

DESECACION

DESECACION

Métodos de secado.—Definiremos la desecación como la operación de separar el agua de un material sólido, líquido o gaseoso, si la cantidad de agua que éste contiene es relativamente pequeña.

La diversidad de los procesos de desecación es considerable, a causa de la naturaleza física y química variable de los cuerpos que deben desecarse. Habrán de ser, por tanto, muy distintas las condiciones de desecación. No es lo mismo desecar aire que acetato de etilo, madera, frutas, leche, almidón, sulfato de cobre con cinco moléculas de agua de cristalización, etcétera. En ocasiones, una desecación demasiado rápida puede ser perjudicial, como sucede en el caso de productos cerámicos, madera, etc., por ser factible entonces la producción de grietas. Por el contrario, otras veces, como sucede con ciertos productos alimenticios, interesa que la desecación sea lo más rápida posible y a temperatura moderada, a fin de no destruir su aroma, sabor, contenido vitamínico, etc. Si se trata de sustancias con agua de cristalización, habrá que procurar no eliminar aquélla en el proceso de su secado. En resumen, siempre que estudiemos una operación de desecación, habremos de fijar nuestra atención en tres factores fundamentales: naturaleza del material, naturaleza del medio desecador y velocidad de secado.

Los métodos de desecación pueden ser clasificados así:

1.—Métodos mecánicos:

Centrifugación.
Prensado.

2.—Métodos físico-químicos:

Enfriamiento.
Compresión.
Absorción.
Adsorción.
Evaporación superficial.

3.—Métodos químicos:

Descomposición del agua.
Precipitación del agua.

1.—Métodos mecánicos:

Algunos materiales, como fibras textiles, lana, etc., debido a su naturaleza fibrosa, pueden retener cantidades considerables de agua, que será fácilmente expulsada, en gran parte, mediante un proceso de centrifugación o prensado, siempre más económico que otros procesos de mayor complicación.

2.—Métodos físico-químicos:

El aire puede ser desecado, parcialmente, poniéndolo en contacto con agua suficientemente fría. También, si una solución acuosa (jugo de frutas, etc.) se *enfria* suficientemente, se separa hielo y, por tanto, tiene lugar una concentración de aquélla, del mismo modo podría llegarse a la separación del agua que acompaña a un líquido orgánico, etc.

El grado de desecación que se alcanza dependerá de la temperatura de enfriamiento, estando limitada ésta, en el caso de los líquidos, si se forman eutécticos.

Por *compresión* de un gas que contenga vapor de agua, puede llegarse a alcanzar la presión de saturación, en cuyo caso, el agua condensará y el gas se deseca. El grado de desecación dependerá del de compresión, y el método sólo será económico si, en otra etapa del tratamiento del gas, se requieren más altas presiones y puede aprovecharse ese efecto de compresión para la deshidratación.

En ocasiones, el agua es eliminada mediante agentes absorbentes que pueden ser líquidos o sólidos. Entre los primeros podemos citar: solución de cloruro cálcico al 35-40 por 100, dietilenglicol, cloruro de litio, glicerina, cloruro de cinc; una solución de cloruro cálcico (40 por 100) y glicerina (20 por 100), y otras soluciones similares. Entre los absorbentes de humedad sólidos se encuentran el cloruro cálcico pulverizado, sosa y potasa cáustica, etc.

En el proceso de colada que se sigue para algunos productos cerámicos, utilizando moldes de yeso, las paredes del molde, al absorber el agua, capilarmente, determina quede una capa de la mezcla cerámica, de espesor variable, según la duración de la colada, recubriendo el molde. También

se trata de una absorción capilar en el caso de eliminación de agua con toallas, esponjas, etc.

Adsorbentes granulares como sílica gel, alúmina activada, sulfato cálcico activado, bauxita activada, etc., presentan la propiedad de adsorber la humedad. Los adsorbentes citados son todos ellos no corrosivos, fácilmente manejables y recuperables y muy buenos desecadores.

La *evaporación superficial* es el método de desecación más importante en el caso de los sólidos, y a él, específicamente, nos referiremos en este trabajo. El método consiste en eliminar la humedad vaporizando primero el agua, que después se separa del material que se desea secar, bien con ayuda de una corriente de aire: «secado al aire» o bien practicando un vacío y arrastrando aquél hasta un condensador: «desecación a vacío».

3.—Métodos químicos:

Ciertas sustancias tienen la propiedad de *descomponer el agua* y pueden actuar como agentes desecadores. Tal es el caso del sodio metálico, que se apodera ávidamente del agua para formar hidróxido, y que actúa como buen agente desecador del éter. También los nitruros y carburos descomponen el agua y pueden servir, en ocasiones, como agentes desecadores. Generalmente, el grado de desecación alcanzable en estos casos es muy bueno, debido a que la presión de vapor de agua, en equilibrio con el compuesto que se forma, será casi siempre despreciable. Bastará conseguir buen contacto del líquido con el agente desecador, para alcanzar una desecación perfecta.

Otras sustancias, *sin descomponer el agua*, tienen la propiedad de apoderarse de ella, para formar compuestos muy estables con baja presión de vapor de agua de equilibrio, y, por tanto, capaces de actuar como buenos desecadores. Entre tales sustancias pueden citarse el pentóxido de fósforo, el óxido de bario, el perclorato magnésico anhidro, el óxido magnésico, la cal viva, los sulfatos de cobre y sodio anhidros, etc.; estas sustancias pueden emplearse tanto para desecar gases como líquidos en los que aquéllas no sean solubles.

DESECACION DE SOLIDOS POR EVAPORACION SUPERFICIAL

Comportamiento de los cuerpos durante la desecación.—Al definir la temperatura del termómetro húmedo, se acepta que la tensión del vapor de agua en la capa de tránsito, inmediatamente junto al cuerpo humedecido,

es igual a la del agua, a la misma temperatura que el cuerpo húmedo. Los cuerpos caracterizados por la igualdad, entre la tensión de vapor en su superficie y la tensión de saturación del líquido puro que los moja, se llaman *propriadamente húmedos*.

Esta igualdad sólo puede existir cuando el cuerpo que se seca es completamente insoluble en el líquido que lo moja, o cuando entre ambos no existe afinidad química que origine su combinación más o menos perfecta. En efecto, en este último caso, la separación del líquido y del sólido no es una evaporación, ya que se trata de un fenómeno químico comparable a la disociación, regida por las leyes de los equilibrios químicos que exigen una tensión de disociación para cada temperatura, que nada tiene que ver con la tensión de evaporación del cuerpo volátil puro.

Por otra parte, si el sólido se disuelve en el líquido, rebaja la tensión de vapor de éste que resulta así inferior a la correspondiente a su estado puro. En estos casos, el sistema formado por el cuerpo sólido y el líquido volátil, se llama *cuerpo higroscópico*.

Llamando P a la tensión de vapor del líquido en la superficie del cuerpo y P_s a la tensión de saturación del líquido puro, es evidente, por lo que acabamos de explicar, que para un cuerpo propriadamente húmedo $P/P_s = 1$, en tanto que para los cuerpos higroscópicos ha de verificarse $P/P_s < 1$.

Como el cociente P/P_s representa la humedad relativa de la capa de tránsito, inmediatamente junto al cuerpo, se comprenderá que en la desecación de los cuerpos higroscópicos, la línea $st-x$, del diagrama de Mollier para $\varphi = P/P_s$ ha de desempeñar un papel análogo a la correspondiente a $\varphi = 1$, para los cuerpos propriadamente húmedos.

El valor de P/P_s en los cuerpos higroscópicos, siempre menor que la unidad, depende de la concentración del agua en el cuerpo húmedo (que representaremos por T kilogramos de agua por kilogramo de sólido seco), y en menor grado, de la temperatura. La relación entre la concentración de agua en el cuerpo húmedo T y P/P_s , ha sido determinada para muchos cuerpos y constituye una característica importante en la técnica de la desecación. En la figura 1, reproducimos los resultados hallados para algunos cuerpos, y puede verse que ninguno de ellos se comporta como propriadamente húmedos, más que a partir de un límite inferior de humedad, determinado por el valor de la abscisa correspondiente a la intersección de la curva correspondiente con la horizontal trazada con la ordenada $P/P_s = 1$, límite que, probablemente, existe aún para los cuerpos menos afines para el agua o menos solubles en este disolvente.

D E S E C A C I O N

Puesto que cuando un cierto material se pone en contacto con aire de temperatura y humedad definida, durante tiempo suficiente, debe establecerse, finalmente, el equilibrio entre la presión de vapor ejercida por el agua que humedece el cuerpo y la presión de vapor correspondiente al contenido en humedad del aire, se comprende que para cada condición del aire, el material alcanzará una humedad determinada, que no se alterará aún por reiterado contacto con el mismo aire. Esta humedad definida se denomina *humedad de equilibrio*, y vendrá representada, como fácilmente se advertirá, para cada humedad relativa del aire P/P_s , por la abscisa T correspondiente de las curvas de la figura.

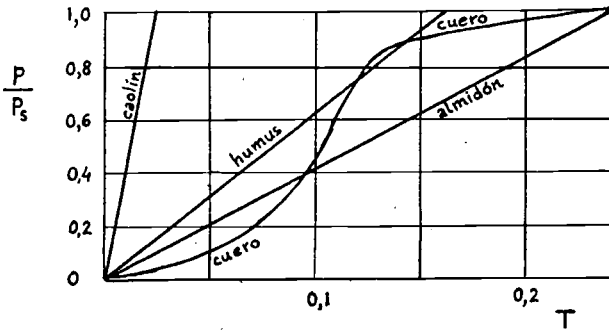


FIG. 1.— P/P_s en función de T .

Si el material contiene una humedad superior a la de equilibrio, correspondiente a la del aire con que se pone en contacto, se secará hasta alcanzar aquélla. Por el contrario, si la humedad del cuerpo es inferior a la de equilibrio, correspondiente a la del aire circundante, el material se humedecerá hasta alcanzar, también, la humedad de equilibrio.

En la figura 1, se adivina cuán variable es la humedad de equilibrio, según la naturaleza del material de que se trate.

La humedad eliminable que un material contiene, es decir, aquella en exceso de la humedad de equilibrio, se denomina *humedad libre*.

Toda el agua que humedece los cuerpos, propiamente húmedos, y la que tienen los cuerpos higroscópicos por encima del contenido en equilibrio con la humedad relativa $P/P_s = 1$, figura 1, recibe el nombre de *humedad no ligada*, para dar a entender que la presión de vapor que aquélla ejerce es la misma que la del agua pura a igual temperatura. La humedad de los cuerpos higroscópicos por bajo de la en equilibrio con

$P/P_s = 1$, figura 1, es decir, la que ejerce una presión de vapor inferior a la del agua pura a igual temperatura ($P/P_s < 1$) se denomina *humedad ligada*.

Supongamos se trata de un cuero con una humedad de 0,4 kgs. agua por un kg. de cuero seco, que debe ser desecado en presencia de aire con una humedad relativa del 30 por 100.

La *humedad de equilibrio* de este cuero es de 0,08 kgs. de agua por un kg. de cuero seco, como se deduce en la figura 1, buscando la abscisa T que corresponde para una ordenada $\varphi = 0,3$ en la curva del cuero. La *humedad libre* será, pues, $0,4 - 0,08 = 0,32$ kgs. de agua por cada kilogramo de material seco. Puesto que la curva correspondiente al cuero corta a la horizontal trazada por $P/P_s = 1$, en un punto de abscisa $T = 0,23$ la *humedad no ligada* será $0,40 - 0,23 = 0,17$ kgs. de agua por un kilogramo de cuero seco y la *humedad ligada* 0,23 kgs. de agua por kilogramo de material seco.

Conviene hacer notar que, así como la *humedad ligada* y la *no ligada* dependen sólo de la naturaleza del cuerpo húmedo, la *humedad de equilibrio* y la *libre* dependen del estado del aire desecante, además, claro está, de la naturaleza del cuerpo, según acabamos de ver.

Mecanismo de la desecación.—Supongamos un cuerpo húmedo en el que el agua (o el líquido que debe ser separado por evaporación superficial), se encuentra uniformemente repartida en toda su masa. Expuesto a una atmósfera no saturada empezará la *evaporación* en la superficie, con lo cual la humedad de la misma descenderá. Para que el proceso de desecación pueda seguir, es evidente que el agua evaporada debe ser reemplazada por otra procedente del interior del cuerpo húmedo. Esta emigración del agua hacia la superficie es un fenómeno de difusión que dependerá, según sabemos, de la diferencia entre las humedades en el interior del cuerpo y en la superficie, diferencia que será siempre positiva, mientras exista evaporación. La marcha de este fenómeno es muy complicada, porque la difusión está determinada por el gradiente de concentración, o sea, por el cociente de la diferencia de concentración de dos capas por la distancia entre las mismas, gradiente que varía con la distancia a la superficie y con el grado de desecación alcanzado en el momento que se considere.

La evaporación superficial requiere dos fenómenos previos: La difusión del agua líquida a través del cuerpo húmedo y la transmisión de calor desde el aire (suponemos se trata de desecación con aire, sin otra

D E S E C A C I O N

fuelle de calor), a través de la capa de tránsito gaseosa formada sobre la superficie del sólido. Finalmente, el vapor formado ha de difundirse a través de la capa de tránsito citada hacia el aire que ha de llevarse la humedad por convección. Por lo tanto, la velocidad de evaporación superficial, vendrá determinada por el más lento de los fenómenos citados.

La velocidad de difusión del vapor a través de la capa de tránsito depende del espesor de esta capa que, como es sabido, puede disminuirse aumentando la velocidad del aire y de la diferencia entre las presiones parciales del vapor en la superficie interfacial y en el aire. La presión parcial del vapor en la superficie del sólido está determinada por la temperatura del mismo que, como sabemos, se confunde muy pronto con la del termómetro húmedo, determinada, a su vez, por la temperatura y humedad iniciales del aire empleado para la desecación.

La velocidad de la evaporación superficial dependerá de la cantidad de calor transmitido desde el aire a la superficie por unidad de tiempo,

$$dQ$$

que sabemos puede expresarse así: $\frac{dQ}{d\theta} = hS (t - t_w)$ siendo t , la tempera-

tura del aire y t_w la del termómetro húmedo, que es, también, la del equilibrio del cuerpo que se deseca. Los kilogramos de agua evaporada en la unidad de tiempo se obtendrán dividiendo las calorías que llegan $dQ/d\theta$ por el calor latente r_w a la temperatura de equilibrio del cuerpo t_w . Se denomina *potencial de desecación* al gradiente de temperatura $t - t_w$; este potencial representa la influencia del aire sobre la velocidad de desecación.

El otro fenómeno que puede acelerar o retardar la velocidad de desecación, es el de la difusión acuosa a través del cuerpo. Si esta difusión es muy lenta, la concentración de la humedad en la superficie del cuerpo podrá llegar a ser mucho más pequeña que en el interior, hasta el punto de que la superficie puede ya comportarse como cuerpo prácticamente seco, cuando en el interior la humedad continúa siendo casi la misma que al empezar la operación del secado. Este caso, que se presenta con frecuencia, debe ser evitado casi siempre. En efecto, el cuerpo seco muchas veces presenta una estructura desprovista de poros y que, por tanto, dificulta la difusión y el secado, siendo evidente que siempre que se presente este fenómeno, una velocidad de desecación rápida en los primeros momentos retrasa la desecación definitiva.

Otro inconveniente de la desecación rápida de la superficie es el originado por la contracción que experimentan los cuerpos al perder su

humedad. Por ejemplo, las pastas de arcilla, caolín, etc., empleadas en las industrias cerámicas, a las que se moldea o se da forma en el torno en estado muy húmedo, sufren al secarse una contracción que representa varias centésimas de sus dimensiones lineales, y si esta contracción progresa mucho más de prisa en la superficie que en el interior, se crean tensiones que originan el agrietamiento y rotura de las piezas antes de la cocción. Lo mismo le pasa a la madera; y es sabido que para obtener tablas sin grietas y sin deformaciones, es necesario que su desecación sea extraordinariamente lenta y uniforme. Por causa análoga se produce el abarquillamiento de los cuerpos que tienen forma de lámina, cuando se desecan más rápidamente por una de las caras.

En todos estos casos se impone un secado lento, y, por tanto, el empleo del aire con un potencial de desecación pequeño, y adaptado convenientemente no sólo a la naturaleza del cuerpo que se seca, sino también al grado de desecación alcanzado. De aquí el interés que va adquiriendo el acondicionamiento del aire para la desecación de cuerpos, cuyo volumen depende considerablemente de su humedad, cuando tiene importancia la conservación de su estructura y de su forma.

La temperatura del cuerpo húmedo, como sabemos, pasa a ser rápidamente la del termómetro húmedo correspondiente a la humedad primitiva del aire que se introduce en el aparato de desecación. Por lo tanto, la temperatura de este aire no puede influir en el cuerpo que se seca, mientras éste se comporta como propiamente húmedo. Esta condición no se cumple en ningún caso al final de la desecación, pues, como ya hemos dicho en otro lugar, todos los cuerpos se convierten en higroscópicos, si su humedad es suficientemente pequeña, es decir, después de perder su humedad no ligada. Tampoco se cumple cuando la difusión de la humedad es muy lenta, pues, en este caso, la superficie del cuerpo se deseca rápidamente y adquiere una temperatura superior a la del termómetro húmedo, y más o menos próxima a la del aire, según sea menor o mayor la cantidad de agua acarreada, por difusión, a su superficie. Por lo tanto, en muchos casos, la temperatura del cuerpo que se deseca, puede alcanzar valores próximos a la del aire empleado en la desecación, y esta posibilidad hay que tenerla en cuenta cuando se trate de cuerpos sensibles al calor.

La temperatura puede influir en el cuerpo que se deseca de dos modos distintos. En primer lugar, puede producir su alteración química, originando fenómenos de pirogenación, oxidación, etc., que modifican los caracteres organolépticos y químicos del cuerpo desecado. Frecuentemen-

te, hay que tener en cuenta, también, la posibilidad de que un secado demasiado profundo origine la pérdida de agua de constitución, que en muchos casos debe evitarse. Otra posibilidad de influencia de la temperatura sobre un cuerpo húmedo está en la formación de un gel o de una fase homogénea, o disolución, cuando el cuerpo sólido se calienta con el líquido que lo humedece a una temperatura excesiva; en este caso, la estructura del cuerpo que se deseca sufre una variación profunda que puede persistir en el cuerpo desecado.

Métodos de desecación.—Como la mayoría de las operaciones industriales, la desecación puede llevarse a cabo continua y discontinuamente. En el primer caso, dentro del aparato se encuentran siempre materiales en diferente fases de desecación. El cuerpo que se quiere secar se introduce en el secadero de un modo rigurosamente continuo o por porciones relativamente pequeñas, si se compara con la capacidad total del aparato, y se saca del mismo, al grado de desecación exigido, de modo análogo al de su introducción. Por el contrario, cuando se opera discontinuamente, la totalidad del material húmedo se introduce de una vez en el secadero y permanece en él hasta que está suficientemente seco, en cuyo momento se descarga totalmente para repetir la operación con nuevo material. Para producciones irregulares y pequeñas, el procedimiento discontinuo tiene la ventaja de una mayor sencillez de instalación y facilidad para controlar la operación. En cambio, exige mayor mano de obra y consumo de energía, ya que hacia el final de la operación el aire tiene que salir del aparato muy distante de las condiciones de saturación y a temperatura elevada. Ambos inconvenientes se evitan en la marcha continua, que es la única económica cuando se trata de producciones elevadas.

Algunos aparatos de funcionamiento continuo son recorridos de uno a otro extremo, a la vez, por el cuerpo que se seca y por el aire que ha de arrastrar la humedad. Esta circulación puede tener lugar en la misma dirección y sentido (corrientes paralelas), en la misma dirección y en sentido contrario (contracorriente) y en direcciones normales (corrientes cruzadas). Las ventajas e inconvenientes, así como los casos particulares a que mejor se adaptan, van a ser estudiados a continuación.

Corrientes paralelas:

En los aparatos que trabajan en estas condiciones, el aire, a la temperatura y con el potencial de desecación máximos, entra inmediatamente

en contacto con el material más húmedo. Por lo tanto, la desecación en los primeros momentos es muy rápida, y si la difusión del agua en el material húmedo no lleva la misma marcha, su temperatura puede elevarse considerablemente. Por consiguiente, si se opera con corrientes paralelas, es preciso que el material con la máxima humedad no sea sensible a las temperaturas altas y, además, que tolere en este estado una desecación rápida. Hacia el final de la desecación, las condiciones son completamente opuestas. El material relativamente seco está en contacto de aire húmedo y frío; por lo tanto, no puede sobrecalentarse y, además, su desecación progresa lentamente; lo que, en determinados casos, puede ser necesario o conveniente. Si el cuerpo que se seca, hacia el final de la operación, se comporta como higroscópico, es evidente que el bajo potencial de desecación del aire no permitirá llegar a un secado profundo.

