

Operaciones de separación por transferencia de materia: Secado

Docente

Diana Catalina Moreno Guarín

Contenido

- Definición
- Equilibrio y conceptos generales
- Mecanismos y cinética de secado
 1. Mecanismos de transferencia de calor y materia
 2. Cinética de secado (velocidad y tiempo de secado)
- Clasificación de secadores

Secado

- **El secado consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo.**



Fuente: http://agronegocioscr.com/wp-content/uploads/2011/08/PATIO_PARA_SECADO_AL_SOL.jpg

Secado

- **El agua u otros líquidos pueden separarse de sólidos mecánicamente mediante prensas o centrífugas, o bien térmicamente mediante evaporación.**
- **Generalmente eliminar líquidos por métodos mecánicos es más barato que por métodos térmicos, y por esta razón es aconsejable reducir el contenido de líquido en lo posible antes de operar en secadero térmico.**



Fuente: http://agronegocioscr.com/wp-content/uploads/2011/08/PATIO_PARA_SECADO_AL_SOL.jpg

Secado

- El contenido de líquido de una sustancia seca varía de un producto a otro.
- Ocasionalmente el producto no contiene líquido y recibe el nombre de totalmente seco, pero lo más frecuente es que el producto contenga algo de líquido. La sal de mesa, por ejemplo, contiene del orden de 0,5 g por 100 g de agua, el carbón seco un 4 por 100 y la caseína un 8 por 100. Secado es un término relativo y tan sólo quiere decir que hay una reducción del contenido de líquido.



Fuente: http://agronegocioscr.com/wp-content/uploads/2011/08/PATIO_PARA_SECADO_AL_SOL.jpg

Secado

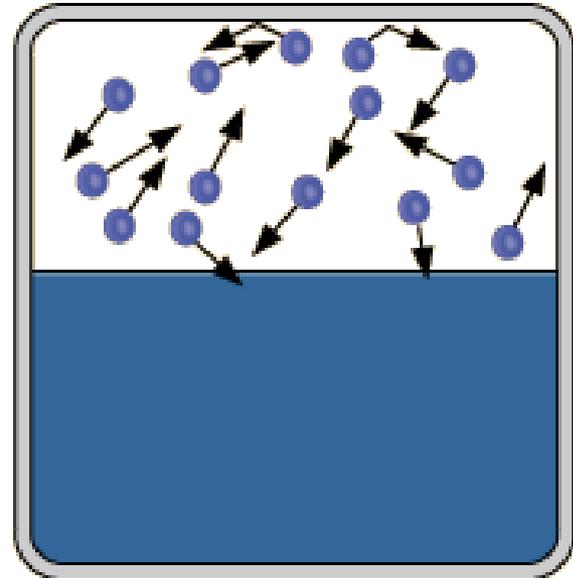
El secado es una operación que suele estar presente en todas las industrias químicas. Las razones para su empleo son de diversos tipos:

- 1. Facilitar la manipulación en etapas posteriores.**
- 2. Reducir gastos de transporte.**
- 3. Facilitar la conservación, sobre todo en alimentos y medicamentos.**
- 4. Aumentar el valor del producto.**
- 5. Aprovechar subproductos.**
- 6. Reducir volumen y aumentar la capacidad de aparatos en otras etapas del proceso, etc.**

Secado

Equilibrio

La humedad contenida en un sólido húmedo o en una solución ejerce una presión de vapor dependiente de la naturaleza de la humedad, de la naturaleza del sólido y de la temperatura.

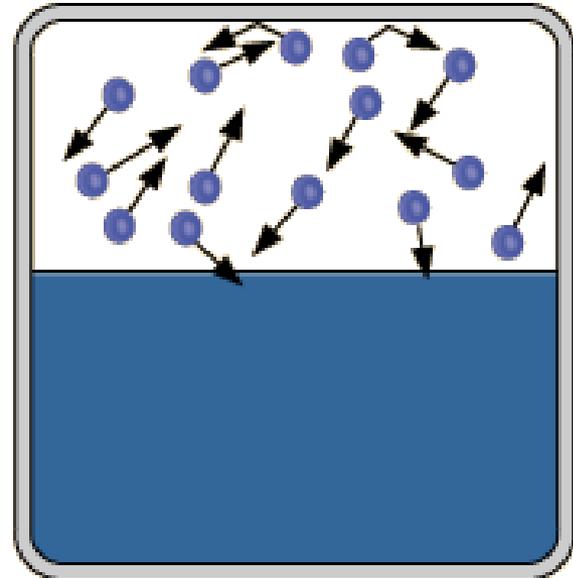


Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/kinetic/imgkin/vapp1.gif>

Secado

Equilibrio

Si el sólido húmedo se expone a una corriente de gas con una presión parcial del vapor p , el sólido perderá humedad por evaporación, o la ganará a expensas del gas hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido iguale a la presión parcial de dicha corriente gaseosa. El sólido y el gas se encuentran, entonces en equilibrio, y la humedad del sólido se denomina humedad de equilibrio.

