

## **CAPÍTULO 5**

### **PROCESO DE SECADO**

Este trabajo se centra en el secado de arroz con cáscara, por lo que es importante conocer las principales características del secado que se va a utilizar.

Los granos de cereal son una fuente importante de alimento para humanos y para animales. El arroz, como una fuente importante de alimentación, no tiene comparación entre los granos, especialmente en el Oriente, donde la mayor porción de granos es producida [48]. El secado de estos granos es indispensable en algunos sistemas de producción.

De todas las operaciones en la ingeniería química, el secado es probablemente la de aplicación más amplia en la industria, y una buena apreciación del mecanismo de secado y del equipo disponible es muy importante. [49] El secado es una actividad diaria, muy común, que tiene sus orígenes en la antigüedad.

El secado es un tema interdisciplinario y muy amplio, así como un proceso muy intensivo. La implementación en una escala industrial de equipo moderno y bien diseñado, con altas efectividades térmicas se está convirtiendo en algo especialmente importante. [50]

## **5.1 Necesidad del secado**

Las razones para el secado son tan diversas como los materiales que se pueden secar. El producto debe de estar listo para procesamientos subsecuentes o para la venta. Algunos materiales deben de tener un contenido de humedad específica, para poder ser prensados, moldeados o granulados. El costo de transportación frecuentemente depende en el contenido de humedad del producto, por lo que se tiene que encontrar un equilibrio entre el contenido de humedad del producto y el costo de secado. El secado en exceso es un desperdicio, ya que no sólo se gasta energía sino que también se puede llegar a degradar el producto. [51]

## **5.2 Definiciones**

### **5.2.1 Definición del secado**

El proceso de secado se define como la remoción de sustancias volátiles (a lo que llamamos humedad) de una mezcla que se encuentra en un producto sólido por medio de calor. Esta definición excluye la concentración de una solución o una mezcla por evaporación y desecación mecánica por filtros, prensas o centrífugos. Se excluye también los métodos térmicos como la destilación o la deshidratación azetrópica de algunos líquidos orgánicos. Sin embargo esta definición toma en cuenta la variedad de equipos que se pueden utilizar. [51]

### **5.2.2 Contenido de humedad**

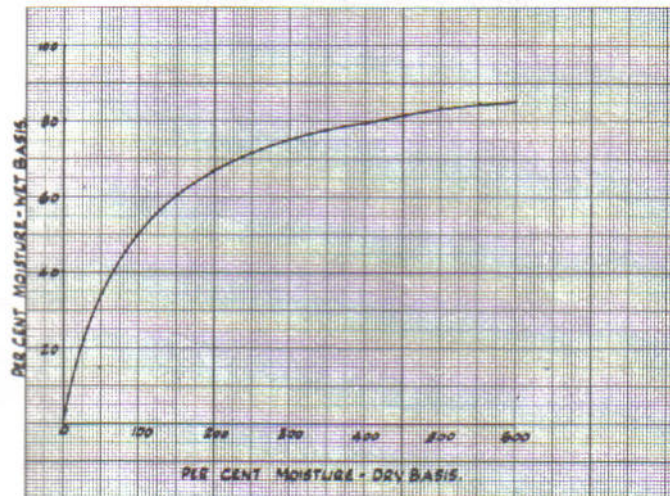
El contenido de humedad de un sólido se expresa comúnmente como el peso de contenido de humedad por unidad de peso del sólido seco o mojado. Es costumbre

referirse al contenido de humedad en una base mojada, aunque más bases científicas de base seca se están empezando a usar en cálculos de secado.

$$X_{W,seco} = \frac{\text{peso humedad}}{\text{peso total, seco}} \quad (5.1)$$

$$X_{W,humedo} = \frac{\text{peso humedad}}{\text{peso total, húmedo}} \quad (5.2)$$

Es importante entender el significado de las dos bases. La base mojada expresa la humedad en un material como un porcentaje del peso del sólido mojado, mientras que la base seca expresa la humedad en un material como un porcentaje del peso de material seco. Así pues, 50% de humedad en base mojada, significa 50 partes de peso de agua por 100 partes de peso de material mojado. Por el otro lado, un material que contiene 50% de humedad en base seca, contiene 50 partes de peso de agua por 100 partes de material seco.