Contracorriente:

Las condiciones, en este caso, son completamente opuestas a las anteriores y, por lo tanto, el procedimiento será ventajoso cuando el cuerpo en estado de desecación avanzado es insensible o poco sensible a la temperatura y, además, tolera una velocidad elevada de desecación o cuando en estado muy húmedo no puede someterse a una desecación rápida o a una temperatura alta. Para llegar a estas conclusiones, basta recordar que, con el sistema de contracorriente, el aire caliente y seco, es decir, con el máximo potencial de desecación, encuentra, en primer lugar, al cuerpo ya casi completamente seco, en tanto que el aire humedecido y enfriado antes de salir del aparato, agota su capacidad de desecación con el cuerpo recién introducido y con la humedad máxima.

Corrientes cruzadas:

En este sistema de desecación, el cuerpo que se seca avanza perpendicularmente a la dirección del aire. Por lo tanto, el aire a temperatura y potencial de desecación máximos, se pone en contacto del producto en todas las fases de desecación, y el procedimiento ha de tener todas las exigencias desfavorables de los anteriores sin ninguna de sus ventajas.

No es necesario decir que cualquiera que sea el sistema de corrientes que se emplee, la calefacción puede realizarse por etapas o en el interior del secadero y que, en todo caso, es también posible rebajar el potencial de desecación del aire nuevo, mezclándolo con una parte del que sale del aparato húmedo y frío.

Clasificación y descripción de los desecadores.—Cada uno de los procedimientos de desecación, cuyo fundamento acabamos de exponer, exige determinadas condiciones de los aparatos en los que se ha de llevar a cabo la operación. Si a esto unimos la inventiva de los constructores y la diversidad de los productos que son objeto de desecación, no puede sorprender que el número de aparatos con características merecedoras de atención sea muy elevado. Remitimos al lector interesado a obras (6) que dan amplia descripción y detalle de estos aparatos, a los que aquí sólo podremos referirnos muy brevemente.

Adoptaremos la clasificación que sigue, a fin de pasar revista a los más importantes:

*Desecadores
intermitentes:*

Material en forma de láminas o masas conducibles en transportadores o bandejas.	}	Habitaciones desecadoras.	}	Atmosféricas.
		Armarios o cámaras de desecación.		A vacío.

*Desecadores
continuos:*

Material en forma de láminas o masas conducibles en transportadores o bandejas.	}	Desecadores de túnel.	}	Circulación en paralelo.
				Circulación en contracorriente.
Materiales granulares, sueltos.	}	Desecadores rotatorios.	}	Circulación cruzada.
				Calefacción directa.
				Calefacción indirecta.
				Aire caliente.
				Gases de combustión.
				Circulación en paralelo.
				Circulación en contracorriente.
				Circulación cruzada.

Láminas continuas.	{	Desecadores de cilindros.	
Pastas o tortas de cristales.		Desecadores con agitación.	
Materiales en solución.	{	Tambores desecadores.	{ Atmosféricos. A vacío.
		Desecadores de pulverización.	

Desecadores intermitentes:

Habitaciones desecadoras.—El desecador más sencillo y, por tanto, conocido desde más antiguo, consiste en una simple habitación, en cuyo interior se instalan, convenientemente, elementos de calefacción (ordinariamente el agente calefactor es vapor de agua). En esta clase de desecadores han venido secándose, durante mucho tiempo, cuero, cartón, papel, etc. Fácilmente se advertirán los inconvenientes de estos desecadores. En los ángulos de la habitación siempre se estacionan masas de aires que apenas se desplazan, mientras que en otras zonas la velocidad es excesiva, resultando, por tanto, muy difícil la distribución uniforme del aire caliente. No será posible conseguir un producto uniformemente desecado, a no ser que se prolongue exageradamente el tiempo de permanencia del material en el desecador con el consiguiente detrimento de rendimiento. Tampoco resulta conveniente la descarga gradual de material seco y su sustitución por material húmedo, pues la humedad del aire variaría de tal forma, que se retrasaría aun más la desecación total del material ya parcialmente desecado.

Armarios o cámaras de desecación.—En los armarios o cámaras de desecación, el producto húmedo se instala en bandejas de modo que presente una gran superficie de contacto con el aire, en capas de espesor lo más pequeño posible. En algunos casos estas bandejas están calentadas interiormente con vapor o con agua caliente en circulación, lo que sólo es ventajoso cuando la temperatura ha de ser muy baja y uniforme. Generalmente, lo que se calienta es el aire que circula entre las bandejas, impulsado por un ventilador, y la calefacción se lleva a cabo con resistencias eléctricas, si esta clase de energía es barata, o mediante radiadores alimentados con vapor. En la figura 2, hemos representado un armario

D E S E C A C I O N

de desecación que permite hacer recircular una parte del aire húmedo, circunstancia, generalmente, ventajosa en aparatos pequeños, tanto por disminuir el potencial de desecación, cosa necesaria en muchas ocasiones, como por el mayor aprovechamiento del aire y, por tanto, del calor, ya que con un contacto tan corto del cuerpo húmedo con el aire es imposible que éste se sature y, por tanto, rinda en un solo paso toda la capacidad de desecación que le comunica el radiador.

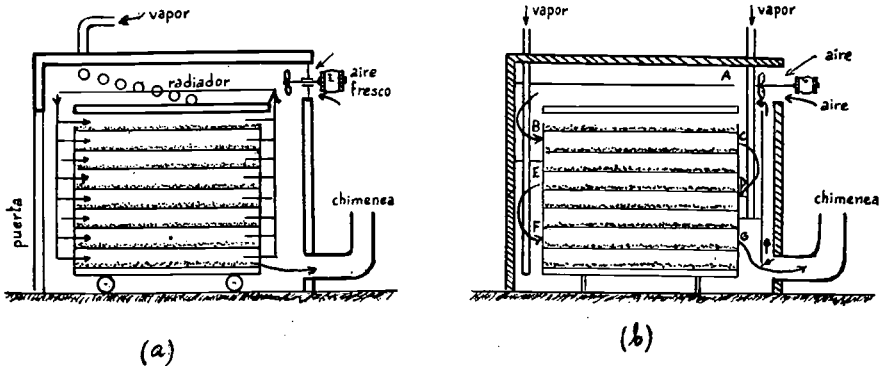


FIG. 2.—Cámara de desecación

En la figura 2 (b), se ha representado una cámara de desecación construida de modo que el aire pueda recalentarse repetidamente en el interior del desecador, y con tabiques separadores situados de tal forma, que el aire, después de calentado a la izquierda por un radiador de vapor, sólo pueda circular sobre un número limitado de bandeja; a su salida vuelve a calentarse en otro radiador de vapor situado a la derecha, y los tabiques mencionados le hacen circular hacia la izquierda, y así, sucesivamente, hasta que sale por el ángulo inferior derecha hacia la chimenea, o bien parte de él es mezclado con el aire fresco, mediante un conducto lateral situado a la derecha con una compuerta que se abre o cierra a voluntad.

La ventaja de este procedimiento de recalentamiento repetido del aire representado en la figura 2 (b), sobre la simple calefacción inicial de aire representada en la figura 2 (a), se advierte claramente en un diagrama de Mollier, figura 3.

El punto A del diagrama representa las condiciones de humedad x_0 y temperatura t_0 del aire que entra en el desecador; en la primera calefacción el paso del aire es AB; de B a C (curva BC adiabática, aproximada-

mente isoentálpica), el aire se enfría al humidificarse adiabáticamente en su función desecadora; entonces vuelve a recalentarse CD, y así, sucesivamente, hasta salir con una humedad x_n , sin haber rebasado nunca la temperatura t_1 . En la figura 2 (b), se han representado las letras coincidentes

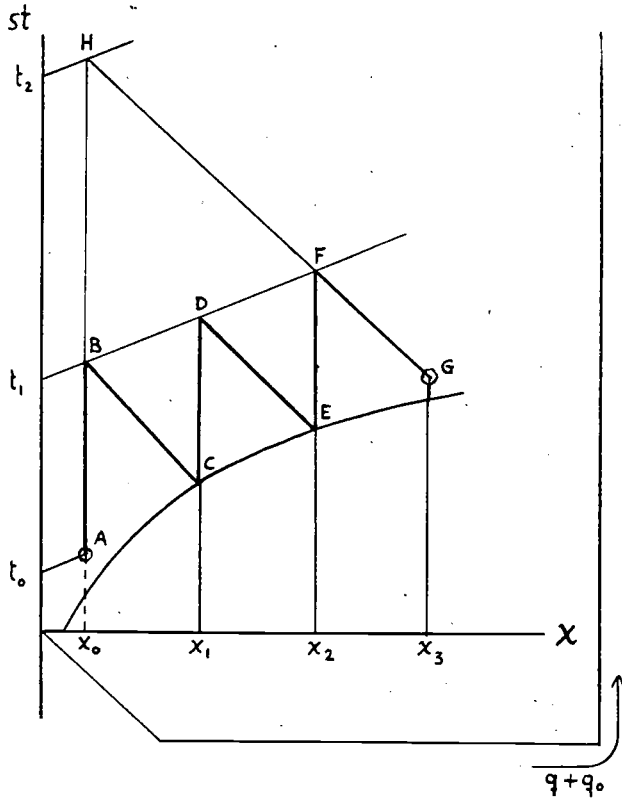


FIG. 3.—Efecto de la calefacción repetida en una desecación

con las diversas posiciones en el diagrama de Mollier. Si el material que se deseca es de tal naturaleza que no puede ser calentado a temperatura superior a t_1 , mediante este proceder, sin rebasar tal temperatura, se consigue que cada kilogramo de aire seco inicial arrastre consigo $x_n - x_1$ kilogramos de vapor de agua. Para haber conseguido tal efecto con sólo una calefacción inicial de aire, hubiera sido necesario, como se aprecia en el

DESECACION

diagrama de Mollier, haberlo calentado hasta t_2 , temperatura muy superior a t_1 y que no soportaría el material en cuestión. Además de la ventaja expuesta, la calefacción repetida del aire permite que el necesario para eliminar una porción dada de humedad sea muy inferior al que se requeriría de la otra forma, es decir, que las pérdidas de calor sensible en el gas de salida sean mucho menores.

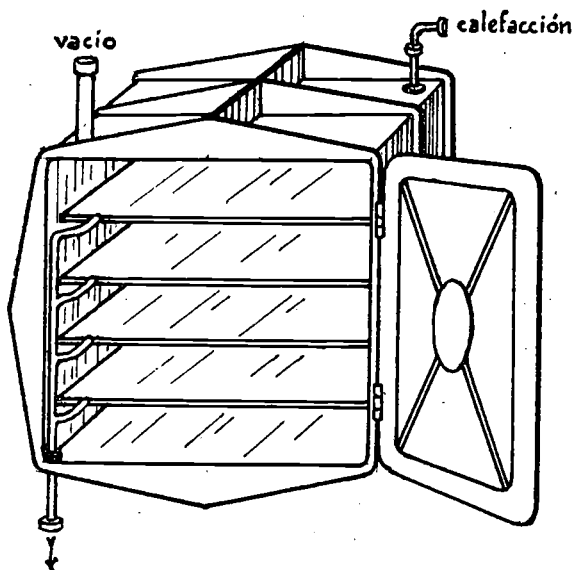


FIG. 4.—Armario de desecación en vacío

La desecación de productos orgánicos delicados y sensibles a la temperatura, se realiza frecuentemente en armarios de vacío en los cuales la calefacción es interior, y se lleva a cabo mediante placas sobre las que se coloca, en bandejas, el producto que se ha de desecar, y por las cuales se hace circular agua a la temperatura conveniente o vapor. En la figura 4, puede verse uno de estos aparatos contruídos de fundición y con una puerta que ajusta herméticamente mediante una junta de caucho dispuesta en el marco de la misma.

Desecadores continuos:

Desecadores de túnel.—Un tipo frecuente de desecador continuo es el llamado de túnel, que, en principio, no es más que un armario a lo largo

del cual se mueven, de un modo continuo, armazones montados sobre ruedas que sostienen bandejas con el producto que se deseca, figura 5.

La calefacción del aire puede realizarse de una sola vez en uno de los extremos del túnel, o bien, si éste se divide en secciones, sacándolo al final de cada una de ellas y recalentándolo antes de que pase a la siguiente. Anteriormente, figura 3, ya hemos explicado la diferencia entre ambos métodos de calefacción. También es posible la calefacción interior y uti-

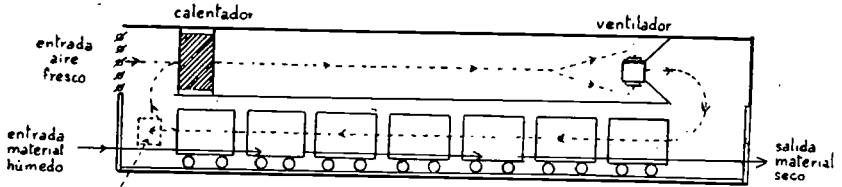


FIG. 5.—Desecador de túnel

lizar circulación en paralelo o contracorriente y, si es preciso, obligar al aire a describir un camino en espiral o zig-zag que lo lleva a los elementos de calefacción, mediante ventiladores montados en el interior y a lo largo del túnel. Las ventajas e inconvenientes de los distintos procedimientos de circulación del aire ya fueron citados anteriormente.

Desecadores rotatorios.—Los productos constituídos por trozos sin tendencia a adherirse formando terrones excesivamente grandes, se desecan con facilidad en aparatos tubulares rotatorios constituídos por un tubo ligeramente inclinado hacia uno de los extremos, por el que se ha de descargar el producto seco. Este, en estado húmedo, se introduce por el extremo más alto de un modo continuo, en tanto que el aire entra por uno u otro extremo, según que la desecación tenga que realizarse en corrientes paralelas o en contracorriente. La calefacción de los desecadores rotatorios puede hacerse de muy diversos modos. Frecuentemente, se calienta el aire antes de introducirlo en el tubo, y muchas veces el agente de desecación está constituído por los gases resultantes de la combustión de carbón o de gas pobre. Otras veces, la calefacción es exterior o bien se realiza por medio de una camisa, por la cual circula vapor de agua. En este tipo de desecadores es muy importante la distribución del material en el interior del tubo en capas de pequeño espesor. Para conseguirlo se montan interiormente láminas metálicas de forma muy variada, una de las cuales

D E S E C A C I O N

puede verse en la figura 6 (b), que hace innecesaria toda explicación. En la misma figura (a), se ha representado un desecador rotatorio, calentado directamente en contracorriente con aire caliente.

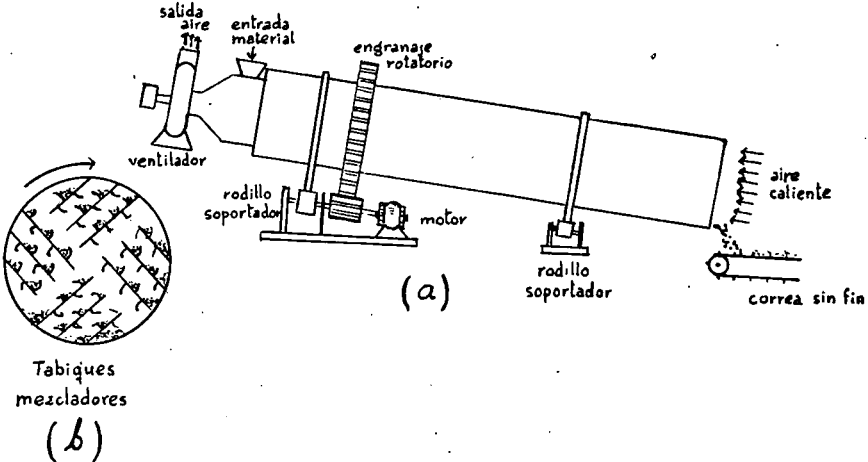


FIG. 6.—Desecador rotatorio con calefacción directa en contracorriente, con aire caliente

Desecadores de cilindros.—Estos desecadores son típicos de las fábricas de papel, donde éste resulta en forma de lámina continua que interesa desecar completamente y a la misma velocidad con que es producida. En

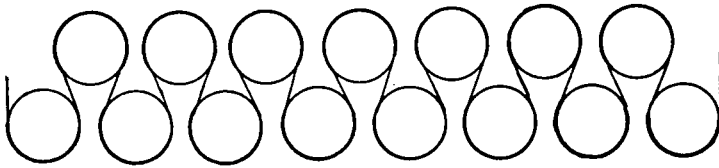


FIG. 7.—Desecador de cilindros

la figura 7, se ha esquematizado un desecador de esta clase. La lámina de papel recién formada se desliza en zig-zag sobre la superficie de un cierto número de cilindros de superficie pulida y huecos, por cuyo interior circula vapor de agua de calefacción. La temperatura de los cilindros, número de éstos y velocidad de rotación de los mismos, son los conve-

nientes para que el papel pueda secarse con la misma velocidad con que se produce.

A veces, estos desecadores pueden ser utilizados para materiales pastosos, que se depositan sobre una banda de tejido adecuado que se desliza entre los cilindros soportando el material que se desea desecar.

Desecadores con agitación.—Como su nombre indica, consisten en cilindros horizontales o verticales, convenientemente calentados, en los que se consigue una agitación mecánica mediante un eje de paletas que gira. Estos aparatos, unas veces tienen dispositivo para la entrada y salida continua del material, otras trabajan intermitentemente, a veces constituyen una cámara cerrada a la que puede aplicarse una bomba de vacío para facilitar la evaporación del agua y la eliminación del vapor formado, ya que en estos aparatos nunca se utiliza corriente de aire para arrastrar el vapor. Constituyen, en realidad, verdaderos evaporadores.

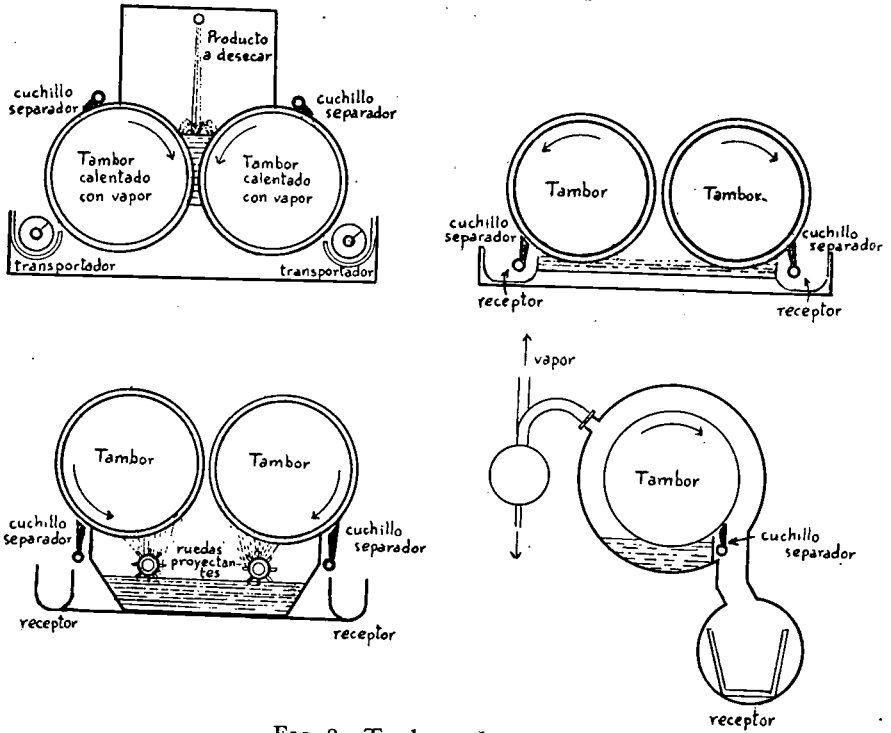


FIG. 8.—Tambores desecadores

Tambores desecadores.—Esta clase de desecadores consiste en uno o dos tambores o rodillos dotados de movimiento de rotación y calentados, interiormente, con vapor de agua, que reciben sobre su superficie caliente una papilla de concentración tal, que su evaporación en evaporadores usuales resultaría poco práctica, y que al depositarse sobre los rodillos, en forma de capa, de espesor variable, según los casos, recibe calor suficiente en una revolución completa de los rodillos, para acabar de eliminar totalmente su contenido acuoso. El material seco es separado de los tambores mediante una cuña convenientemente situada.

