



## ANALES DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA

Se publican a través del curso académico, a base de un cuaderno o fascículo para cada una de las Facultades universitarias, completado por uno de Crónica, en el que se recoge la actividad general de la Universidad, durante el respectivo curso y de sus distintas Facultades, instituciones y servicios.

La publicación de *Anales*, puesta bajo la alta dirección del Magnífico y Excmo. Sr. Rector de la Universidad y de los Ilustres Sres. Decanos de las cuatro Facultades, se halla confiada a una Comisión de Redacción, integrada por los siguientes señores: Director, Ilustrísimo Sr. D. José Santa Cruz Teijeiro, Decano de la Facultad de Derecho y Director del Secretariado de Publicaciones. Vocales: don Antonio Llobart Rodríguez, Catedrático y Vicedecano de la Facultad de Medicina; don Pablo Alvarez Rubiano, Catedrático de la Facultad de Filosofía y Letras, y don Enrique Costa Novella, Catedrático de la Facultad de Ciencias; Secretario, don José María Font Rius, Catedrático de la Facultad de Derecho y Secretario del Secretariado de Publicaciones.

El Secretariado de Publicaciones, Intercambio Científico y Extensión Universitaria, desea que *Anales de la Universidad de Valencia* pueda servir, a su vez, de instrumento de relación con otras Universidades y organismos científicos de España y del extranjero, y a este fin organiza su distribución, principalmente, por el sistema de intercambio, con las publicaciones de estos centros, bien de la totalidad de sus fascículos, bien de sólo aquellos que interesen en cada caso en función de la respectiva especialidad. Asimismo, para otros organismos, particulares, etc., tiene establecido el régimen de venta por cuadernos independientes.

\* \* \*

Toda clase de correspondencia dirigirla al Secretariado de Publicaciones, Intercambio Científico y Extensión Universitaria. Universidad de Valencia (España).

**PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO  
PURO MEDIANTE LA TECNICA DE POLVO  
FLUIDIFICADO**

**P O R**

**W. K. LEWIS, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
E. COSTA NOVELLA, UNIVERSIDAD DE VALENCIA  
W. M. CHOW, LAFAYETTE COLLEGE**

**D E S E C A C I O N**

**P O R**

**ENRIQUE COSTA NOVELLA**

ANALES DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA

VOL. XXVI - CURSO 1952-53

CUADERNO II - CIENCIAS

W. K. LEWIS, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

E. COSTA NOVELLA, UNIVERSIDAD DE VALENCIA

W. M. CHOW, LAFAYETTE COLLEGE

PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO PURO  
MEDIANTE LA TECNICA DE POLVO FLUIDIFICADO

ENRIQUE COSTA NOVELLA

D E S E C A C I O N



SECRETARIADO DE PUBLICACIONES

INTERCAMBIO CIENTIFICO Y EXTENSION UNIVERSITARIA  
(UNIVERSIDAD DE VALENCIA)

**PRODUCCION DE ANHIDRIDO  
SULFUROSO PURO MEDIANTE  
LA TECNICA DE POLVO FLUIDIFICADO**

## RESUMEN

La nueva técnica de interacción de un gas con un sólido suspendido en la corriente gaseosa, a modo de masa fluyente turbulenta, ha sido estudiada como método de combustión de azufre o tostación de piritas para obtener  $\text{SO}_2$  puro, presentándose datos sobre velocidades de reacción básicos en el proyectado industrial. Se utilizan los resultados para hacer ver las extensas posibilidades de aplicación del método de polvo fluidificado.

---

Hace, aproximadamente, diez años, empezó a utilizarse un nuevo procedimiento para el «cracking» catalítico de petróleos, consistente en suspender el catalizador sólido pulverizado, a modo de masa turbulenta, en una corriente ascendente de gas. Se utilizaron dos reactores. En el primero, el catalizador se suspendía en una corriente del vapor de la fracción conveniente del petróleo, que se craquizaba por contacto con el polvo. En el segundo, el carbón depositado sobre el catalizador, en virtud de la reacción de «cracking», se eliminaba por combustión, en corriente de aire. El proceso resultaba continuo, fluyendo el catalizador uniformemente de un reactor al otro.

Este proceso (7, 8, 9) alcanzó extraordinario éxito. Como constituía una técnica nueva de interacción entre gases y sólidos, pronto empezó a estudiarse su aplicación a diversas reacciones químicas de aquellas características. Así, tal técnica ofreció marcadas ventajas para la calcinación de la piedra caliza, funcionando ya, en la actualidad, una instalación piloto para la producción de cal, de escala considerable (13). Las características del proceso hacían pareciere prometedor como método industrial para la producción de  $\text{SO}_2$  puro, seco, a partir de azufre o sulfuros de hierro, como materias primas. El trabajo de que aquí se da cuenta es un estudio experimental exploratorio de las posibilidades de este método para la producción de  $\text{SO}_2$ , así como de determinación cuantitativa de datos sobre velocidades de reacción indispensables para el proyectado industrial de

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

reactores para el proceso. Asimismo tiene el valor, más general; de ilustrar las características generales de la técnica de fluidificación, haciendo resaltar sus posibilidades y limitaciones, y de presentar métodos de aplicación general para la reunión e interpretación de datos cuantitativos necesarios para la valoración de su uso técnico en cualquier caso específico, y para el proyectado de las unidades que se requieren en las operaciones industriales.

Cuando el azufre o las piritas se oxidan con aire en cualquier operación industrial, se utiliza siempre un cierto exceso de aire, a fin de evitar la presencia de vapor de azufre en los gases de combustión. El  $\text{SO}_2$  producido está muy diluido con nitrógeno, oxígeno y la humedad del aire de combustión. También aparece siempre acompañado de una cierta cantidad de  $\text{SO}_3$ . Si se desea obtener el  $\text{SO}_2$  como tal, su separación de la mezcla supone dificultades operativas bastante serias. Son obvias las ventajas que resultarían si se pudiera obtener  $\text{SO}_2$  puro y seco, directamente, como producto de la combustión. La técnica de polvo fluidificado ofrecía atractivas perspectivas a tal respecto.

Imaginemos una instalación de polvo fluidificado de dos reactores, semejante a la utilizada en el «cracking» catalítico de petróleos. Llenemos estas dos unidades con óxido férrico pulverizado, es decir, con hematites roja. Introdúzcase, en el primer reactor, por ejemplo, piritas como materia prima, utilizando  $\text{SO}_2$  como gas fluidificante, que se recircula de la parte superior a la inferior del reactor. Acéptese que el polvo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en el reactor oxidará las piritas a  $\text{SO}_2$ , reduciéndose él, a su vez, a óxidos inferiores de hierro. El  $\text{SO}_2$  producido por esta reacción podrá separarse, como producto, del gas que sale por el tope del reactor; el resto de dicho gas se conduce hacia la parte inferior de aquél, a fin de mantener la fluidificación. El óxido de hierro del primer reactor podrá conducirse continuamente a la segunda cámara de fluidificación, con aire como medio fluidificante, que oxidará el hierro, de nuevo, a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , el cual, a su vez, podrá volver al reactor primero de modo continuo. Resultaría así un proceso continuo en el que el agente oxidante es el aire, pero en el que tal aire actúa sobre las piritas, no directamente, sino a través de óxidos de hierro que actúan como transportadores de oxígeno, eliminando, de este modo, el nitrógeno como contaminante del  $\text{SO}_2$  producido. Se advertirá la importancia de conocer las características operativas y posibilidades de tal proceso.

Experimentalmente (10) se encontró que el vapor de azufre (diluido con nitrógeno), al pasar a través de un lecho estacionario de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

exceso, se oxida rápida y prácticamente de modo cuantitativo, a  $\text{SO}_2$ . No se encontraron ni  $\text{SO}_3$ , ni azufre en el producto gaseoso de reacción. Sin embargo, si se desea utilizar piritas, solamente una parte de su azufre se desprenderá como vapor; quedará un residuo de sulfuro ferroso. Resultaba, pues, necesario, determinar la posibilidad de oxidar este  $\text{FeS}$  residual con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Con este propósito se recurrió a la experimentación, utilizando el método de polvo fluidificado.

### OXIDACION DE $\text{FeS}$ CON $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Los estudios experimentales que se detallan, se llevaron a cabo en dos reactores. Ambos consistieron en tubos verticales de acero níquel-cromo, aislados y calentados eléctricamente. El primero, de 1,905 cm. de diámetro interior, con una sección vertical de calefacción de 25 cm.; el segundo, de 5,1 cm. de diámetro interior y con sección vertical de calefacción de 122 cm. El primero tenía en su interior un par termoeléctrico axial, dispuesto en el interior de un tubo de 0,64 cm. de diámetro exterior y, también, un tubo de entrada de gas de 0,32 cm. de diámetro, que llegaba hasta un centímetro del fondo. El reactor grande no tenía tales complicaciones internas, sus pares termoeléctricos y conexiones para la entrada de los compuestos reaccionantes eran laterales y el gas se introducía por el fondo. El reactor pequeño se utilizó, principalmente, para ensayos exploratorios previos. La carga se fluidificó en una corriente de nitrógeno introducido en el reactor a una velocidad de 21,3 cm. por segundo, medida a la temperatura de reacción. Este gasto gaseoso se mantuvo constante a lo largo de cada ciclo. Se utilizó este método, debido a que el simple análisis del gas effuyente permitía así determinar la velocidad de reacción de un modo rápido y seguro, en cualquier momento del proceso, y, por lo tanto, seguir el curso de la reacción a medida que el ciclo transcurría.