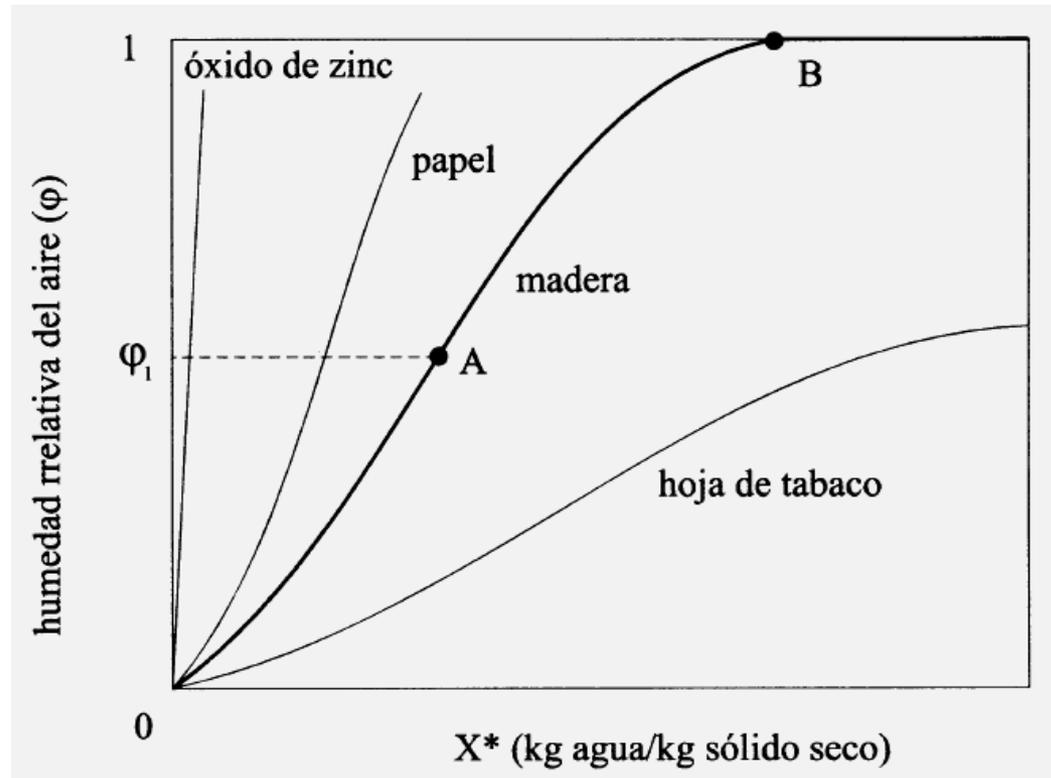


Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/kinetic/imgkin/vapp1.gif>

Secado

Equilibrio

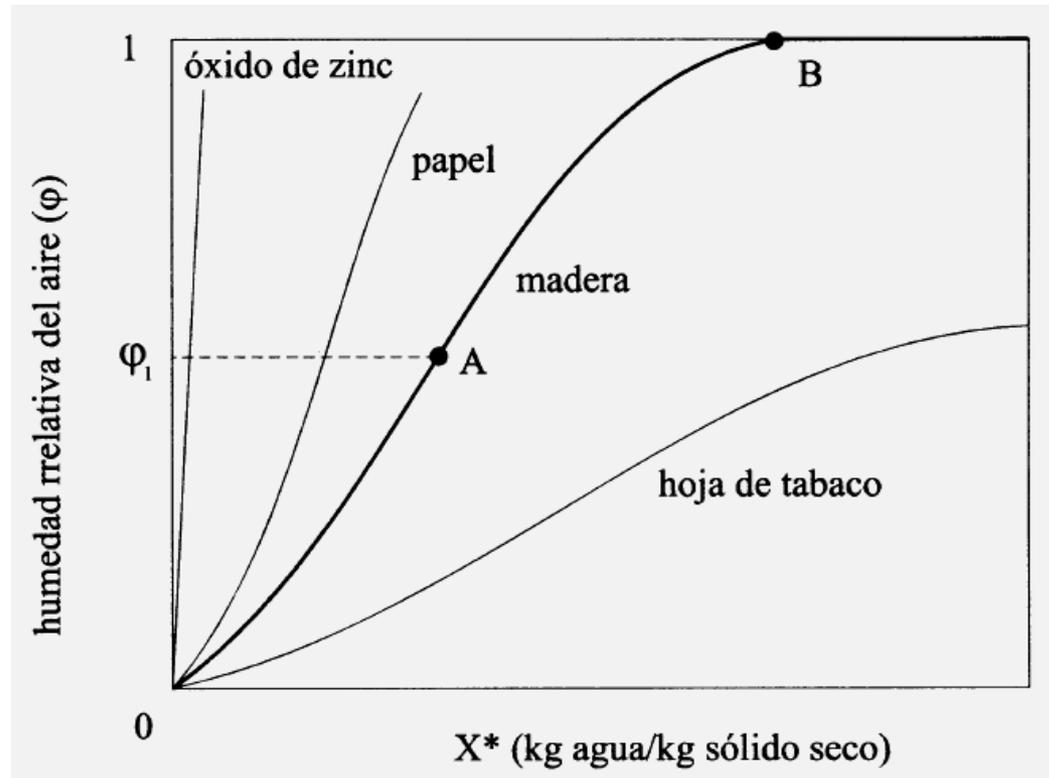
La figura muestra una serie de comportamiento típicos de equilibrio de distintos sólidos, donde la humedad es en todos los casos agua. Se ha representado la humedad relativa (ϕ) del gas frente a la humedad del sólido (X kg agua/kg sólido seco).



Secado

Equilibrio

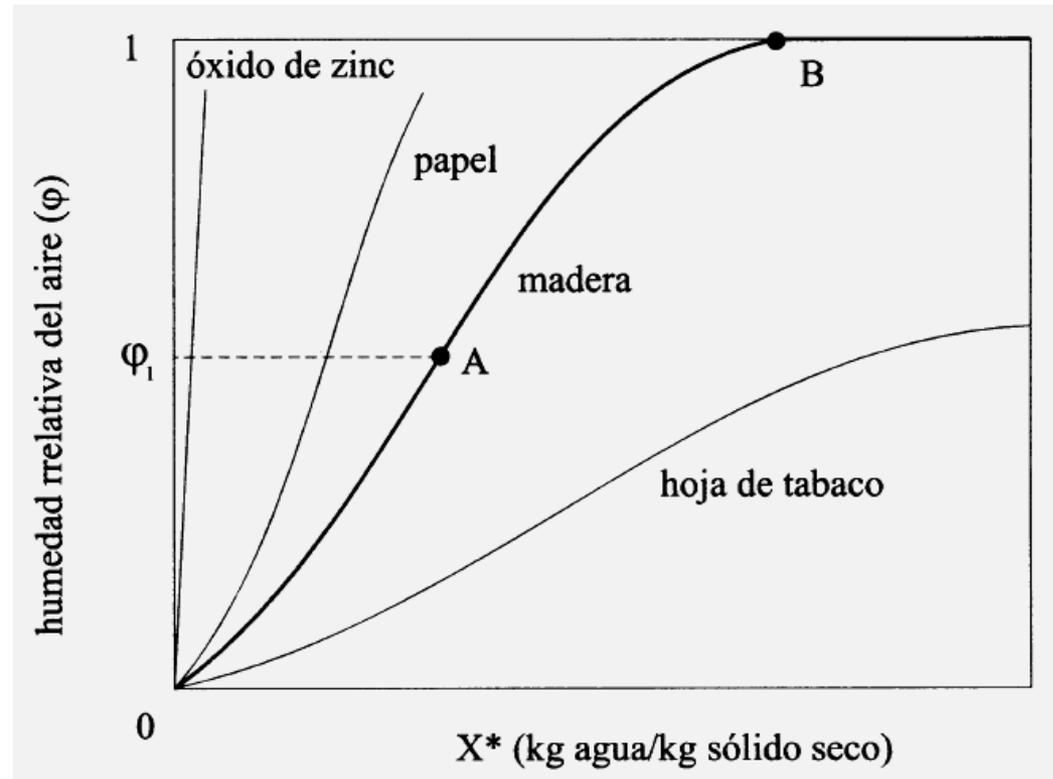
Considerando la curva para la madera, si ésta tiene una humedad inicial superior a la correspondiente al punto B, y se expusiera a la acción de un aire con una humedad φ_1 , la madera perdería humedad por evaporación hasta alcanzar su concentración de equilibrio, la correspondiente al punto A. Una exposición más prolongada a este aire no ocasionaría pérdida adicional de agua, independientemente del tiempo.