Son numerosas las variaciones en este tipo de desecadores, que pueden constar de uno o dos rodillos, trabajar a presión atmosférica o a vacío, recibir el alimento en forma de chorro en la porción que queda entre ambos, o recogerlo ellos mismos al sumergirse parcialmente en la papilla, o bien recibirlo proyectado al estar situados sobre el recipiente que contiene la papilla, con unas ruedas de paletas que al girar producen su proyección; algunos de estos tipos se han esquematizado en la figura 8.

Desecadores de pulverización.—Consisten en unas cámaras por las que circula, según los casos, aire caliente o gases de combustión, y en donde

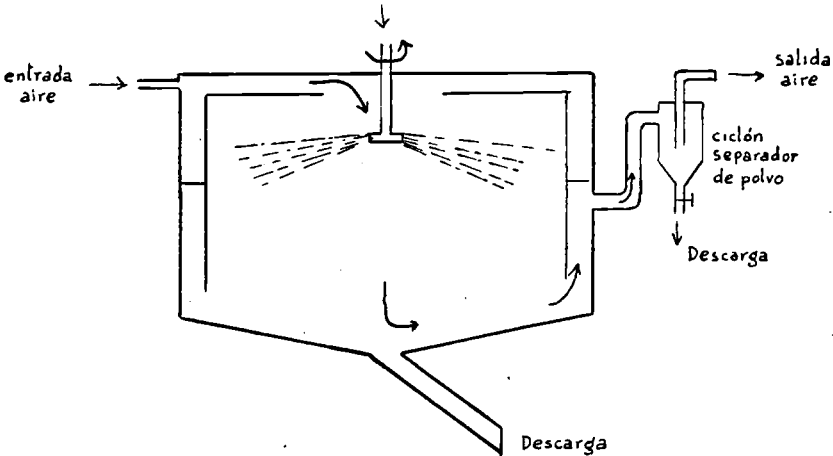


FIG. 9.—Desecador de pulverización

se pulveriza, ordinariamente, mediante un disco que gira a gran velocidad, una solución. Las gotas de la misma, antes de tener tiempo de llegar al fondo o paredes de la cámara, pierden su agua completamente y con

extraordinaria rapidez. El polvo así formado se suele acumular en el fondo de la cámara, debido a su peso; un rastrillo conveniente que gira permite eliminarlo continuamente. A la salida de la cámara el gas se hace circular por un ciclón, a fin de separar los finos que pudiera haber arrastrado. En la figura 9, reproducimos un desecador de esta clase. Es importante que las dimensiones de la cámara y la velocidad y temperatura del gas desecador sean tales que las gotas se desequen totalmente antes de llegar a las paredes, donde se adherirían formando una cubierta pastosa.

Para la desecación de pequeños cristales, suelen utilizarse unos desecadores tubulares verticales, en cuya base se introducen continuamente los pequeños cristales que se arrastran hacia arriba a lo largo del tubo, mediante una corriente de aire caliente. Los cristales son transportados por éste al mismo tiempo que se desecan, y si el tubo es suficientemente largo, llegan a su extremo superior completamente secos. Si es necesario el recorrido del aire que arrastra los cristales, se alarga haciéndolos pasar a otro tubo, también vertical. Finalmente, la mezcla del aire y del cuerpo seco se separa en un ciclón. Este tipo de aparatos es muy eficaz para el secado de cuerpos sensibles a la temperatura (perborato sódico, por ejemplo), ya que la desecación se realiza en pocos segundos en corrientes paralelas, y el producto no llega a calentarse mucho ni tiene oportunidad de descomponerse en el breve tiempo que dura la operación.

Desecación con radiaciones infrarrojas y desecación dieléctrica.—En los párrafos anteriores hemos estudiado la desecación por medio del aire. Una gran parte de la energía necesaria para este proceso es suministrada por el propio aire, y la operación tiene lugar con la máxima economía térmica. En cambio, la velocidad de desecación tiene un límite impuesto por la velocidad de transmisión del calor desde el aire al cuerpo húmedo, a través de la capa de tránsito, según vimos. Por lo tanto, el secado con aire, aun de las sustancias que toleran grandes potenciales de desecación, es forzosamente lento. Para acelerarlo es preciso introducir rápidamente en el cuerpo húmedo grandes cantidades de calor, lo que, como sabemos, sólo es posible calentándolo por radiación. De aquí que el moderno procedimiento de desecación, mediante radiaciones infrarrojas (8), que empezó a aplicarse en las fábricas de automóviles y aeroplanos, para secar rápidamente los barnices, cada día encuentra un campo más vasto de aplicaciones.

El generador térmico es una lámpara eléctrica provista de reflector, que proyecta las radiaciones sobre el objeto que se quiere desecar. Este

adquiere rápidamente una temperatura superior a la del aire, que depende de sus propiedades ópticas, y la calefacción no queda limitada a la superficie, sino que penetra en la substancia húmeda, más o menos profundamente, según su transparencia para las radiaciones infrarrojas. Generalmente, los objetos que se quieren secar, se disponen sobre una banda transportadora que pasa cerca de las lámparas eléctricas, situadas en el interior del secadero, que muchas veces tiene la forma de túnel.

La desecación dieléctrica consiste en hacer que el material que se desea desecar constituya el dieléctrico de un condensador constituido por dos láminas metálicas conectadas con los terminales de un generador eléctrico de alta frecuencia; durante una fracción del ciclo eléctrico la lámina superior está cargada positivamente y la inferior negativamente; se crea, por tanto, una cierta tensión sobre las moléculas del material húmedo que funciona como dieléctrico. Medio ciclo más tarde, se invierten las polaridades así como la tensión sobre el material. Como el cambio de polaridad ocurre con extraordinaria rapidez (2×10^6 a 100×10^6 veces por segundo), este campo eléctrico, que oscila tan rápidamente, genera calor en el material húmedo, debido a la rápida variación de tensiones sobre sus moléculas, a las que se somete a un intenso rozamiento generador de calor. La uniformidad de calefacción en toda la masa, quizás sea la característica más importante de este método de desecación que le distingue de los otros métodos, en que el calor sólo llega al centro de la masa del cuerpo que se deseca a medida que aquél se va secando. Las aplicaciones de este método son numerosas; por ejemplo, ya es una realidad en el caso de la penicilina (3) y se halla en pleno estudio su uso para productos cerámicos (9), madera (1), plásticos (2), papel (5) y fibras textiles (7).

OPERACIONES AUXILIARES EN LOS PROCESOS DE DESECACION

Acondicionamiento del aire para la desecación.—Según vimos, la diversidad de procesos de desecación obliga a variadas maneras de conducirla. Resultará, pues, indispensable en muchas ocasiones, un acondicionamiento de aire a fin de que tenga la temperatura y humedad que convenga. En invierno, en general, el aire es muy frío y consecuentemente seco; aunque esta última cualidad es, en la mayoría de los casos, deseable, la baja temperatura del mismo, obligará a un consumo conside-

rable de calor en la precalefacción. El aire, al atravesar el desecador se enfría, puesto que de él parte el calor latente gastado en la vaporización del agua del material húmedo, pero aun así, a su salida, su temperatura, ordinariamente, supera con mucho, sobre todo, en invierno, a la del aire exterior. Resulta, pues, casi inexcusable el aprovechamiento de ese calor sensible contenido en el aire húmedo que abandona el desecador. Podría utilizarse un cambiador de calor y, de esta forma, aprovechar el calor sensible del aire húmedo residual para la precalefacción del aire seco de entrada. Este método tendría la ventaja de conservar la baja humedad del aire inicial, pero un precalentador en estas condiciones debería ser de grandes dimensiones, a causa del pequeño coeficiente de transmisión de calor desde el gas residual al aire de entrada a través de la pared metálica.

Otro método consiste en recircular aire que sale del desecador después de deshumidificarlo convenientemente hasta el grado que se desee, poniéndole en contacto con agua a la temperatura adecuada y recalentándolo a continuación hasta la temperatura conveniente. El método resulta satisfactorio si el aire que sale del desecador está casi saturado, pero si la humedad del aire residual no es muy elevada, la cantidad de aire que hay que enfriar y luego calentar es tan grande que el rendimiento calorífico es muy pequeño. En estas circunstancias, como sucede al final de la desecación en el caso de una operación intermitente, pueden obtenerse mejores resultados recurriendo a un tercer método, que consiste en deshumidificar lo más posible sólo una porción del aire húmedo residual, que luego, al mezclarla con el resto sin deshumidificar, deja el conjunto con el grado de humedad que se desee.

Bien se utilice aire nuevo, o recirculado, es necesario mantener continuamente constantes las condiciones de humedad y temperatura del aire que entra en el desecador. Se necesitarán para ello mecanismos automáticos que corrijan cualquier desviación de las condiciones requeridas. Existen en el comercio válvulas que mediante mecanismo especial y variado, accionado por un termómetro, se abren al descender la temperatura por debajo de un cierto límite, y se cierran cuando la temperatura rebasa ese límite. Si al abrirse o cerrarse la válvula deja pasar o interrumpe el paso de vapor de calefacción que circula por el interior del radiador que calienta el aire de entrada, se comprende pueda regularse perfectamente la temperatura de éste. Si otra válvula de esta clase se acciona por un termómetro cuyo depósito está envuelto en un paño humedecido, puede mantenerse, también, constante la temperatura húmeda, es decir, la humedad, si aquella válvula al abrirse deja pasar vapor de agua, agua líquida o

DESECACION

aire húmedo que ya pasó por el desecador, que incrementarán la humedad del aire, interrumpiéndose este paso cuando al crecer demasiado la humedad varía la temperatura húmeda del aire.

Dispositivos de esta clase, convenientemente combinados, permiten mantener constante la condición del aire de entrada.

La circulación del aire se consigue mediante ventiladores adecuados, de cuyas características (6) no podemos ocuparnos aquí, pero que deben proporcionar una distribución y velocidad de aire uniformes. Respecto a las posibilidades de circulación, ya fueron tratadas anteriormente.

TEORIA DE LA DESECACION: PROYECTADO DE DESECADORES

Estudiadas las condiciones de equilibrio, al referirnos anteriormente al comportamiento de los cuerpos durante la desecación, nos ocuparemos ahora de la cinética del proceso en que se funda el proyectado de los desecadores.

Velocidad de desecación en corriente de aire.—Antes de abordar un problema de desecación, es siempre necesario efectuar una experiencia de desecación con el material de que se trate. Tal experiencia suele llevarse a cabo, casi siempre, en *condiciones de desecación constante*. Se dice que un proceso de desecación tiene lugar en tales condiciones, cuando la corriente de aire desecante es de dirección, velocidad, temperatura y humedad constantes.

Estudiaremos, en primer lugar, la velocidad de desecación en condiciones constantes, tanto por ser su estudio más sencillo como porque nos ayudará a interpretar esas indispensables experiencias de laboratorio a que acabamos de aludir. Como en la práctica casi nunca se darán tales condiciones, estudiaremos, a continuación, el caso general de *desecación en condiciones variables*.

Condiciones de desecación constantes.—Realicemos una experiencia de desecación en condiciones constantes con un cuerpo sólido laminar, cuya superficie sea grande en relación a su espesor, a fin de disminuir los efectos de desecación en los bordes y con su humedad uniformemente

repartida en toda la masa, y en proporción suficiente para que su superficie esté bien humedecida al principio de la experiencia.

Representemos por T la humedad total expresada en kilogramos de agua por cada kilo de material seco, y por W , la humedad libre, expresada también en la misma forma.

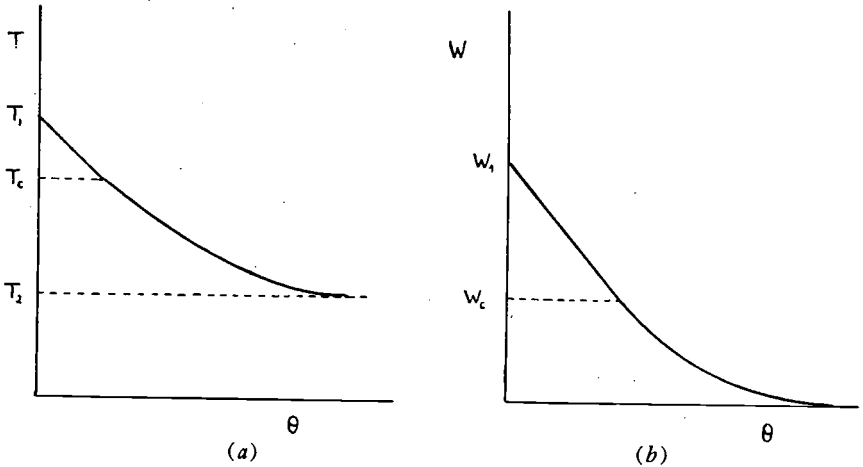


FIG. 10.—Experiencia de desecación en condiciones constantes
 a) Curso de la humedad total con el tiempo.
 b) Curso de la humedad libre con el tiempo.

Si suponemos el material situado sobre el platillo de una balanza, en una cámara por la que circula aire en condiciones constantes, y conocemos el peso de material seco que contiene, podremos seguir el curso de su desecación perfectamente y en cada momento saber la humedad total T que se conserva, figura 10 (a). Si también conocemos su humedad de equilibrio, E kilogramos de agua por kilogramo de material seco en las condiciones del experimento, puesto que $W = T - E$, podremos obtener directamente la curva de la figura 10 (b), a partir de la curva 10 (a), podremos construir inmediatamente una de las curvas de la figura 11. Mientras el sólido tiene una humedad elevada superior a un valor crítico W_c , característico de cada material, la velocidad de desecación (pérdida

de humedad libre W por unidad de tiempo: $-\frac{dW}{d\theta}$) es constante, por

D E S E C A C I O N

bajo de este valor la velocidad de desecación disminuye gradualmente, hasta anularse, cuando su contenido en humedad libre se agota. La pendiente y curvatura de la curva durante el período de velocidad decreciente depende de las propiedades del material que se deseca.

Los procesos de desecación en condiciones constantes siempre pueden dividirse en los dos períodos acabados de indicar: período de velocidad de desecación constante, representado por una línea horizontal en el diagrama de la figura 11, y período de velocidad de desecación decreciente, representado por una de las curvas 1, 2 ó 3 de la misma figura, según los casos.

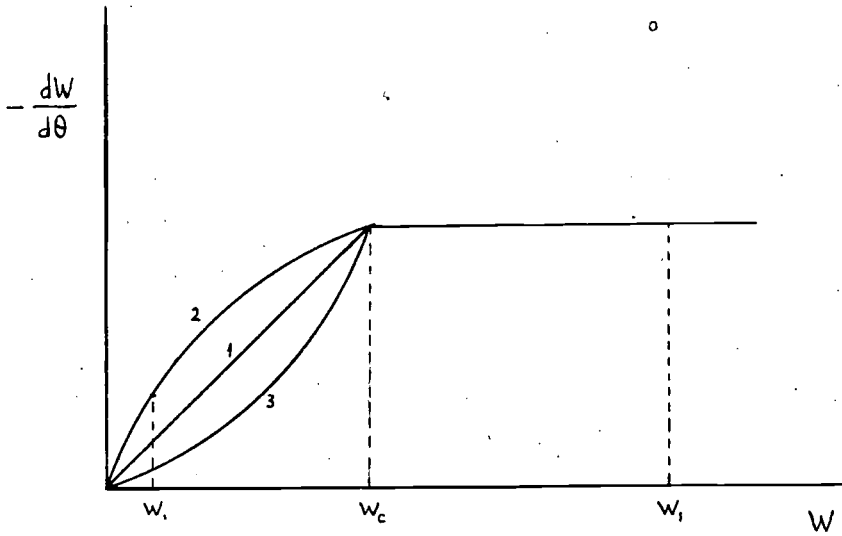


FIG. 11.—Curvas de velocidad de desecación en condiciones constantes

Tratemos de interpretar este fenómeno. Como ya explicamos al ocuparnos del mecanismo de la desecación, tan pronto como el sólido se pone en contacto con el aire, a más elevada temperatura, empieza a evaporarse el agua superficial, el vapor formado se difunde a través de la capa del tránsito gaseosa y, finalmente, se aleja por convección, ya en la masa principal de aire. Según dijimos, esta vaporización, al disminuir la concentración de agua en la superficie del cuerpo, provoca un gradiente de concentraciones que motiva la difusión del agua desde el interior del cuerpo hacia la superficie. Mientras ésta permanece suficientemente húmeda, la evaporación del agua tiene lugar con velocidad constante, puesto

que todo el calor que desde el aire llega a la superficie del cuerpo, a través de la capa de tránsito gaseosa, se invierte cuantitativamente en la evaporación del agua superficial a la temperatura de la superficie del cuerpo, que coincidirá con la húmeda del mismo, en ausencia de calor transmitido por radiación o conducción. Este período corresponde al de velocidad de desecación constante.

Al continuar el proceso de desecación, y disminuir con ello el grado de humedad del sólido, se llega a un punto en que el agua que llega a la superficie desde el interior del cuerpo ya no compensa la que se elimina por evaporación. La superficie deja de comportarse como un cuerpo bien mojado, la velocidad de evaporación superficial disminuye, empezando el período de velocidad de desecación decreciente. Como quiera que el calor transmitido desde el aire al cuerpo al empezar el nuevo período de desecación sigue siendo el mismo y el calor consumido en la evaporación es menor, la diferencia se invertirá en la calefacción del sólido, que de esta manera incrementará gradualmente la temperatura de su superficie. Con este aumento de temperatura superficial, también aumentará el gradiente de presiones parciales de vapor de agua a través de la película de tránsito, pero esta circunstancia es más que contrarrestada por ese contenido de agua superficial que disminuye progresivamente, por lo que la disminución de velocidad de desecación continúa.

El mecanismo de desecación durante este período de velocidad decreciente varía con la naturaleza del material que se deseca y con la mayor o menor velocidad con que se desarrolló la desecación en el período de velocidad constante.

Si se trata de un material poco poroso y la velocidad de desecación durante el período en que aquélla se mantiene constante fué pequeña, es decir, las condiciones de desecación suaves, al empezar el período de velocidad decreciente el agua seguirá siendo capaz de difundirse desde el interior hasta la superfine (o hasta un plano muy inmediato a ésta), evaporándose en la misma durante todo el resto de la desecación.

Ahora bien, si el cuerpo es poroso, o aun no siéndolo, la velocidad, durante el período de velocidad de desecación constante, fué elevada, por utilizarse condiciones de desecación más agudas, al empezar el período de velocidad de desecación decreciente el agua interior no será capaz de difundirse hacia la superficie con la velocidad que exigirán las condiciones de desecación externa. Esta circunstancia motiva que el plano de vaporización empiece a desplazarse hacia el interior del sólido (4). La rapidez del desplazamiento dependerá de la velocidad con que el agua se difunde a

través del cuerpo, de la velocidad de difusión del vapor formado a través de la parte de sólido entre el plano de vaporización y la superficie, y de la velocidad con que el calor se transmite desde el aire al plano de vaporización.

En la figura 12 se ha representado el fenómeno de desecación de un cuerpo poroso que acabamos de explicar, en el supuesto que se comporte como propiamente húmedo, es decir, con humedad ligada despreciable. En un cierto momento el plano de vaporización ocupa la posición esquematizada en la figura, y a través de las distintas zonas señaladas se esta-

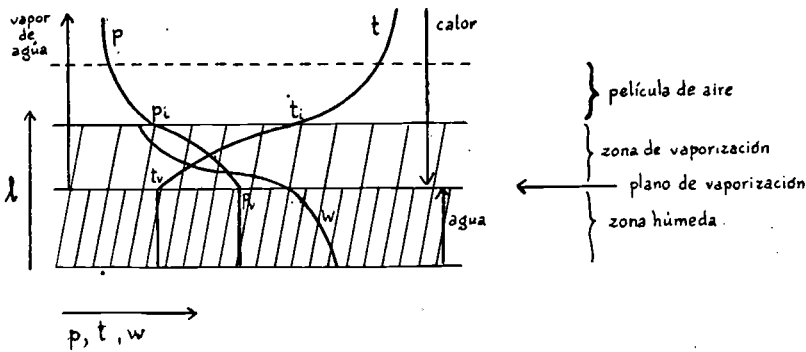


FIG. 12.—Mecanismo de desecación de un sólido poroso propiamente húmedo

blecen los gradientes indicados, en virtud de los cuales el agua se difunde desde el interior del cuerpo hasta el aire, y el calor desde el aire hasta dicho repetido plano, utilizándose una pequeña parte del mismo en la calefacción del sólido ya seco, cuya temperatura, según vimos, aumenta gradualmente, y el resto en la vaporización del agua.