**Figura 5.1** Curva de conversión de contenido de humedad en base seca y base mojada. [49]

Esta relación también se establece con las siguientes fórmulas:

$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (5.3)$$

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (5.4)$$

Donde:

$W_w$  = kilogramos de humedad por kilogramos de material mojado [kg/kg].

$W_d$  = kilogramos de humedad por kilogramos de material seco [ kg/kg]. [49]

### 5.3 Secado de sólidos

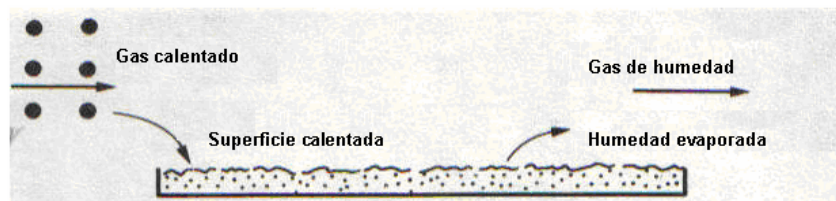
Cuando un sólido mojado es sometido a secado térmico dos procesos ocurren simultáneamente:

- 1) Transferencia de calor para aumentar la temperatura del sólido mojado y evaporar el contenido de humedad.
- 2) Transferencia de masa en forma de humedad interna hacia la superficie del sólido y su subsecuente evaporación.

La velocidad a la que se realiza el secado es consecuencia de la velocidad a la que estos dos procesos ocurren.

La transferencia de calor en la operación de secado ocurrirá a través del flujo de calor, como resultado de convección, conducción o radiación, y en ciertos casos como el resultado de la combinación de cualquiera de esos efectos.

La transferencia de masa en el secado de un sólido mojado dependerá de dos mecanismos; el movimiento interno de humedad en el sólido que es una función de la naturaleza física interna del sólido y de su contenido de humedad, y del movimiento de vapor de agua de la superficie del material como resultado de condiciones externas de temperatura, humedad de aire y fluido, área de exposición y presión flotante. En una operación de secado, algunos de estos mecanismos pueden ser un factor limitante en la velocidad de secado. Con algunos materiales a cierta etapa de la operación de secado, la velocidad de movimiento de humedad en el sólido hacia la superficie puede ser un factor de control, mientras que en ciertas etapas del ciclo de secado, la velocidad de evaporación de la superficie puede ser el factor de control. [49]



**Figura 5.2** Proceso de secado. [51]

Para varios materiales con un contenido de humedad superior al 30% el líquido llena todas las microcapilaridades ( $r < 10^{-7}$  m) y la mayoría de las macrocapilaridades ( $r > 10^{-7}$  m), y esto ocurre en la superficie del material en la forma de una delgada capa de

agua. En este caso, el líquido evaporado penetra –por difusión molecular- a través de la capa límite de gas hacia la base del vapor de gas donde la difusión convectiva de humedad tiene lugar.

Si el contenido de humedad es más alto que el contenido de humedad higroscópica, el vapor de agua cerca de la superficie se satura, y así la temperatura de la superficie del material (para secado convectivo) es igual a la temperatura de bulbo húmedo. La velocidad de secado es casi constante porque la intensidad de secado es igual a la intensidad de evaporación de la superficie libre hacia el líquido (región de control capa límite).

Cuando la capa de líquido es completamente evaporada, el proceso de evaporación empieza al final de las capilaridades. Luego, la intensidad de secado puede ser mayor que la de la capa de líquido. Si el contenido de humedad es menor que la humedad higroscópica, la velocidad de secado disminuye, principalmente debido a la retención de la superficie de evaporación (región de control de difusión interna). Debido a que el efecto de enfriamiento de evaporación cesa, la temperatura de la superficie del material gradualmente aumenta casi hasta la temperatura del agente de secado. [50]

### **5.3.1 Mecanismo de Secado**

Hay dos métodos para remover la humedad:

1) Evaporación: Esta ocurre cuando la presión del vapor de la humedad en la superficie del sólido es igual a la presión parcial del agua en el aire. Esto se debe al