Secado

Equilibrio

El contenido de humedad podría ser reducido utilizando un aire con una humedad relativa menor. Pero para secar totalmente el sólido debería emplearse aire totalmente seco, es decir con $\varphi=0$.



Secado

Conceptos generales

Humedad: El contenido de humedad de un sólido puede expresarse sobre base seca o base húmeda; pero en el secado de sólidos es más conveniente referir la humedad sobre base seca (masa de agua que acompaña al sólido seco).

Humedad de equilibrio (X^*): Cuando un sólido húmedo se pone en contacto, con aire de temperatura y humedad determinadas y constantes, se alcanzan las condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido húmedo. Se logran las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire.

Secado

Conceptos generales

Cuerpos húmedos y cuerpos higroscópicos: Para una temperatura determinada, la presión de vapor del agua contenida en el sólido húmedo aumenta con su humedad para todas las sustancias, hasta alcanzar el valor de la tensión de vapor del agua pura a la temperatura considerada. Se llama sólido higroscópico cuando la presión de vapor del agua que acompaña al sólido es menor que la tensión de vapor del agua a la misma temperatura. Y si esta presión de vapor del agua del sólido es igual que la tensión de vapor, se llama sólido húmedo.

Secado

Conceptos generales

Humedad libre: Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones dadas: $F = X - X^*$. Es la humedad que puede perder el sólido después de un tiempo de contacto con el aire en las condiciones dadas y constantes.

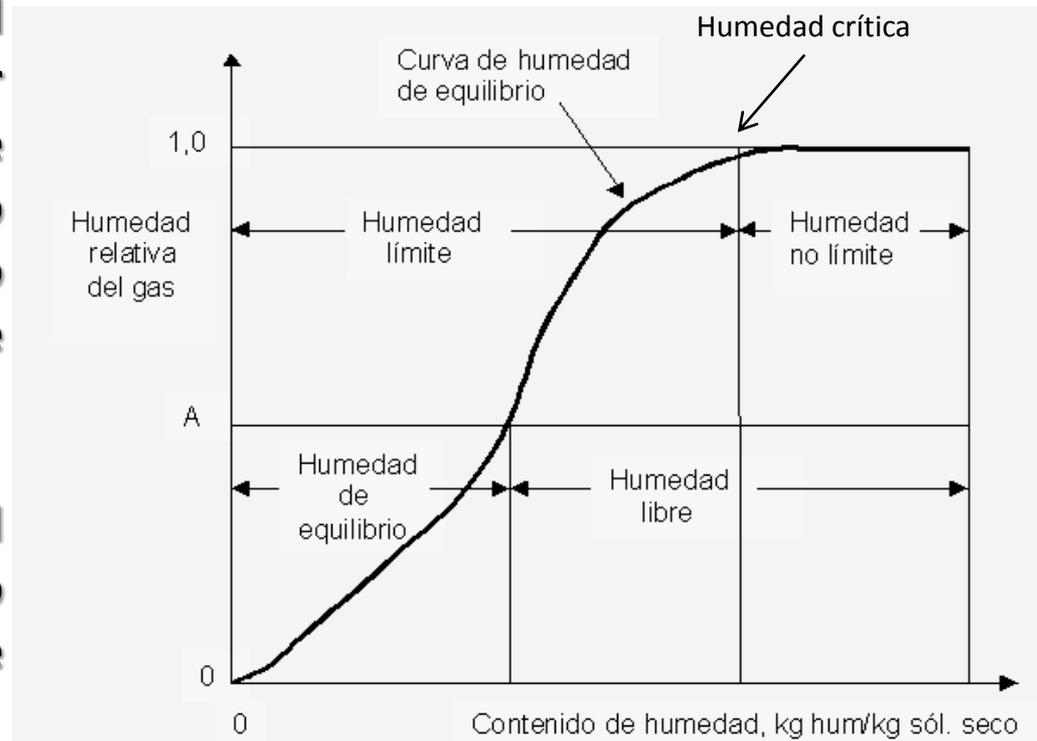
Humedad ligada o agua ligada: Es el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con aire saturado; o bien la humedad mínima del sólido necesaria para que este deje de comportarse como higroscópico.

Secado

Conceptos generales

Humedad libre o desligada: Es el agua que el sólido puede perder mediante métodos físicos, que se encuentra unida al sólido superficialmente. Si el sólido tiene humedad libre se comportará como húmedo.

Humedad crítica: La humedad crítica de un sólido es el punto que separa los dos períodos de secado pre-crítico y post-crítico.

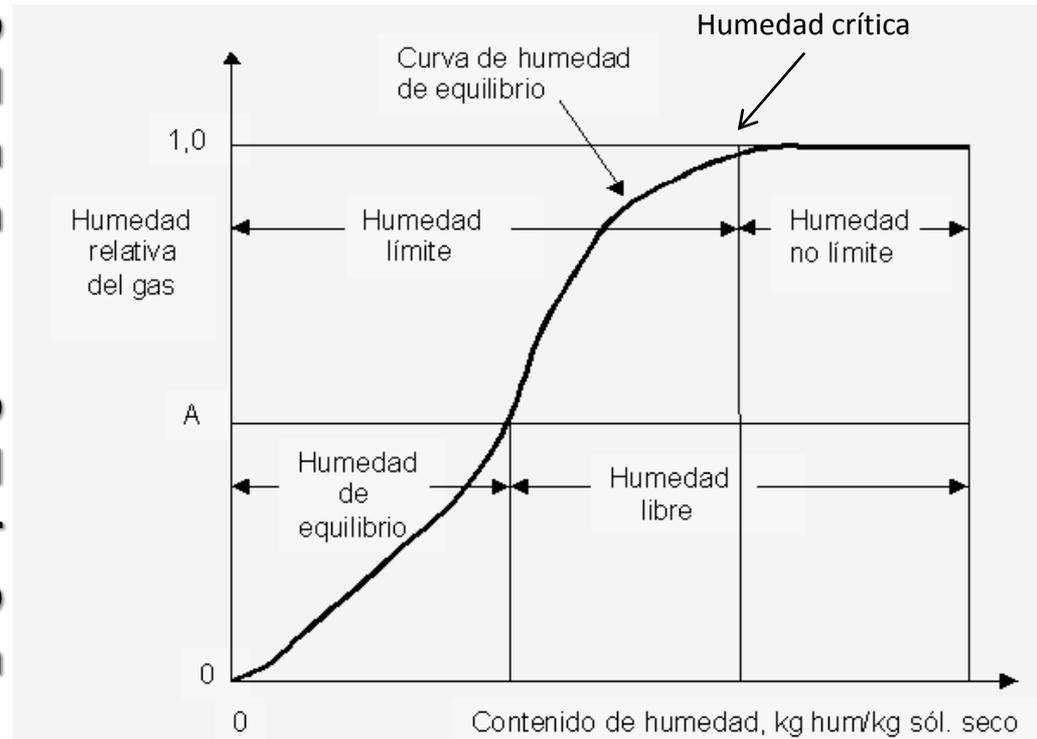


Secado

Conceptos generales

Período pre-crítico: Es el período de tiempo en el que la velocidad de secado es constante, desde la humedad inicial hasta la humedad crítica.