Si el cuerpo poroso que se deseca es higroscópico, es decir, posee cantidad apreciable de humedad ligada, las condiciones de desecación en el período de velocidad decreciente están representadas en la figura 13.

La diferencia fundamental entre este caso y el de un cuerpo propiamente húmedo estriba en que ahora, con un cuerpo higroscópico, entre el plano de vaporización y la superficie del sólido, existe un gradiente de humedad ligada que, por su presión de vapor anormalmente baja, no se vaporizó cuando lo hizo la humedad no ligada. El calor que ahora llega desde el aire, además de invertirse en una pequeña parte en la calefacción de la zona que va secándose y en la vaporización del agua no ligada en

el plano de vaporización como antes, se consume también en la vaporización del agua ligada que quedó en la zona exterior de la que ya se eliminó completamente la humedad no ligada. Esta circunstancia influencia el gradiente parcial de temperatura $t_i - t_v$. Algo parecido puede decirse del gradiente de presión de vapor $p_v - p_i$, que ahora también está influenciado por la vaporización tardía de la humedad ligada. Efectivamente, en cada punto del sólido comprendido entre el plano de vaporización y la superficie del sólido, la presión de vapor correspondiente al vapor formado en el plano de vaporización y que se difunde hacia el exterior, debe estar en equilibrio con la presión de vapor que ejerza en ese punto el agua ligada que todavía resta.

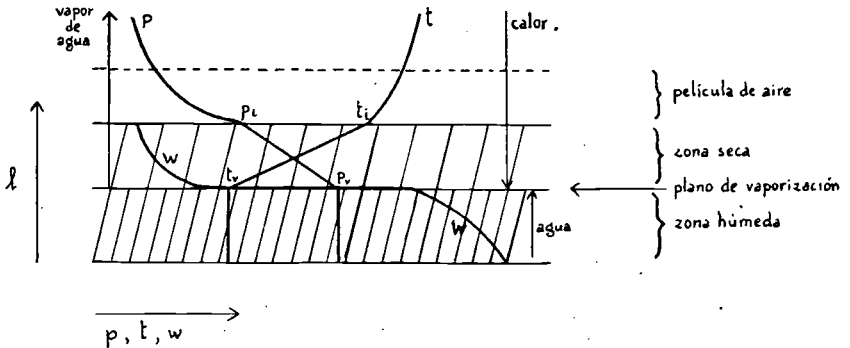


FIG. 13.—Mecanismo de desecación de un sólido poroso higroscópico

Cuando el plano de vaporización llegue al centro de un cuerpo propiamente húmedo, éste se habrá desecado por completo. No podrá decirse lo mismo en el caso de un sólido higroscópico, pues, entonces, cuando eso suceda, todavía restará en el interior del cuerpo parte de la humedad ligada, que sólo podrá eliminarse por vaporización en el interior del material y difusión hacia el exterior del vapor formado. Tal difusión tendrá lugar con un gradiente de presión reducido a causa de la ya citada presión de vapor anormalmente baja de la humedad ligada. Además, el vapor encuentra a su paso una resistencia grande que prácticamente se extiende a la mitad del espesor del sólido. Ambas circunstancias determinan que, desde el momento en que el plano de vaporización llega al centro del cuerpo, se produzca todavía una nueva y ahora más intensa disminución de la velocidad de desecación. Tal efecto puede apreciarse en la curva 2 de la figura 11, pues al llegar en la desecación a una humedad libre W_2 ,

D E S E C A C I O N

empieza el período final de eliminación de agua exclusivamente ligada y, con ello, el descenso brusco final de la velocidad de desecación.

Como acabamos de ver que, según que el material que se deseca sea poroso o no poroso, higroscópico o propiamente húmedo y que las condiciones de desecación sean suaves o drásticas, el mecanismo de desecación varía en el período de velocidad decreciente, se comprenden las formas diversas de las curvas correspondientes a este período representadas en la figura 11, y aun otras menos frecuentes no representadas.

Período de velocidad de desecación constante $W > W_0$.

Puesto que, según hemos dicho anteriormente, durante este período la constancia de velocidad de desecación se debe exclusivamente a la velocidad constante con que se vaporiza el agua en la superficie humedecida del sólido mediante el calor que le llega desde el exterior, y que se invierte íntegramente en esa vaporización, y a la difusión del vapor formado a través de la capa de tránsito gaseosa, recordando los mecanismos de transmisión de calor y materia, podremos escribir:

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{\varphi SL} \frac{hS(t - t_s) + h_r S(t' - t_s)}{r_s} = \frac{1}{\varphi SL} k_G S_h (p_s - p) \quad (1)$$

en la que h es el coeficiente de transmisión de calor desde el aire a la superficie por conducción y convección; h_r , el coeficiente de transmisión de calor desde el exterior a la superficie por radiación; k_G , el coeficiente de transmisión de materia; S , la superficie total del cuerpo; S_h , la superficie humedecida; t , la temperatura del aire; t' , la temperatura de la estructura circundante (paredes de la cámara de desecación, etc.); t_s , la temperatura superficial de equilibrio del sólido; p_s , la presión de vapor del agua a la temperatura t_s de la superficie; p , la presión de vapor del aire; φ , el peso del material seco por unidad de volumen original; L , la mitad del espesor de la lámina de sólido. Sustituyendo el gradiente de presiones ($p_s - p$) por un gradiente de humedades ($x_s - x$), introduciendo

do para ello el coeficiente $k' = \frac{(D_v/RT) B_f}{0,622}$ en el que $D_v =$ difusi-

vidad molecular del vapor de agua en la película de aire; $B_f =$ espesor de dicha película; $T =$ temperatura absoluta; $R =$ constante de los gases, y $0,622 =$ (peso molecular del agua) / (peso molecular del aire):

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{\varphi L} \frac{h(t-t_s) + h_r(t'-t_s)}{r_s} = \frac{1}{\varphi L} \frac{S_b}{S} k' (x_s - x) \quad (2)$$

siendo x_s y x la humedad del aire saturado a la temperatura t_s (suponemos se alcanza el estado de equilibrio en la superficie interfacial) y la humedad del aire, respectivamente, kilogramos de vapor por kilogramos de aire seco.

Si toda la superficie del sólido está humedecida, S será igual a S_b , y si las temperaturas del aire y de los alrededores t y t' son también iguales, o la velocidad del aire es elevada y h_r despreciable frente a h_c , t_s es exacta o muy aproximadamente la temperatura del termómetro húmedo, y, por supuesto, en cualquier caso permanece constante durante este período. Con estas simplificaciones, la ecuación 2 se convierte en:

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{h(t-t_w)}{\varphi L r_w} = \frac{k'(x_w - x)}{\varphi L} \quad (3)$$

Haciendo:

$$\frac{k'}{\varphi L} = B \quad (4)$$

$$\frac{h}{\varphi L r_w} = B' \quad (4)$$

(3) se convertirá en:

$$-\frac{dW}{d\theta} = B'(t-t_w) = B(x_w - x) \quad (5)$$

Sabemos que los coeficientes de transmisión de masa y calor dependen de la naturaleza de la capa de tránsito y del espesor de la misma, es decir, de la difusividad o conductividad del fluido y de la temperatura, velocidad de circulación y dirección del mismo. Todos estos factores permanecen invariables en el caso de un proceso de desecación en condiciones constantes, luego B y B' (4), son constantes, y como en aquellas condiciones de desecación también permanecen invariables los gradientes $t-t_x$ y x_w-x , se comprende sea constante la velocidad de desecación expresada por la ecuación 5, que también podríamos expresar así:

D E S E C A C I O N

$$-\left(\frac{dW}{d\theta}\right)_I = \text{constante} = \frac{W_1 - W_c}{\theta_I} \quad (6)$$

en la que el subíndice I y el tiempo de desecación θ_I , se refieren al período de desecación de velocidad constante.

Por supuesto de la ecuación más general 2, también deduciríamos la constancia de la velocidad en este período, sin necesidad de recurrir a simplificación alguna, siempre que *todas* las condiciones de desecación fueran constantes.

Si por desecarse los bordes o por otra circunstancia cualquiera, la superficie seca $S - S_h$ es una fracción considerable de la superficie total S , un balance calórico demostraría que la temperatura que alcanzaría el sólido sería superior a la del termómetro húmedo y también superior, por ello, la velocidad de desecación en el período de velocidad constante.

Se comprende, después de cuanto antecede, que la velocidad de desecación durante el período de constancia de la misma, podrá incrementarse o bien utilizando aire más caliente o menos húmedo, puesto que se aumentarán los gradientes $t - t_w$ o $x_w - x$; o procurando la extracalefacción del sólido bien por radiación o por conducción a través del soporte metálico sobre el que aquél se sitúa, o finalmente aumentando la velocidad de circulación del aire de desecación, la que equivaldrá a aumentar h y k' .

Período de velocidad de desecación decreciente $W < W_c$.

La figura 11, con sus variadas curvas representativas del período de velocidad decreciente, pone de manifiesto que la velocidad momentánea de desecación en este período es una función del contenido en humedad libre en ese momento:

$$-\frac{dW}{d\theta} = f(W) \quad (7)$$

Esta función, como se ve en la figura 11, representa casi siempre una curva que, si ha sido determinada experimentalmente, permitirá la integración gráfica de la ecuación (7), y con ello el cálculo del tiempo θ_{II} que dura este período de la operación:

$$\theta_{II} = - \int_{W_c}^{W_2} \frac{dW}{f(W)} \quad (8)$$

bastará representar los valores inversos de las ordenadas $f(W)$ correspondientes a cada valor de W frente a éstos y medir el área limitada por el eje de las abscisas, la curva y las ordenadas $W = W_c$ y $W = W_2$. En ocasiones como la representada por la curva (1) de la figura 11, $f(W)$ es una función lineal, en estos casos o en aquellos en que, aun no siéndolo, no se cometa error excesivo al suponer sea lineal dicha función, a falta de datos experimentales más exactos, será posible la integración analítica de (7).

En efecto, esta ecuación podrá entonces escribirse así:

$$-\frac{dW}{d\theta} = KW \quad (9)$$

y con ello, al separar variables e integrar entre los límites adecuados, resulta:

$$\theta_{II} = \frac{1}{K} \ln \frac{W_c}{W_2} \quad (10)$$

Puesto que cuando el sólido alcanza su humedad libre crítica W_c las velocidades de ambos períodos de desecación coinciden, de (6) y (9) se deducirá:

$$\frac{W_1 - W_c}{\theta_I} = KW_c \quad (11)$$

o bien:

$$\theta_I = \frac{W_1 - W_c}{KW_c} \quad (11-a)$$

D E S E C A C I O N

y combinando esta última ecuación con la (10):

$$\theta_{\text{total}} = \theta_I + \theta_{II} = \frac{1}{K} \left[\frac{W_1 - W_c}{W_c} + \ln \frac{W_c}{W_2} \right] \quad (12)$$

y, naturalmente, también:

$$\frac{\theta_I}{\theta_{II}} = \frac{\frac{W_1 - W_c}{W_c}}{\ln \frac{W_c}{W_2}} \quad (13)$$

Problema 1.—Una lámina de cartón de $0,60 \times 1,80$ m. y $1,25$ cm. de espesor, impermeabilizada por una de sus caras, se desecó en un aparato experimental en condiciones de desecación constantes. La lámina fué protegida convenientemente de cualquier radiación externa, obteniéndose una pérdida constante de agua libre de $1,65$ Kgs./hr.

Otra lámina del mismo material de iguales dimensiones superficiales ($0,60 \times 1,80$ m.), pero de $2,5$ cm. de espesor, ha de desecarse en el mismo aparato bajo iguales condiciones de desecación, pero teniendo lugar ésta por ambas superficies. Utilizando los datos que se expresan a continuación, calcular la velocidad de desecación, Kgs. de agua libre / (Kgs. de material seco) (hora), de la lámina de $2,5$ cm. de espesor.

Datos y notas.—La conductividad térmica del cartón se supone es $0,223$ Kcal./(hr.) (m.^2) ($^{\circ}\text{C.}/\text{m.}$). El peso de material seco por 1 dm.³ de volumen original es de $0,24$ Kgs. En ambos experimentos, el aire tenía una temperatura de 66° C. y una temperatura húmeda de $35,6^{\circ}$ C; su humedad era $0,025$ Kgs. de vapor de agua por Kg. de aire seco. En ambos casos el material fué convenientemente protegido de la radiación térmica. Despreciar los efectos de desecación por los cantos.

Solución.

Base de cálculo, 1 hora y 1 Kg. de material seco en cada experiencia.
Las ecuaciones (2)

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{\varphi LS} \frac{hS(t - t_s) + h_r S(t' - t_s)}{r_s} = \frac{1}{\varphi L} \frac{S_b}{S} k' (x_s - x)$$

las modificaremos, en el caso de la lámina de cartón impermeabilizada por uno de los lados, de la siguiente forma:

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{i}{\varphi LS} \frac{h(S/2)(t-t_s) + \frac{i}{(1/h) + (0,0125/0,223)}(S/2)(t-t_s)}{r_s} =$$

$$= \frac{i}{\varphi L} \frac{S_h}{S} k' (x_s - x)$$

ya que el calor transmitido por radiación es nulo y la superficie disponible para la desecación es solamente la mitad de la total, llegando a ella el calor necesario para la vaporización del agua, tanto directamente desde el aire que está sobre la superficie no impermeabilizada, como del que está sobre la impermeabilizada, indirectamente, a través de todo el grosor de la lámina de cartón de conductividad 0,223. También, teniendo en cuenta que el calor húmedo del aire es $s = 0,24 + 0,46 x =$

$$= 0,24 + (0,46)(0,025) = 0,252, \text{ podrá sustituirse } k' = \frac{h}{s} = \frac{h}{0,252}. \text{ Así, pues,}$$

para el cartón impermeabilizado:

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{1,65}{\varphi LS} = \frac{i}{2\varphi L r_s} \left(h + \frac{0,223 h}{0,223 + 0,0125 h} \right) (66 - t_s) =$$

$$= \frac{i}{2\varphi L} \frac{h}{0,252} (x_s - 0,025)$$

De aquí:

$$\frac{(1,65)(2)(r_s)}{(2)(1,8)(0,6)(66 - t_s)} = \frac{0,446 h + 0,0125 h^2}{0,223 + 0,0125 h}$$

y

$$\frac{(1,65)(2)(0,252)}{(2)(1,8)(0,6)(x_s - 0,025)} = h$$

D E S E C A C I O N

Simplificando ambas ecuaciones:

$$\frac{1,53}{66 - t_s} = \frac{0,446 h + 0,0125 h^2}{0,223 + 0,0125 h}$$

y

$$\frac{0,385}{x_s - 0,025} = h$$

Resolviendo el sistema de ambas ecuaciones por tanteos, dando un valor a x_s y buscando en el diagrama de Mollier t_s y en las tablas el calor latente r_s , correspondiente a esta última temperatura, podremos calcular el valor de h mediante la segunda ecuación y comprobar si se cumple la primera. Se encuentra que los valores que satisfacen ambas ecuaciones son:

$$x_s = 0,043 \text{ Kgs. vapor/Kgs. aire seco; } t = 38^\circ \text{ C.; } r_s = 575 \text{ Kcal./Kg.}$$

$$h = 21,4 \text{ Kcal./hr (m.}^2 \text{) (}^\circ \text{C.).}$$

La lámina que se seca por ambos lados, en el período de desecación constante, adquirirá la temperatura húmeda del aire, y a ella será aplicable la ecuación 3, sin modificación alguna, teniendo h , como es lógico, el mismo valor que para la primera lámina, acabado de calcular:

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{\varphi L} \frac{h (t - t_w)}{r_w} \quad (3)$$

Sustituyendo los datos del enunciado:

$$\varphi = (0,24) (1000) = 240 \text{ Kgs. material seco/metro}^3.$$

$$L = 0,025/2 = 0,0125 \text{ m.}$$

$$h = 21,4 \text{ Kcal./hr (m.}^2 \text{) (}^\circ \text{C.).}$$

$$t = 66^\circ \text{ C.}$$

$$t_w = 25,6^\circ \text{ C.}$$

$$r_w = 578 \text{ Kcal./Kg.}$$

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{(240) (0,0125)} \frac{(21,4) (66 - 25,6)}{578} =$$

$$= 0,375 \text{ Kgs. agua/hr (Kg. material seco)}$$

ENRIQUE COSTA NOVELLA

En el caso de la lámina impermeabilizada, la velocidad sería:

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{1,65}{(240)(1,8)(0,6)(0,0125)} =$$

$$= 0,509 \text{ Kgs. agua/(hr) (Kg. material seco)}$$

ahora bien, puesto que en la lámina gruesa el material seco es (240) (1,8) (0,6) (0,025) = 6,48 Kgs., mientras que en la delgada solamente la mitad, 3,24, la relación entre el agua total evaporada por hora en ambos casos sería:

$$\frac{(0,375)(6,48)}{(0,509)(3,24)} = 1,473$$

es decir, que se evaporarían 47,3 por 100 más agua cada hora en el caso de la desecación por ambas superficies.

Problema 2.—Un material se deseca en condiciones de desecación constante. Durante el proceso se obtienen los datos que se tabulan a continuación:

θ , horas	0	1,0	1,5	2,1	3,0	4,3
T, Kgs. agua total/Kgs. material seco	0,82	0,64	0,54	0,42	0,282	0,1665

La humedad de equilibrio es 4 Kgs. de agua por 100 Kgs. de material seco.

- a) ¿Qué tiempo adicional se requerirá para reducir la humedad total de 0,1665 a 0,08?
 b) Calcular la humedad crítica de este material.

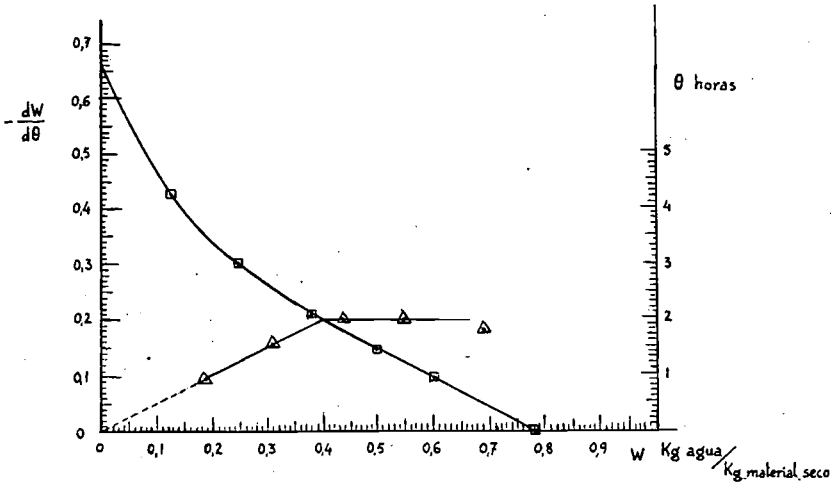
Solución.

Puesto que $W = T - E = T - 0,04$.

θ	T	W	$\Delta\theta$	ΔW	$\Delta W/\Delta\theta$	W media
0	0,82	0,78	0	0,78	0	—
1,0	0,64	0,60	1	0,18	0,18	0,69
1,5	0,54	0,50	0,5	0,10	0,20	0,55
2,1	0,42	0,38	0,6	0,12	0,20	0,44
3,0	0,282	0,242	0,9	0,138	0,1533	0,311
4,3	0,1665	0,1265	1,3	0,1155	0,0889	0,1842
x	0,08	0,04	—	—	—	—

D E S E C A C I O N

Podemos trazar así las curvas $-\frac{dW}{d\theta}$ respecto a W , y W respecto a θ ; de ellas deducimos:



b) $W_c = 0,4$ Kgs. agua/Kgs. material seco.

$\theta_c = 2$ horas.

a) Puede apreciarse que la curva del período de velocidad de desecación decreciente es recta; por tanto, aplicaremos la ecuación 10, primero, al intervalo de experimentación:

$$\theta_{II} = \theta_T - \theta_c = 4,3 - 2 = \frac{1}{k} \ln \frac{0,4}{0,1265}$$

$$k = \frac{\ln(0,4/0,1265)}{2,3} = 0,50$$

y ahora, entre los límites que se indican en el enunciado:

$$\theta_{adicional} = \frac{1}{0,5} \ln \frac{0,1265}{0,04} = 2,3 \text{ hr}$$

Condiciones de desecación variables.—Hasta ahora nos ocupamos exclusivamente de la velocidad de desecación en condiciones constantes,

es decir, para temperatura, humedad, velocidad y dirección del aire desecador constantes. Realmente, en cualquier proceso de desecación que se lleve a efecto en un aparato desecador, el material está siendo desecado por aire cuya temperatura y humedad varían continuamente. También varía continuamente la temperatura del material que se deseca.