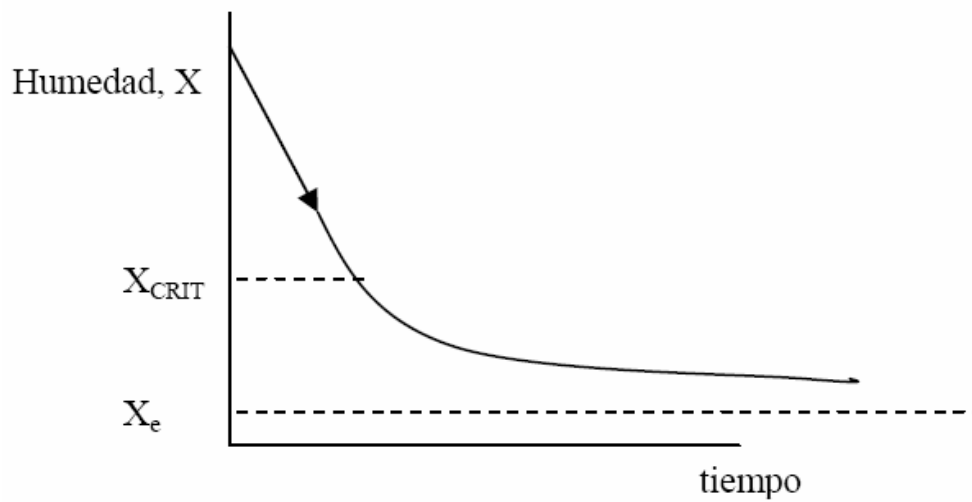
aumento de la temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición. Si el material que está siendo secado es sensible al calor, entonces la temperatura a la cual la evaporación ocurre puede ser disminuida, bajando la presión (evaporación a vacío). Si la presión disminuye más allá del punto triple, entonces la fase líquida no puede existir y la humedad en el producto es congelada.

2) Vaporización: El secado es llevado a cabo por convección, pasando aire caliente sobre el producto. El aire es enfriado por el producto y la humedad es transferida hacia el aire. En este caso la presión del vapor de la humedad sobre el sólido es menor que la presión parcial del agua en el aire. [10]

### **5.3.2 Etapas del secado**

Varias observaciones experimentales aumentadas al desarrollo teórico de los fenómenos que rigen el secado han llevado a la división formal de dos periodos de secado: 1) velocidad constante y 2) velocidad decreciente de secado. El contenido de humedad en el punto de transición entre estos dos periodos –que se llama punto crítico– se conoce como humedad crítica. Debido a que en raras ocasiones la tasa de secado en la primera etapa es realmente constante se prefiere el nombre de etapa inicial.

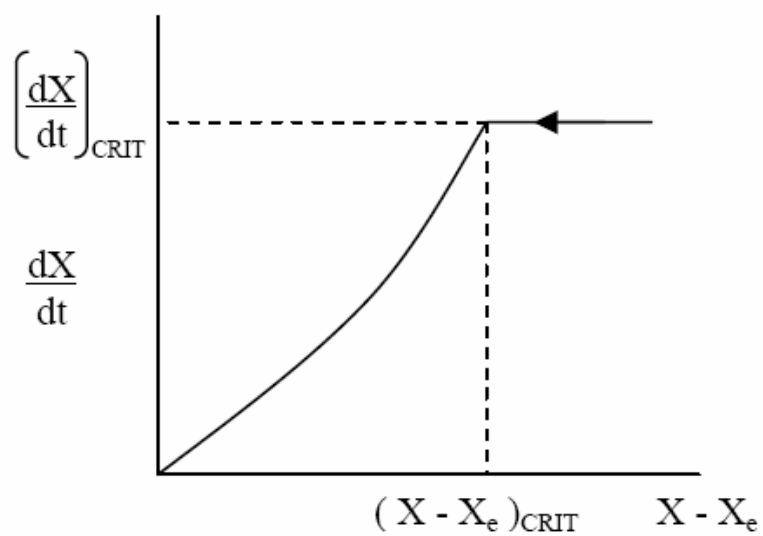
La figura 5.3 nos muestra como se comporta la humedad con respecto al tiempo durante un proceso de secado. La parte recta corresponde al periodo de velocidad constante y la siguiente es la velocidad decreciente. [11]



**Figura 5.3** Humedad vs. Tiempo [52]

$X_e$  corresponde a la humedad de equilibrio que es función de la humedad relativa y la temperatura para una determinada sustancia.

