativa y una presión atmosférica de 0.89 atmosferas

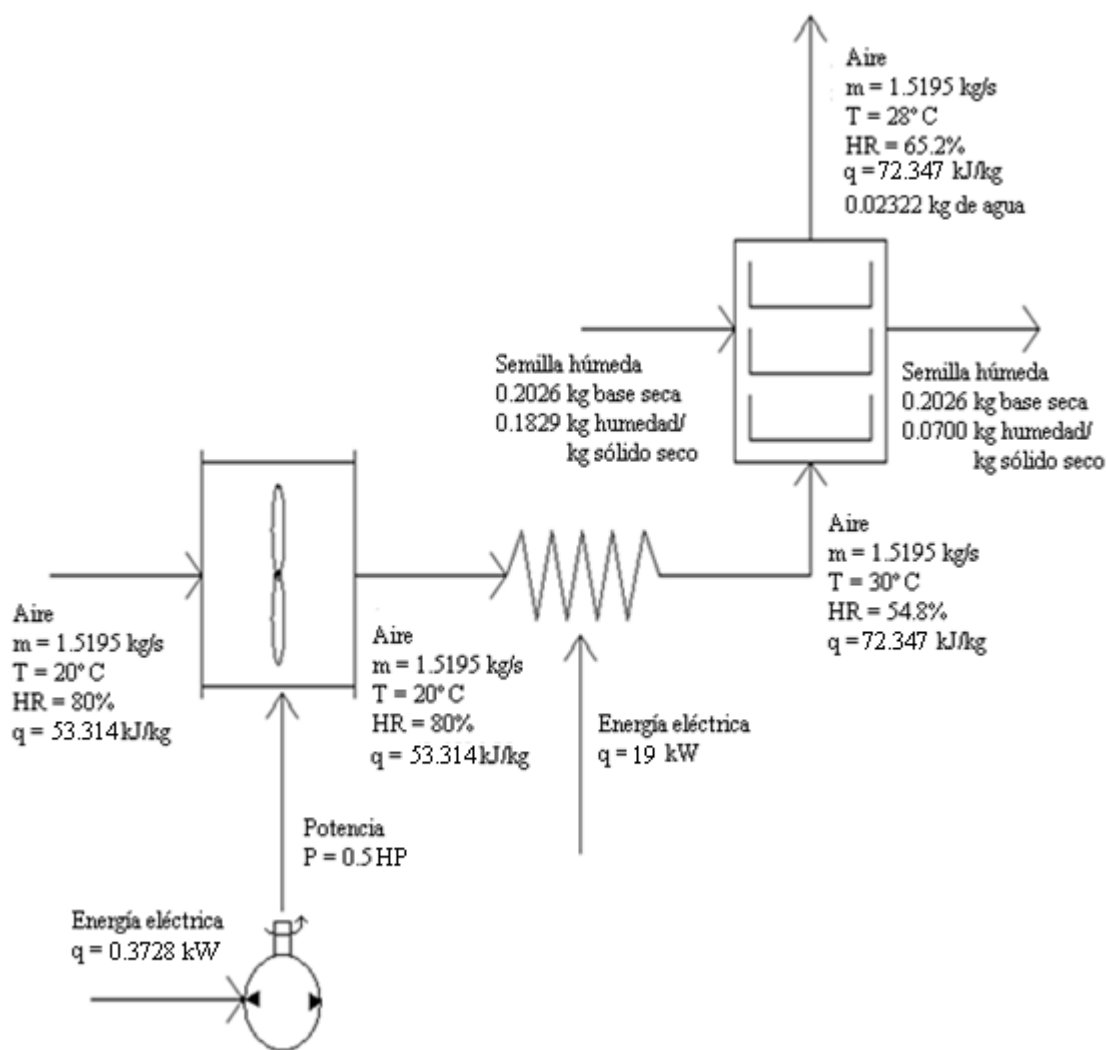


Diagrama No. 5. Vista isométrica y cotas del secador.

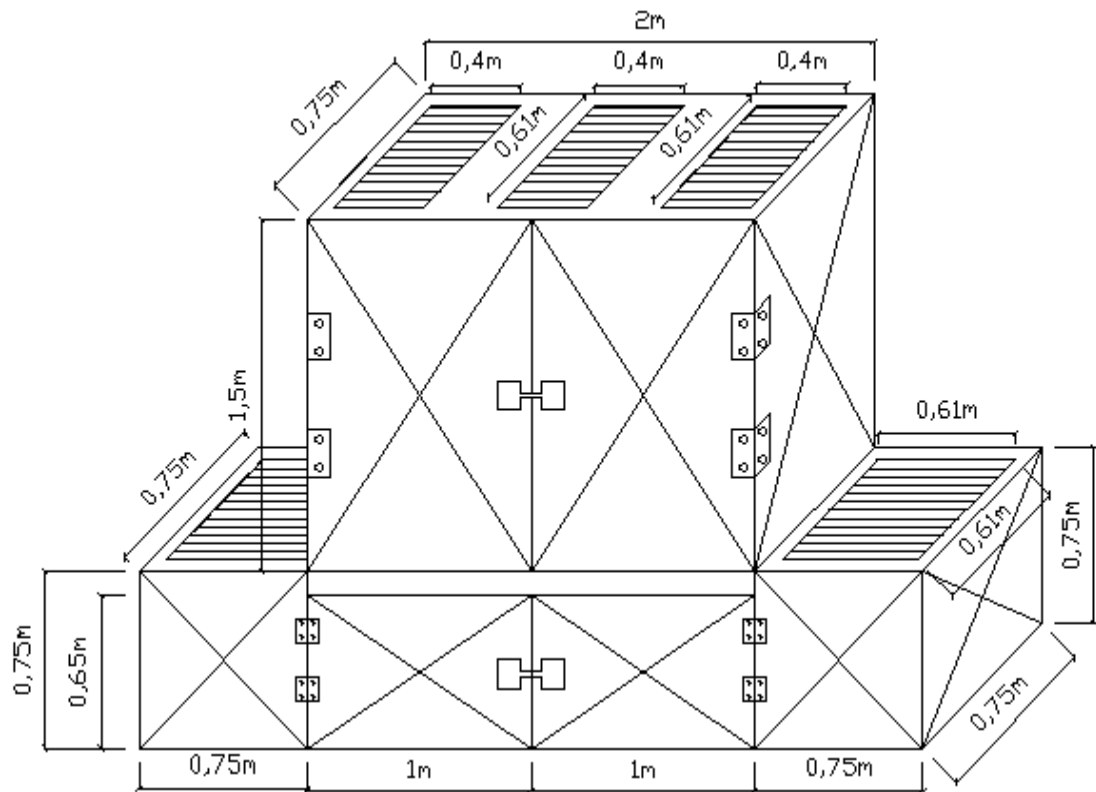


Diagrama No. 6. Dimensiones frontales, laterales y vista exterior del secador.