En estas condiciones ya no resultarán aplicables las ecuaciones deducidas anteriormente, ni tampoco podrá hablarse de períodos de velocidad de desecación constante y de velocidad de desecación variable. No obstante, resulta conveniente seguir dividiendo el proceso de desecación en dos períodos: el primero se referirá a la eliminación de la humedad libre por encima de la humedad crítica W_c , y el segundo, que se extenderá desde que el material alcanza la humedad crítica hasta el final del proceso, es decir:

Período I $W > W_c$

Período II $W < W_c$

Período I, $W > W_c$: Vimos que en condiciones de desecación constantes, cuando $W > W_c$, la velocidad también lo era, teniendo un valor definido para cada gradiente de humedades ($x_w - x$), por tanto, y teniendo, además, en cuenta que todos los razonamientos utilizados al ocuparnos de este período entonces, son aplicables también ahora, ya que por ser $W > W_c$, la superficie del material estará siempre saturada de humedad, podrá aplicarse la ecuación:

$$-\frac{dW}{d\theta} = B' (t - t_w) = B (x_w - x) \quad (5)$$

pero considerando las constantes B y B' como constantes experimentales dependientes de la velocidad del aire, dirección del mismo, espesor, densidad y porosidad del material, etc., equivalentes a valores medios, a lo largo del período $W > W_c$ de los representados por las ecuaciones 4, ya que debido a la variación de las condiciones del aire, variarán también ligeramente los valores de los coeficientes de transmisión que en ellas figuran.

Período II, $W < W_c$: La ecuación diferencial 7 es aplicable en el caso en que ($x_w - x$) permanece constante; puesto que ahora ese gradiente varía continuamente, es lógico modificar dicha ecuación del siguiente modo, para que sea aplicable al caso presente:

D E S E C A C I O N

$$-\frac{dW}{d\theta} = f [W, (x_w - x)] \quad (14)$$

es decir, que la velocidad de desecación para un contenido en humedad libre inferior al crítico, es una función de las dos magnitudes variables W y $(x_w - x)$. La naturaleza de la función habrá que aclararla, también aquí, experimentalmente. En ocasiones toma forma sencilla como:

$$-\frac{dW}{d\theta} = KW (x_w - x) \quad (15)$$

o

$$-\frac{dW}{d\theta} = KW^n \quad (n \geq 1) \quad (16)$$

Sólo en este último caso resulta la velocidad de desecación independiente de $(x_w - x)$.

Proyectado de desecadores.—Dentro de la brevedad que el carácter de esta obra nos impone, hemos pasado revista a los distintos factores que juegan papel en los procesos de desecación y esquematizado los aparatos donde llevarlos a cabo. Es llegado el momento de exponer cómo, valiéndonos de los conceptos fundamentales de la desecación, es posible proyectar desecadores adecuados para cada caso particular.

Aunque naturalmente es necesario conocer las propiedades físicas y químicas del material que se desea desecar, antes de abordar el estudio de su secado, rara vez bastarán estas propiedades para determinar las dimensiones del aparato y las condiciones mejores para llevar a buen término la operación. Se requerirá, además, como ya anteriormente hemos indicado, efectuar en el laboratorio experiencias previas de desecación con el material de que se trate, a fin de obtener información sobre las indispensables curvas de velocidad y sobre las humedades críticas respectivas para varias series distintas de condiciones de desecación constantes.

Lógicamente, cuanto mayor sea la escala en que tales experiencias se realicen, tanto menos probable es que omitamos alguno de los factores que intervienen al trabajar en escala industrial, pero no en la de laboratorio, y, por consiguiente, más satisfactorios serán los datos obtenidos.

En estos experimentos se procurará reproducir lo más posible las condiciones en que luego ha de operarse en escala industrial, es decir, se procurará utilizar el mismo tipo de aparato, el mismo tamaño de material, grosor de la lámina, etc., las mismas condiciones físicas como contenido de agua libre, temperatura, etc., del material a secar, análoga velocidad de circulación de aire y dirección del mismo; si va a existir radiación externa, se procurará tenerla también en el experimento, etc., etc.

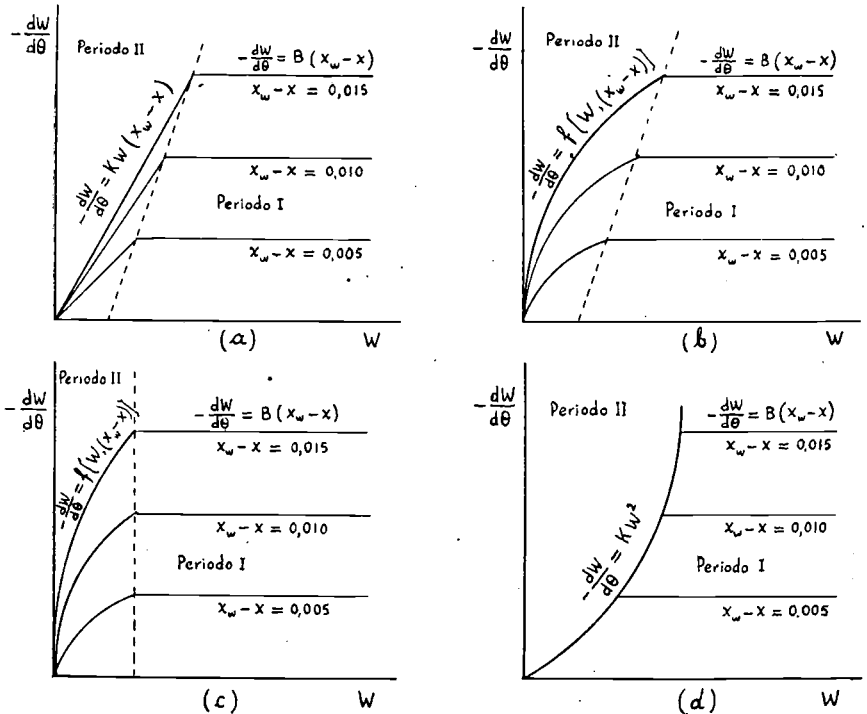


FIG. 14.—Experiencias previas de desecación en condiciones constantes

En la figura 14 reproducimos algunas curvas representativas de las que suelen obtenerse en este género de experiencias de desecación previas, en condiciones de desecación constantes.

Como se ve, hemos reproducido casos en que serían aplicables las ecuaciones 5 (figura anterior en los cuatro casos), la 14 (figura anterior *b* y *c*), la 15 (figura anterior *a*) y la 16 (figura anterior *d*). También se apreciará

D E S E C A C I O N

que la humedad crítica W_c puede casualmente ser constante (figura anterior c), pero que generalmente varía con $x_w - x$.

Método general para el proyectado de desecadores continuos con corriente de aire.—El método que exponemos a continuación se basa en la suposición de que la operación de desecación es independiente del paso o historia previa del material que se seca, es decir, se supone es una función puntual. La validez de esta hipótesis será discutida más tarde.

En lo que sigue, además de las magnitudes T , W , x , ya utilizadas, y , por tanto, de significado conocido, representaremos por m los Kgs. de aire seco utilizados por cada Kg. de material seco. Con el subíndice 1 , nos referiremos siempre a una corriente que entra en el desecador, bien sea aire o material a desecar; por el subíndice 2 , será representado del mismo modo cualquier corriente que abandone el mismo. El subíndice c se referirá a las condiciones del aire o material en el plano transversal del desecador donde el material alcance su humedad crítica W_c , y el subíndice p se referirá a las condiciones en cualquier plano transversal arbitrariamente escogido del desecador.

Denominaremos zona I, a la región del desecador en la que W es mayor que W_c , y zona II, a la región del mismo en que W es menor que W_c . θ_I se referirá al tiempo de secado en la zona I y θ_{II} a la duración del secado en la zona II.

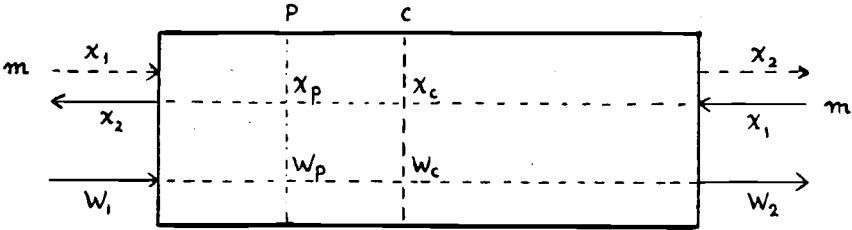


FIG. 15.—Condiciones en un desecador continuo con corriente de aire

En la figura 15 representamos esquemáticamente las condiciones que se encuentran en un desecador: El material penetra en el desecador con una humedad libre W_1 y lo abandona con humedad libre W_2 ; en contracorriente o paralelo con el material, penetra en el desecador m Kgs. de aire por cada Kg. de material seco, con una humedad x_1 , abandonando el desecador con una humedad x_2 . En la sección C , el material alcanza

su humedad crítica, por lo que la región a la izquierda de dicho plano será la zona I y a la derecha la zona II.

Balance de agua.

Si tomamos como base 1 Kg. de material seco, podremos expresar así un balance total de agua:

$$W_1 - W_2 = m (x_2 - x_1) \quad (17)$$

Usualmente se especifican los valores de entrada y salida de W y x ; así, pues, la anterior ecuación permitirá el cálculo de m . Una vez m conocido, será posible encontrar la humedad x_p que el aire tendrá en cualquier punto del desecador en que el material tenga una cierta humedad libre W_p ; en efecto, bastará plantear un balance de agua entre el plano p de que se trate y uno de los extremos del desecador:

$$W_1 - W_p = m (x_2 - x_p) \quad (18)$$

si el aire circula en contracorriente con el material, y

$$W_1 - W_p = m (x_p - x_1) \quad (18 a)$$

si la circulación del aire y material es en paralelo.

Cálculo del tiempo de desecación requerido.

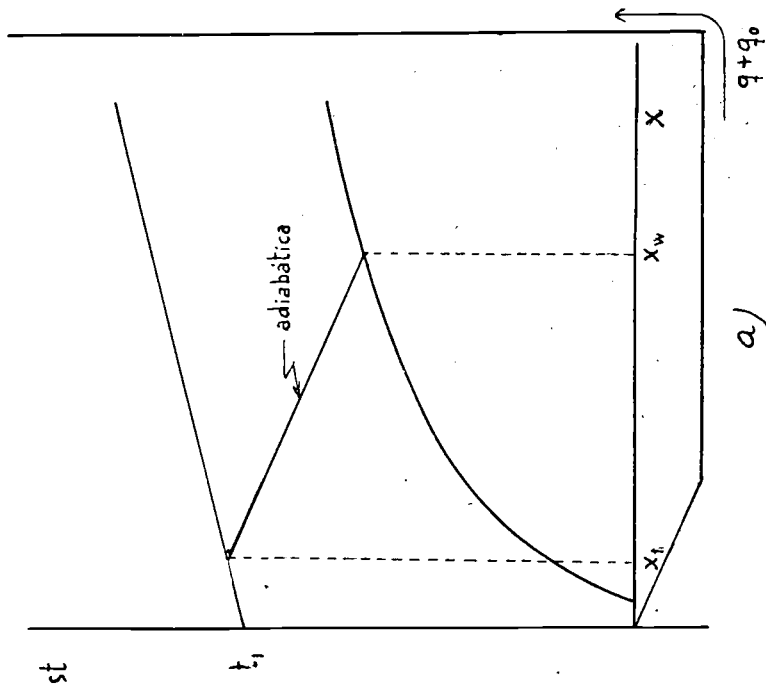
Si se dispone de datos experimentales en la forma de gráficas — $\frac{dW}{d\theta}$

respecto a W , para diferentes valores de $(x_v - x)$, tales como los representados en la figura 14, una solución general para obtener el tiempo de desecación requerido, será llevar a efecto la integración gráfica

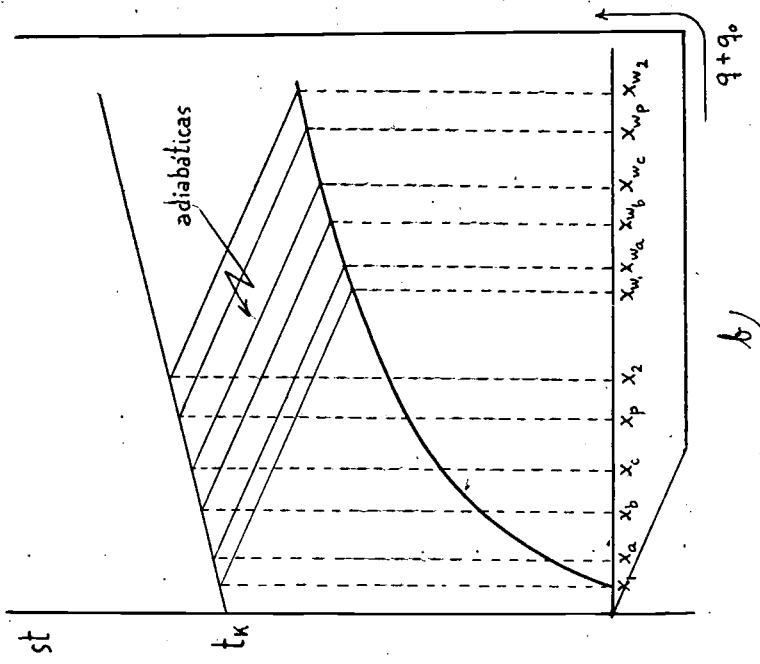
$$\int_{W_1}^{W_2} -\frac{d\theta}{dW} dW = \theta, \text{ representando } -\frac{d\theta}{dW} \text{ (inversa de las ordenadas}$$

de los gráficos anteriores) frente a W y midiendo el área abarcada por la curva, eje de abscisas y ordenadas trazadas por $W = W_1$, y $W = W_2$.

Se opera del siguiente modo:



Desecador adiabático



Desecador de temperatura media constante

FIG. 16.—Cálculo de x_w

a) Para un valor escogido arbitrariamente de $W = W_p$ entre W_1 y W_2 , se calcula la humedad del aire x_p en el punto del desecador de que se trate, mediante un balance de agua, ecuaciones (18).

b) Mediante diagrama de Mollier se determina el valor de x_w . El modo de operar dependerá de la naturaleza del desecador; si éste es adiabático bastará trazar en el diagrama de Mollier la adiabática que pasa por el punto (x_1, t_1) y buscar su intersección con la curva de saturación, figura 16-a, puesto que en este caso x_w será constante. Si se trata de un desecador que funciona a temperatura constante t_k , se traza la isoterma correspondiente en el diagrama de Mollier, figura 16-b, y se encuentra para cada x_p el x_w correspondiente, ahora variable, sin más que trazar desde x_p, t_k , la adiabática hasta cortar a la curva de saturación, puesto que al hablar de desecador a temperatura constante quiere decirse a temperatura media constante, ya que el aire en el interior del mismo se calienta intermitentemente, enfriándose al humidificarse adiabáticamente en el intervalo que media entre dos calefacciones. Si el desecador es de humedad controlada, es decir, si $x_w - x$ permanece constante a lo largo del mismo, conociendo el valor de este gradiente, bastará hallar el valor de x correspondiente a cada punto para conocer también el de x_w .

c) Con cada W_p fijado en a) y el correspondiente valor $x_w - x$ calculado en a) y b), se lee en el gráfico $-\frac{dW}{d\theta}$ respecto a W , el valor de la

velocidad de desecación en ordenadas $-\frac{dW}{d\theta}$ que corresponde.

d) Se repite el método con distintos valores de W_p , se toman las inversas de los valores $-\frac{dW}{d\theta}$ hallados en c) y se procede a la integración

gráfica entre los límites W_1 y W_2 , como se indica en la figura 17. El área bajo la curva, entre los límites W_1 y W_c , representa el tiempo θ_I y el área entre los límites W_c y W_2 , será θ_{II} . La suma de ambos tiempos, o sea el área total entre W_1 y W_2 será el tiempo total θ_T , de desecación.

DESECCION

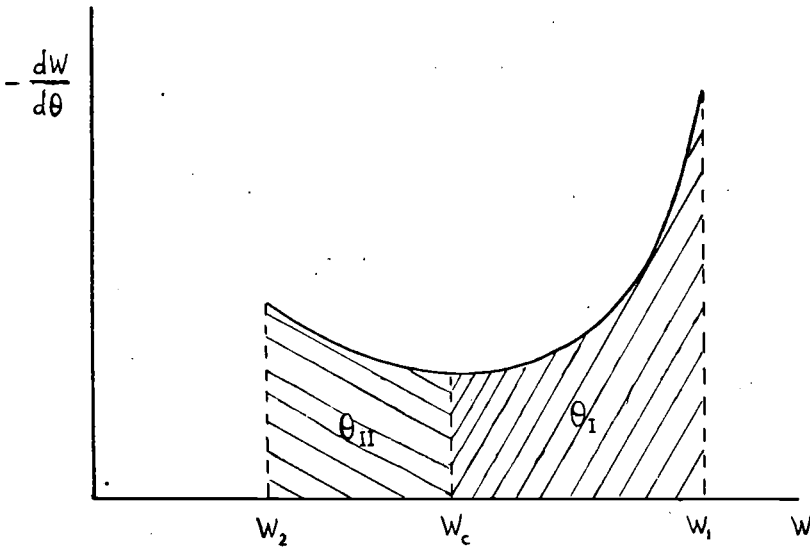


FIG. 17.—Integración gráfica $\theta = \int \frac{d\theta}{dW} dW$

Cálculo de la longitud del desecador.

Se comprende que si sabemos la cantidad de material que deseamos desecar por hora y los Kgs. del mismo que puede acomodarse en cada metro de longitud del desecador, dato este último que, naturalmente, dependerá del tipo que se decida utilizar, una vez calculado el tiempo total de desecación, se conoce inmediatamente la longitud de desecador necesaria: sean M los Kgs. de material húmedo que se desea secar por hora; N , los Kgs. del mismo que pueden ser acomodados por cada metro de longitud, y θ_T , el tiempo total de desecación calculado. La longitud L del desecador deberá ser:

$$\frac{M}{N} \theta \frac{\text{Kg./hr}}{\text{Kg./m}} \text{ hr} = L \text{ metros} \quad (19)$$

Validez del método.

En el método seguido se ha supuesto que la desecación es una función

puntual, cuando en realidad tal operación parece depender de la historia previa del material.

Las gráficas $-\frac{dW}{d\theta}$ respecto a W se basan en ensayos de laboratorio

durante los que se mantuvo constante $x_w - x$ durante toda la desecación, desde W_1 a W_2 . En la realidad con el método de proyectado explicado, pasamos continuamente de un gradiente $(x_w - x)$ a otro. Se comprenderá

que la velocidad $-\frac{dW}{d\theta}$ para un W y $(x_w - x)$ determinados cuando

$(x_w - x)$ está variando continuamente, que es el caso del desecador real,

habrá de ser diferente de la velocidad $-\frac{dW}{d\theta}$ para esos mismos W y

$(x_w - x)$, si $(x_w - x)$ es siempre constante e independiente del tiempo, caso de las gráficas representativas de las experiencias de laboratorio.

A pesar del error que puede cometerse con tal irregularidad, el método explicado representa una solución aproximada utilísima suficiente en muchos casos.

Elección entre la circulación de material y aire en contracorriente o paralelo.

En general, los materiales con una humedad crítica W_c pequeña se secan con mínimo de tiempo utilizando circulación en paralelo, y para los materiales con humedad crítica W_c elevada, el tiempo de desecación es menor si se recurre a la circulación en contracorriente.

No obstante, el único procedimiento seguro para averiguar el sistema de recirculación que conducirá a una desecación más rápida para cada caso particular, será el calcular el tiempo de desecación del modo indicado para ambos sistemas y comparar los resultados. Naturalmente, no sólo será el tiempo de desecación el factor a considerar en la selección del sistema, sino que, además, según vimos, las propiedades del material habrán de ser tenidas muy en cuenta antes de tomar una decisión.

D E S E C A C I O N

Métodos de cálculo que no exigen la utilización de las curvas experimentales — $dW/d\theta$ respecto a W .