La figura 1 muestra los resultados de tres ciclos típicos de carga, en el reactor grande. En esta figura, y, en general, en todas las curvas de las que siguen, los puntos indicados son simple representación gráfica de datos experimentales. En cada caso, la carga fué de 2.000 gramos de hematites roja, conteniendo 82,5 por 100,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y 60 gramos de  $\text{FeS}$  con 55,6 de pureza. La hematites roja fué introducida primero, fluidificada en corriente de nitrógeno, elevándose paulatinamente la temperatura. Cuando se alcanzaron condiciones estables de temperatura al nivel deseado, se intro-

PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

dujo rápidamente el FeS. El momento de introducción del sulfuro corresponde al tiempo cero de la figura 1. Como se indicó anteriormente, la velocidad de reacción se determinó por el contenido en SO<sub>2</sub> del gas eflu-

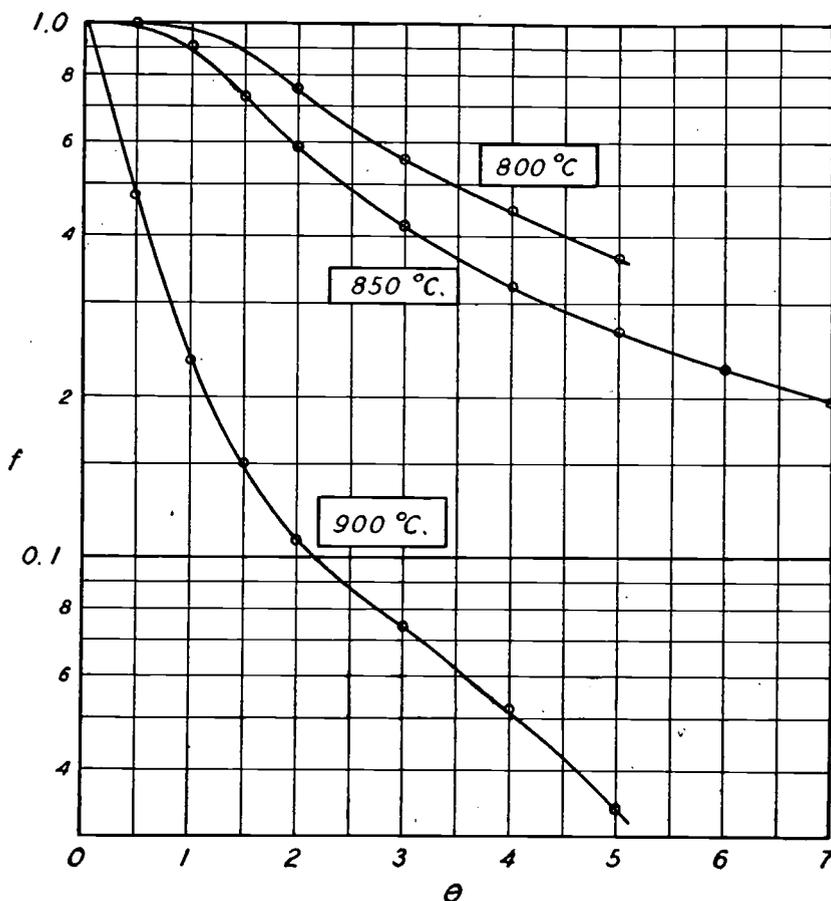


FIG. 1.—Reacción de FeS con Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en corriente de N<sub>2</sub>. Fracción,  $f$ , de FeS original remanente en el lecho al tiempo,  $\theta$ , en horas.

yente, que se encontró por análisis. En ninguno de estos ciclos pudo observarse la formación de SO<sub>3</sub> o vapor de azufre. Los resultados confirman los que se encuentran en la bibliografía relativos a esta reacción (6, 12, 14).

PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

El primer hecho sorprendente de la figura 1 es la forma horizontal de la curva de reacción al iniciarse ésta, fácilmente apreciable en los ciclos de 800° y 850° C. Un ciclo de comprobación a 900° C, representado en la figura 2, demuestra que, también en este caso, la reacción se caracteriza por un período de inducción, seguido por otro de velocidad creciente. A

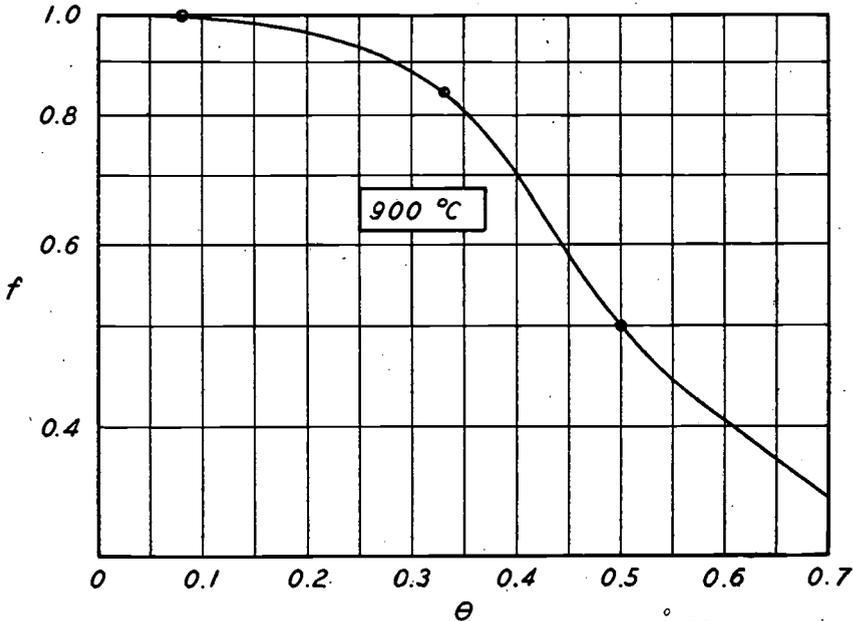


FIG. 2.—Reacción de FeS con Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en corriente de N<sub>2</sub>. Fracción, f, de FeS original remanente en el lecho al tiempo, θ, en horas.

todas las temperaturas la velocidad decrece, finalmente, con el tiempo. La figura 1 está representada en escala semilogarítmica. Si la reacción, a lo largo de cada ciclo, fuera proporcional a la cantidad de sulfuro que resta en el lecho en cada momento, los datos de cada ciclo determinarían una línea recta. La pendiente de cada una de estas curvas en cualquier punto, representa la velocidad de reacción momentánea,  $dW/W_0 d\theta$  correspondiente al punto, en cuestión, representando aquí W el número de mols. (o el peso) de FeS en el reactor al tiempo θ. En vez de permanecer constante esta cantidad, empieza valiendo cero, pasa por un máximo en el punto de inflexión y, a partir de entonces, decrece progresivamente a medida que el proceso continúa. El mecanismo de reacción es evidentemente complejo.

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

Las velocidades de reacción entre sólidos no volátiles mezclados son ordinariamente pequeñas. Esta reacción es relativamente rápida. Los datos de la figura 1 muestran que puede completarse hasta un 96 por 100 en cinco horas. Parece probable que el mecanismo de reacción consista en alguna forma de interacción entre los sólidos y la fase gaseosa. A la temperatura en cuestión, el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tiene una presión de disociación de oxígeno detectable, por lo que, en principio, parecía lógico inclinarse a suponer que el oxígeno así liberado fuera el agente oxidante efectivo (1). Sin embargo, la presión parcial de oxígeno sobre el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no puede aumentar durante la reacción. Aquella presión alcanza, ciertamente, su máximo valor en las etapas iniciales, pero en estas etapas iniciales la velocidad de reacción es despreciable. Esta circunstancia elimina la posibilidad de que el oxígeno procedente de la disociación del óxido férrico sea el agente inmediato dominante en el mecanismo de reacción.

Puesto que el gasto gaseoso de nitrógeno se mantuvo constante durante cada ciclo, la presión parcial de  $\text{SO}_2$  en el gas que sale del reactor es, aproximadamente, proporcional a la velocidad de reacción en el momento en cuestión, —  $dW/d\theta$ . La forma de las curvas de la figura 1 sugiere inmediatamente la posibilidad de que bajo tales condiciones, la reacción sea autocatalítica, es decir, que el  $\text{SO}_2$ , formado por la reacción misma, acelere esta reacción. En vista de las condiciones experimentales es evidente que al principio del ciclo no existe  $\text{SO}_2$  en el sistema. Por otra parte, puede producirse la oxidación lenta del FeS por la acción de la pequeña porción de oxígeno liberada del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Esta oxidación determina la formación inmediata de algo de  $\text{SO}_2$ . Si este  $\text{SO}_2$  es un catalizador de la reacción, ésta se aceleraría. Sin embargo, la velocidad de reacción absoluta debe necesariamente decrecer, finalmente, al consumirse el FeS. Esta circunstancia determina una reducción final del contenido de  $\text{SO}_2$  del gas. En consecuencia, la velocidad de reacción debe pasar por un máximo, como sucede, realmente, en los puntos de inflexión de la figura 1, y después decrecer. En otras palabras, desde un punto de vista meramente cualitativo, la forma de las curvas de la figura 1 es explicable, suponiendo que el  $\text{SO}_2$ , que es uno de los productos de reacción, actúa también como un catalizador de la misma.