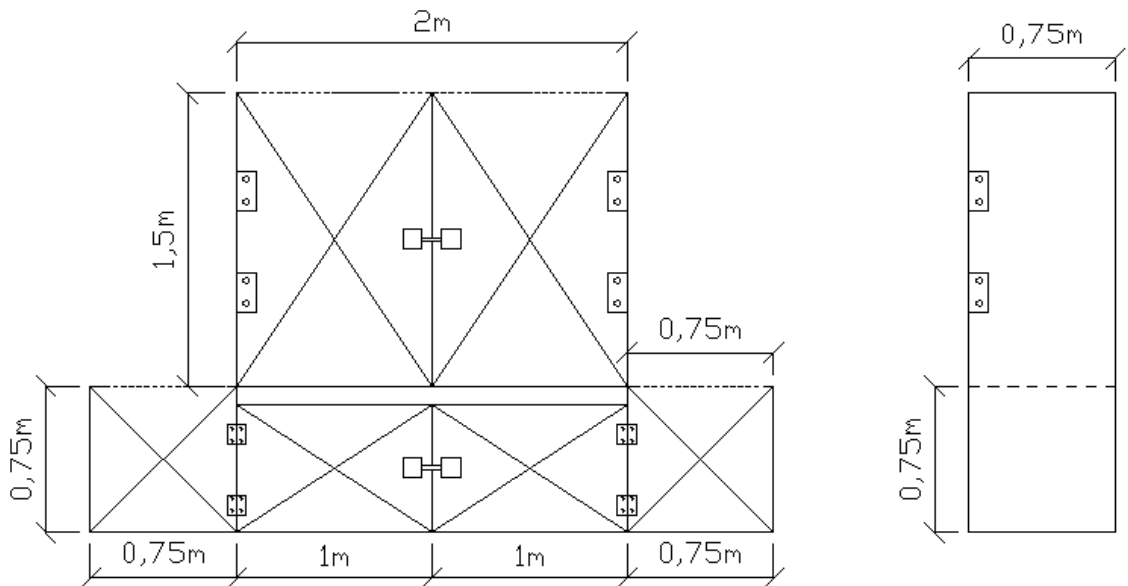


Diagrama No. 7. Vista de planta de secador.

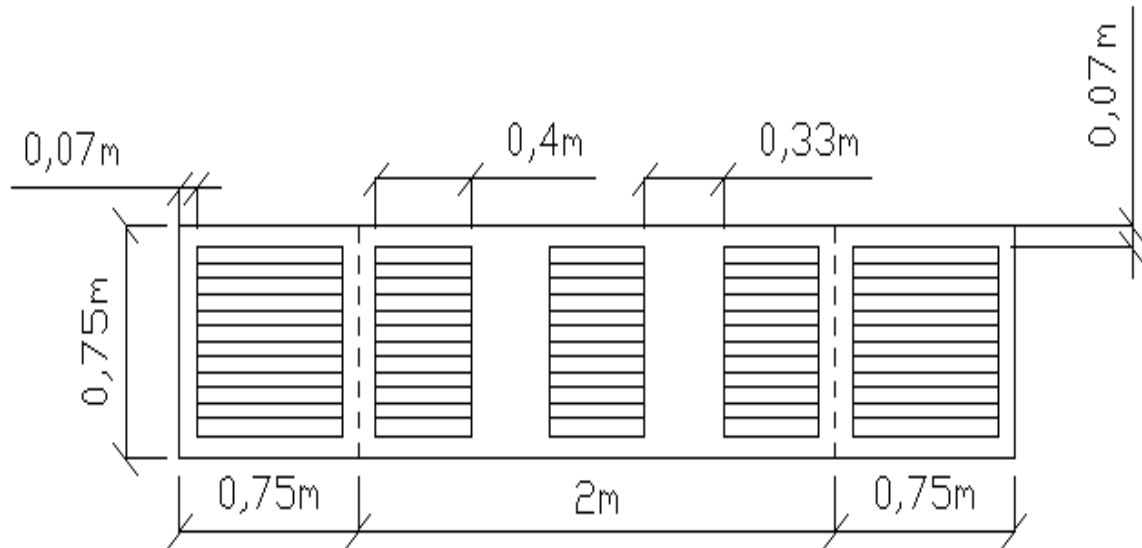


Diagrama No. 8. Dimensiones de entradas y salidas de aire y descripción del interior del secador.

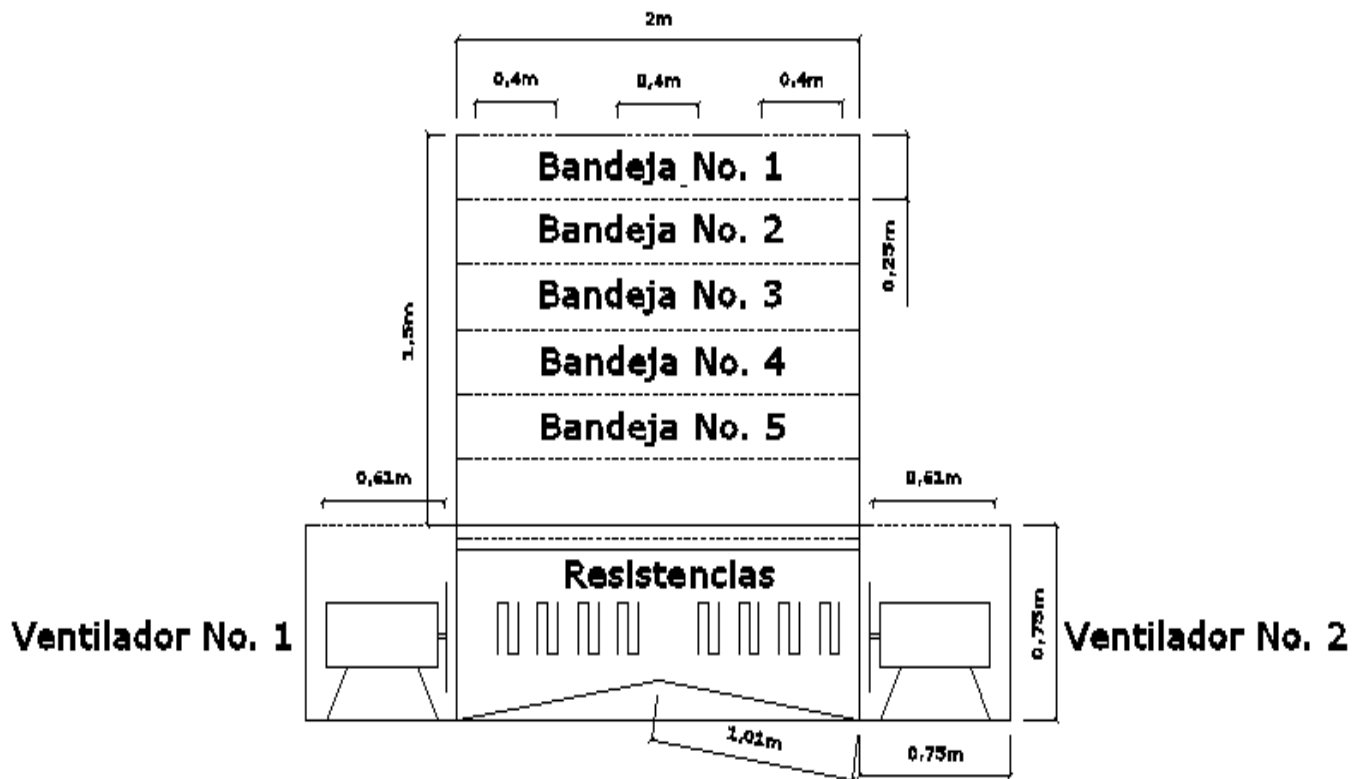


Diagrama No. 9. Dimensiones de bandejas.