En ciertos casos no es necesario recurrir a las curvas de velocidad $-\frac{dW}{d\theta}$ respecto a W . Para la zona I, en que $W > W_c$, serán aplicables

las ecuaciones 5:

$$-\frac{dW}{d\theta} = B' (t - t_w) = B (x_w - x) \quad (5)$$

en que B' y B están representadas por:

$$B' = \frac{h}{\varphi L r_w} \quad \text{y} \quad B = \frac{k'}{\varphi L} \quad (4)$$

Puesto que en esta zona la superficie del material está siempre saturada de humedad la temperatura de la misma será la húmeda del aire. Como por balance de agua podemos conocer la humedad x_p en cualquier punto del desecador correspondiente a un W_p determinado, conociendo la clase de desecador (es decir, el paso que el aire sigue en un diagrama de Mollier) se podrá determinar la temperatura del aire t_p y aplicar la ecuación 5 en cualquiera de las dos formas, si se puede calcular h_c (o lo que es igual, k' ,

por la relación de Lewis $\frac{h}{k'} = s$; calor húmedo) a esa temperatura

húmeda del aire, y encontrar el valor de $-\frac{dW}{d\theta}$ que corresponde a

cualquier valor de $W > W_c$.

En la zona II, donde $W < W_c$, son aplicables las ecuaciones 14, 15 y 16. Aquí, debido a que la temperatura del material que se deseca no es conocida, no podrá recurrirse a balances calóricos a menos de que pueda deducirse aquélla por datos de laboratorio sobre la velocidad de desecación

y h durante el período de velocidad de desecación decreciente. En esta zona es permisible considerar se aplica la ecuación:

$$-\frac{dW}{d\theta} = KW(x_w - x) \quad (15)$$

y deducir el valor de la constante K basándose en el hecho de que en el punto del desecador en que el material alcanza su humedad crítica, las velocidades correspondientes a ambos períodos de desecación concuerden, es decir, en el punto crítico:

$$-\frac{dW}{d\theta} \frac{1}{W_c} = B'(t - t_w) = KW_c(x_w - x) \quad (16)$$

de donde:

$$K = \frac{B'(t - t_w)}{W_c(x_w - x)} = \frac{h}{\rho L r_w} \frac{(t - t_w)}{W_c(x_w - x)} \quad (20)$$

Si los datos de laboratorio se expresan en forma algebraica:

$$\text{Zona I} \quad -\frac{dW}{d\theta} = B(x_w - x) \quad (5)$$

$$\text{Zona II} \quad -\frac{dW}{d\theta} = KW(x_w - x) \quad (15)$$

conociendo las constantes B y K podrá encontrarse W_c , resolviendo el sistema de ambas ecuaciones, cuyos primeros miembros son iguales para $W = W_c$. Del mismo modo si K o B y W_c son conocidos, podrá encontrarse B o K , respectivamente.

En resumen, bien la velocidad de desecación en ambos períodos $-\frac{dW}{d\theta}$ pueda deducirse de gráficos o ecuaciones algebraicas será, en general, por

integración gráfica de $\int \frac{d\theta}{dW} dW$, como deduciremos el tiempo requerido para la desecación.

Tipos particulares de desecador con corriente de aire

En ciertos tipos de desecadores $(x_w - x)$ y $(t - t_w)$ pueden variar linealmente con W o ser constantes, permitiendo entonces la integración analítica de las ecuaciones de velocidad de desecación sin necesidad de recurrir a la laboriosa integración gráfica.

1.—Desecador adiabático.

La única fuente de calor para la evaporación del agua que humedece el material será el mismo aire que circula en paralelo o contracorriente

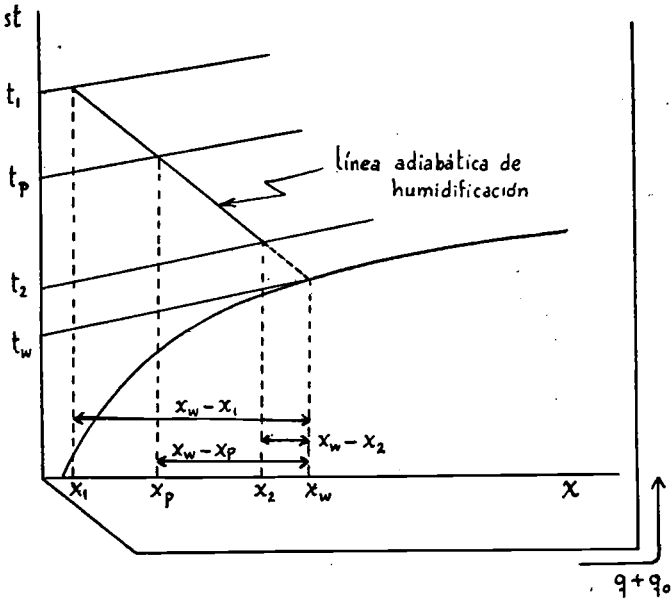


FIG. 18.—Desecación adiabática

con el material. La variación de estado del aire (humedad y temperatura) puede ser representada en el diagrama de Mollier, figura 18.

De la ecuación 18, representativa del balance acuoso, se deduce:

$$x_p = \left(\frac{mx_2 - W_1}{m} \right) + \frac{i}{m} W_p \quad (18-b)$$

es decir, que x varía linealmente respecto W . Como en una desecación adiabática x_w es constante, si x varía linealmente respecto a W , también variará linealmente respecto a esta variable la diferencia $x_w - x$. Esta circunstancia puede apreciarse en la figura 19.

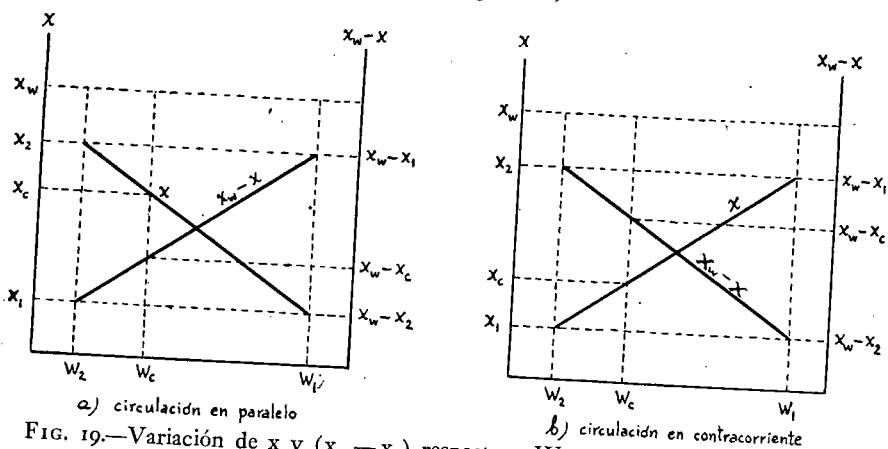


FIG. 19.—Variación de x y $(x_w - x_1)$ respecto a W en un desecador adiabático

Si en uno de los gráficos de velocidades de desecación representadas en la figura 14 dibujamos la línea recta que conecta $(x_w - x_1)$, W_1 con $(x_w - x_2)$, W_2 si la circulación de aire y material es paralela o la que une $(x_w - x_1)$, W_2 con $(x_w - x_2)$, W_1 si la citada circulación es en contracorriente, obtendremos la figura 20 y tendremos el curso de $x_w - x$ respecto a W a lo largo del desecador. En la zona I, en que $W > W_c$,

dicha recta representa también la velocidad $-\frac{dW}{d\theta}$ como función de W , es decir, que para cualquier valor de $W_p > W_c$, encontraremos el correspondiente $-\frac{dW}{d\theta}$ sin más que buscar la intersección de la vertical que

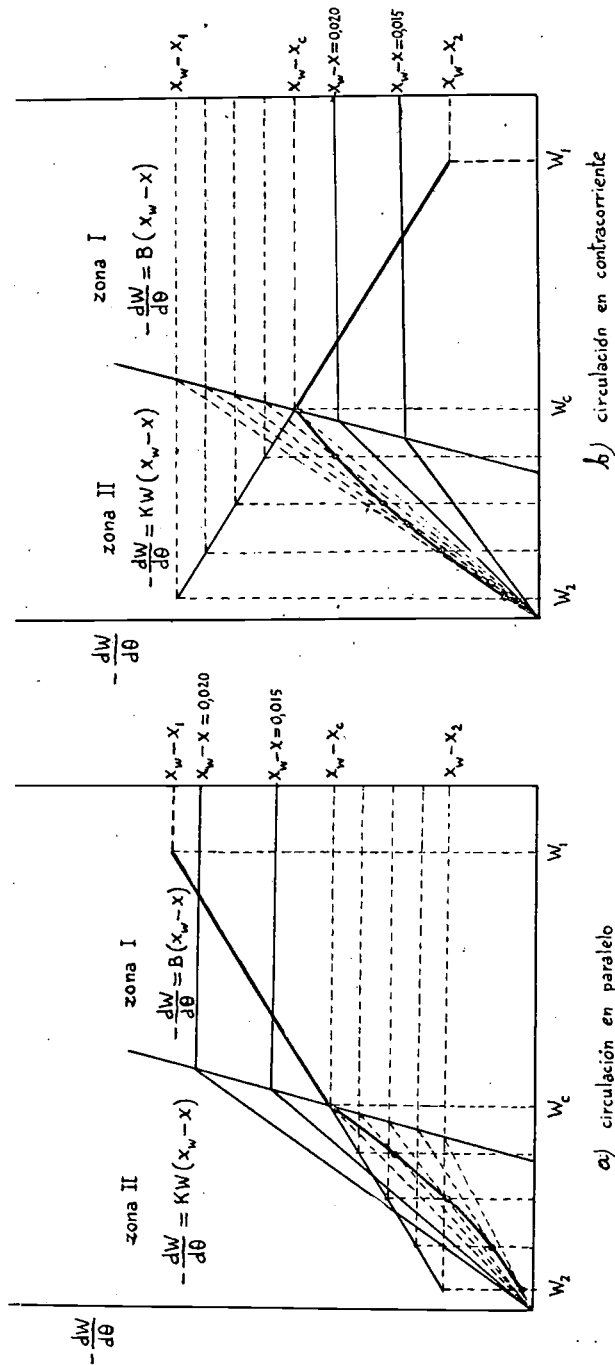


FIG. 20.—Desecación adiabática

pasa por el W_p con dicha recta y leer en el eje de ordenadas la de dicho punto de intersección. Pero para valores $W < W_0$ de la zona II, dicha recta, fácilmente se advertirá, no representa ya la velocidad $-\frac{dW}{d\theta}$ en función de W .

En esta zona II esa recta sólo puede considerarse como representación de $x_w - x$ frente a W , y la velocidad $-\frac{dW}{d\theta}$ para un valor W_p dado se encontrará trazando la vertical hasta encontrar en la recta en cuestión el $x_w - x$ que corresponda, trazando entonces para ese $x_w - x$, la curva completa de velocidad, tanto correspondiente a la zona I como a la II, cosa fácil, pues bastará interpolar entre las curvas experimentales del gráfico. La ordenada correspondiente al punto de intersección de la vertical que pasa por W_p con la curva de velocidad decreciente acabada de trazar, será el valor $-\frac{dW}{d\theta}$ buscado.

Obteniendo de este modo diversos puntos representativos de $-\frac{dW}{d\theta}$ respecto a W en la zona II, podrán ser unidos por una curva, y obtener así esas curvas de trazado grueso de la figura 20 que forman un ángulo obtuso o agudo, respectivamente, con uno de los lados curvos y que representan la curva total $-\frac{dW}{d\theta}$ respecto a θ .

Como en un desecador adiabático $x_w - x$ es función lineal de x , es posible eludir la integración gráfica utilizando valores medios logarítmicos para $x_w - x$.

D E S E C A C I O N

Así, si las ecuaciones de velocidad de desecación son:

$$\text{Zona I} \quad - \frac{dW}{d\theta} = B (x_w - x) \quad (5)$$

$$\text{Zona II} \quad - \frac{dW}{d\theta} = KW (x_w - x) \quad (15)$$

podremos integrarlas de la siguiente forma:

Zona I.

«Circulación en paralelo».

De la figura 19-a:

$$\frac{d(x_w - x)}{dW} = \frac{(x_w - x_1) - (x_w - x_c)}{W_1 - W_c} \quad (21)$$

o bien

$$dW = \frac{W_1 - W_c}{(x_w - x_1) - (x_w - x_c)} d(x_w - x) \quad (21-a)$$

Sustituyendo este valor en (5):

$$\frac{W_1 - W_c}{(x_w - x_1) - (x_w - x_c)} d(x_w - x) = B (x_w - x) d\theta \quad (22)$$

Separando variables e integrando entre límites convenientes:

$$- \int_{x_w - x_1}^{x_w - x_c} \frac{d(x_w - x)}{x_w - x} = \frac{(x_w - x_1) - (x_w - x_c)}{W_1 - W_c} B \int_0^{\theta_1} d\theta \quad (23)$$

es decir:

$$-\ln \frac{x_w - x_c}{x_w - x_1} = \frac{(x_w - x_1) - (x_w - x_c)}{W_1 - W_c} B\theta_I \quad (23-a)$$

de donde finalmente se deduce:

$$\frac{W_1 - W_c}{(x_w - x_1) - (x_w - x_c)} = B\theta_I \quad (23-b)$$

$$\ln \frac{x_w - x_1}{x_w - x_c}$$

«Circulación en contracorriente».

De la figura 19 b):

$$\frac{d(x_w - x)}{dW} = \frac{(x_w - x_2) - (x_w - x_c)}{W_1 - W_c} \quad (24)$$

despejando dW y sustituyendo en (5) y operando como antes, resultará, finalmente:

$$\frac{W_1 - W_c}{(x_w - x_c) - (x_w - x_2)} = B\theta_I \quad (25)$$

$$\ln \frac{x_w - x_c}{x_w - x_2}$$

Zona II.

Separando variables en (15) e integrando entre límites convenientes:

$$-\int_{W_c}^{W_2} \frac{dW}{W(x_w - x)} = K \int_{\theta_I}^{\theta_I + \theta_{II}} d\theta \quad (26)$$

D E S E C A C I O N

Llevando a cabo la integración (sencilla, pero demasiado larga para incluirla aquí) se llega a las expresiones.

Circulación en paralelo:

$$\frac{W_c - W_2}{W_c(x_w - x_2) - W_2(x_w - x_c)} = K \theta_{II} \quad (27)$$

$$\ln \frac{W_c(x_w - x_2)}{W_2(x_w - x_c)}$$

Circulación en contracorriente:

$$\frac{W_c - W_2}{W_c(x_w - x_1) - W_2(x_w - x_c)} = K \theta_{II} \quad (28)$$

$$\ln \frac{W_c(x_w - x_1)}{W_2(x_w - x_c)}$$

En un desecador adiabático t_w es constante, y como t varía prácticamente de modo lineal con x y, por tanto, con W , también $t - t_w$ variará linealmente con W como se ve en la figura 21.

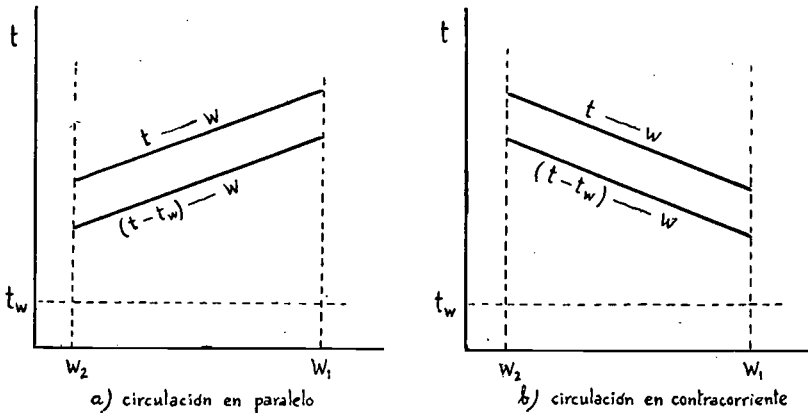


FIG. 21.—Variación de t y $(t - t_w)$ respecto a W en un desecador adiabático

Por tanto, si la velocidad de desecación en la zona I ha de calcularse con la ecuación:

$$- \frac{dW}{d\theta} = B' (t - t_w) = \frac{h}{\rho L r_w} (t - t_w) \quad (5)$$

ésta podrá integrarse así:

$$- \int_{W_1}^{W_0} \frac{dW}{t - t_w} = \frac{h}{\rho L r_w} \int_0^{\theta_1} d\theta \quad (29)$$

o sea

$$\frac{W_1 - W_0}{(t - t_w) \text{ m. l.}} = \frac{h}{\rho L r_w} \theta_1 \quad (29-a)$$

Los desecadores adiabáticos son particularmente utilizados en la desecación de materiales sensibles al calor cuando húmedos, pero no cuando secos (gelatinas, azúcar, etc.).

Problema 3.—Un material ha de ser desecado en un desecador adiabático, desde un contenido acuoso de 0,9 Kgs. de agua por Kg. de material seco hasta un contenido de 0,05 Kgs. de agua por Kg. de material seco. El material circulará en contracorriente con aire que, a su entrada en el desecador, tiene una temperatura de 88° C y una humedad de 0,002 Kgs. de agua por Kg. de aire seco. El gasto másico de aire será de 60 Kgs. de aire seco por Kg. de material seco.

- a) ¿Cuál es la máxima velocidad de desecación en cualquier punto del desecador?
- b) ¿Cuáles son las condiciones críticas?
- c) Calcular el tiempo de desecación necesario.

Datos y Notas.—El agua de equilibrio es despreciable. Los datos de laboratorio obtenidos en condiciones de desecación constante son:

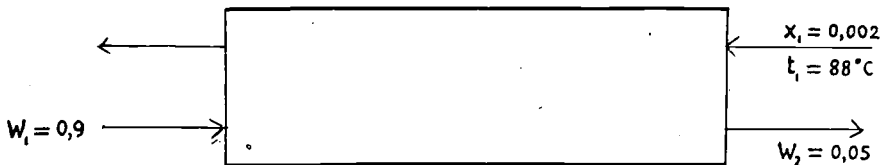
D E S E C A C I O N

Gradiente de humedades $x_w - x$	Contenido acuoso de la sustancia Kgs./Kgs. mat. seco W	Velocidad de dese- cación (Kgs. agua)/ (Kgs. mat. seco) (hr) $-dW/d\theta$
0,002	0,9	0,020
	0,1	0,009
0,006	0,9	0,060
	0,15	0,029
0,010	0,9	0,100
	0,3	0,076
	0,15	0,039
0,014	0,9	0,140
	0,3	0,092
	0,15	0,048
0,018	0,9	0,180
	0,4	0,136
	0,2	0,073
0,022	0,9	0,220
	0,5	0,185
	0,3	0,124
	0,1	0,043
0,026	0,9	0,260
	0,5	0,207
	0,3	0,140
	0,1	0,049

Las condiciones críticas quedan situadas todas sobre una recta cuya ecuación es:

$$-(dW/d\theta)_c = 0,467 W_c - 0,0933$$

Solución.



Base de cálculo: 1 kg. de material seco.

Diagrama de Mollier (del modo indicado en la figura 18):

Humedad de desecación adiabática, constante durante la operación:

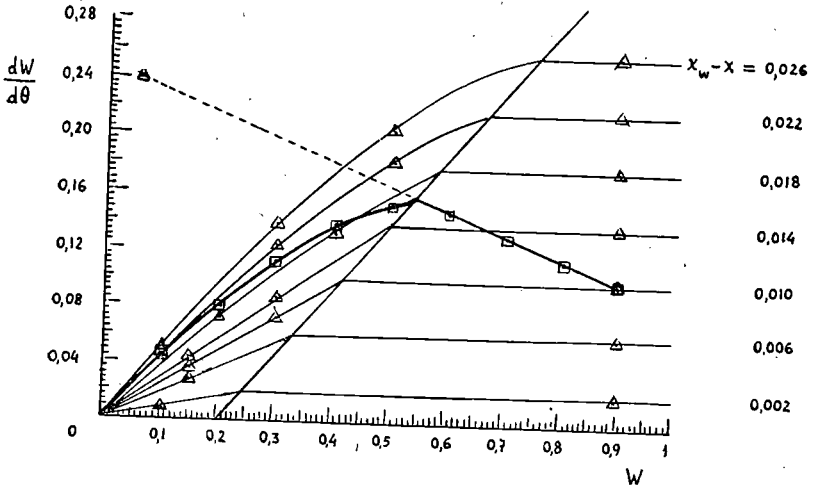
$$x_w = 0,0261$$

ENRIQUE COSTA NOVELLA

Mediante ecuación 17 (balance de agua):

$$0,9 - 0,05 = 60 (x_2 - 0,002); \quad x_2 = 0,0161$$

Mediante los datos del enunciado se construyen las curvas $-dW/d\theta$ respecto a W , y en el mismo gráfico se representa la función lineal $x_w - x_p$ respecto a W_p .