La conclusión esbozada es susceptible de comprobación experimental. La reacción se condujo a  $800^\circ\text{C}$ , dos ciclos se llevaron a cabo en el reactor pequeño y uno en el grande, utilizando la técnica descrita anteriormente, pero utilizando  $\text{SO}_2$  puro como gas fluidificante en vez de nitrógeno. La progresión de la reacción se determinó por análisis de los

PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

sólidos que quedaban en el reactor al final de cada ciclo. Los resultados se representan en la figura 3. Se notará que cuando la fluidificación se efectuó con  $\text{SO}_2$ , se alcanzó en 30 minutos una oxidación de FeS, equivalente a la alcanzada al cabo de cinco horas, cuando el agente fluidificante fué el nitrógeno. El efecto catalítico del  $\text{SO}_2$ , en la fase gaseosa, sobre la velocidad de reacción resultó, pues, fuera de duda.

Las curvas de la figura 1 decrecen su pendiente al progresar la reacción. Esto puede ser debido, como se indicó anteriormente, a la baja con-

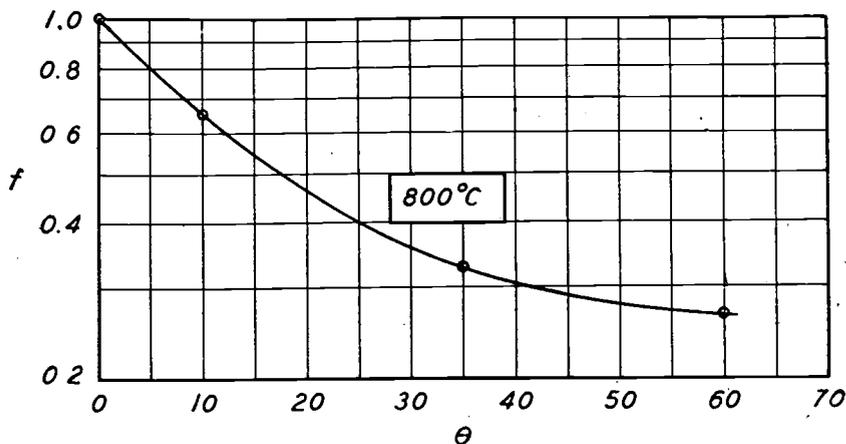


FIG. 3.—Reacción de FeS con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en corriente de  $\text{SO}_2$ . Fracción,  $f$ , de FeS original remanente en el lecho al tiempo,  $\theta$ , en minutos.

centración de  $\text{SO}_2$  existente al final de cada ciclo. No obstante, la curva de la figura 3, también disminuye su pendiente al desaparecer el sulfuro, a pesar del hecho de que la técnica utilizada garantiza una presión parcial de  $\text{SO}_2$  constante a lo largo del ciclo. Esto indica que, por alguna razón, la reactividad del sulfuro disminuye cuando la reacción progresa. Deseando aclarar la razón de tal circunstancia, se efectuó el ciclo de la figura 4, utilizando el reactor grande y las condiciones operativas ya descritas. El óxido férrico utilizado fué el residuo de un ciclo previo, reoxidado con aire. No obstante, el óxido residual no estaba totalmente exento de sulfuro, puesto que aun al final del período de su reoxidación con aire, aparecía aún, en el gas efluente, algún  $\text{SO}_2$ . Se apreciará en la curva de la izquierda de la figura 4, que la velocidad de reacción es claramente más elevada que la correspondiente al ciclo de  $900^\circ \text{C}$ . de la figura 1.

PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

Este resultado confirma, una vez más, la acción catalítica del  $\text{SO}_2$ . Al cabo de dos horas y media, cuando el contenido en sulfuro había descendido a

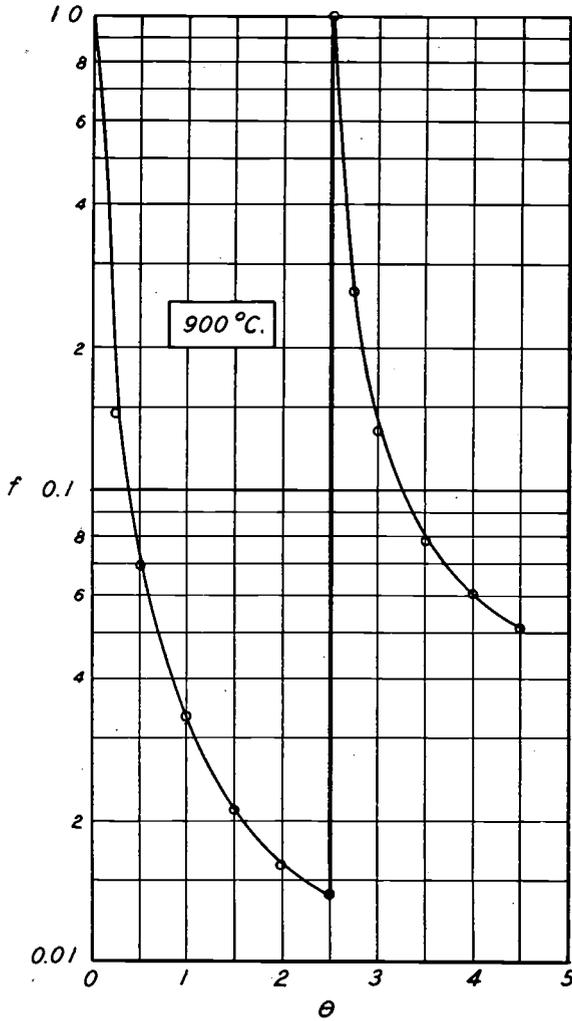


FIG. 4.—Reacción de FeS con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en corriente de  $\text{N}_2$ . FeS adicionado en dos porciones, fracción reaccionada frente a tiempo en horas.

1,4 por 100 de su valor inicial, se adicionaron 30 gramos más de FeS. La eliminación de sulfuro del lecho en estas nuevas condiciones, aparece en

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

la curva de la derecha de la figura 4. La fracción de sulfuro residual que constituye la ordenada de esta curva representa la fracción del total en el lecho después de la segunda adición de sulfuro, y no está basada en el sulfuro inicial al principio del ciclo.

Dos cosas deben notarse en la figura 4. En primer lugar, la velocidad de reacción después de la adición de la segunda porción de sulfuro se eleva a un valor muy alto. En segundo lugar, en la primera parte de la reacción, a lo largo de la curva de la derecha, la velocidad momentánea es, aproximadamente, mitad de la correspondiente a la curva de la izquierda para cada nivel, correspondiente a igual fracción de sulfuro remanente en el lecho. Esto es debido, probablemente, al hecho de que la concentración de  $\text{SO}_2$  en la fase gaseosa, que debe ser proporcional a la velocidad de reacción —  $dW/d\theta$ , es en la curva de la derecha solamente la mitad que en la curva de la izquierda, puesto que, inicialmente, sólo se disponía de la mitad de sulfuro en el lecho.

Esta curva indica que la velocidad de reacción es, al menos aproximadamente, proporcional a la presión parcial de  $\text{SO}_2$  en la corriente gaseosa.

El contenido en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  del lecho es mucho menor a lo largo de la curva de la derecha que a lo largo de la de la izquierda. El hecho de que la adición de nuevo  $\text{FeS}$  eleva la velocidad de reacción a un valor tan alto, a pesar del agotamiento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , demuestra que, en tanto existe en el lecho una concentración moderada de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , la velocidad de reacción es relativamente independiente de su concentración. Los datos disponibles indican que la disminución de velocidad, debida al consumo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , es pequeña en tanto reste 20 por 100 de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en el lecho.

La técnica de fluidificación con nitrógeno utilizada en este trabajo tiene la gran ventaja de que posibilita la determinación de velocidades de reacción puntuales o momentáneas con facilidad y seguridad. Tiene, además, la gran ventaja de haber puesto de manifiesto la acción catalítica del  $\text{SO}_2$  sobre la velocidad de reacción, que podría, en otro caso, haber pasado desapercibida. No obstante, resulta difícil la interpretación cuantitativa de los datos de los ciclos con nitrógeno comparativamente, a los de ciclos con  $\text{SO}_2$  a causa de nuestra ignorancia del mecanismo de circulación de los gases en el reactor. Se sabe que existe una mezcla vertical de los gases, de dirección opuesta a la corriente, al fluir aquéllos a través de un lecho fluidificado (3). Se sabe también, que tal mezcla no es muy grande, pero su magnitud cuantitativa no puede estimarse con seguridad. Cuando anteriormente se dijo que la concentración de  $\text{SO}_2$  en los ciclos de nitrógeno era proporcional a la velocidad de reacción en el punto o momento en

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

cuestión, tal concentración se refería al gas efluente. La concentración a niveles más bajos del reactor es menor, en realidad, mucho menor que aquélla. Sin embargo, las condiciones de fluidificación fueron suficientemente similares en todos los ciclos, para que el mecanismo de circulación gaseosa fuera semejante en todos ellos. Esto equivale a decir que la concentración a cualquier nivel sería proporcional a la concentración del gas efluente. El efecto catalítico del  $\text{SO}_2$  sobre la velocidad de reacción está determinado por el valor medio de la concentración de este  $\text{SO}_2$  en el reactor. Careciendo de un conocimiento cuantitativo de la influencia del mecanismo de circulación gaseosa en el proceso de fluidificación sobre la mezcla vertical en sentido opuesto al de la corriente, un cálculo cuantitativo del efecto del  $\text{SO}_2$  en los ciclos de nitrógeno no puede efectuarse.