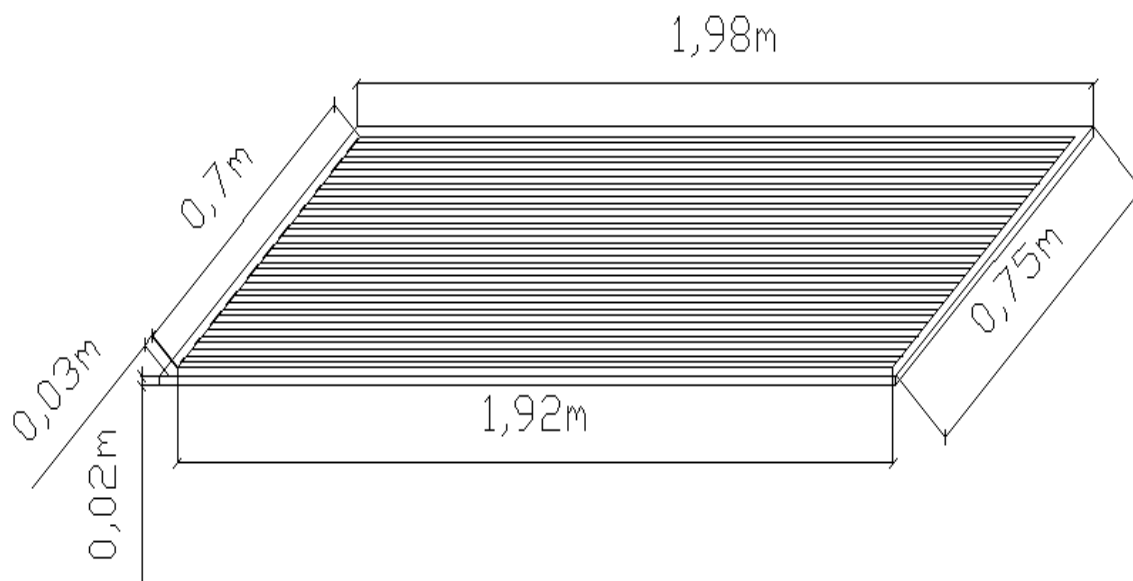


Tabla No. 1. Descripción del secador seleccionado.

Característica	Descripción
Secador directo o por convección	Debido a que la transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de secado; por ejemplo, con los gases calientes.
Operación discontinua	Ya que los secadores se diseñan para operar con un tamaño específico de carga de alimentación húmeda, para ciclos de tiempos dados.
Circulación directa	El material se coloca en bandejas con base tamiz a través de las cuales se impulsa el aire caliente.
Inducción del aire de secado	El secador trabajará con un mecanismo de tiro forzado.

Continuación Tabla No. 1. Descripción del secador seleccionado.

Característica	Descripción
Temperatura máxima	La temperatura de operación rondara los 30°C debido a que a mayor temperatura el material puede sufrir daños y perder su poder germinativo.
Velocidad de aire de secado	La velocidad del aire de secado será de aproximadamente 1.5 m/s en cualquier área de las bandejas.
Número de bandejas	En total son cinco bandejas con un área de 1.5 metros cuadrados cada una para obtener un total de 7.5 metros cuadrados.
Capacidad de secado	La capacidad máxima cuando se dispone secar semillas de tomate la capacidad es de 5.025 kilogramos por lote de semilla seca, y cuando se dispone secar semillas de pepino la capacidad es de 9.825 kilogramos por lote de semilla seca.
Capacidad de evaporación	El secador posee una evaporación promedio de 0.01164 kilogramos/ segundo.
Consumo energético	El consumo energético es debido a las ocho resistencias eléctricas de 2.3 kilowatts cada una, las cuales proporcionan el calor al aire de secado, los dos motores de los ventiladores consumen 0.186 kilowatts cada uno. En total el consumo energético es de aproximadamente 19.3718 kilowatts.
Régimen del flujo de aire	El aire es transportado con un régimen turbulento para aumentar la transferencia de masa y de calor.
Control de temperatura	La temperatura interna del secador se controlara por medio de un termostato marca Allen-Bradley serie 837-A3 con un rango de temperatura de -4 a 52 °C que modificara la corriente de alimentación de las resistencias cuando la temperatura llegue a 30°C y las activara cuando la temperatura baje de 27°C.
Material	La carcasa del secador estará construida de láminas de hierro de 1/16 de pulgada, los marcos y las bandejas serán construidas con lámina perforada de acero inoxidable 316.

Continuación Tabla No. 1. Descripción del secador seleccionado.

Característica	Descripción
Motor y ventilador	Ventilador Helicoidal Axial marca Soler & Palau modelo HXT-400/H, con motor de 1/4 HP

Tabla No. 2 Descripción del mecanismo de control para la fuente de calor.

Marca	Allen-Bradley
Serie	837-A3
Rango de Temperatura	-4 a 52 °C
Largo del Bulbo	216 mm

Tabla No. 3 Velocidad de transferencia de masa para un lote de secado de semilla de chile en secador de planta piloto con una velocidad de aire de secado de 1m/s, humedad relativa de 55% a una temperatura de 33°C

Tiempo (s)	Peso (kg)	Kg evaporados	X (kg humedad/kg de sólido seco)	N (kg evaporados/m ² s)
0	0.2064	0.0000	0.1829	0.000000
1,800	0.1087	0.0977	0.0963	0.005428
3,600	0.0899	0.0188	0.0797	0.001044
5,400	0.0840	0.0059	0.0744	0.000328
7,200	0.0816	0.0024	0.0723	0.000133
9,000	0.0808	0.0008	0.0716	0.000044
64,800	0.0790	0.0018	0.0700	0.000003
Npromedio (kg evaporados/m ² s)				0.001164

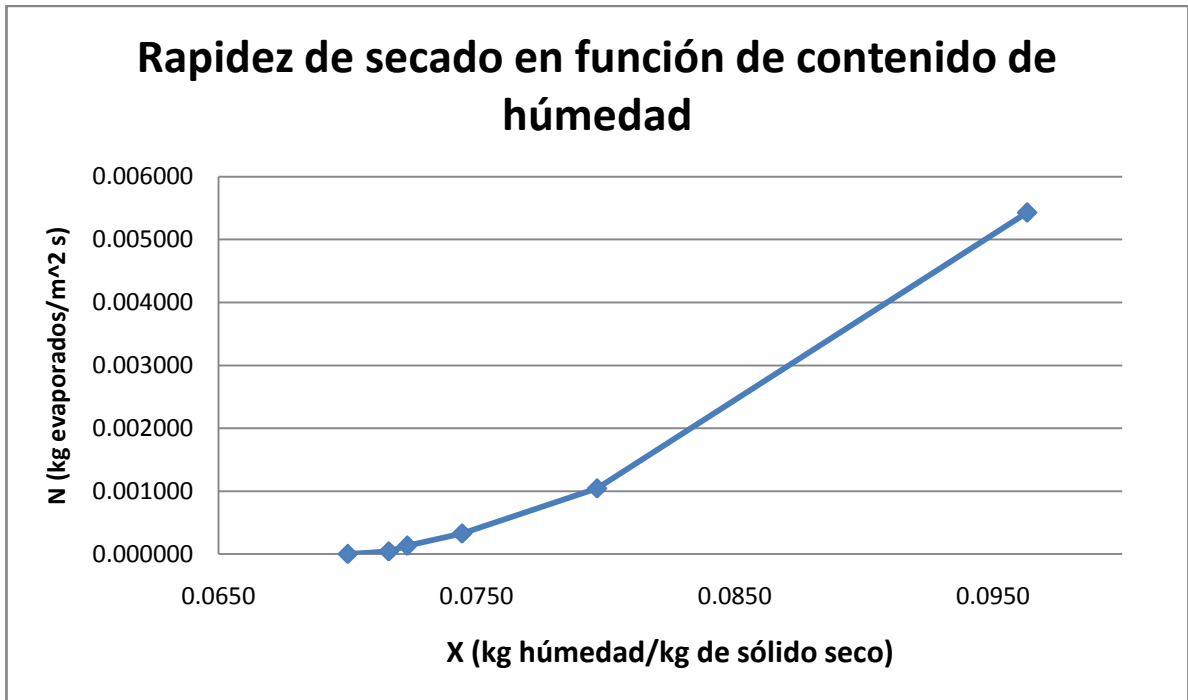
Tabla No. 4 Modelo matemático para predecir el tiempo en minutos de secado con aire a 54.8% de humedad relativa y una presión atmosférica de 0.89 atmosferas de un lote de semillas de chile con un contenido de humedad inicial entre 18 y 9 kg humedad/kg de sólido seco.