Ecuación 18 b:

$$x_p = \left(\frac{m x_2 - W_1}{m} \right) + \frac{1}{m} W_p = \frac{(60)(0,0161) - 0,9}{60} + \frac{1}{60} W_p = 0,0166 W_p + 0,001166 \quad (a)$$

Para $W_p = W_1 = 0,9$; $x_p = x_2 = 0,0161$;
 $x_w - x_p = 0,0261 - 0,0161 = 0,01$

$W_p = W_2 = 0,05$; $x_p = x_1 = 0,002$;
 $x_w - x_p = 0,0261 - 0,002 = 0,0241$

Observando el corte de las verticales levantadas por distintos valores de W_p con la recta (a) acabada de trazar, o bien resolviendo analíticamente (a) para esos valores y leyendo luego, por interpolación, el valor de $-dW/d\theta$ de que corresponda para cada valor que se encuentre de $x_w - x$ se obtiene la siguiente tabla:

D E S E C A C I O N

W_p	$x_w - x_p$	$-dW/d\theta$	$-d\theta/dW$
0,9	0,01	0,1	10,00
0,8	0,0116	0,116	8,61
0,7	0,0133	0,133	7,52
0,6	0,0149	0,149	6,71
0,5	0,0166	0,153	6,54
0,4	0,0183	0,139	7,19
0,3	0,0199	0,114	8,76
0,2	0,0216	0,080	12,50
0,1	0,0233	0,044	22,70
0,05	0,002	0,021	47,60

a) La máxima velocidad de desecación corresponde al punto crítico del gráfico:

$$-(dW/d\theta)_c = 0,1598 \text{ Kgs. agua/(hr) (Kgs. material seco)}$$

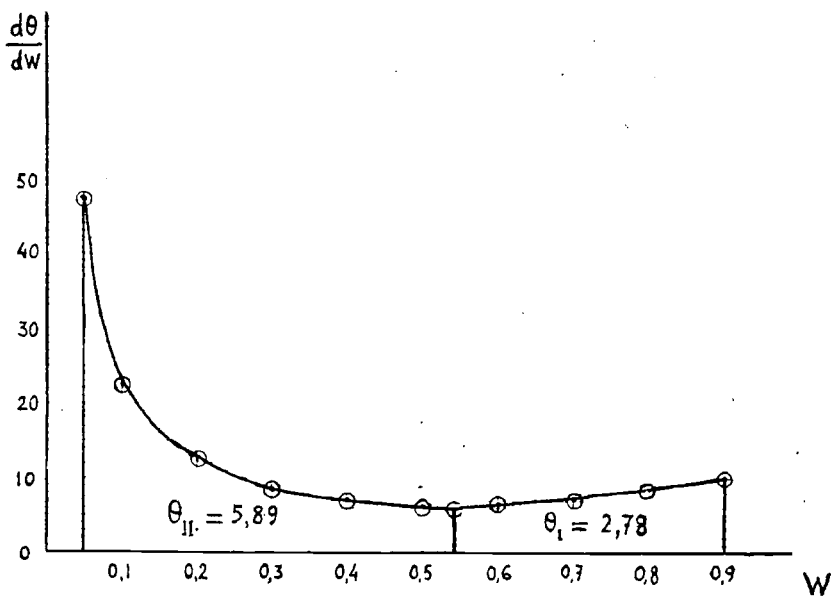
b) Del gráfico:

$$W_c = 0,54$$

$$x_w - x_c = 0,01598$$

$$x_c = 0,01012$$

c)



c)

$$\int (d\theta/dW) dW = \theta$$

Integración gráfica con los datos de la tabla anterior y los valores del punto crítico ($W_c = 0,54$; $-(d\theta/dW)_c = 6,27$).

$$\theta_I = 2,78$$

$$\theta_{II} = 5,89$$

$$\theta_T = 8,67 \text{ horas}$$

Para el período $W > W_c$, puede utilizarse la ecuación 5 y resolverse analíticamente:

$$-\frac{dW}{d\theta} = B(x_w - x); \quad B = \frac{\left(-\frac{dW}{d\theta}\right)_c}{(x_w - x)_c} = \frac{0,1598}{0,01598} = 10$$

Ecuación 25:

$$\theta_I = \frac{1}{B} \frac{W_1 - W_c}{\ln \frac{x_w - x_c}{x_w - x_2}} =$$

$$= \frac{1}{10} \frac{0,9 - 0,54}{(0,0261 - 0,01012) - (0,0261 - 0,0161)} = 2,80 \text{ horas}$$

$$\ln \frac{0,0261 - 0,01012}{0,0261 - 0,0161}$$

2.—*Desecador a temperatura media constante.*

El aire que circula por el desecador se calienta intermitentemente, enfriándose al humidificarse adiabáticamente con el agua que humedece el material, en el intervalo que media entre dos calefacciones; por ello la constancia de temperatura se refiere a la temperatura media. Las variaciones de humedad del aire, al atravesar el desecador, se representan en el diagrama de Mollier de la figura 22.

D E S E C A C I O N

Como ya dijimos, aquí x_w no es constante, por lo que $x_w - x$ no es función lineal de x , ni, por tanto, de W . Ya indicamos anteriormente, figura 16 b, el modo de hallar el valor de x_w que corresponde a cada uno de x .

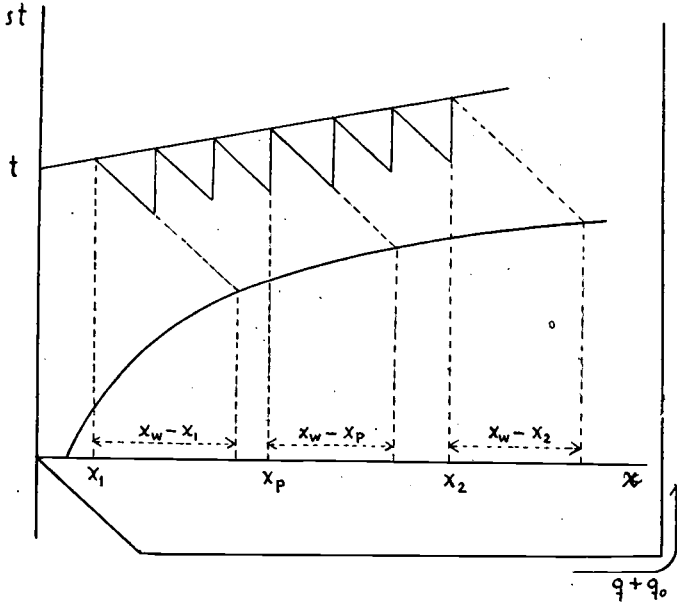


FIG. 22.—Desecación a temperatura media constante

Se utilizan los desecadores de temperatura constante para materiales sensibles al calor cuando secos, pero no cuando húmedos (fibras textiles, caucho, etc.).

Problema 4.—Se desea desecar 3.000 Kgs. por hora de una torta procedente de un filtro prensa con 26 Kgs. de agua por cada 100 Kgs. de material seco, hasta reducir su humedad a 3 Kgs. de agua por cada 100 Kgs. de material seco. Se proyecta utilizar un desecador túnel con las siguientes características:

Circulación en contracorriente de aire y material.

Control termostático para mantener una temperatura media constante e igual a 63° C.

El aire se precalienta antes de su entrada en el desecador, teniendo al entrar en el precalentador una temperatura de 21° C. y una humedad relativa del 50 por 100, y al salir del desecador, una humedad absoluta que corresponde al 70 por 100 de la humedad absoluta de saturación.

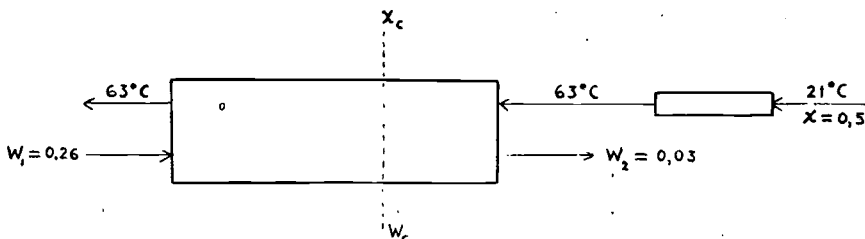
Para el transporte del material se dispone de unas vagonetas provistas de bandejas

con fondos de tela metálica. Es posible colocar un peso de torta húmeda correspondiente a 21,5 Kgs. de material seco por cada metro cuadrado de superficie de bandeja, siendo 75 metros cuadrados la superficie de las mismas que corresponde a cada metro de longitud de desecador.

Calcular la longitud de desecado que se requiere.

Datos y Notas.—Puede considerarse que la humedad crítica del material es de 10 Kgs. de agua por cada 100 Kgs. de material seco, y que la humedad de equilibrio, con relación a las condiciones del aire de entrada, es despreciable. La velocidad del aire sobre las bandejas es la adecuada para obtener un coeficiente de película de transmisión de calor desde el aire al material de 12.2 Kcal./ (hr.) (m.²) (°C.), tanto para la superficie superior como para la inferior de la torta. Considérese que en el período de velocidad de desecación decreciente, $W < W_c$, aquélla es directamente proporcional, únicamente, al contenido de agua libre.

Solución.



Base de cálculo: 1 Kg. de material seco.

Considérese la temperatura del material igual a la temperatura húmeda del aire.

De las tablas de vapor:

Presión de saturación a 63° C. = 0,226 atm.

Presión de saturación a 21° C. = 0,0245 atm.

$$x_{s2} = \frac{0,226}{1 - 0,226} \frac{18}{29} = 0,1816; \quad x_2 = (0,70) (0,1816) = 0,1271$$

$$x_1 = \frac{\rho p_s}{P - \rho p_s} \frac{18}{29} = \frac{(0,5) (0,0245)}{1 - (0,5) (0,0245)} \frac{18}{29} = 0,0077$$

Zona I $W > W_c$.

Las ecuaciones 4 y 5, combinadas e introduciendo la superficie S, nos dan:

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{hS}{\rho LSr_w} (t - t_w)$$

en donde, refiriéndonos al material situado por metro cuadrado de bandeja, que corresponde a 2 metros cuadrados (ambos lados) de superficie de desecación en aquél:

D E S E C A C I O N

$$S = 2 \text{ m.}^2.$$

$$\rho \text{ LS} = 21,5 \text{ Kgs. de material seco.}$$

$$h = 12,2 \text{ Kcal./}(\text{hr.}) (\text{m.}^2) (\text{° C.}).$$

Por tanto:

$$-\frac{dW}{d\theta} = \frac{(12,2)(2)}{21,5} \frac{t-t_w}{r_w} = 1,135 \frac{t-t_w}{r_w} \quad (a)$$

Puede huirse de la integración gráfica, tomando un valor medio logarítmico para el gradiente $t-t_w$, ya que aunque t_w no varía linealmente con x y, por tanto, tampoco lo hace $t-t_w$, si la variación de t_w no es excesiva, esta aproximación es aceptable, y un valor medio para r_w que corresponda a la media aritmética de las temperaturas t_w del material.

Ecuación 17:

$$0,26 - 0,03 = m (0,1271 - 0,0077); \quad m = 1,926 \text{ Kgs. aire seco/Kgs. material seco}$$

Ecuación 18:

$$0,26 - 0,10 = 1,926 (0,1271 - x_c); \quad x_c = 0,044$$

En el diagrama de Mollier, del modo indicado en la figura 16 b, encontramos:

$$\text{Para } x_2 = 0,1271: t_{w2} = 57^\circ \text{ C.} \quad \text{y para } x_c = 0,044: t_{wc} = 41,9^\circ \text{ C.}$$

$$t_{m.l.} = \frac{(63 - 41,9) - (63 - 57)}{\ln \frac{63 - 41,9}{63 - 57}} = 12$$

$$t_{w.m.a.} = \frac{57 + 41,9}{2} = 49,5$$

en las tablas de vapor se encuentra a esta temperatura $r_w = 570 \text{ Kcal./Kg.}$

Con estos datos, integrando (a):

$$-\int_{W_1}^{W_0} dW = \frac{(1,135)(12)}{570} \int_{\theta_1}^{\theta_0} d\theta$$

$$W_1 - W_0 = 0,0239 \theta_I ; \quad \theta_I = \frac{0,26 - 0,10}{0,0239} = 6,695 \text{ horas}$$

Zona II $W < W_0$.

$$\text{Según el enunciado} \quad - \frac{dW}{d\theta} = KW \quad (b)$$

Ecuación 16 y ecuación (a):

$$- \left(\frac{d\theta}{dW} \right)_0 = 1,135 \frac{t - t_w}{r_w} = KW_0$$

En las tablas de vapor se encuentra para $t_w = 41,9^\circ \text{C}$, $r_w = 575 \text{ Kcal./Kg}$.

$$K = 1,135 \frac{63 - 41,9}{575} \frac{1}{0,10} = 0,416$$

Integrando (b):

$$- \int_{W_0}^{W_2} \frac{dW}{W} = 0,416 \int_{\theta_0}^{\theta_2} d\theta$$

$$\theta_{II} = \frac{1}{0,416} \ln \frac{W_0}{W_2} = \frac{1}{0,416} \ln \frac{0,10}{0,03} = 2,885 \text{ horas}$$

$$\theta = \theta_I + \theta_{II} = 6,695 + 2,885 = 9,58 \text{ horas}$$

Longitud del desecador:

En la ecuación 19:

$M = 3.000 \text{ Kgs. material húmedo.}$

$N = (21,5) (1,26) (75) = 2.030 \text{ Kgs. mat. húmedo/m.}$

$\theta = 9,58 \text{ horas.}$

$$L = \frac{N}{M} \theta = \frac{3.000}{2.030} 9,58 = 14,2 \text{ metros}$$

3.—Desecador de humedad controlada.

Se procura controlar la temperatura del aire que circula por el desecador de tal manera que, prácticamente, resulta un gradiente $(x_w - x)$ constante. En el diagrama de Mollier de la figura 23 se representa el paso que habrá de seguir el aire para que se cumpla aquella condición.

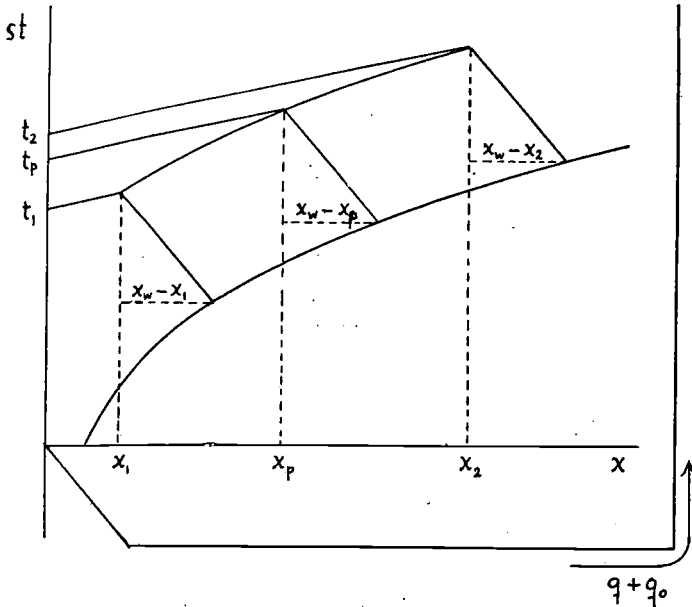


FIG. 23.—Desecación con humedad controlada

El aire deberá variar su humedad y temperatura a lo largo de una línea que, como se ve en la figura, es paralela a la curva de saturación. Este desecador es, pues, una simple variación del desecador con temperatura constante y se construirá de modo similar. Suelen utilizarse, sobre todo, en la desecación de cristales con agua de cristalización y, en general, de aquellos materiales que se descomponen si la humedad rebasa ciertos límites superior e inferior. También para materiales que no pueden soportar excesiva velocidad de secado, como madera, cerámica, papel, etc.

Como en estos desecadores $x_w - x$ es prácticamente constante, se podrá eludir aquí también la integración gráfica de $\int (d\theta/dW) dW$, si se dispone de las ecuaciones de velocidad de desecación:

Así, si conocemos las constantes de las ecuaciones

$$\text{Zona I} \quad - \frac{dW}{d\theta} = B (x_w - x) \quad (5)$$

$$\text{Zona II} \quad - \frac{dW}{d\theta} = KW (x_w - x) \quad (15)$$

será posible integrar directamente, tomando un valor medio aritmético del gradiente $x_w - x$, si éste varía ligeramente:

$$\theta_I = \frac{W_1 - W_c}{B (x_w - x)_{m. a.}} \quad (30)$$

$$\theta_{II} = \frac{\ln (W_c / W_2)}{K (x_w - x)_{m. a.}} \quad (31)$$

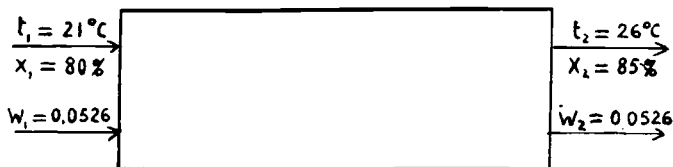
Problema 5.—Se necesitan desecar 100 kilogramos por hora de $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, desde 5,26 a 0,526 Kgs. de agua libre por 100 Kgs. de material seco, en un desecador de túnel. A causa de que esta sal pierde su agua de cristalización, si se le somete a condiciones inconvenientes de temperatura y humedad, un estudio previo de sus propiedades aconseja utilizar en su desecación aire que tenga inicialmente una temperatura de 21° C. y una humedad relativa de 80 por 100, y que abandone el desecador con 26° C. de temperatura y 85 por 100 de humedad, como máximo. La humedad crítica del material excede los 5,3 Kgs. de agua por Kg. de material seco. En el desecador los cristales forman capa de 2,5 centímetros de espesor sobre bandejas perforadas, situadas unas sobre otras de modo que dejen un espacio libre entre ellas de también 2,5 centímetros. El aire pasa por entre las bandejas con una velocidad másica de 120 Kgs./metro cuadrado de sección libre transversal (minuto). Experimentos previos prueban que para $W < W_c$, la constante K de la ecuación $-dW/d\theta = KW (x_w - x)$ tiene un valor de 180, si θ se expresa en horas y el gradiente de humedades del modo habitual, y que la humedad de equilibrio de la sal es nula.

Calcular las dimensiones mínimas del desecador.

Datos y Notas.—Como quiera que el agua que humedece la sal está en forma de solución saturada, durante la desecación no alcanzará la temperatura húmeda del aire, sino que a causa del descenso de la presión de vapor, provocado por la sal, su temperatura será algo mayor, con un porcentaje acuoso de 98.

La densidad aparente del producto es 0,9 gramos/centímetro cúbico.

Solución:



D E S E C A C I O N

Por ser $W_c > W_2$, sólo se tendrá el segundo período de desecación. Diagrama de Mollier o gráfico de humedades:

$$x_1 = 0,0125 \qquad x_2 = 0,0188$$

Ecuación 17:

$$0,0526 - 0,00526 = m (0,0188 - 0,0125);$$

$$m = 7,5 \text{ Kgs. aire seco/Kg. material seco}$$

Material seco por hora:

$$(100/105,26) 100 = 95 \text{ Kgs./hr.}$$

Aire total necesario:

$$(7,5) (95) = 714 \text{ Kgs./hr.} = 11,9 \text{ Kgs./minuto}$$

Sección transversal libre de desecador necesaria:

$$11,9/120 = 0,099 \text{ metros cuadrados}$$

Puesto que el espesor de la capa de producto iguala al espacio libre:
Sección transversal total de desecador necesaria:

$$(0,099) (2) = 0,198 \text{ metros cuadrados}$$

Diagrama de Mollier o gráfico de humedades:

Adiabática que pasa por $x_1 = 0,0125$:

$$x_{w1} = 0,0134$$

por interpolación entre $\rho = 0,80$, correspondiente a x_1 , y $\rho = 1,00$, correspondiente a x_{w1} , se encuentra para $\rho = 0,98$ (contenido acuoso de la solución saturada), $x_{s1} = 0,01336$. Por tanto:

$$x_{s1} - x_1 = 0,01336 - 0,0125 = 0,00086$$

Del mismo modo, adiabática que pasa por $x_2 = 0,0188$: $x_{w2} = 0,0195$, $x_{s2} = 0,01943$ y,

$$x_{s2} - x_2 = 0,01943 - 0,0188 = 0,00063$$

Ecuación 31:

$$\theta_{II} = \frac{\ln (0,0526/0,00526)}{(180) (0,00086 + 0,00063)/2} = 17 \text{ horas}$$

La densidad del producto es 0,9, es decir, los 100 Kgs. que entran en el desecador por hora ocuparán un volumen de $100/900 = 0,1111$ metros cúbicos, y como la

ENRIQUE COSTA NOVELLA

sección ocupada por el producto, despreciando el grosor de las bandejas, igual a la sección libre, es de 0,099 metros cuadrados, los 100 Kgs. ocuparán una longitud de desecador de $0,1111/0,099 = 1,12$ metros.