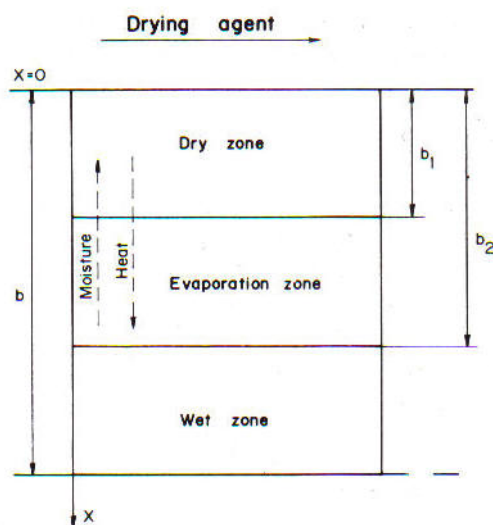
La figura 5.4 muestra el comportamiento de la tasa de secado con respecto a la humedad en exceso  $X - X_e$ .



**Figura 5.4** Tasa de secado vs. Humedad en exceso [52]



Algunos estudios nos llevan a la conclusión de que no se puede establecer una clara evaporación dividiendo el material de secado en dos partes. El proceso de evaporación tiene lugar en una región llamada zona de evaporación. Entonces, en un material sujeto a secado, se pueden distinguir 3 zonas; seca, de evaporación y húmeda. Durante el período de velocidad constante de secado, la zona húmeda llena todo el material, y el proceso de evaporación tiene lugar en la superficie del material de secado. Las otras zonas aparecen subsecuentemente durante el período de velocidad decreciente. En la zona seca, la humedad se transfiere sólo en forma de vapor, mientras que en la zona húmeda la humedad líquida se transfiere. Estos dos mecanismos de transferencia ocurren en la zona de evaporación. La existencia de la zona de evaporación ha sido probada experimentalmente de diferentes maneras, como en el análisis de la distribución de la temperatura o mediciones del flujo de calor dentro del material de secado. [50]



**Figura 5.5** Las zonas en un material de secado. [50]

### 5.3.2.1 Período de Velocidad Constante

En el período de velocidad constante, la superficie de la partícula está mojada lo suficiente para que la capa de aire adyacente a la superficie se sature. Por lo tanto, la velocidad de secado está determinada por la velocidad a la que la humedad vaporizada puede ser transportada a través de la capa límite que rodea a la partícula. Durante este período la temperatura de la partícula permanece constante en la temperatura de bulbo húmedo  $T_{wb}$  del aire. Si  $P_{wb}$  es la presión parcial del vapor a la temperatura de bulbo húmedo,  $p$  es la presión parcial en el vapor de aire y  $K_p$  es el coeficiente de transferencia de masa basada en la presión parcial, la velocidad de remoción de humedad  $N_c$ , por unidad de área de superficie de la partícula (llamado el flujo de secado) en el período de velocidad constante esta dado por:

$$N_c = K_p (P_{wb} - P) \quad (5.5)$$

Ya que la temperatura de la partícula no se eleva durante este período, todo el calor transferido a través de la capa límite del gas a la partícula, debe ser usada para la evaporización. Por lo tanto una fórmula alternativa puede ser:

$$N_c = \frac{h_{gp}}{\lambda} (T - T_{wb}) \quad (5.6)$$

Donde:

$h_{gp}$  = coeficiente de transferencia de calor del gas a la partícula [ $W/m^2K$ ]

$\lambda$  = calor latente de vaporización [ $kJ/kg$ ]

$T$  = la temperatura del gas [ $K$ ]

Hay una plétora de datos en los coeficientes de transferencia de calor de gas a partícula en lechos fluidizados de pequeñas partículas de diámetros de menos de 1 mm. Una de las correlaciones más frecuentemente usadas es[52]:

$$Nu = 0.03 Re_p^{1.3} \quad (5.7)$$

Esta fórmula sugiere que el coeficiente de transferencia de calor y por lo tanto la velocidad de secado en el período de velocidad constante, debe de ser proporcional a la velocidad del gas  $U$  elevada a la potencia 1.3. [52]