Modelo Matemático	$Y = 10743X - 884,7$
Coefficiente de determinación R²	1
Variable dependiente Y	Tiempo en minutos
Variable independiente X	Contenido de humedad en humedad/kg de sólido seco
Rango de contenido de humedad	18 y 9 kg humedad/kg de sólido seco

Tabla No. 5 Costo del secador diseñado.

Costo de secador de bandejas	Q 52,800.00
------------------------------	-------------

Gráfica No. 1 Rapidez de secado en función del contenido de humedad para un lote de semillas de chile con una velocidad de aire de secado de 1m/s, humedad relativa de 55% a una temperatura de 33°C



VIII. DISCUSIÓN

El objetivo principal de este trabajo de graduación es diseñar un secador para el secado de semillas de cucurbitáceas y solanáceas para un proceso por lotes utilizando flujo turbulento de aire a una temperatura máxima de 30° C. La selección del tipo de secador se realizó con base a las características del material a secar, en este caso semillas de solanáceas y cucurbitáceas las cuales se asemejan a sólidos granulados o fibrosos clasificados según las tablas presentadas en el apéndice C con el título figuras utilizadas para la selección del secador.

Luego de haber identificado las características del material se procedió a descartar los tipos de secadores que por su elevado costo o por su complejidad, no lograban satisfacer las necesidades del proceso. Por ejemplo el tipo de secador por congelación al vacío es costoso, éste es utilizado con frecuencia en la industria farmacéutica o compuestos químicos finos; el secador de artesa al igual que el rotatorio al vacío producen degradación en el material, no se puede utilizar el secador rotatorio indirecto porque el material es sensible a la temperatura debido a que si se somete a temperaturas mayores a los 30°C puede verse afectado su poder de germinación, los secadores de bandejas vibratorias y de lecho fluidizado poseen mecanismos complejos y que requieren de un alto grado de mantenimiento, por lo que el secador discontinuo de circulación directa es el secador que mejor se ajusta y es adecuado a operaciones por lotes, satisfaciendo las necesidades del proceso.

Se diseñó un secador de bandejas como el del diagrama número 7 el cual estará construido con láminas de hierro con un grosor de 1/16 de pulgada, las bandejas estarán construidas con acero inoxidable para evitar la corrosión debido a la humedad de las semillas. El secador de bandejas es apropiado para operaciones discontinuas, y por el tipo de material el cual se seca dentro de costales plásticos es más fácil distribuir las semillas de una manera mas uniforme en cada bandeja, se escogió un secador directo o por convección debido a que la transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos, los gases calientes y el líquido vaporizado se arrastra con el medio de secado en este caso con el aire calientes, es una operación discontinua ya que el secador esta diseñado para operar con un tamaño específico de carga de alimentación húmeda debido que la producción no es continua. El secador trabajará con un mecanismo de tiro forzado y circulación transversal ya que los tiempos de secado son, en general, mucho más cortos comparados con los secadores de bandejas de flujo paralelo debido a que en este ultimo es más difícil extraer la humedad de la parte de la semilla que no está en contacto con el flujo de aire. La temperatura de operación rondará los 30°C debido a que a mayor temperatura el material puede sufrir daños e incluso puede perder su poder germinativo. Se determinó un total de cinco bandejas con un área de 1.5 metros cuadrados cada una para obtener un total de 7.5 metros cuadrados para poder obtener una capacidad máxima de secado al secar semillas de tomate de 5.025 kilogramos por lote de semilla seca, y

cuando se dispone secar semillas de pepino una capacidad de 9.825 kilogramos por lote de semilla seca. Se realiza esta comparación debido a que la semilla de tomate es la menos densa de todas, por lo que se obtendrá la menor carga de secado, y la semilla de pepino es la más densa con lo cual se obtiene la mayor carga de secado. Según la prueba realizada, el secador poseerá una capacidad de evaporación promedio de 0.01164 kilogramos/ segundo por metro cuadrado, con un consumo total de aproximadamente 19.3728 kilowatts el cual es debido a las ocho resistencias eléctricas de dos kilowatts cada una, las cuales proporcionan el calor al aire de secado y a los dos motores de los ventiladores consumen 0.186 kilowatts cada uno. Los ventiladores son helicoidales axial marca Soler & Palau modelo HXT-400/H, con motor de 1/4 HP proporcionaran un flujo de aire con un régimen turbulento para aumentar la transferencia de masa y de calor en toda la superficie de las semillas. El costo total del secador es de Q 52,800.00, es un costo elevado debido a que partes de éste se encuentran fabricadas con acero inoxidable para evitar que las bandejas puedan colapsar debido a la corrosión.

El secador diseñado ocupa un área de 2.62 m², con una altura de 2.5 metros desde su base, posee dos compartimientos laterales donde se encuentran los ventiladores con un área de 0.75 m² cada uno, la primer bandeja se encuentra a 1 metro del suelo y las siguientes cuatro bandejas están separadas a una distancia de 0.25 metros. Debajo del compartimiento de las bandejas se encuentran las resistencias, éstas están protegidas por medio de una lamina perforada para evitar el contacto entre el operario con las resistencias eléctricas y pueda causarle algún tipo de daño. Las ventanas de succión del aire son de lámina perforada la cual comprende un área de 0.37 m² y las ventanas de descarga de aire húmedo son de 0.24 m². Las puertas del compartimiento de bandejas y de resistencia eléctrica están sujetadas con bisagras a la carcasa del secador y se cierran con pasadores metálicos.

El control de la temperatura interna del secador se controlara por medio de un termostato marca Allen-Bradley serie 837-A3 con un rango de temperatura de -4 a 52 °C, el cual activará las resistencias eléctricas cuando la temperatura baje de 27°C y las desactivará cuando la temperatura llegue a 30°C, este tipo de control será utilizado únicamente en los meses de octubre a febrero que es la temporada donde la temperatura promedio se encuentra debajo de los 27°C. Para los meses de abril a septiembre la cual es la época calurosa, al cuarto de secado se le colocarán cortinas de un polímero utilizadas para aumentar la temperatura en cuartos, estas en su exterior son de color negro para atrapar la energía solar y en el interior son de color blanco para irradiar todo el calor atrapado y así aumentar la temperatura del cuarto y no utilizar energía eléctrica para las resistencias eléctricas lo cual implica un ahorro de 19 kW al momento de operar el secador, éste es uno de los factores por lo que se decidió no recircular el aire. Además se estudia la posibilidad de cambiar el techo las cuales son láminas de cerámica por lámina transparente con el mismo objetivo de aumentar la temperatura del cuarto de secado. Para evitar que el aire del cuarto de secado se sature y se vea afectado el proceso se dejaran espacios de aproximadamente 1 metro en la parte inferior de

las puertas para que el aire húmedo pueda ser reemplazado ya que por estar más húmedo tendera a estar en la parte baja del cuarto de secado.

Las bandejas se construirán con laminas perforadas de acero inoxidable 316, se diseñaron para estar suspendidas en monorrieles sobre las cuales se desplazan para cargar el material a secar, serán construidas de lámina perforada con un marco de angular de 1 pulgada de ancho para que el aire circule a través de ellas, es importante mencionar que se escogió de esta manera y no bandejas en forma de anaquel en carro, debido a que el aire suele escapar por los espacios entre las paredes del secador y el carrito con las bandejas.