En los ciclos de la figura 3, la relación de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a  $\text{FeS}$  fue, con mucho, en exceso de la teórica. A la luz de cuantos razonamientos se han hecho, se debería concluir que la disminución de pendiente de las curvas de la figura 3, a medida que el sulfuro reacciona, a presión constante de  $\text{SO}_2$ , se deberá a una especie de pérdida de actividad del sulfuro reaccionante, probablemente, debida a la acumulación de materia inerte sobre su superficie. Suponiendo que la velocidad de reacción del sulfuro pueda expresarse como una función potencial de la fracción que queda por reaccionar,  $-dW/W_0 \cdot d\theta = K (W/W_0)^m$ , donde  $K$  es una función de la presión parcial del  $\text{SO}_2$  y de la temperatura, los datos de la figura 3 indican que  $m$  es del orden de 2,5. Para una atmósfera de  $\text{SO}_2$  a  $800^\circ\text{C}$ ,  $K$  es 4,3.

Si se consideran los datos de la figura 1, puede verse que, más allá del punto de inflexión, la velocidad puntual es proporcional, aproximadamente, a la raíz cúbica de la presión parcial de  $\text{SO}_2$  en el gas que abandona el reactor. Naturalmente, esta relación debe considerarse como puramente empírica; sin embargo, permite evaluar el coeficiente de temperatura de la velocidad de reacción. En el intervalo de temperaturas entre  $800^\circ$  y  $900^\circ\text{C}$ , la velocidad de reacción, bajo condiciones comparables, aumenta aproximadamente 3,4 veces.

Se tienen algunos resultados auxiliares del trabajo experimental que es importante mencionar. Hasta  $900^\circ\text{C}$  no pudimos notar efecto alguno de oxidación del  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sobre  $\text{FeS}$  utilizando nitrógeno como gas fluidificante (11). Sin embargo,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  oxida rápidamente  $\text{FeS}_2$ , produciendo grandes cantidades de  $\text{SO}_2$ . Este hecho se debe, indudablemente, a la reacción del azufre desprendido, en la descomposición térmica de la pirita, con el óxido de hierro. Mayor luz sobre la naturaleza de esta reacción arroja el hecho de que el  $\text{FeS}$  fluidificado con  $\text{SO}_2$  a  $900^\circ\text{C}$ , desprende

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

entre uno y dos por ciento de vapor de azufre que pasa al gas efluyente, cantidad que corresponde, aproximadamente, al equilibrio químico (5). La introducción de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  junto con el  $\text{FeS}$ , no ejerce efecto alguno sobre la interacción de  $\text{FeS}$  y  $\text{SO}_2$ . La adición de pirita a un lecho de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , fluidificado con nitrógeno, produce una reacción muy rápida al principio. El azufre destilado se oxida a  $\text{SO}_2$  prácticamente con la misma rapidez con que se forma. El  $\text{FeS}$  residual se oxida entonces mucho más lentamente, como se mostró en los resultados experimentales anteriormente reseñados. La producción de  $\text{SO}_2$  por oxidación con óxidos de hierro requiere la presencia de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Si el contenido en oxígeno del óxido de hierro utilizado desciende hasta el correspondiente a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , éste no puede continuar oxidando el  $\text{FeS}$ . Aunque se puede oxidar el vapor de azufre de cualquier origen con  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , la oxidación es incompleta. Para alcanzar una operación satisfactoria se requiere, al menos, un pequeño exceso de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , el cual se reduce solamente a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Desde un punto de vista químico, los hechos anteriores concuerdan perfectamente con los datos sobre energías libres que se encuentran en la bibliografía (2,5).

### OXIDACION DE $\text{Fe}_3\text{O}_4$ CON AIRE

El éxito del proceso, en cuestión, depende de la posibilidad de reoxidar el óxido de hierro consumido al estado férrico. Se demostró experimentalmente que fluidificando  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  u óxido de hierro consumido en corriente de aire, la reoxidación se produce, inicialmente, con extrema rapidez aun a temperaturas tan bajas como  $700^\circ\text{C}$ . En un lecho de sólo 25 cm. de espesor, con una corriente de aire de 21,3 cm. por segundo de velocidad, solamente se apreciaron indicios de oxígeno en el gas efluyente al principio del ciclo (11). Es cierto que la concentración de oxígeno en el gas efluyente, empieza a elevarse antes que la oxidación del hierro sea completa. Sin embargo, la elevación de la concentración de oxígeno es muy rápida, y en sólo pocos minutos el hierro del lecho pasa, en su mayor parte, al estado férrico.

En la figura 5 se representa la razón molar de oxígeno a nitrógeno, que se obtiene por análisis del gas efluyente, en función del tiempo, con los datos de un ciclo en que  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  impuro fue oxidado, fluidificándolo en corriente de aire, a presión normal y temperatura de  $900^\circ\text{C}$ . La carga original fué de 35,5 gramos de óxido. El gasto gaseoso se mantuvo prácticamente constante; referido a nitrógeno fue de 0,0257 moléculas

PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

gramo por minuto. La concentración de oxígeno, extremadamente baja en las etapas iniciales del ciclo, así como la rápida elevación de aquélla, al cabo de aproximadamente tres minutos, hasta alcanzar un valor asintótico con la concentración de oxígeno del aire de fluidificación, fueron impresionantes.

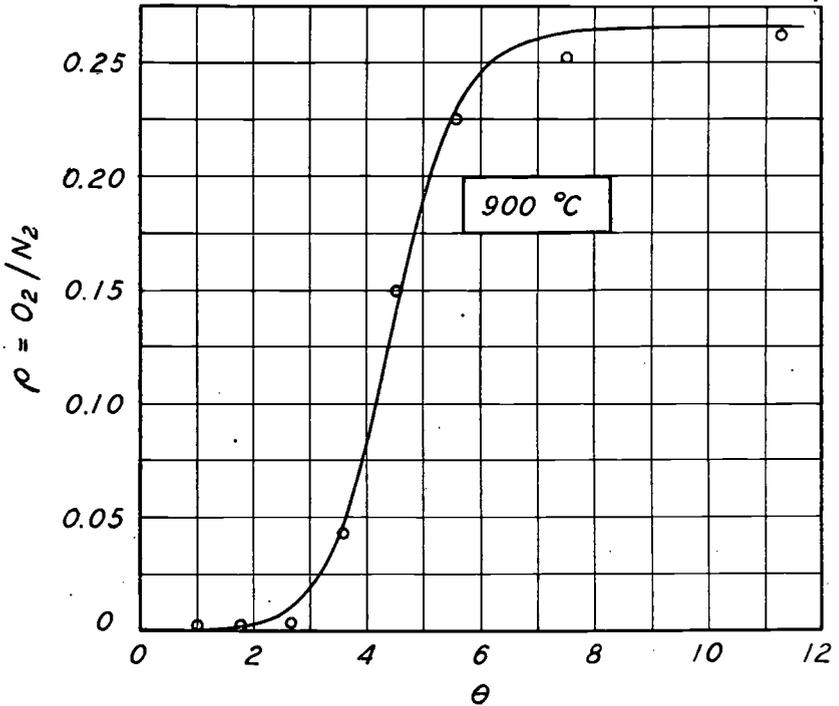


FIG. 5.—Oxidación de  $Fe_3O_4$  con aire.  
Relación,  $\rho$ , de  $O_2/N_2$  en el gas de salida al tiempo,  $\theta$ , en minutos.

Llamemos  $\pi$  la presión total,  $N$  el gasto de nitrógeno,  $n$  el gasto de oxígeno a través de cualquier sección específica del lecho y  $Q$  el número total de mols. de  $Fe_3O_4$  no oxidado que permanece en el lecho al tiempo  $\theta$ . No olvidemos que la mezcla de sólidos en un lecho como éste es excelente, pero que la mezcla vertical del gas es limitada. Si se considera que la velocidad de oxidación es proporcional a la presión parcial de oxígeno,  $p$ , en cualquier punto del lecho y a la cantidad de  $Fe_3O_4$  no oxidado presente,

PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

$$\frac{-dn}{dQ} = kp = k \pi \frac{n}{N+n}$$

Esta ecuación integrada da:

$$\ln \frac{0,266}{\rho} + 0,266 - \rho = \frac{K\pi Q}{N}$$

donde  $\rho$  es el valor de la relación  $O_2/N_2$ ,  $n/N$ , en el gas de salida.

Un balance de oxígeno proporciona la relación

$$-\frac{dQ}{d\theta} = 4(0,266 N - n)$$

Combinando estas dos ecuaciones con eliminación de  $Q$ , resulta:

$$\ln \frac{\rho}{\rho_0} + 1,266 \ln \frac{0,266 - \rho_0}{0,266 - \rho} = 1,064 K\pi\theta,$$

donde  $\rho_0$  es el valor de  $\rho$  a  $\theta = 0$ .