Es evidente que la velocidad de secado durante el período de velocidad constante depende de tres factores operantes externos; el coeficiente de calor o masa, el área del sólido expuesto en el medio de secado y la diferencia entre la temperatura y la humedad del medio de secado y la de la superficie del sólido húmedo. Un incremento en cualquiera de estos factores provocará un aumento de las velocidades de secado. [49]

### **5.3.2.2 Período de Velocidad Decreciente**

El período de velocidad decreciente, la velocidad de migración de humedad hacia la superficie de la partícula es insuficiente para mantener la capa de aire saturada adyacente a la superficie de la partícula. Por lo tanto, la velocidad de secado no es ahora determinada solamente por las condiciones en la capa límite. También depende de la estructura de los poros del material, y en el mecanismo de migración de la humedad.

Estos incluyen acción capilar, difusión de vapor, difusión a través de las superficies internas, y en el caso de materiales celulares, difusión a través de las paredes de la célula. El balance de estos mecanismos puede cambiar como avanza el proceso de secado. Por ejemplo, el movimiento capilar puede predominar durante las etapas tempranas del período de velocidad decreciente cuando los poros están relativamente llenos. Mientras que la difusión del vapor puede dominar hacia el final cuando sólo pequeños paquetes de humedad permanecen en la estructura sólida. En general la curva de velocidad decreciente no puede predecir a priori y debe de ser determinada experimentalmente.

Sin embargo, determinando la curva de velocidad decreciente experimentalmente con ciertas condiciones operacionales, se puede predecir aproximando cómo es que se comportará cuando las condiciones cambien. Esto es útil, pues permite explorar un rango de opciones de proceso con pocas muestras experimentales.

#### **5.4 Tipos y Clasificación de Secadores Industriales**

Una amplia variedad de diseños de secadores se han construido, con el objetivo de crear un eficiente sistema de secado. Para poder encontrar una clasificación adecuada de los secadores, primero es necesario definir como son suministrados los requerimientos térmicos y los secadores con los que se cuentan actualmente.

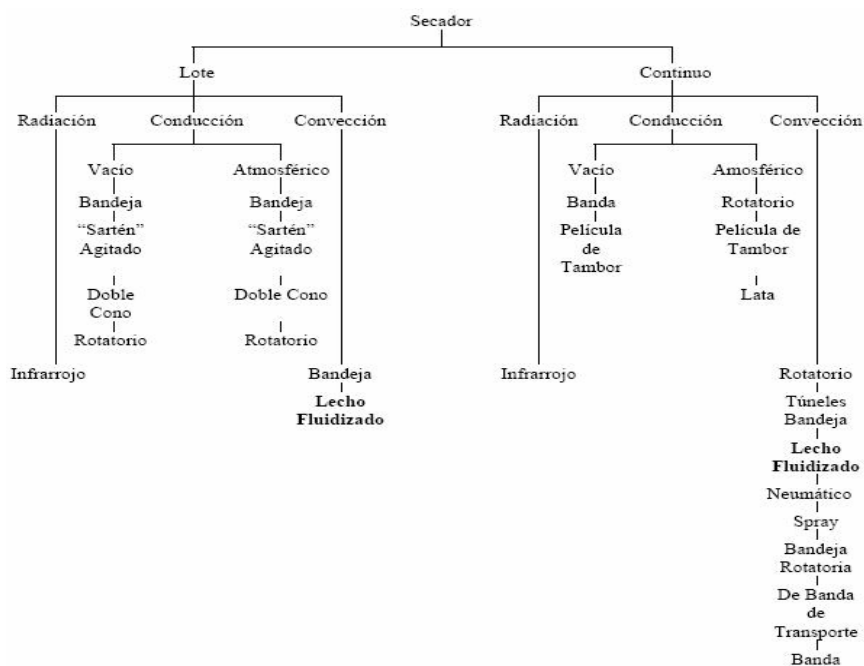
En primer lugar, el calor se debe transferir al material mojado, para promover la operación de secado. El calor puede ser aplicado por uno o más de los siguientes métodos:

1) Convección, donde el medio calorífico, usualmente aire o productos de combustión, se encuentran en contacto directo con el material mojado.