Se tomó la decisión de utilizar dos ventiladores para poder distribuir de una mejor manera el aire ya que una de las deficiencias de este tipo de secadores es que la corriente de aire no es uniforme en toda el área de las bandejas, lo que ocasiona una mala uniformidad en el secado en diferentes partes del secador. Las entradas de aire para los ventiladores se diseño en la parte superior de los cajones donde están resguardados para evitar que el ventilador succione basura o polvo que se encuentre en el piso del cuarto de secado, además evitando que pueda ingresar algún insecto al interior del secador, otro de los motivos por los que se decidió colocar la succión de aire en la parte superior es que el aire con mayor temperatura por ser menos denso que el aire saturado se encuentra por encima de éste ultimo. No se recircula el aire, ni se aislara la estructura del secador debido a que no se esta trabajando con temperaturas elevadas por ser un secado a bajas temperaturas.

El espacio donde están colocadas las resistencias eléctricas al igual que donde se encuentran los ventiladores estará restringida para evitar que alguien pueda sufrir un accidente con estos componentes del equipo, la división entre el área de bandejas y el área de resistencias esta dividida por una lamina perforada que no puede ser removida como las bandejas, esto para evitar que el operario pueda entrar en contacto con las resistencias.

Al observar las gráficas de rapidez de secado en función del contenido de humedad se concluye que la secado empieza en la región de rapidez descendiente por lo que le secado consiste al inicio en secar la superficie no saturada y luego en el movimiento interno la humedad. El secado de la humedad de la superficie saturada se realiza por medio de un centrifugado el cual se realiza luego de que la semilla es tratada con químicos para protegerla de patógenos. Debido a esto no se puede obtener un contenido de humedad crítica pues nunca se pasa del secado de rapidez constante a secado con rapidez decreciente del cual se rige este proceso.

El modelo matemático que describe el comportamiento de secado en el rango de de contenido de humedad de 18 a 9 kg de humedad/kg sólido seco es $Y = 10743X - 884.7$ donde Y es el tiempo en minutos que la semilla debe estar en el secador y X es el contenido de humedad en humedad/kg de sólido seco. El modelo se ajusta en un 100% en este rango de humedad por lo que lo convierte en un modelo que predice de

una forma exacta el tiempo de secado a las condiciones de aire a 54.8% de humedad relativa y una presión atmosférica de 0.89 atmósferas. No se logro realizar un modelo matemático que se ajuste a un contenido de humedad mayor a los 18 kg de humedad/kg sólido seco debido a que no se pudieron realizar más pruebas de secado pues no se coincidió con la temporada de procesamiento de semilla, por lo que es necesario realizar mas pruebas para poder diseñar método para determinar el tiempo de secado tomando como variables el contenido de humedad inicial de ésta, ya que el contenido de humedad final se encuentra entre 7 y 8 kg de humedad/kg sólido seco. Además que actualmente no se cuenta con el equipo adecuado para determinar la humedad inicial de las semillas.

Se realizó el balance de masa y energía para la operación del secador partiendo de condiciones mínimas de temperaturas en el aire del ambiente ya que es cuando se necesita que funcione todo el sistema de transferencia de calor y es donde se obtiene un consumo máximo de energía, al contrario si se opera con aire a una temperatura del ambiente entre 27 y 30°C el consumo energético será el mínimo ya que no se utilizaran las resistencias eléctricas y el consumo será el que provoca el funcionamiento de los motores eléctricos de los ventiladores axiales. En el secador el aire entra con 54.8% de humedad relativa a una temperatura de 30°C y a una presión atmosférica de 0.89 atmósferas.

Se descartaron otros combustibles como fuente de calor para el calentamiento del aire de secado como gas debido a que el control de la quema del combustible para el intercambiador es complicado y costoso, se descarto el uso de vapor, porque la caldera se encuentra lejana al cuarto de secado además de que el funcionamiento de la caldera es poco probable que coincida con el uso de los secadores, pues la caldera es utilizada al principio de la siembra para desinfectar la turba.

Por los datos obtenidos durante la prueba de secado se logro determinar que el tiempo de secado es de 6 horas aproximadamente, pero actualmente el tiempo es entre 16 y 18 horas, por lo que la eficiencia es demasiado baja y el consumo energético es demasiado alto debido al mal funcionamiento del mecanismo de control con el que se cuenta.

IX. CONCLUSIONES

1. El tipo de secador adecuado para estos materiales es un secador de bandejas por convección con circulación transversal de aire con mecanismo de tiro forzado con operación discontinua. El secador esta diseñado para operar con aire a 54.8% de humedad relativa y una presión atmosférica de 0.89 atmosferas.
2. El consumo energético para la operación del secador es de 19.3728 kW; con el nuevo sistema de control se podrá ahorrar hasta un 98% de energía eléctrica si las condiciones del aire ambiental son las adecuadas para el secado.
3. La velocidad de secado promedio para un lote de semilla de chile es de 0.001164 kg evaporados/ m² s.
4. El secador diseñado ocupa un área de 2.62 m², con una altura de 2.5 metros desde su base.
5. El control de la transferencia de calor se realizará por medio de un termostato marca Allen-Bradley serie 837-A3 con un rango de temperatura de -4 a 52 °C que modificará la corriente de alimentación de las resistencias cuando la temperatura llegue a 30°C y las activará cuando la temperatura baje de 27°C.
6. El modelo matemático que describe el comportamiento de secado en el rango de de contenido de humedad de 18 a 9 kg de humedad/kg sólido seco es $Y = 10743X - 884.7$ donde Y es el tiempo en minutos que la semilla debe estar en el secador y X es el contenido de humedad en humedad/kg de sólido seco.
7. Con el nuevo diseño se amplía la capacidad por lote en un 25%, pues el área total de secado es de 7.5 metros cuadrados.
8. El tiempo de residencia de la semilla de chile en el secador es de seis horas cuando el aire se encuentra con una humedad relativa de 54.8% , una temperatura de 30°C y una presión atmosférica de 0.89 atmosferas.
9. El costo del secador diseñado es de Q52,800.00.

X. RECOMENDACIONES

Se recomienda cambiar el techo del cuarto de secado por lámina transparente y aislar el área de secado para obtener un aire con mayor energía el cual podría disminuir o incluso desactivar las resistencias proporcionando así una mayor eficiencia en el secado y reducir hasta en un 98% el uso de energía eléctrica durante el proceso de secado.

También es importante contar con equipo adecuado para determinar con mayor precisión el contenido de humedad inicial y final de la semilla para garantizar un proceso eficiente.

Se recomienda proporcionar seguimiento a los lotes de secado en el cuarto frío para verificar su comportamiento, al igual que verificar el consumo energético según las condiciones de trabajo durante el tiempo de secado, ya que se pueden estar desperdiciando recursos al no saber el tiempo de residencia exacto de la semilla en los secadores.

Se recomienda determinar las curvas de secado de todos los tipos de materiales a secar.

Se recomienda realizar un manual dirigido al operario donde se indiquen las buenas prácticas de manejo del material a secar y el buen uso del secador.

Se recomienda verificar el sistema de control de los secadores que actualmente se utilizan, ya que el mal funcionamiento podría causar una disminución en la eficiencia o incluso la pérdida del lote de semilla.

Se recomienda una reingeniería de los secadores con los que actualmente se trabajan.

Se recomienda realizar un análisis a los procesos anteriores y posteriores al secado para determinar su eficiencia.

XI. BIBLIOGRAFÍA

Instituto Técnico de Capacitación y Productividad. *Sistemas para el Almacenamiento y Secamiento de Granos y Semillas. Sección de Reproducciones del INTECAP*, 1977.

McCabe, W., *et al.*, Operaciones unitarias en ingeniería química, Séptima edición, McGraw Hill, México, 2007.