Utilizando la ecuación última pueden calcularse  $K$  y  $\rho_0$  por aproximaciones sucesivas ajustándose a los datos experimentales de la figura 5. La curva suave de la figura 5, se calculó a partir de la ecuación, utilizando las constantes,  $K = 1,8$  y  $\rho_0 = 6,59 \cdot 10^{-5}$ . Sustituyendo estos valores en la primera ecuación resulta  $Q_0 = 0,1223$  mols. de  $Fe_3O_4$  inicial.

Un examen de la figura 5 muestra que la ecuación se ajusta a los datos, dentro del error experimental, durante los primeros seis minutos. Después de este tiempo todos los puntos experimentales son bajos. Aparentemente la reactividad del  $Fe_3O_4$  decrece al prolongarse la oxidación. En este aspecto, actúa como el  $FeS$ . Los datos indican que, aproximadamente, cinco por ciento del total del  $Fe_3O_4$  original permanece inactivo, exigiendo tiempos mucho mayores para completar la oxidación. Puesto que el valor  $Q_0$  arriba indicado, se obtuvo a partir de los datos en las etapas primeras de oxidación, el  $Fe_3O_4$  original, deducido por datos de desaparición de  $O_2$ , será aproximadamente 0,129 mols. ó 29,9 gramos. Como el óxido original total utilizado en la reacción fué 35,5 gramos, estos datos

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

de velocidad de absorción de oxígeno, indican un contenido de alrededor de 84 por 100 de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

El contenido en azufre del polvo, después de la oxidación con aire, puede ser reducido a un valor de, aproximadamente, 0,1 por 100, probablemente presente en la forma de trióxido adsorbido. Sin embargo, una eliminación tan completa como esa requiere una permanencia del polvo en la cámara de oxidación de dos a tres horas.

## CARACTERÍSTICAS DE LA FLUIDIFICACIÓN

El comportamiento de los sólidos utilizados en este proceso durante la fluidificación es muy satisfactorio. La tendencia a la formación de zonas de polvo interrumpidas en el lecho («slugs») o a la formación de canales es muy pequeña, siempre que las velocidades gaseosas se mantengan a niveles apropiados, entre 0,15 y 0,3 metros por segundo, a ser posible, entre 0,18 y 0,24 metros por segundo. Velocidades inferiores pueden producir la formación de canales. Podrían utilizarse velocidades mayores, pero a costa de una menor densidad de polvo en el lecho, a no ser que se prevea un dispositivo para la eliminación del polvo arrastrado por el gas effuyente y su recirculación, a través del reactor a las velocidades elevadas consiguientes. Ciertamente, si los óxidos son muy reducidos, sus condiciones de fluidificación son afectadas apreciablemente; pero, como más arriba quedó indicado, la química del proceso sólo exige un grado de reducción por encima del correspondiente a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . En estas condiciones la fluidificación no ofrece dificultad.

## PROYECTADO

Desde el punto de vista de proyectado, los datos relevantes para el reactor aparecen en la curva de la figura 3, y para el regenerador en la de la figura 5.

Continuamente, se genera gas en el reactor. Si se proyectara éste para una velocidad de entrada, por la parte inferior, del gas recirculado, de 0,18 metros por segundo, y una velocidad de salida, por la parte superior, de 0,24 metros por segundo, se tendría una evolución neta de gas de 0,06 metros cúbicos, por metro cuadrado de sección transversal del reactor, por segundo. Si se operara a  $800^\circ\text{C}$ , aquella evolución supondría una pro-

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

ducción de  $\text{SO}_2$  de 2,46 mols. Kg. de  $\text{SO}_2$  (158 kgs.) por metro cuadrado por hora, esto es, 3,79 toneladas métricas de gas por metro cuadrado por día de 24 horas. Estas cifras son válidas cualquiera sea la fuente de azufre.

### COMBUSTIÓN DE AZUFRE

Utilizando azufre, como materia prima, se pueden emplear lechos de polvo de poco espesor. Como se ha indicado, nosotros hemos operado felizmente con lecho de 1,25 metros de espesor, pero no es conveniente permitir que la relación de espesor de lecho a diámetro del reactor descienda a niveles muy inferiores a dos. En reactores mayores puede resultar, por tanto, necesario incrementar el espesor del lecho.

Las exigencias estequiométricas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para estos reactores, son, aproximadamente, 2.400 kgs. por metro cuadrado de sección del reactor por hora. La densidad del lecho es, aproximadamente, 826 kgs. por metro cúbico. Por tanto, suponiendo una profundidad de lecho de dos metros, el tiempo teórico mínimo de residencia del óxido recirculado en el lecho es de 0,7 horas. Este tiempo debería incrementarse lo suficiente para garantizar un exceso adecuado de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en el reactor, en todo momento, a ser posible, hasta cifras no inferiores a una hora, aumentando el espesor del lecho a unos tres metros. El calor requerido por el reactor se suministra fácilmente, en forma de calor sensible, por el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  recirculado desde el regenerador.

### REGENERACIÓN

La reoxidación del óxido de hierro en el regenerador requiere, teóricamente, 2,46 mols. Kg. de oxígeno. Como se indicó anteriormente, operando cuidadosamente y utilizando lechos de espesor razonable, la reoxidación puede conseguirse utilizando muy pequeño exceso de aire. El aire teórico correspondiente a un metro cuadrado de sección transversal del generador es 11,7 mols. Kg. por hora ó 0,286 metros cúbicos por segundo a la temperatura ( $800^\circ \text{C}$ ) y presión del reactor. La introducción de este aire en el regenerador, a una velocidad lineal de 0,24 metros por segundo, requiere una sección transversal del regenerador de 1,19 metros cuadrados por cada metro cuadrado del reactor. Esta cifra deberá incrementarse utilizando un factor de seguridad, que prevea la incompleta

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

utilización del oxígeno del aire, un factor que será cada vez más pequeño a medida que crezcan el espesor del lecho y la relación de dicho espesor al diámetro. Un factor superior a 1,5 será rara vez necesario.

Una respuesta más específica nos la ofrecen los datos de la figura 5. Consideremos que se desee asegurar un 90 por 100 de reoxidación del  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a  $900^\circ \text{C}$ , utilizando presión atmosférica y una densidad de lecho de 826 kgs. por metro cúbico, no permitiendo, al mismo tiempo, una cantidad de oxígeno superior al 1 por 100 en el gas efluyente. Tómese como base un metro cuadrado de sección transversal del regenerador, y considérese como gasto de entrada de aire permisible 0,21 metros por segundo, o sea 0,131 mols. Kg. por minuto. El valor de  $N = 79$  por 100 de éste, o sea 0,104 mols. Kg. por minuto. El gasto de oxígeno en el gas efluyente,  $n$ , es un noventa y nueveavo de éste, o sea 0,00105. Sustituyendo estos valores en la ecuación de velocidad de oxidación del  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , se obtiene un valor de  $Q$  de 0,203 moléculas kilogramo, es decir, 47 kgs. Sin embargo, puesto que debido a lo indicado con anterioridad, aproximadamente, un 5 por 100 del óxido residual es relativamente inerte frente al oxígeno, el peso total de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en el lecho vendrá a ser, aproximadamente, doble de esta cifra, o sea 94 kgs. Puesto que el porcentaje en peso de óxido magnético, en una masa oxidada en su 90 por 100 de óxidos puros, es 9,69 por 100, y puesto que la densidad del lecho es 826 kgs. por metro cúbico, el volumen del lecho debe ser 1,17 metros cúbicos, cantidad que representa, también, numéricamente, la altura en metros del lecho. Para asegurar una buena fluidificación, el espesor deberá ser, al menos, de dos metros. Las unidades de reoxidación proyectadas adecuadamente y bien operadas, tienen capacidad elevada y excelente utilización de oxígeno.

## TOSTACIÓN DE PIRITAS

Utilizando  $\text{FeS}_2$  como fuente de azufre y las mismas limitaciones de velocidad, es evidente que la capacidad de producción neta, por metro cuadrado de sección transversal de reactor, es la misma que en el caso precedente, es decir, 2,46 mols. Kg. de  $\text{SO}_2$  por hora. Sin embargo, en este caso, el problema de proyectado se complica por el hecho de que la velocidad de oxidación del  $\text{FeS}$  que resta después de la descomposición térmica de la pirita, es muy pequeña en comparación con la velocidad de oxidación del azufre destilado. Conviene, si es posible, no intentar desprender todo el azufre de la pirita en forma de  $\text{SO}_2$  en el generador, sino

PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

agotar, posteriormente, el azufre residual en el óxido, en el regenerador, al llevar a cabo la reoxidación. Considérese, por el momento, que se desee un desprendimiento de 80 por 100 del azufre total de la pirita en el generador, recuperando el 20 por 100 restante, como gas diluido, en el regenerador. Esto equivale a dejar, por cada molécula gramo de pirita alimentada en el reactor, 0.4 mols. de FeS, que pasarán, con el polvo, hacia el regenerador, es decir, que en el generador solamente se oxidaría el 60 por 100 del FeS formado por descomposición térmica de la pirita. El significado de cuanto antecede en relación con el proyectado del reactor, puede apreciarse con los datos representados en la figura 3, pero estos datos deberán corregirse teniendo en cuenta la diferencia entre las condiciones de operación de carga, que representa dicha figura y las de operación continua de la instalación industrial (4).