2) Conducción, donde el calor es transmitido indirectamente por contacto del material mojado y una superficie caliente.

3) Radiación, donde el calor se transmite directamente y sólo de un cuerpo caliente al material mojado, por radiación de calor.

Más conciso, los secadores industriales, se encuentran ubicados en dos categorías principales, secadores de convección y secadores de conducción. Estos secadores tomarán forma de secadores tipo lote o alternativamente secadores continuos. En la siguiente figura se muestra los diferentes tipos de secadores que existen.



**Figura 5.6** Clasificación de secadores. [11]

En este trabajo nos centraremos en secadores del tipo de lecho fluidizado.

### **5.5 Secado por Lecho Fluidizado**

La fluidización es un atractivo método para secar muchos polvos o productos granulares húmedos. Esta técnica ha sido utilizada industrialmente desde 1948, y actualmente goza de una gran popularidad secando minerales, arena, polímeros, fertilizadores, farmacéuticos, materiales cristalinos y muchos otros productos industriales.

Las principales razones de su popularidad son:

a) El eficiente contacto entre sólidos y gas hacen que las unidades sean compactas y de bajo costo, y tiene una alta eficiencia térmica.

b) El manejo de partículas es gentil, comparado a otros tipos de secadores, esto es importante con cristales frágiles.

c) El que no existan muchas partes móviles, más allá de las necesarias para la alimentación y descarga de las partículas, mantiene la confianza y los bajos costos. [52]

d) La posibilidad de aplicar diversos tipos de energía (paneles calientes inmersos, radiadores, etc.)

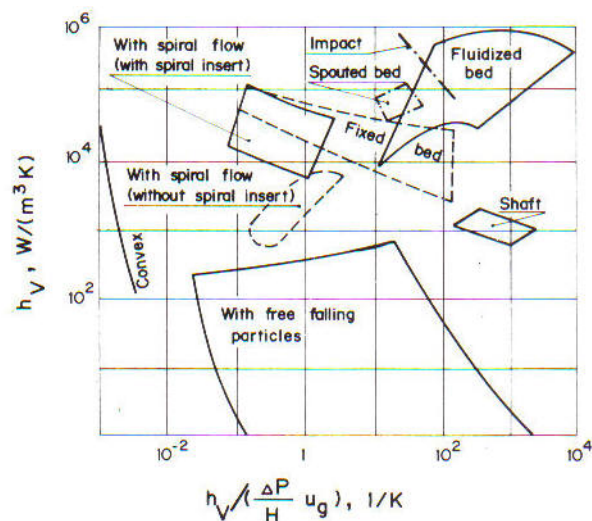
c) buen mezclado, uniformidad del material en el lecho. [50]

La mayor limitante en la aplicación de los secadores de lechos fluidizados, es que el material que está siendo secado tiene que ser fluidizable. Algunos de los potenciales productos se encuentran muy mojados para fluidizar satisfactoriamente. Esto es usualmente debido a un excesivo contenido de humedad en la superficie de las partículas, causando aglomeración. Este problema puede solucionarse exponiendo la superficie húmeda en un secador neumático previo al secado en un lecho fluidizado. Otra limitante se encuentra si el producto tiene una distribución de tamaño muy amplia, de tal manera que la velocidad del fluido suficiente para fluidizar las partículas grandes represente pérdidas de pequeñas partículas del lecho. Para superar esta limitación se pueden usar lechos fluidizados vibratorios. [52]

Las dimensiones del equipo de secado en un lecho fluidizado dependen de:

- Rendimiento de procesamiento del material seco
- Masa de la humedad removida
- Velocidad del gas
- Tiempo de residencia del material en el dispositivo [50]

Una comparación gráfica de la intensidad de la transferencia de calor en varios tipos de secadores para materiales granulares se pueden observar en el figura 5.7.