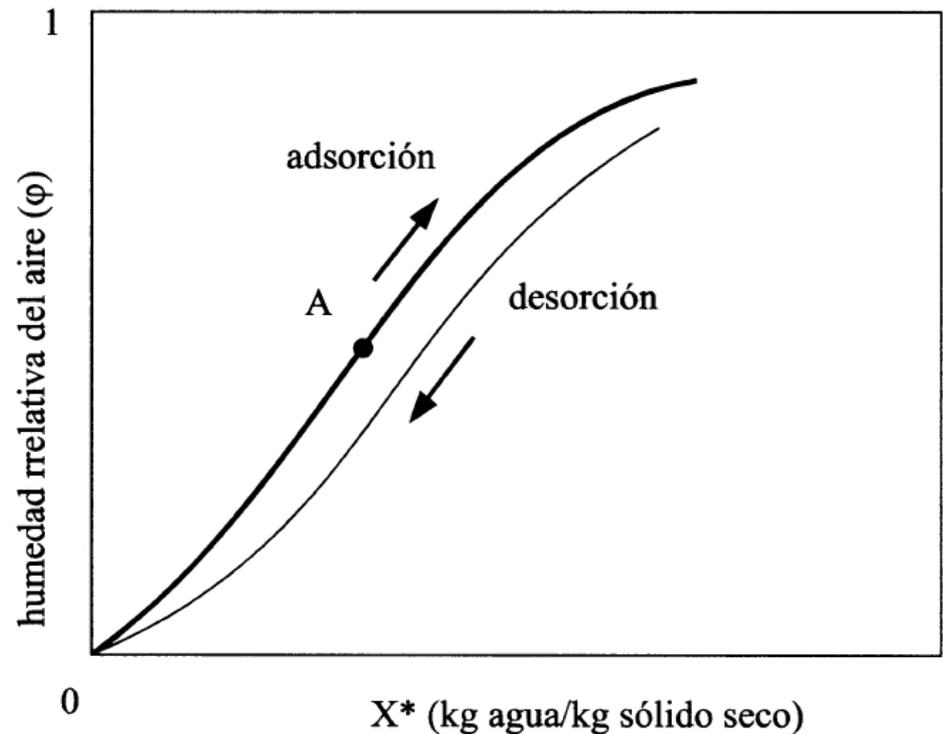
Período post-crítico: Es el período de tiempo en el que la velocidad de secado disminuye hasta llegar a un valor de cero. Este período empieza con la humedad crítica hasta la humedad de equilibrio.



Secado

Conceptos generales

Histéresis: Los sólidos muestran diferentes características de equilibrio dependiendo de si éste se alcanza por condensación (adsorción) o por evaporación (desorción) de la humedad. En operaciones de secado lo que interesa es el equilibrio de desorción, que normalmente es el que presenta mayores valores de humedad adsorbida de los dos posibles.



Secado

Mecanismos y cinética de secado

En los procesos de secado ocurren simultáneamente los fenómenos de transporte de materia y calor. Entonces se va a hacer una breve introducción a estos mecanismos

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Transferencia de calor

El transporte de calor hacia la interfase puede tener lugar por conducción, convección y radiación. Dentro del sólido el transporte tendrá lugar por conducción.

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Transferencia de materia

El transporte de materia tiene lugar en sentido opuesto a la transmisión de calor y puede manifestarse por capilaridad y/o difusión a través del sólido y por difusión desde la interfase hacia el seno de la fase gaseosa.

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Velocidad de secado

Mediante el establecimiento de la velocidad de secado se pueden determinar la capacidad del equipo y el tiempo de secado.

Para el estudio de la velocidad de secado se utilizan condiciones constantes de operación: presión, temperatura, humedad, velocidad del aire.

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Velocidad de secado

El procedimiento para determinar la velocidad de secado consta de dos pasos:

- 1. Obtención de la curva de pérdida de peso en el tiempo**
- 2. Obtención de la curva de velocidad de secado**

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Velocidad de secado

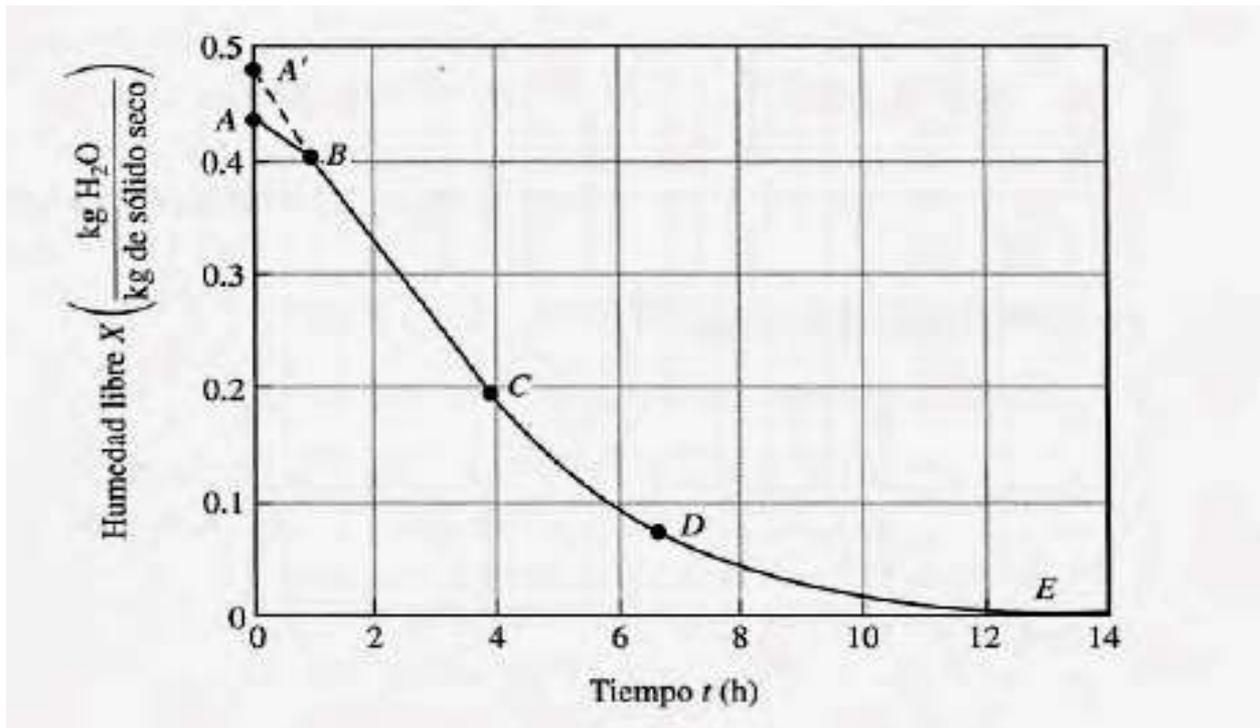
Para la obtención de la curva de pérdida de peso se lleva un registro en el tiempo de la merma de peso que sufre el material de estudio en una operación de baja escala sin interrupciones. Se debe tener en cuenta que:

- El material que se estudia debe distribuirse (bastidores, bandejas) en forma similar a la operación en gran escala.
- La muestra no debe ser pequeña con el fin de percibir fácilmente los cambios de peso.
- Las condiciones operativas deben ser similares a las de la operación a gran escala.