Aceptando que la disminución en la velocidad de oxidación del FeS, a medida que la reacción transcurre, puesta de manifiesto para operación de carga en la figura 3, es debida a la historia (pasado) de las partículas de sulfuro y no a los cambios de concentración de FeS en el lecho, el proyectado de un reactor de lecho fluidificado para operación continua, debe hacerse teniendo en cuenta este hecho. Para calcular la capacidad volumétrica de un reactor, operando de modo continuo a presión atmosférica con SO<sub>2</sub> recirculado a 800° C, considérese una pequeña unidad de FeS que se introduce en un momento determinado, que consideraremos como tiempo  $\theta = 0$ . Ignoremos, por el momento, el resto de FeS en el lecho y sigamos la historia de esa unidad. Sea Z la fracción del hierro en esta unidad que permanece en el lecho al cabo del tiempo  $\theta$ , y y la fracción de este hierro que queda como sulfuro no oxidado. En la figura 3, y viene dada en función de  $\theta$ . Representemos por  $\alpha$  la velocidad espacial, esto es, la velocidad de alimentación, expresada como volumen de polvo alimentado, medido a la densidad del lecho, dividido por el volumen de polvo en el lecho ( $\alpha$  es la recíproca del tiempo de residencia del polvo). El sulfuro que abandonó el lecho, como tal, expresado como fracción de la cantidad original, es  $u$ . Resulta evidente (1)  $-dZ = \alpha Z d\theta$  y (2)  $du = -y dZ$ . De donde:

$$u = \int_{\theta = 0}^{\theta = \infty} \alpha y e^{-\alpha \theta} d\theta$$

Esta expresión nos da  $u$  en función de  $\alpha$ . Puesto que en operación con-

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

tinua la historia de todos los elementos de alimento es la misma, esta función es la relación operativa entre  $u$  y el tiempo de residencia.

Por integración gráfica, para las condiciones de la figura 3, resulta un tiempo de residencia de, aproximadamente, 0,9 horas para conseguir un 60 por 100 de oxidación del FeS.

El estudio de estas relaciones pondrá de manifiesto que la operación continua de un simple lecho es un procedimiento poco efectivo de asegurar la oxidación completa del FeS. Gran parte del FeS abandona el lecho después de un tiempo de residencia muy breve, siendo aun muy reactivo, pero antes de que haya tenido tiempo de oxidarse. La operación de carga es un procedimiento mucho mejor para alcanzar una oxidación elevada del FeS. La conversión puede esperarse se ajuste, entonces, a la figura 3.

Se ha considerado que por cada mol. de  $\text{FeS}_2$  que entra en el generador, se desprenden 1,6 mols. de  $\text{SO}_2$  en él. Estequiométricamente se requieren, pues, dos mols. de  $\text{O}_2$  ó 12 mols. de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  procedentes del regenerador. Suponiendo que se suministre al generador un exceso del 100 por 100 de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y que la reoxidación del  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en el regenerador es sólo del 90 por 100, se deduce que estequiométricamente será necesario un flujo de 4.270 kgs. de sólidos, desde el generador al regenerador, por cada mol. de  $\text{FeS}_2$  que se alimente en el primero. Por metro cuadrado de sección del generador por hora, esta cantidad deberá multiplicarse por la relación 2,46/1,6. Para conseguir un tiempo de residencia de 0,9 horas, el resultado deberá multiplicarse por este factor, dando 5,910 quilogramos de sólidos por metro cuadrado de reactor. Esta cantidad corresponde a  $5,910/826 = 7,15$  metros cúbicos, o sea un espesor de lecho de 7,15 metros.

Este espesor de lecho considerable y la caída de presión del gas necesaria para su fluidificación, junto con la producción de 20 por 100 del  $\text{SO}_2$  total en forma diluída (3,5 por 100) en el gas del regenerador, es el precio que debe pagarse por utilizar piritas como materia prima de azufre en vez del azufre mismo. Sin embargo, este precio, relativamente bajo, aun puede reducirse utilizando temperaturas más elevadas, si ello es posible, con la pirita de que se trate, o utilizando menor exceso de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Debe recordarse que el comportamiento de estos sólidos depende tanto de la composición como de la estructura física, y, por lo tanto, de su origen e historia. Los datos numéricos que se han dado deben considerarse como típicos de los materiales utilizados, pero para completa garantía en el proyectado de instalaciones deberán obtenerse los correspondientes datos experimentales con el material que vaya a utilizarse.

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

### CONSIDERACIONES GENERALES

Las características básicas de la técnica de polvo fluidificado, debidamente aplicada, son: (1) mezcla íntima del polvo, desde la parte inferior a la superior del lecho; (2) elevada concentración de polvo por unidad de volumen (y de aquí, elevada relación de masas de sólido a gas y gran superficie interfacial por unidad de volumen); (3) posibilidad de una elevada velocidad de circulación de sólidos a través del lecho, y, finalmente (4), operación suave, fácilmente controlable, con pocas o ninguna partes móviles, y con un mínimo de desgaste en la instalación. Como consecuencia de estas características, la operación ofrece ventajas importantes. Proporciona uniformidad de temperatura en toda la zona de reacción, evitando sobrecalentamientos localizados, circunstancias nunca alcanzables, hasta ahora, en operaciones industriales de escala similar. Permite alcanzar un control seguro de la temperatura en función del tiempo. Utilizando el polvo como transportador de calor, permite el suministro o eliminación del mismo sin necesidad de la transmisión de aquél a través de las paredes del reactor. La carga circulante puede actuar, también, como vehículo de componentes químicamente activos. Un reactor determinado puede ofrecer capacidad elevada, aun para reacciones lentas por unidad de superficie interfacial. Esta técnica se adapta tanto a operaciones continuas como intermitentes o de carga, y a escalas muy diferentes de producción.

El método tiene limitaciones que conviene tener presentes. La capacidad de circulación gaseosa está limitada por el hecho de que, aunque la velocidad del gas debe ser bastante elevada para asegurar la turbulencia del lecho, no debe ser excesivamente alta a fin de mantener una adecuada densidad de polvo en el mismo. La caída de presión del gas, equivalente al peso del polvo, es inevitable. Debe preverse un mecanismo para la eliminación del polvo que acompaña al gas efluyente, y si las velocidades de gas son muy elevadas, para su recirculación por el lecho. Ahora bien, cuando se trate de reacciones que suponen interacción química o térmica de gases y sólidos, en especial, que requieran gran área interfacial, estrecho control de temperatura aun en presencia de efectos caloríficos considerables (especialmente a temperaturas muy elevadas), resistencia a corrosión y altas velocidades de circulación de sólidos a través de la zona de reacción, la industria química está encontrando en

## PRODUCCION DE ANHIDRIDO SULFUROSO

la técnica de polvo fluidificado un método de operación importante, aplicable a una gran diversidad de problemas.

### BIBLIOGRAFIA

- (1) Baxter, G. P. y Hoover, C. R., *Journ. Am. Chem. Soc.*, *34*, 1.657 (1912).
- (2) Chipman, J., y Murphy, D. W., *Ind. Eng. Chem.*, *25*, 319 (1933).
- (3) Gilliland, E. R., y Mason, E. A., *Ind. Eng. Chem.*, *41*, 1.191 (1949).
- (4) Kalbach, J. C., *Chem. Eng.*, *54*, No. 2, 136 (1947).
- (5) Kelly, K. K., «The Thermodynamic Properties of Sulfur and its Inorganic Compounds», U. S. Dept. Interior, Bur. Mines, Bul. 406, 29-44, 126-137 (1938).
- (6) Martín, F., y Fuchs, Z., *Anorg. Chem.*, *125*, 312 (1922).
- (7) Murphree, E. V., Fischer, H. G. M., Gohr, E. V. Sweeney, W. J., y Brown, C. L., *A. P. I. proc.*, *24*, No. 3, 91 (1943).
- (8) Murphree, E. V., Brown, C. L., Fischer, H. G. M., Gohr, E. V. y Sweeney, W. J., *Ind. Eng. Chem.*, *35*, 768 (1943).
- (9) Murphree, E. V., Brown, C. L., Gohr, E. J., Jahnig, C. E., Martin, H. Z., y Tyson, C. W., *Trans. Am. Institute Ch. Eng.* *XLI*, 19 (1945).
- (10) Rudolfs, W. Jr., *Chem. Eng. Dept. Thesis, Massachusetts Institute of Technology* (1947).
- (11) Smith, V. C., y Revoir, W. H., Jr., *Chem. Eng. Dept. Thesis, Massachusetts Institute of Technology* (1948).
- (12) Tscherswinsky, P., Halferdahl, A. C., Dieschlag, E., y Horn, E., *Centr. Min.* *199* (1927).
- (13) White, F. S., *Am. Chem. Soc. Symposium*, Dec. 28-29 (1948).
- (14) Wokler, L., Martin, F., y Schmidt, E., Z., *Anorg. Chem.*, *127*, 289 (1923).

Este trabajo fué presentado en el XXII Congreso Internacional de Química Aplicada, celebrado en Barcelona en octubre de 1949.