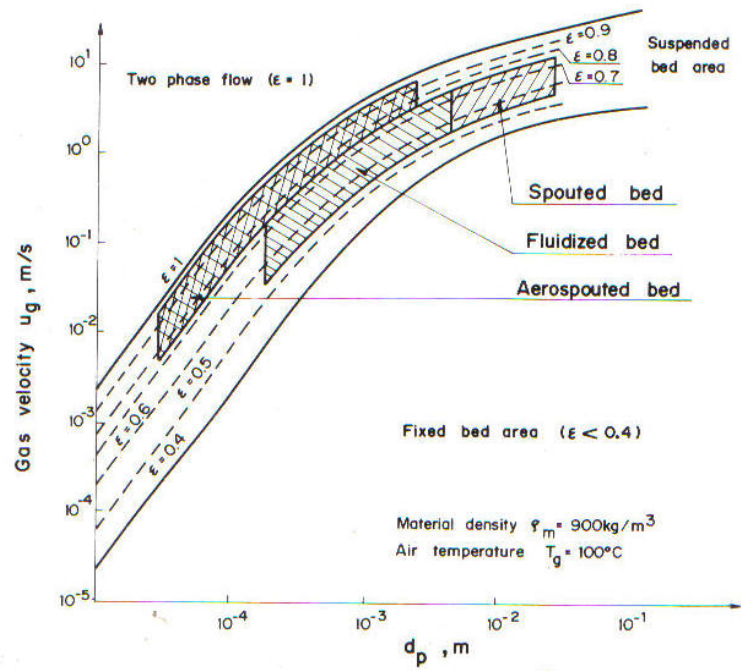
**Figura 5.7** Comparación de transferencia de calor de varios secadores. [50]

En secadores de dispersión (excluyendo lechos vibrofluidizados) el estado de suspensión de las partículas es obtenida por la acción del fluido pasando a una velocidad adecuada a través del lecho de partículas con un diámetro definido. El lecho que se forma de dicha manera es caracterizada por una porosidad.

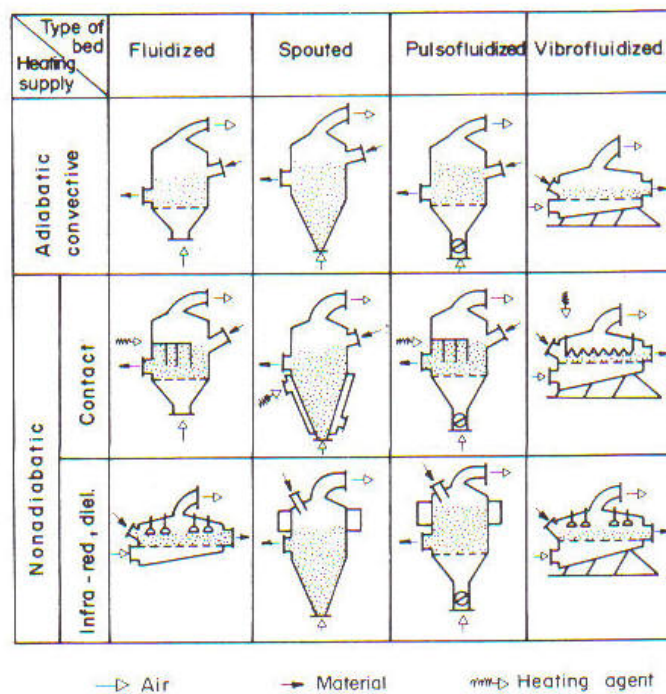
Para cada tipo de secador existen algunas variaciones en los parámetros llamados parámetros de rango de comportamiento del equipo. En la figura 5.8 se muestra una gráfica en la que algunos comportamientos de equipos pueden compararse.

Existen varios tipos de secadores de lecho fluidizado, que tienen diferentes funciones, y en donde se pueden secar de diferente manera, diferentes tipos de partículas. En la figura 5.9 se pueden observar algunos tipos de secadores de lecho fluidizado y cómo es que suministra el material y el calor a ellos.