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Curva de pérdida de peso de secado



Secado

Mecanismos y cinética de secado

Velocidad de secado

Análisis de la curva de pérdida de peso

- Tramo AB: Sólido frío.
- Tramo A'B: Sólido caliente.
- Tramo BC: Tramo de pendiente constante, velocidad constante.
- Tramo CD: Pendiente decreciente, disminución de la velocidad de secado. Se denomina: 1° Período de Velocidad Decreciente.
- Tramo DE: Velocidad de secado decrece con mas rapidez.
- Se denomina: 2° Período de Velocidad Decreciente

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Velocidad de secado

Para la obtención de la gráfica de velocidad de secado se realiza la conversión de datos: se determina la humedad libre (X) y se realiza una derivación con respecto del tiempo

Humedad en base seca en t:
$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \frac{\text{kg total de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \left(\frac{\text{lb total de agua}}{\text{lb de sólido seco}} \right)$$

Humedad en base húmeda en t:
$$X_{B.H.} = \frac{W - W_s}{W} = \frac{\text{kg total de agua}}{\text{kg total}} = \frac{\text{lb total de agua}}{\text{lb total}}$$

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Velocidad de secado

Humedad libre:

$$X = X_t - X^*$$

Velocidad de secado:

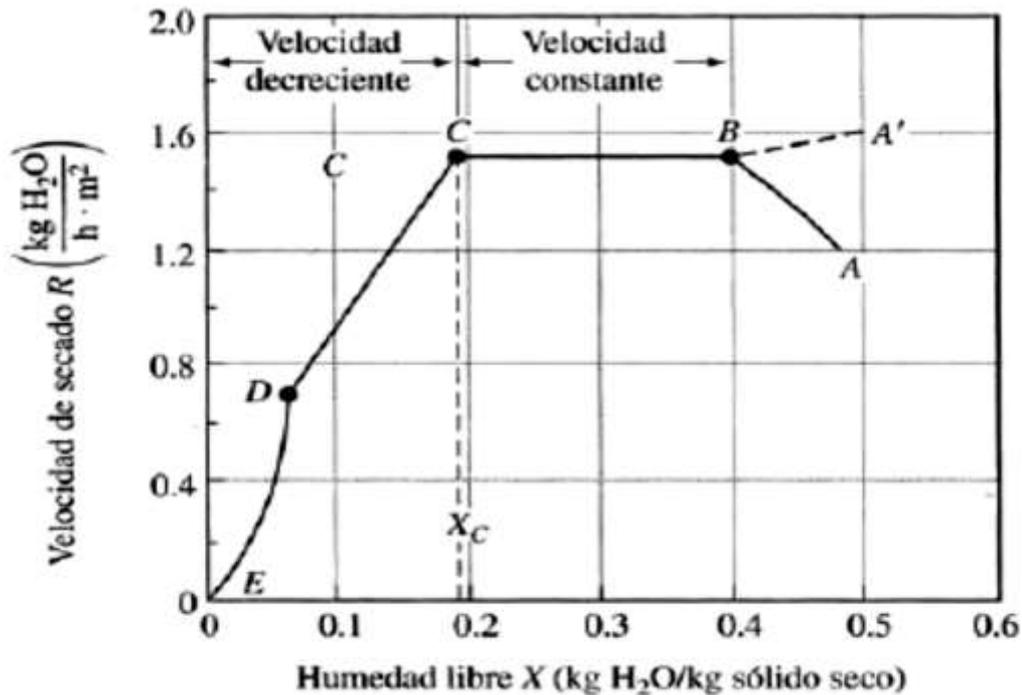
$$R = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

En donde X^* es la humedad de equilibrio, X_t es la humedad en el tiempo t , dX/dt es la derivada de la humedad con respecto al tiempo que puede estar dada por $\Delta X/\Delta t$ y L_s es la cantidad de sólido inicial (Kg) y A el área de la superficie de secado (m^2)

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Curva de velocidad de secado



Secado

Variables de influencia en la velocidad de secado

- 1. Naturaleza del material**
- 2. Temperatura del aire**
- 3. Velocidad del aire**
- 4. Humedad absoluta del aire**
- 5. Tamaño de partícula del sólido**

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Tiempo de secado

En el periodo de velocidad constante puede obtenerse a partir de la ecuación de velocidad de secado:

$$R = -\frac{L_S}{A} \frac{dX}{dt}$$

$$t = \int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{L_S}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

$$t = \frac{L_S}{AR_C} (X_1 - X_2)$$

Secado

Mecanismos y cinética de secado

Tiempo de secado

En el periodo de velocidad decreciente el tiempo de secado esta dado por:

$$t = \frac{L_S}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

Secado

Tipos de secadores

Los secadores se clasifican según el método de transmisión de calor a los sólidos húmedos, en:

- Secadores directos.
- Secadores indirectos.

Secado

Secadores directos

La transferencia de calor para la desecación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación; es decir, con los gases calientes. Los secadores directos se llaman también secadores por convección.

Secado

Secadores indirectos

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

Secado

Tipos de secadores

Los secadores también se pueden clasificar por:

El tipo de operación:

- **Secadores continuos**
- **Secadores por lotes**

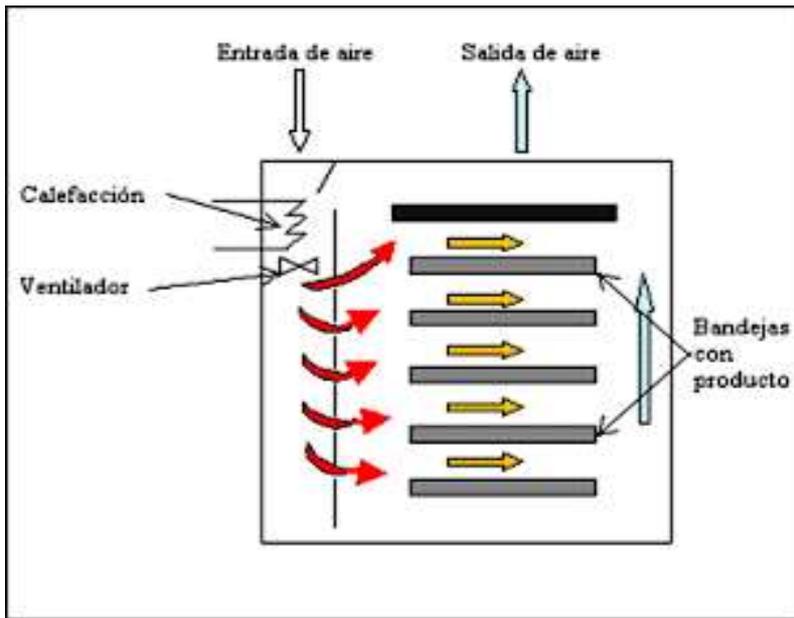
La naturaleza de la alimentación:

- **Secador de líquidos o pastas**
- **Secadores de sólidos**

Secado

Tipos de secadores

Por su configuración y tipo de alimentación:



Fuente: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manuales/4070035/imagenes/Fig_7.7.gif



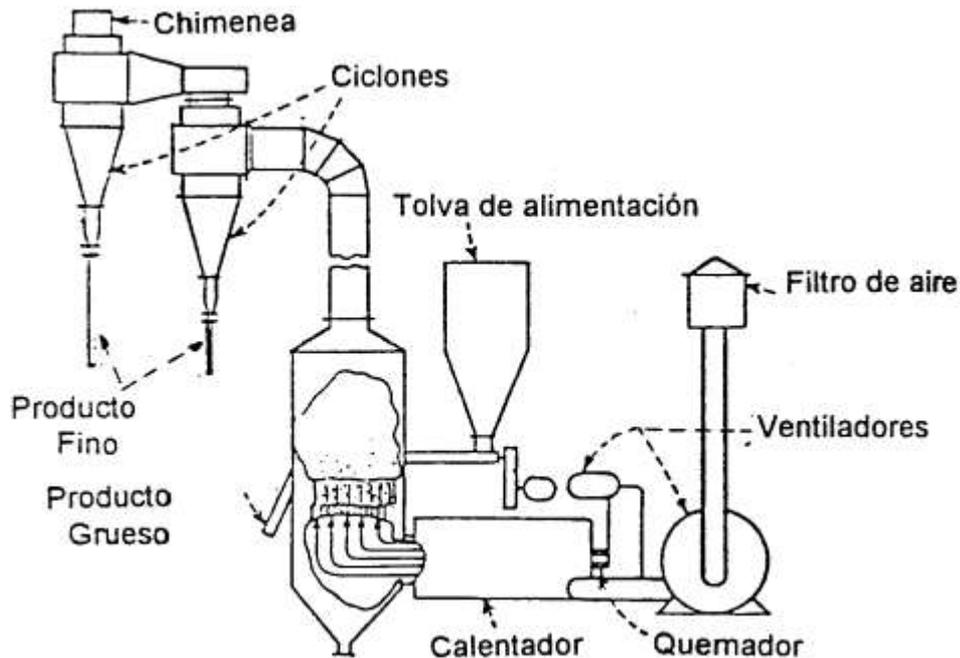
Fuente: http://www.brei.c/site/imagenes/stories/secadorpoten_2.jpg

Secador de bandejas

Secado

Tipos de secadores

Por su configuración y tipo de alimentación:



Fuente: <http://ataateca.unad.edu.co/contenidos/211619/EXELARNING/image22.jpg>



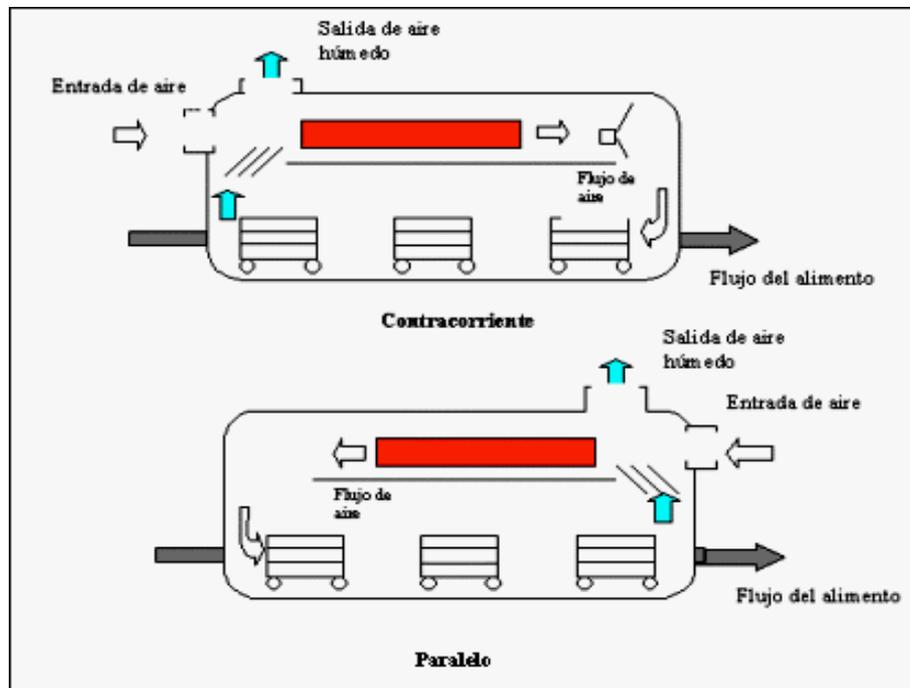
Fuente: <http://www.techni-process.com/es/trans/catalogue/fiche/cofe/487-secador-a-tomizacion-lechto-fluidizado-integrado-lis-simulacion-numerica-pasteurizacion.jpg>

Secador de lecho fluidizado

Secado

Tipos de secadores

Por su configuración y tipo de alimentación:



Fuente: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/imagenes/fig_7.3.gif



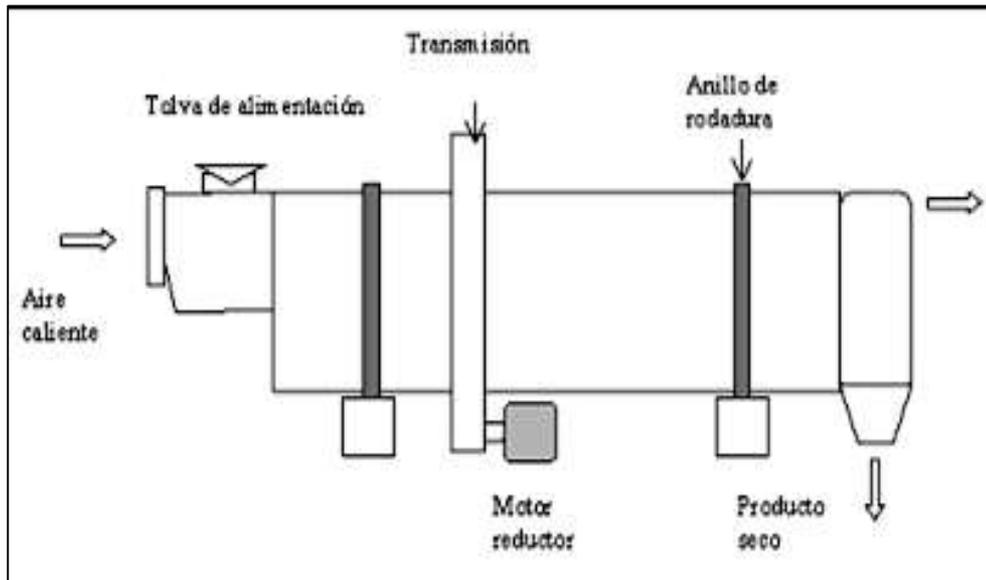
Fuente: http://011.aiimg.com/photo/0/334326443/Tunnel_dryer.jpg