# 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.

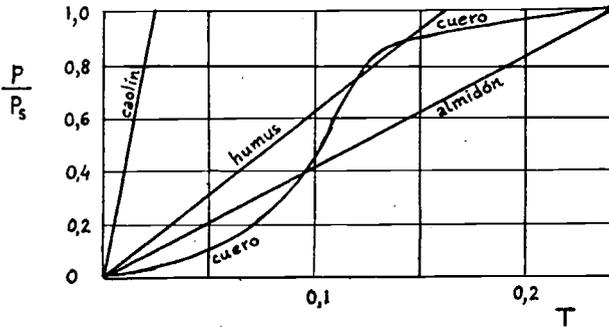


FIG. 1.— $P/P_s$  en función de  $T$ .

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. A vacío.
		Armarios o cámaras de desecación.		

*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.

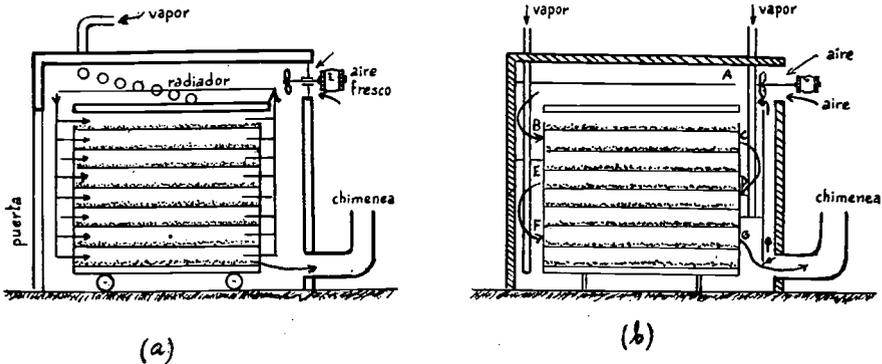


FIG. 2.—Cámara de desecación

En la figura 2 (b), se ha representado una cámara de desecación construída 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-



## 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.

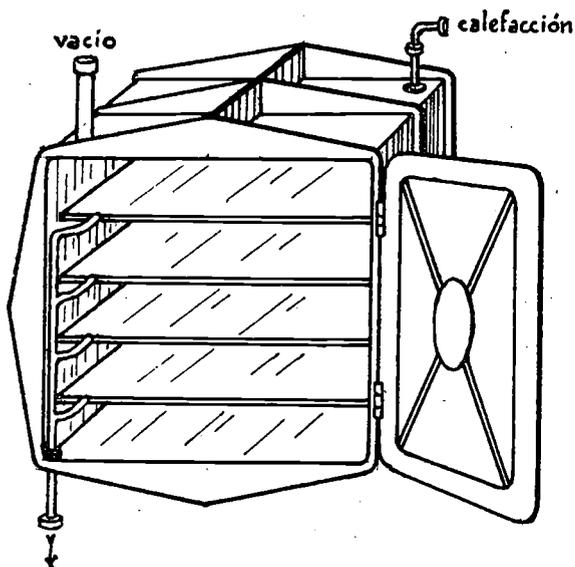


FIG. 4.—Armario de desecación en vacío

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-

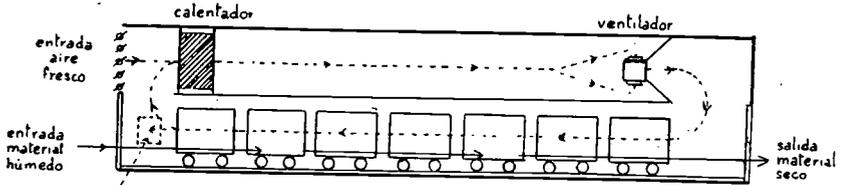


FIG. 5.—Desecador de túnel

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.

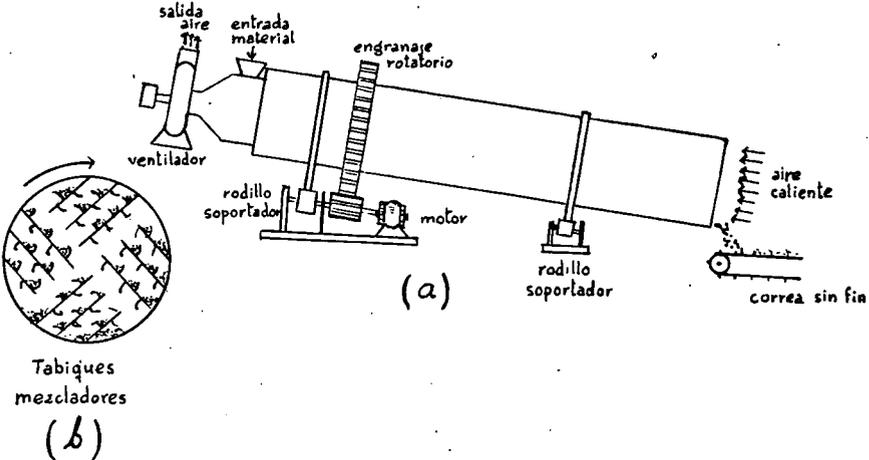


FIG. 6.—Desecador rotatorio con calefacción directa en contracorriente, con aire caliente

**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

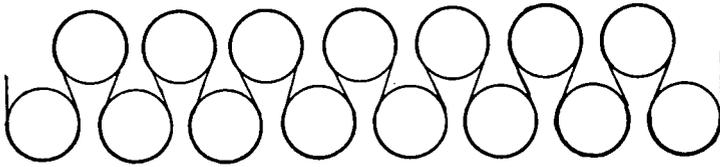


FIG. 7.—Desecador de cilindros

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.

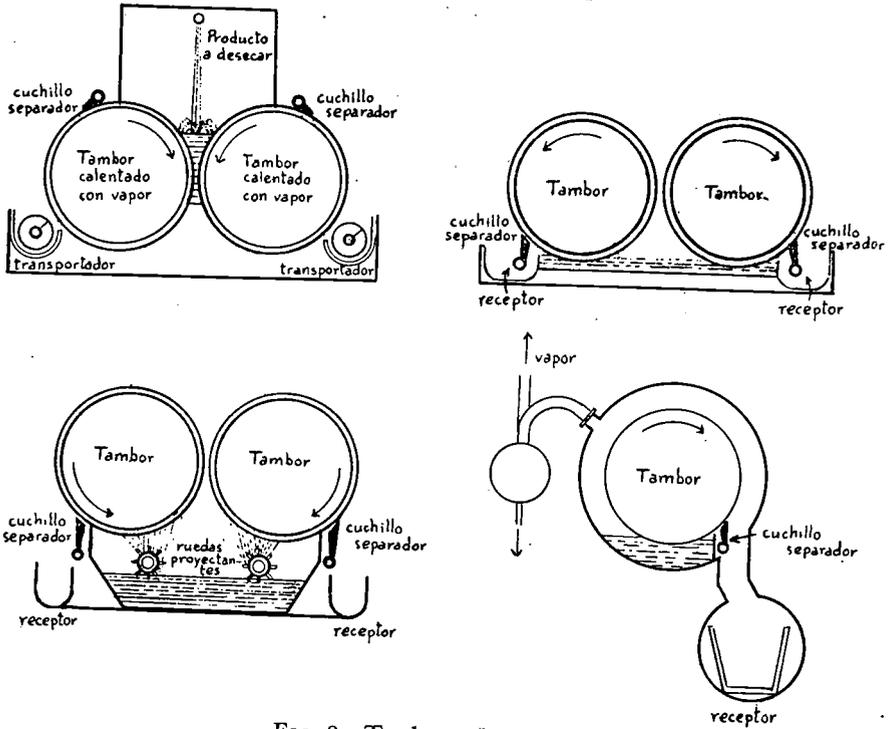


FIG. 8.—Tambores desecadores

**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

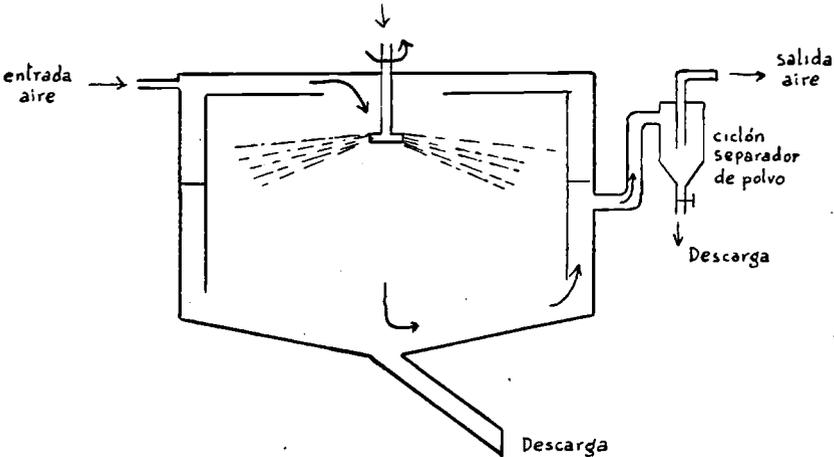


FIG. 9.—Desecador de pulverización

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 ( $2 \times 10^6$  a  $100 \times 10^6$  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.