Nonhebel, G. y Moss, A. *El secado de sólidos en la industria química*. Reverté S. A. Barcelona. 1979

Perry, H, *et al.* *Manual del Ingeniero Químico*. 7ma Edición. McGraw Hill. España. 2001

Thomson J. R. *Introducción a la Tecnología de las Semillas*, Editorial Acribia, España, 1979.

Treybal, R. *Operaciones de Transferencia de Masa*. 2da. Edición. McGraw Hill. México. 2007.

XII. APÉNDICE

APÉNDICE A. Cálculos

1. Cálculos de equipo

- a. Cálculo de flujo másico de aire necesitado para mantener una velocidad promedio de 1 metro/segundo en toda el área de las bandejas.

$$\dot{m} = vA\rho = \left(1 \frac{m}{s}\right) (1.5 m^2) \left(1.013 \frac{kg}{m^3}\right) = 1.5195 \frac{kg}{s}$$

La densidad se obtuvo a la temperatura promedio de secado que es de 25°C.

- b. Cálculo del calor requerido para aumentar la temperatura del aire de secado de 20°C a 30°C por medio de las resistencias eléctricas.

Se determinaron por medio de cartas psicrométricas con la ayuda de los datos obtenidos durante la prueba realizada a la muestra de chile, las condiciones de humedad y temperatura al igual que la presión atmosférica son las indicadas en el balance de masa y energía.

- c. Cálculo del tipo de régimen del flujo de aire.

$$N_{Re} = \frac{DV\rho}{\mu} = \frac{(0.75m) \left(1 \frac{m}{s}\right) (1.013 \frac{kg}{m^3})}{0.018 \times 10^{-3} \frac{kg}{m s}} = 42,208.33$$

La viscosidad del aire se obtuvo a la temperatura promedio de secado que es de 25°C.

- d. Cálculo de densidad de semilla.

Para calcular la densidad de las semillas de pepino se llenó un recipiente de 20 mL y luego se pesó, para obtener el peso de la semilla contenida en este volumen.

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{13.1 g}{20 cm^3} = 0.655 \frac{g}{cm^3} \approx 655 \frac{kg}{m^3}$$

De esta forma se realizó para semillas de chile, tomate, sandía, melón y ayote, obteniendo como resultado la siguiente tabla.

Tabla No. 6 Densidades en gramos por centímetro cubico de semillas de distintas hortalizas y frutas.

Material	Densidad (g/cm ³)
Chile	0.540
Tomate	0.335
Sandía	0.520
Melón	0.440
Ayote	0.550

e. Cálculo de capacidad de bandeja

Para calcular la carga en kilogramos de semilla de tomate por bandeja se asumió un espesor de sólido a secar de 2 mm.

$$Capacidad = \left(0.335 \frac{g}{cm^3}\right) \left(\frac{(100 \text{ cm})^3}{1 \text{ m}^3}\right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}\right) (0.002 \text{ m}) = 0.67 \frac{kg}{m^2}$$

f. Cálculo de capacidad total del secador.

En total el secador posee 5 bandejas de 1.5 m² por lo que la capacidad total para secar semillas de tomate que es la semilla con menor densidad es:

$$Capacidad \text{ total} = \left(0.67 \frac{kg}{m^2}\right) (1.5 \text{ m}^2)(5 \text{ bandejas}) = 5.025 \text{ kg de semilla seca}$$

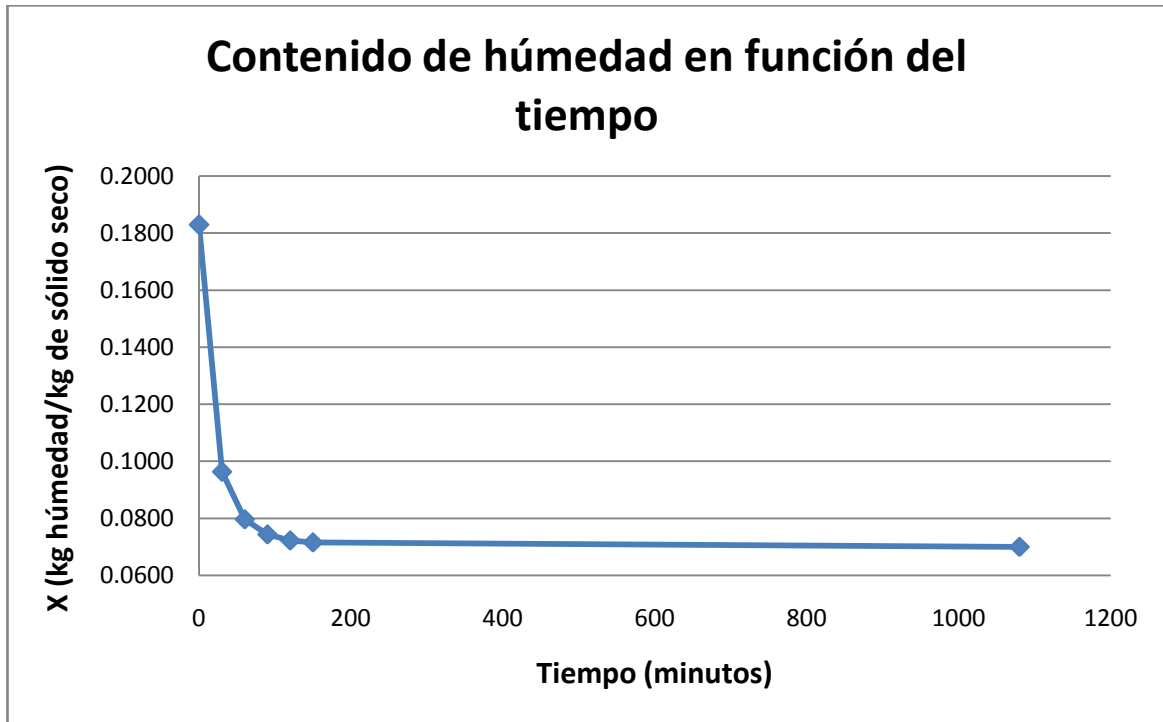
g. Cálculo de flux de transferencia de masa de semilla de chile.

En un tiempo de 1,800 segundos se perdieron 0.0977 kg de humedad en un área de 0.1 m² por lo que la velocidad de transferencia de masa en este punto es:

$$N = \frac{0.0977 \text{ kg de humedad extraida}}{(1,800 \text{ s})(0.1 \text{ m}^2)} = 0.005428 \frac{kg \text{ evaporados}}{m^2 \text{ s}}$$

APÉNDICE B. Gráficas obtenidas de pruebas de secado en planta piloto

Gráfica No. 2 Contenido de humedad en función del tiempo para un lote de semillas de chile con una velocidad de aire de secado de 1m/s, humedad relativa de 55% a una temperatura de 33°C



APÉNDICE C. Tablas utilizadas para la selección del secador

Tabla No. 7 Clasificación de secadores basada en el método de transferencia de calor