Ecuación 19:

$$L = \frac{M}{N} \theta = \frac{100}{100/1,12} 17 = 19 \text{ metros}$$

Las dimensiones calculadas para conseguir la velocidad másica de aire apropiada, así como el tiempo de residencia adecuado, no son prácticas. Si se utilizasen vagonetas con dimensiones internas de 1,5 metros de altura, 1 metro de anchura y 1,32 metros de profundidad, puesto que las bandejas distan 2,5 centímetros y el espesor de capa de producto también 2,5 cm., podrían situarse 30 bandejas en cada vagoneta, que en total contendrían:

$$(30) (1) (1,32) (0,025) (900) = 890 \text{ Kgs. de producto;}$$

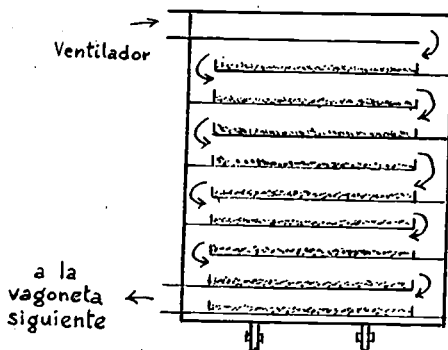
Este peso será por 1,32 metros de longitud de desecador, luego:

Ecuación 19:

$$L = \frac{100}{890/1,32} 17 = 2,52 \text{ metros de longitud mínima.}$$

Esto equivaldría a 1,9 vagonetas continuamente en el interior del túnel. Tomando, como margen de seguridad, una longitud de 5,18 metros, se tendrían continuamente cuatro vagonetas en el interior del túnel.

Se conseguiría mantener la velocidad másica de aire indicada en el enunciado haciéndolo circular transversalmente, como se indica en el esquema adjunto, mediante ventiladores laterales convenientes.



De este modo, la sección de paso del aire sería:

$$(1/2) (1,5/10) (1,32) = 0,099 \text{ metros cuadrados}$$

como antes.

DESECCACION

La circulación indicada se consigue mediante una adecuada construcción de las vagonetas.

La altura y anchura del túnel dependerán de la altura de las ruedas y del espacio libre que se deje a los lados de las vagonetas, donde habrá que situar los ventiladores y sistemas calefactores a fin de mantener la temperatura y humedad adecuada.

Resaltemos que sólo en los desecadores adiabáticos se cumple la relación lineal entre $x_w - x$ y W . Tanto en los desecadores de temperatura media constante como en los de humedad controlada, al representar $x_w - x$ frente a W , en los diagramas de velocidad de desecación — $dW/d\theta$ frente a W , se obtendrá una curva, como puede apreciarse en la figura 24.

No nos extendemos en los detalles de trazado de la curva angular — $dW/d\theta$ respecto a W , por haberlos dado al referirnos a la figura similar 20 y por ser dicho trazado fácil de advertir con sólo observar la figura.

Para completar el proyectado de los desecadores continuos con aire como agente desecador, faltará calcular el calor necesario, teniendo en cuenta, no sólo el que se requiere para evaporar el agua, sino también el que se pierde en forma de calor sensible con el material desecado, mecanismos transportadores y aire húmedo y las pérdidas hacia los alrededores.

Habrá que calcular también la superficie que se requiere para la precalefacción del aire, habrá que prever dispositivos de control de temperaturas y humedades en diversos puntos del desecador y, finalmente, será necesario calcular la caída de presión que el aire experimenta al circular por el desecador a fin de decidir la potencia del ventilador o compresor que ha de mantener la circulación aludida.

Proyectado de desecadores en que el material a desecar está en contacto directo con una superficie metálica calefactora. — Podemos incluir en este grupo, ciertos armarios desecadores con bandejas (página 43), los desecadores de cilindros y los tambores desecadores, en todos los cuales el vapor de agua se emplea como elemento de calefacción de esas superficies metálicas que, a su vez, han de calentar el material que se deseca.

El problema de proyectado de estos desecadores se reduce a un problema de transmisión de calor y, por consiguiente, nos abstenemos de abordarlo aquí con detalle.

Proyectado de desecadores en los que el material que se deseca se calienta por contacto directo o indirecto con gases de combustión procedentes de un hogar.—Pertenecen a este grupo algunos desecadores

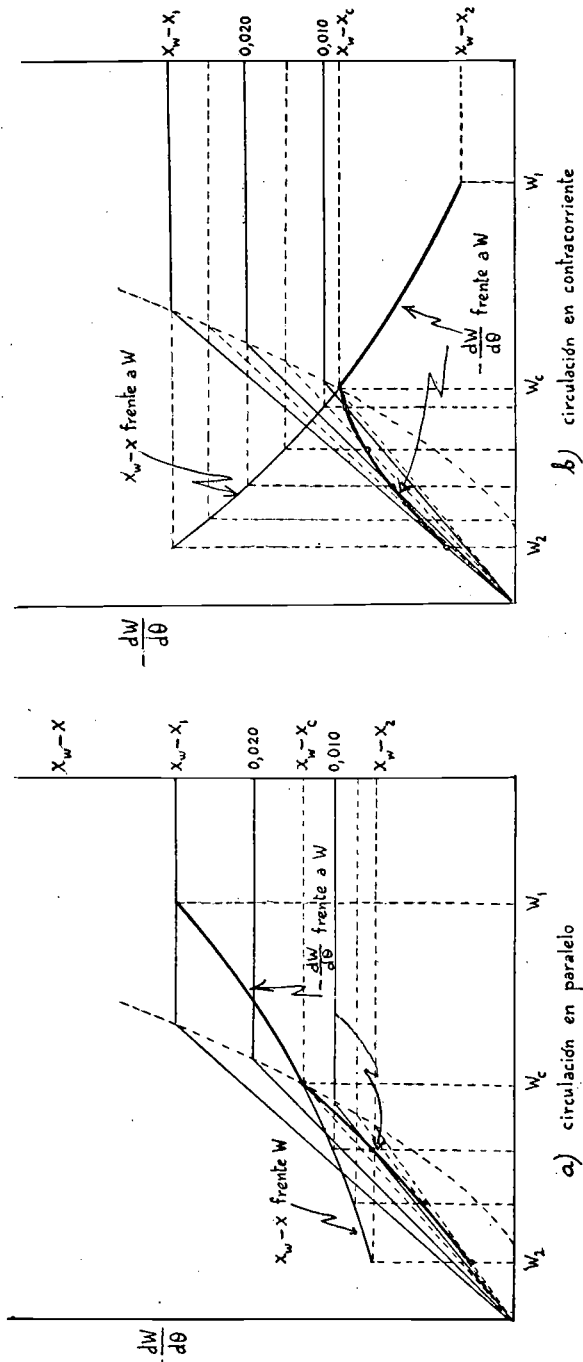


FIG. 24.—Desecación no adiabática

D E S E C A C I O N

rotatorios, algunos de túnel y otros de pulverización. En ellos, la temperatura del material que se seca varía con el tiempo de permanencia del mismo en el desecador. En efecto, al principio empieza a ascender la temperatura del material, sin que haya apenas evaporación y, por tanto, desecación; este período se denomina de *precafección*. Llega un momento en que se inicia la evaporación, consumiéndose en ésta casi todo el calor que recibe el material, cuya temperatura apenas varía: período de desecación propiamente dicho o de *evaporación*. Finalmente, cuando ya casi toda el agua se eliminó, la temperatura del material asciende de nuevo: período de *sobrecalfacción*.

También el proyectado de estos desecadores queda reducido a un problema de transmisión de calor, que convendrá desglosar en los tres períodos citados. Suele ser conveniente englobar el producto (hA) del coeficiente de transmisión de calor por la superficie de calefacción, en un coeficiente único, dada la vaguedad de A en estos tipos de transmisión calorífica. El nuevo coeficiente (hA) habrá de ser determinado experimentalmente para cada material y tipo de aparato, a ser posible en desecadores industriales en funcionamiento.

Problema 6.—En un desecador rotatorio de acero, perfectamente aislado térmicamente, de 12 metros de longitud y 1,2 metros de diámetro, con velocidad de rotación de 7,5 revoluciones por minuto, se desecan 500 Kgs. por hora de un mineral que contiene 15 Kgs. de agua por cada 100 Kgs. del mismo. El mineral, al entrar en el desecador, tiene una temperatura de 21° C.; al abandonarlo, 121° C. El calor específico del mineral seco es 0,2 Kcal./Kg. $^{\circ}$ C. El material ocupa, aproximadamente, el 7 por 100 del volumen total. El gas procedente de la combustión de coque, que circula en contracorriente, en contacto directo con el material, entra en el desecador a una temperatura de 600° C. y lo abandona a 70° C. La composición del gas es 14,35 por 100 de CO_2 , 2,05 por 100 de CO , 3,79 por 100 de O_2 , 79,81 por 100 de N_2 . Su punto de rocío a la entrada es de $24,4^{\circ}$ C. ($p_{H_2O} = 22,8$ mm. de Hg.), y su presión, la atmosférica normal.

a) Calcular la velocidad de salida y el gasto másico del gas, el calor consumido en la evaporación y el que se pierde con el material seco.

b) Proyectar un recuperador de calor, de características similares a las del desecador, para precalentar el aire necesario en la combustión del coque, recuperando el 75 por 100 del calor que se perdería con el material seco.

Datos y Notas.—Valores medios de los calores molares, Kcal./(mol. Kg.) ($^{\circ}$ C.):

	0 — 70° C.	0 — 600° C.
CO_2	9,3	9,9
CO	6,9	7,4
O_2	7,1	7,6
N_2	6,9	7,3
H_2O	7,9	8,7

ENRIQUE COSTA NOVELLA

Solución:

a) Balance total de calor:

Calor invertido en calentar el material seco + Calor invertido en calentar y vaporizar el agua humectante = Calor cedido por el gas al enfriarse.

Calefacción del mineral seco desde 21 a 121° C.:

$$(500) (0,85) (0,2) (121 - 21) = 8.500 \text{ Kcal./hr.}$$

Calefacción y vaporización desde agua a 21° C. a vapor a 70° C.

$$(500) (0,15) [(1) (70 - 21) + 574] = 46.725 \text{ Kcal./hr.}$$

(Tablas de vapor: calor latente a 70° C.: 574 Kcal./Kg.)

Enfriamiento del gas desde 600° C. a 70° C.:

Base 100 mols. de gas.

Humedad del gas: $(22,8 / (760 - 22,8)) 100 = 3,09$ mols. de vapor.

$$\text{CO}_2 \quad 14,35 [(9,9) (600) - (9,3) (70)] = 75.800$$

$$\text{CO} \quad 2,05 [(7,4) (600) - (6,9) (70)] = 8.100$$

$$\text{O}_2 \quad 3,79 [(7,6) (600) - (7,1) (70)] = 15.400$$

$$\text{N}_2 \quad 79,81 [(7,3) (600) - (6,9) (70)] = 311.000$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 3,09 [(8,7) (600) - (7,9) (70)] = 14.400$$

TOTAL = 424.700 Kcal./100 mols. gas seco.

$$8.500 + 46.725 = (4.247) \text{ (N.º de mols. Kg. de gas seco por hora).}$$

$$\text{N.º de mols. Kg. gas seco/hr.} = \frac{55.225}{4.247} = 13.$$

$$\text{N.º de mols. Kg. gas húmedo/hr.} = (13) (1,0309) = 13,4.$$

Peso molecular medio del gas:

$$\frac{(14,35) (44) + (2,05) (28) + (3,79) (32) + (79,81) (28) + (3,09) (18)}{103,09} = 30$$

$$\text{Gasto másico a la entrada} = (13,4) (30) = 402 \text{ Kgs./hr.}$$

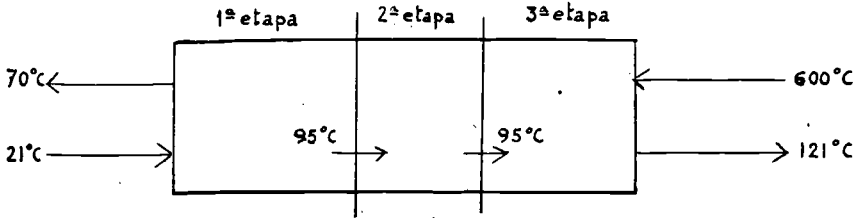
$$\text{Gasto másico a la salida} = 402 + (500) (0,15) = 477 \text{ Kgs. aire húmedo/hr.}$$

D E S E C A C I O N

$$\text{Velocidad m\u00e1sica de salida} = \frac{477}{\pi (1,2^2)} = 422 \text{ Kgs./}(\text{hr.}) (\text{m.}^2).$$

4

b) Hagamos la hip\u00f3tesis de que la vaporizaci\u00f3n del agua tiene lugar a 95\u00b0 C. Consideremos dividido el recuperador de calor que se quiere proyectar, en tres zonas:



1.^a Zona: Per\u00edodo de precalentamiento.

El material seco con el agua que lo humedece se calienta desde 21 a 95\u00b0 C.:

$$(500) (0,15) (1) (95 - 21) + (500) (0,85) (0,2) (95 - 21) = 11.840 \text{ Kcal./hr.}$$

2.^a Zona: Per\u00edodo de evaporaci\u00f3n.

Vaporizaci\u00f3n del agua a 95\u00b0 C. En las tablas de vapor se encuentra calor de vaporizaci\u00f3n del agua a esa temperatura: 544 Kcal./Kg.:

$$(500) (0,15) (544) = 40.800 \text{ Kcal./hr.}$$

3.^a Zona: Per\u00edodo de sobrecalentamiento.

Calefacci\u00f3n del material seco de 95 a 121\u00b0 C.:

$$(500) (0,85) (0,2) (121 - 95) = 2.210 \text{ Kcal./hr.}$$

Enfriamiento del gas:

Pasando por alto ahora las variaciones de los calores molares con la temperatura, el calor liberado por el gas al enfriarse 1\u00b0 C. ser\u00e1:

$$\frac{(13) \left(\frac{424.700}{100} \right)}{600 - 70} = 102,1 \text{ Kcal./}1^\circ \text{ C. de descenso de temperatura.}$$

Descenso de la temperatura del gas en la tercera zona:

$$2.210/102,1 = 21,6^\circ \text{ C.}$$

es decir, en ella el gas pasa de 600\u00b0 C. a 600 - 21,6 = 578,4\u00b0 C.

ENRIQUE COSTA NOVELLA

Descenso de la temperatura del gas en la segunda zona:

Para calcular este descenso no puede operarse como en el caso de la tercera zona, ya que el gas se enfría, no sólo por perder el calor necesario para la vaporización del agua, sino también por el efecto diluyente de este vapor. Si suponemos t° C. es la temperatura al empezar la etapa de evaporación, un balance calor alrededor de la segunda zona podrá expresarse así:

$$(102,1) (578,4 - t) = 40.800 + (500) (0,15) (0,48) (t - 200)$$

de donde:

$$t = 184^{\circ} \text{ C.}$$

Así, pues, la correspondencia entre las temperaturas del gas y del material a lo largo del desecador es:

	Zona 1. ^a Precalentación		Zona 2. ^a Evaporación		Zona 3. ^a Sobrecalentación	
	Principio	Fin	Principio	Fin	Principio	Fin
Temperatura gas ...	70	184	184	578,4	578,4	600
Temperatura del material	21	95	95	95	95	121
Diferencia de temperaturas	49	89	89	483,4	483,4	479
Diferencia de temperatura media para cada zona:						

$$(\Delta t)_m \dots \dots \dots \frac{49 + 89}{2} = 69 \quad \frac{483,4 - 89}{\ln \frac{483,4}{89}} = 234 \quad \frac{483,4 + 479}{2} = 481,2$$

En la zona de evaporación tomamos como diferencia media de temperaturas la media logarítmica, aunque no sea estrictamente aplicable debido al efecto de dilución del vapor.

En cada zona podrá aplicarse la correspondiente ecuación de transmisión de calor, $dQ/d\theta = q = hA (\Delta t)_m$. Si A_1 , A_2 y A_3 representan las superficies de material expuestas en cada una de las tres zonas, A será la superficie total expuesta, suma de las tres anteriores. Puesto que la resistencia principal al paso del calor en las tres zonas, se localizan en la película gaseosa que se forma sobre la superficie del material y el espesor de ésta y, por tanto, h depende de la velocidad de circulación del gas sobre el material que, en este caso, puede suponerse constante para las tres

D E S E C A C I O N

zonas, también el coeficiente de transmisión de calor h puede suponerse constante para las mismas.

Zona de precalentamiento:

$$hA_1 = \frac{q_1}{(\Delta t)_{m1}} = \frac{11.840}{69} = 172 \text{ Kcal./hr. } (^{\circ}\text{C})$$

Zona de evaporación:

$$hA_2 = \frac{q_2}{(\Delta t)_{m2}} = \frac{40.800}{234} = 174 \text{ Kcal./hr. } (^{\circ}\text{C})$$

Zona de sobrecalentamiento:

$$hA_3 = \frac{q_3}{(\Delta t)_{m3}} = \frac{2.210}{481,2} = 4,6 \text{ Kcal./hr. } (^{\circ}\text{C})$$

$$hA_1 + hA_2 + hA_3 = hA = 350,6 \text{ Kcal./hr. } (^{\circ}\text{C})$$

La cantidad de aire utilizado en la combustión y, por tanto, el disponible para la recuperación de calor, se deducirá del contenido de nitrógeno del gas de combustión, puesto que aquél procede totalmente del aire:

$$13 (79,81/79) = 13,6 \text{ mols. de aire seco}$$

$$(13,6) (29) = 394 \text{ Kgs. de aire seco}$$

Calor que debe ser recuperado:

$$(8.500) (0,75) = 6.375 \text{ Kcal./hr.}$$

La temperatura del aire que entrará en el recuperador de calor es 21°C ., llamando t_a la de salida y tomando el calor específico del aire igual a $0,24$:

$$(394) (0,24) (t_a - 21) = 6.375 ; \quad t_a = 88,5^{\circ}\text{C.}$$

La temperatura t_m con que el material abandonará el recuperador será:

$$6.375 = (500) (0,85) (0,2) (121 - t_m); \quad t_m = 46^{\circ}\text{C.}$$

ENRIQUE COSTA NOVELLA

Por tanto:

	Recuperador	
	<i>Principio</i>	<i>Final</i>
Temperatura del material	121	46
Temperatura del aire	88,5	21
Diferencia de temperaturas	32,5	25
Media logarítmica de las diferencias de temperaturas		28,6° C.

Así, pues, podrá escribirse para el recuperador:

$$(hA)_{\text{recup.}} = \frac{q_r}{(\Delta t)_m} = \frac{6.375}{28,6} = 223 \text{ Kcal./}(\text{hr.}) (\text{° C.})$$

Como los valores (hA) son proporcionales a los volúmenes de desecador y recuperador:

$$\begin{aligned} \text{Volumen recuperador/volumen desecador} &= (hA) \text{ rec.}/(hA) \text{ desec.} = \\ &= 223/350,6 = 0,635 \end{aligned}$$

es decir, el volumen del recuperador de calor debe ser un 63,5 por 100 el del desecador. Se dará al recuperador el mismo diámetro del desecador, a fin de mantener la velocidad gaseosa prácticamente la misma, y una longitud 0,635 la del desecador.

BIBLIOGRAFIA

- (1) BERKNES, Wood Prod. 45 (9), 12 (1940).
- (2) BOSOMWORTH, Can. Chem. Process. Ind. 30 (7), 28 (1946).
- (3) BROWN, Proc. Inst. Radio. Engrs. 34 (2), 58 (1946).
- (4) MC. CREADY y MC. CABE, Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 29, 131-160 (1933).
BADGER, MC. CABE, «Elements of Chemical Engineering» 2 Ed. McGraw-Hill Book Company Inc. New York, 1936.
- (5) NONKEN, Tech. Assoc. Papers., 27, 625 (1944).
- (6) PERRY, «Chemical Engineering Handbook» McGraw-Hill Book Company Inc. New York, 1950.
- (7) RUZKA, Textile World, 96 (5), 118 (1946).
- (8) TILLER y GARBER, Ind. Eng. Chem. 34, 773 (1942).
- (9) VAUGHN y al., Va. Polytechnic Ints. Eng. Exp. Sta. Bull., 42, 34 (1940).