**Figura 5.8** Rango de comportamiento de algunos secadores de dispersión. [50]



**Figura 5.9** Métodos de suministro de calor en secadores con varios tipos de lecho

fluidizado. [50]

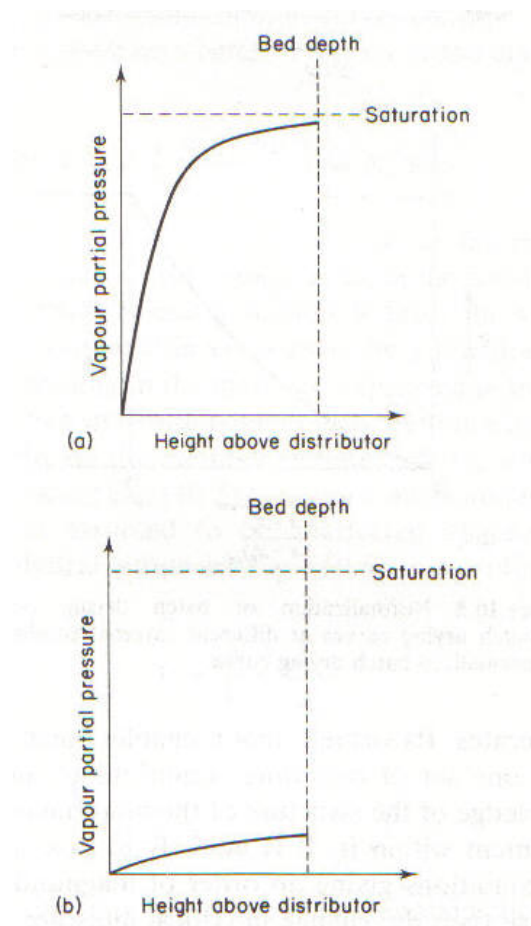
## **5.5.1 Parámetros importantes en el Secado en Lechos Fluidizados**

### **5.5.1.1 Efecto de la profundidad del lecho en la velocidad de secado**

La evidencia experimental existente, indica que para materiales que se secan relativamente rápido,  $dX/dt$  es casi inversamente proporcional a la profundidad del lecho. [53, 54]. Por ello la velocidad de secado  $-W_B dX/dt$ , donde  $W_B$  es el peso del lecho de secado- es efectivamente independiente de la profundidad del lecho, y la creciente profundidad del lecho no incrementa la velocidad de secado.

Al parecer la mayor parte del secado ocurre en una capa justo por encima del distribuidor, y la creciente profundidad del lecho, solo reduce la frecuencia con la cual una partícula individual entra a esta capa. Si asumimos que el fluido de gas puede dividirse en un flujo intersticial y un flujo de burbujas, con la mayor parte de la transferencia de masa y calor ocurriendo en la original, y sin mucho intercambio de gas ocurriendo entre ellas, una explicación plausible es que la velocidad transferencia de masa es tan rápida que el gas intersticial se satura a poca distancia por encima del distribuidor. [52]

Por otro lado si el material seca muy lento,  $dX/dt$  es casi independiente de la profundidad del lecho [54]. Por ello la velocidad de secado es proporcional a la profundidad del lecho. Esto se puede conjeturar que en caso de que el gas intersticial se encuentre lejos de saturarse en la superficie del lecho.



**Figura 5.10** Incremento de presión parcial de vapor con una altura por encima del distribuidor en el flujo de gas intersticial: a) secado rápido; b) secado lento. [52]

### 5.5.1.2 Efecto del tamaño de partícula en la velocidad de secado

En los experimentos con silica gel de Mostaza (citado por D.Reay y C.G.J. Baker), se descubrió que incrementando el diámetro de partícula  $d_p$ , de 106 a 2247  $\mu\text{m}$  se obtiene un ligero incremento en la velocidad de secado. Los experimentos fueron ejecutados a la misma velocidad de gas, altura y temperatura de lecho. En contraste, Venecek y Picka (citados por D.Reay y C.G.J. Baker) en sus experimentos con

fertilizante NPK, encontraron que el tiempo para eliminar una cantidad de humedad fue proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula. [55]

### **5.5.1.3 Efecto de la velocidad del gas sobre la velocidad de secado**

Con materiales que pierden la humedad relativamente fácil, la velocidad de secado es proporcional a la velocidad del gas. Por el contrario, materiales con una resistencia interna alta, como el trigo, la velocidad de secado es independiente a la velocidad del gas. [55]