Secador de túnel

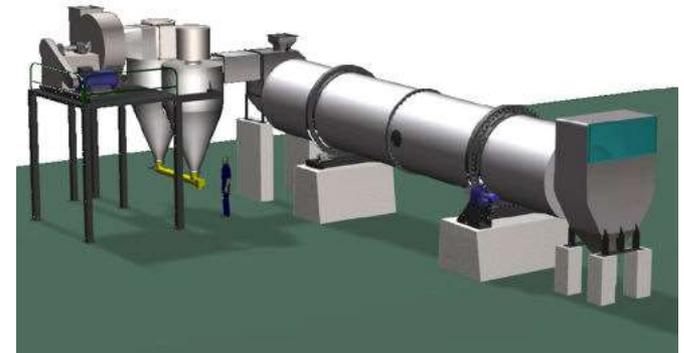
Secado

Tipos de secadores

Por su configuración y tipo de alimentación:



Fuente: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/seeds/manuales/4070035/imagenes/fig_7.8.gif



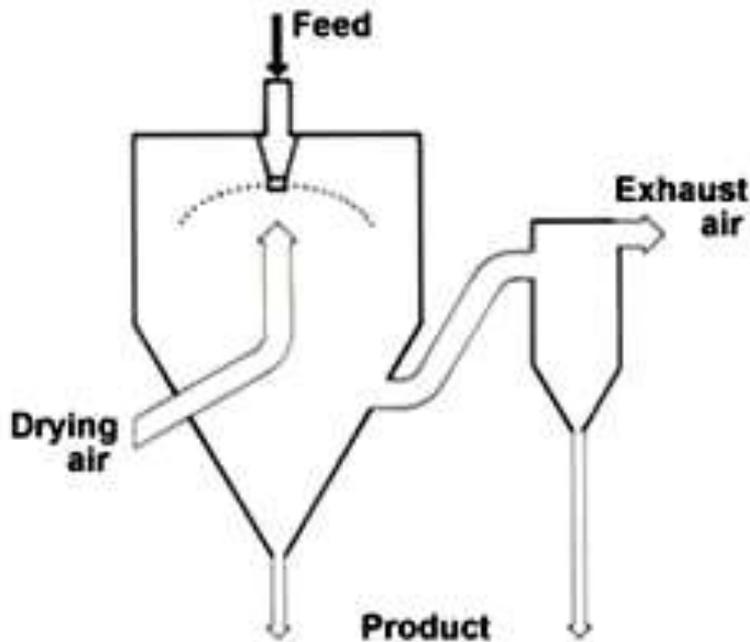
Fuente: <http://www.sertoneginy.com/ESP/imagenes/3.11%20SER%20Rotary%20Dryer.jpg>

Secador rotatorio

Secado

Tipos de secadores

Por su configuración y tipo de alimentación:



Fuente: http://www.nitronic.com/images/food_chemical/spray_dryer_typed1.jpg



Fuente: http://001.aliling.com/photo/261408841/Spray_drier.jpg

Secador por aspersión o spray dryer

Ejercicio

El polen es un subproducto apícola de alto contenido vitamínico. Sin embargo necesita un proceso de secado para su conservación. Un laboratorio va a hacer el estudio de polen con una muestra de 1600 g con 20% de humedad en base húmeda. Los datos obtenidos se muestran a continuación.

t (h)	peso (g)
0	1600
0.5	1570
1	1540
1.5	1510
2	1480
2.5	1450
3	1420
3.5	1405
4	1396
4.5	1390
5	1388
5.5	1385
6	1385

Hallar:

- La curva se secado del polen a esas condiciones.
- La humedad del polen a las 4 horas de secado.
- La humedad de equilibrio.

Solución

- 1. Obtener el peso seco:

$$\text{Peso del agua} = X_{bh} * \text{Peso total} = \frac{20\%}{100\%} * 1600 \text{ kg} = 320 \text{ kg}$$

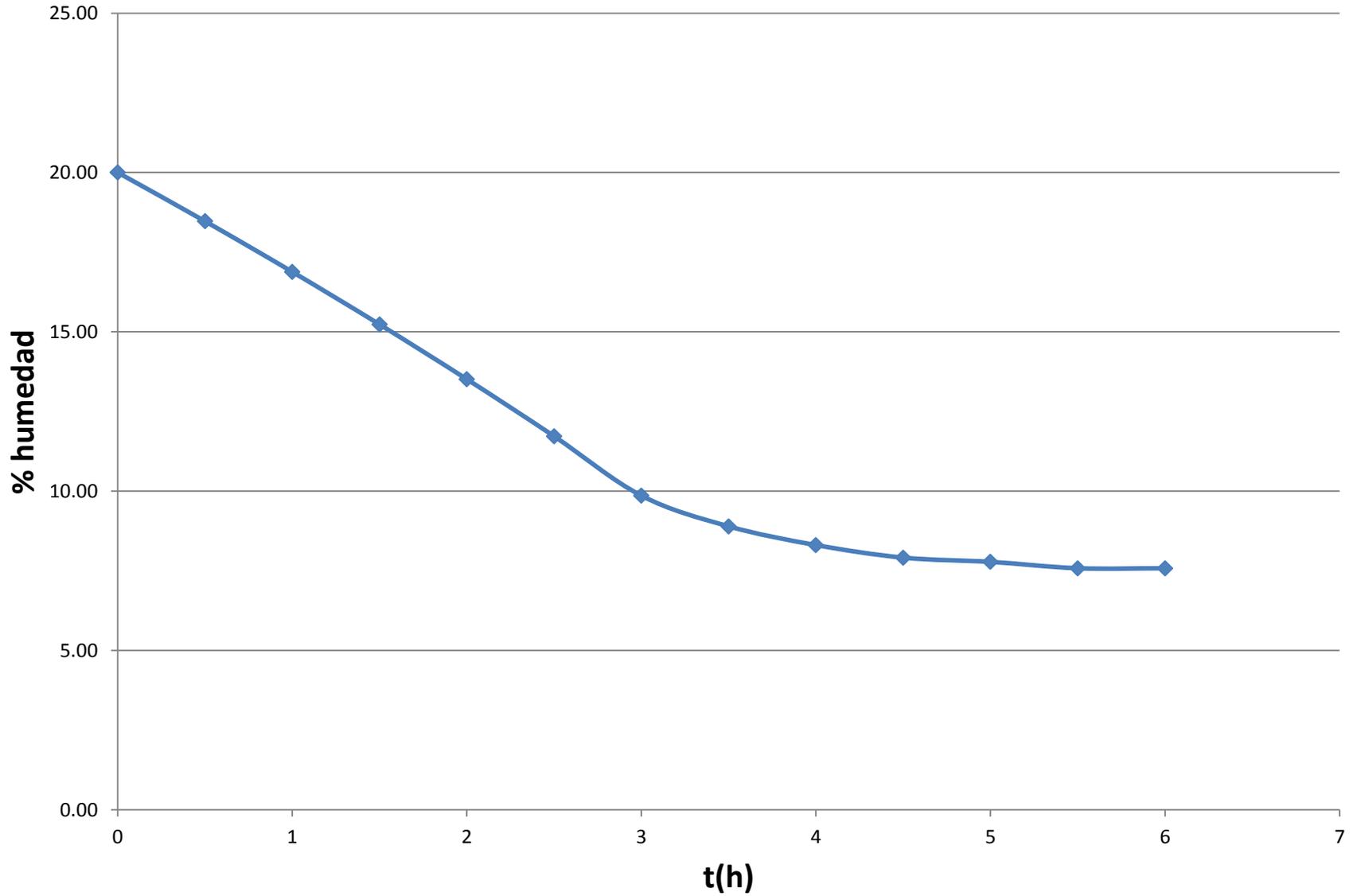
$$\text{Peso seco} = \text{Peso total} - \text{Peso del agua} = 1600\text{kg} - 320 \text{ kg} = 1280 \text{ kg}$$