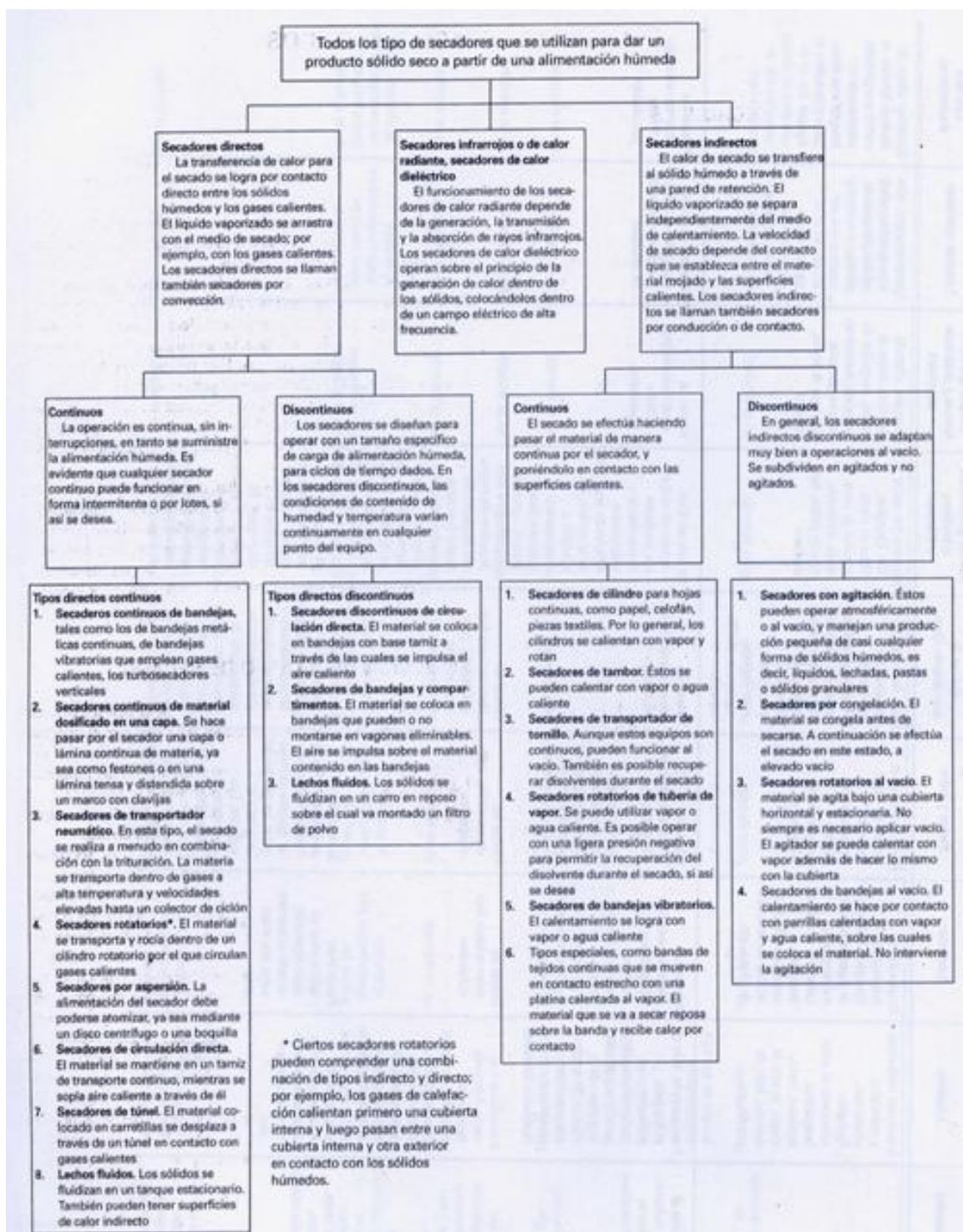


Tabla No. 8 Clasificación de secadores basada en los materiales a secar.

Tipo de secador	Líquidos	Lichados	Pastas y lechos	Pólvos de movimiento libre	Sólidos granulados, cristalinos o fibrosos	Sólidos grandes, formas y contornos especiales	Láminas continuas	Láminas discontinuas
	Soluciones verdaderas y coloidales; emulsiones. Ejemplos: soluciones de sales inorgánicas, extractos, leche, saques, lacres de desecho, latex de caucho, etc.	Suspensiones bombeables. Ejemplos: lechadas de pigmentos, jabón y detergentes, carbonato de calcio, bentonita, suspensiones fluidas de arcilla, concentrados de plomo, etc.	Ejemplos: tortas de prensa de fibras, lodos de sedimentación, sólidos centrifugados, almidón, etc.	Malla de tamiz 100 o menores. De movimiento relativamente libre en estado húmedo. Polvos finos cuando están secos. Ejemplos: precipitados, centrifugados, pigmentos, arcilla, cemento	Mayor que malla 100. Ejemplos: fibras de rayón, cristales de sales, arena, minerales, tasa de papa, hule sintético	Ejemplos: alfarría, ladrillos, tortas de rayón, cascillos de escoria, bombetas, objetos pintados, moldes de yeso, madera	Ejemplos: papel, tela impregnada, pabos, telas, laminas de plástico	Ejemplos: chips de madera, laminas de carbón comprimido, impresores fotográficas, cuero, linternas de hule espuma
Por congelación al vacío. Tipo indirecto, operación discontinua	Por lo común, sólo se utiliza para productos farmacéuticos, como penicilinas y plasma sanguíneo. Es costoso. Se emplea con materiales sensibles al calor o fácilmente oxidables	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Es costoso. Casi siempre se utiliza con productos farmacéuticos y relacionados, difíciles de secar por otros medios. Es aplicable a compuestos químicos finos	Véanse las observaciones bajo «Sólidos granulados»	Se aplica en casos especiales, como en películas recubiertas de emulsión	Véanse las observaciones bajo «Sólidos granulados»
De arena. Tipo indirecto, operación discontinua	Atmosférico o al vacío. Adecuado para ciertos productos. Se limpia con facilidad. Los disolventes son recuperables. El material se agita durante el secado	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Adecuado para lotes pequeños. Se limpia con facilidad. El material se agita durante el secado generando cierto grado de degradación	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable
Rotatorio al vacío. Tipo indirecto, operación discontinua	No es aplicable excepto cuando se bombas lentamente sobre una «base seca»	Puede tener aplicaciones en casos especiales cuando se bombas sobre una «base seca»	Se emplea en contornos. Por lo común, el material se agita en tortas sobre las paredes del secador y el agitador. Los disolventes son recuperables	Adecuado para materiales no adhesivos. Útil para lotes grandes de materiales sensibles al calor y para la recuperación de disolventes	Útil para lotes grandes de materiales sensibles al calor o cuando se deben recuperar los disolventes. El producto se somete a cierto grado de trituración. Es probable que se necesiten colectores de polvo	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable

Tipo de secador	Líquidos	Lichados	Pastas y lechos	Pólvos de movimiento libre	Sólidos granulados, cristalinos o fibrosos	Sólidos grandes, formas y contornos especiales	Láminas continuas	Láminas discontinuas
	Soluciones verdaderas y coloidales; emulsiones. Ejemplos: soluciones de sales inorgánicas, extractos, leche, saques, lacres de desecho, latex de caucho, etc.	Suspensiones bombeables. Ejemplos: lechadas de pigmentos, jabón y detergentes, carbonato de calcio, bentonita, suspensiones fluidas de arcilla, concentrados de plomo, etc.	Ejemplos: tortas de prensa de fibras, lodos de sedimentación, sólidos centrifugados, almidón, etc.	Malla de tamiz 100 o menores. De movimiento relativamente libre en estado húmedo. Polvos finos cuando están secos. Ejemplos: precipitados, centrifugados, pigmentos, arcilla, cemento	Mayor que malla 100. Ejemplos: fibras de rayón, cristales de sales, arena, minerales, tasa de papa, hule sintético	Ejemplos: alfarría, ladrillos, tortas de rayón, cascillos de escoria, bombetas, objetos pintados, moldes de yeso, madera	Ejemplos: papel, tela impregnada, pabos, telas, laminas de plástico	Ejemplos: chips de madera, laminas de carbón comprimido, impresores fotográficas, cuero, linternas de hule espuma
Por congelación al vacío. Tipo indirecto, operación directa, operación discontinua	Por lo común, sólo se utiliza para productos farmacéuticos, como penicilinas y plasma sanguíneo. Es costoso. Se emplea con materiales sensibles al calor o fácilmente oxidables	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Es costoso. Casi siempre se utiliza con productos farmacéuticos y relacionados, difíciles de secar por otros medios. Es aplicable a compuestos químicos finos	Véanse las observaciones bajo «Sólidos granulados»	Se aplica en casos especiales, como en películas recubiertas de emulsión	Véanse las observaciones bajo «Sólidos granulados»
De arena. Tipo indirecto, operación discontinua	Atmosférico o al vacío. Adecuado para ciertos productos. Se limpia con facilidad. Los disolventes son recuperables. El material se agita durante el secado	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Véanse las observaciones bajo «Líquidos»	Adecuado para lotes pequeños. Se limpia con facilidad. El material se agita durante el secado generando cierto grado de degradación	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable
Rotatorio al vacío. Tipo indirecto, operación discontinua	No es aplicable excepto cuando se bombas lentamente sobre una «base seca»	Puede tener aplicaciones en casos especiales cuando se bombas sobre una «base seca»	Se emplea en contornos. Por lo común, el material se agita en tortas sobre las paredes del secador y el agitador. Los disolventes son recuperables	Adecuado para materiales no adhesivos. Útil para lotes grandes de materiales sensibles al calor y para la recuperación de disolventes	Útil para lotes grandes de materiales sensibles al calor o cuando se deben recuperar los disolventes. El producto se somete a cierto grado de trituración. Es probable que se necesiten colectores de polvo	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable

Continuación Tabla No. 8 Clasificación de secadores basada en los materiales a secar.

Tipo de secador	Líquidos	Lechadas	Pastas y lodos	Pulvos de movimiento libre	Sólidos granulados, cristales o fibrosos	Sólidos grandes, formas y contornos especiales	Láminas continuas	Láminas discontinuas
Infrarrojo. Operación discontinua o continua	Sólo para películas delgadas	Véase las observaciones bajo «Líquidos»	Véase las observaciones bajo «Líquidos» (sólo para capas delgadas)	Sólo para capas delgadas	Apropiado sobre todo para secar la humedad superficial. No es adecuado para capas gruesas	Apropiado sobre todo para secar y formar patatas y ensaltes	Se emplea comúnmente en combinación con otros métodos. Es útil cuando se tienen limitaciones de espacio	Útil para trabajos de laboratorio o en combinación con otros métodos
Dieléctrico. Operación discontinua o continua	Muy común	Véase las observaciones bajo «Líquidos»	Véase las observaciones bajo «Líquidos»	Muy común	Muy común	El secado rápido de objetos grandes es apropiado para este método	Aplicaciones para las capas finales de secadores para papel	Muy apropiado para tests rápidos. No se ha desarrollado por completo para otros materiales
De bandejas y compartimentos. Tipo directo, operación discontinua	No es aplicable	Para una producción discontinua muy pequeña	Apropiado para operaciones discontinuas. A grandes capacidades, los costos de inversión y operación son elevados. Tiempos de secado prolongados	La formación de polvo puede constituir un problema. Véase las observaciones bajo «Pastas y lodos»	Apropiado para operaciones discontinuas. A grandes capacidades, los costos de inversión a operación son elevados. Tiempos de secado prolongados	Véase las observaciones bajo «Sólidos granulados»	No es aplicable	Véase las observaciones bajo «Sólidos granulados»
Discontinuo, de circulación directa. Tipo directo, operación discontinua	No es aplicable	No es aplicable	Apropiado sólo si el material se puede preconformar. Adecuado para operaciones discontinuas. Tiempos de secado más cortos que los secadores de bandejas	No es aplicable	Por lo común, no es apropiado para materiales más pequeños que la malla 30. Adecuado a capacidades reducidas y operaciones por lotes	Útil principalmente para objetos pequeños	No es aplicable	No es aplicable
De túnel. Continuo, de bandejas. Tipo directo, operación continua	No es aplicable	No es aplicable	Apropiado para producciones a pequeña y gran escala	Véase las observaciones bajo «Pastas y lodos». El tubosecador vertical es aplicable	Especialmente a gran escala, secado discontinuo en bandejas	Apropiado para una amplia variedad de formas y contornos. La operación puede ser continua. Tiene un uso muy difundido	No es aplicable	Apropiado para carne, láminas de cartón comprimido, chapas de madera

Continuo de circulación directa. Tipo directo, operación continua	No es aplicable	Sólo es adecuado como secador de filtro para cristales	Apropiado para materiales que se pueden preconformar. Maneja grandes capacidades. El Roto-Louvre requiere la recirculación del producto seco	En general no es aplicable, excepto el Roto-Louvre en ciertos casos	Por lo común, no es aplicable para materiales con tamaños menores que malla 30. El material no se somete a volutas excepto en el secador Roto-Louvre. Este último funciona a temperaturas más elevadas	Apropiado para objetos más pequeños que se pueden cargar amon sobre otros. Se utiliza para transportar materiales a través de las zonas calentadas. El Roto-Louvre no es apropiado	No es aplicable	Se requieren diseños especiales. Apropiado para chapas de madera. El Roto-Louvre no es apropiado
Rotatorio directo. Tipo directo, operación continua	Aplicable con recirculación del producto seco	Aplicable con recirculación del producto seco	Apropiado sólo si el producto no se adhiere a las paredes y no forma polvo. Es probable que la recirculación del producto evite su adhesión	Apropiado para la mayoría de los materiales y las capacidades a condición de que la producción de polvo no sea demasiado notable	Apropiado para la mayoría de los materiales y las capacidades. La abrasión de polvo o cristales reduce su utilidad	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable
De transportador neumático. Tipo directo, de operación continua	Véase los comentarios bajo «Lechadas»	Sólo se puede usar si el producto se estructura para hacer manejable la alimentación	En general, requiere la recirculación del producto seco para obtener una alimentación adecuada. Muy apropiado para grandes capacidades. Casi siempre se necesita desintegración	Apropiado para materiales que se suspenden fácilmente en una corriente de gas y pueden humidarse sin mayores problemas. Muy apropiado para grandes capacidades	Apropiado para materiales que se suspenden fácilmente en una corriente de gas. Muy apropiado para grandes capacidades. Puede ser que el producto sufra cierta degradación física	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable
De resaca. Tipo directo, operación continua	Apropiado para grandes capacidades. Por lo común el producto es polvoriento, esférico y de libre movimiento. Es fácil usar temperaturas elevadas con materiales sensibles al calor. El producto puede tener una densidad a granel reducida	Véase las observaciones bajo «Líquidos». Aceleradores de boquilla a presión sujetos a erosión	Requiere equipos especiales de bombeo para alimentar el alimentador. Véase las observaciones bajo «Líquidos»	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable

Continuación Tabla No. 8 Clasificación de secadores basada en los materiales a secar.

Tipo de secador	Líquidos	Lichadas	Pastas y lodos	Polveres de movimiento libre	Sólidos granulados, cristales o fibrosos	Sólidos grandes, formas y contenidos especiales	Láminas continuas	Láminas discontinuas
En láminas o capas continuas de material. Tipo directo, operación continua	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	Existen diferentes tipos para distintos espesores. Apropiaos para el secado en contacto con las superficies calientes.	No es aplicable
De parrillas al vacío. Tipo indirecto, operación discontinua	No es aplicable	Apropiaos para producciones pequeñas por lotes.	Apropiaos para operaciones discontinuas a pequeñas cantidades. Útil para materiales sensibles al calor o fácilmente oxidables. Los disolventes se pueden recuperar.	Véase las observaciones bajo «Pastas y lodos».	Apropiaos para operaciones discontinuas a capacidades reducidas. Útiles para materiales sensibles al calor o fácilmente oxidables. Los disolventes se pueden recuperar.	Véase las observaciones bajo «Sólidos granulados».	No es aplicable	Véase las observaciones bajo «Sólidos granulados».