- 2. Hallar el porcentaje de humedad en cada uno de los puntos.

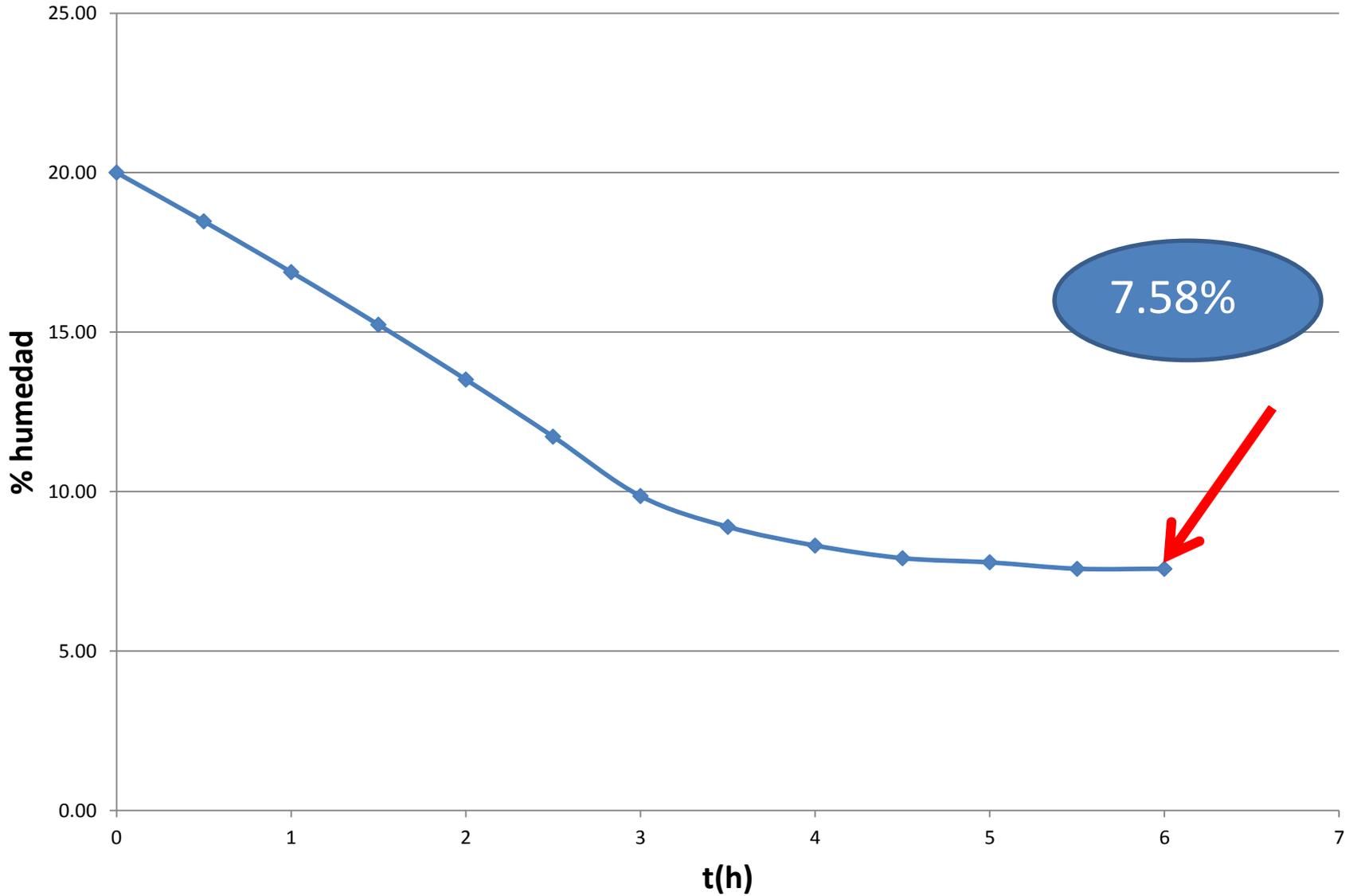
t(h)	X(%)
0	20.00
0.5	18.47
1	16.88
1.5	15.23
2	13.51
2.5	11.72
3	9.86
3.5	8.90
4	8.31
4.5	7.91
5	7.78
5.5	7.58
6	7.58

$$X_{BH}(\%) = \frac{\text{Peso total} - \text{peso seco}}{\text{peso total}} \times 100$$

- 3. Hallar la curva de secado



- 3. Hallar la humedad de equilibrio



Referencias

- **Perry's Chemical Engineer's Handbook. Green, D. Perry, R. Editorial McGraw Hill. 8ª Edición. 2008.**
- **Operaciones unitarias en ingeniería química. McCabe, W. ,Smith, J. ,Hariott, P. Editorial McGraw Hill. 4ª Edición. 1998.**
- **Operaciones de transferencia de masa. Treybal, R.E. Editorial McGraw Hill. 2ª Edición. 1997.**
- **Introducción a las operaciones de separación de contacto continuo. Marcilla Gornis, A. Editorial Compobell S.L. Murcia. 1ª Edición. 1999.**