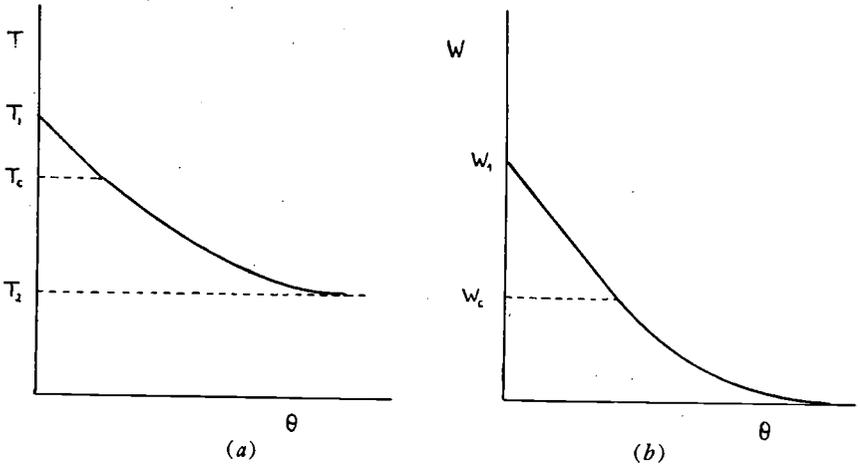


FIG. 10.—Experiencia de desecación en condiciones constantes  
 a) Curso de la humedad total con el tiempo.  
 b) Curso de la humedad libre con el tiempo.

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.

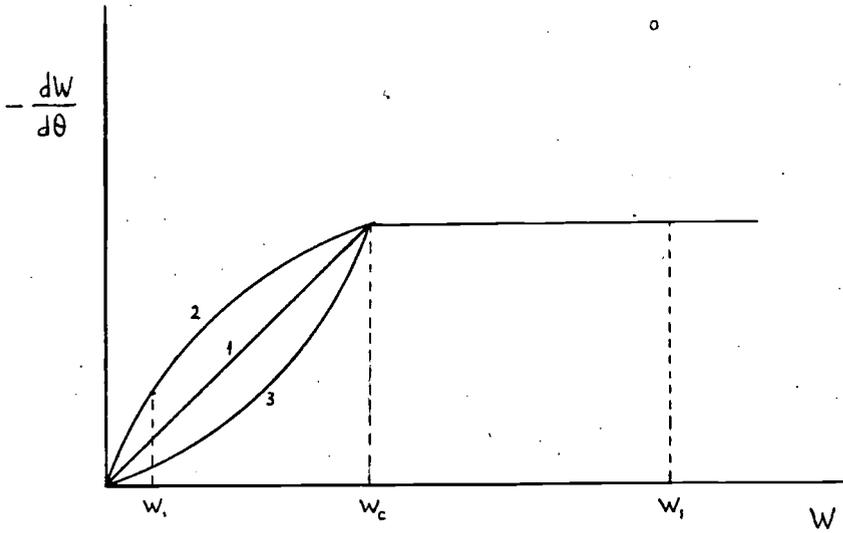


FIG. 11.—Curvas de velocidad de desecación en condiciones constantes

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

## D E S E C A C I O N

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-

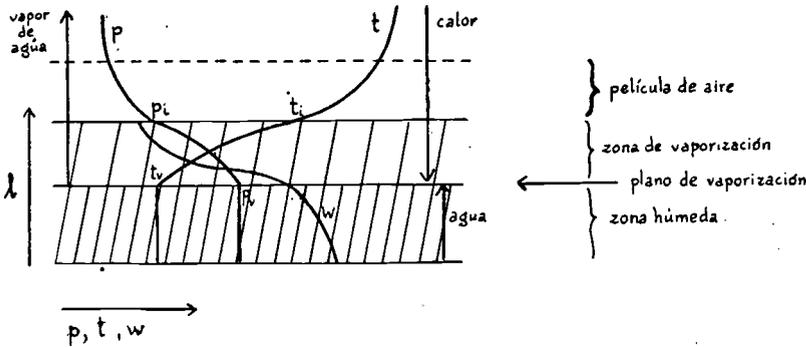


FIG. 12.—Mecanismo de desecación de un sólido poroso propiamente húmedo

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.

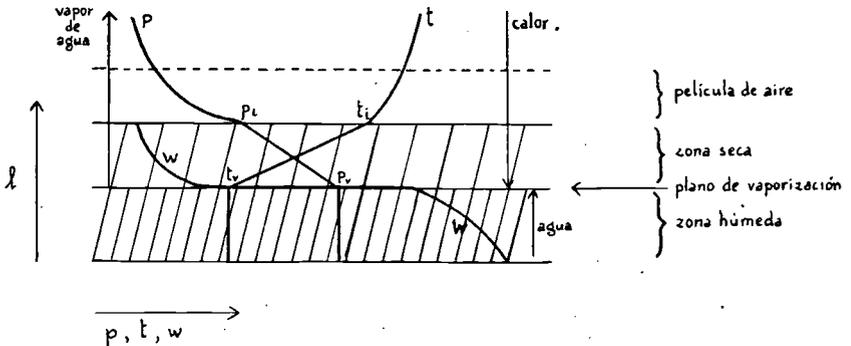


FIG. 13.—Mecanismo de desecación de un sólido poroso higroscópico

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;  $\varphi$ , 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  $\theta_I$ , 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  $\theta_{II}$  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.) ( $\text{m.}^2$ ) ( $^{\circ}\text{C.}/\text{m.}$ ). El peso de material seco por  $1$  dm.<sup>3</sup> de volumen original es de  $0,24$  Kgs. En ambos experimentos, el aire tenía una temperatura de  $66^{\circ}$  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:

$\theta$ , 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.

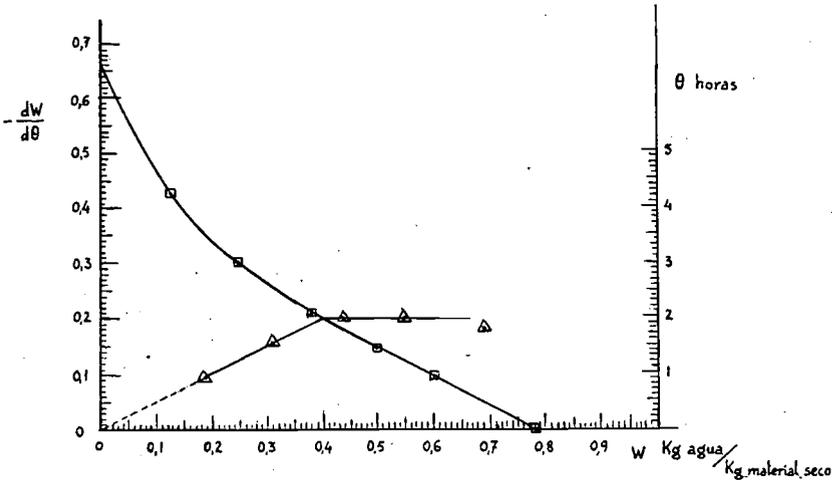
*Solución.*

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

$\theta$	T	W	$\Delta\theta$	$\Delta W$	$\Delta W/\Delta\theta$	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  $\theta$ ; 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:

$$\text{Período I } W > W_c$$

$$\text{Período II } W < W_c$$

*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.

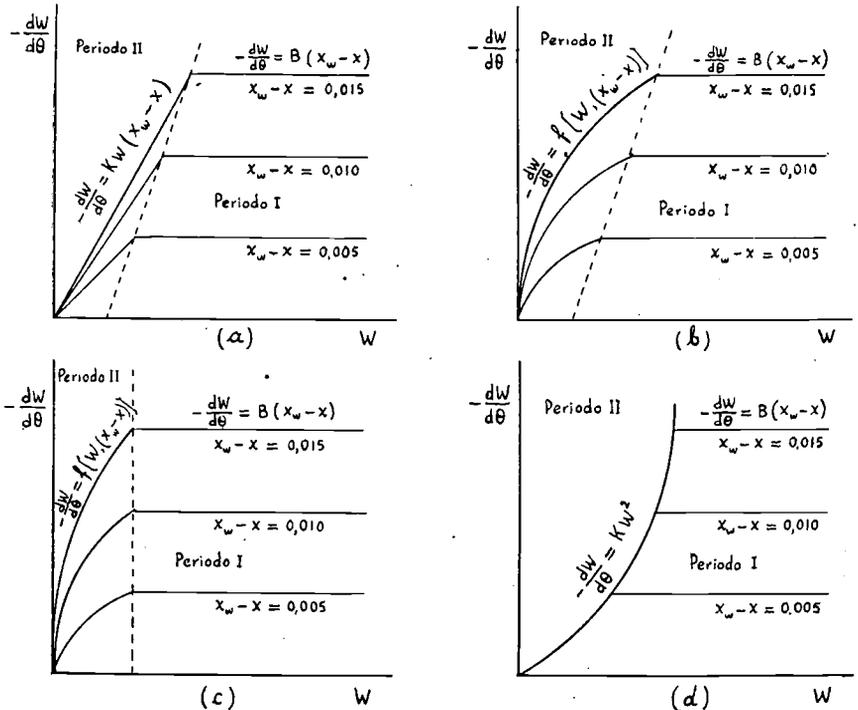


FIG. 14.—Experiencias previas de desecación en condiciones constantes

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  $W_c$ .  $\theta_I$  se referirá al tiempo de secado en la zona I y  $\theta_{II}$  a la duración del secado en la zona II.

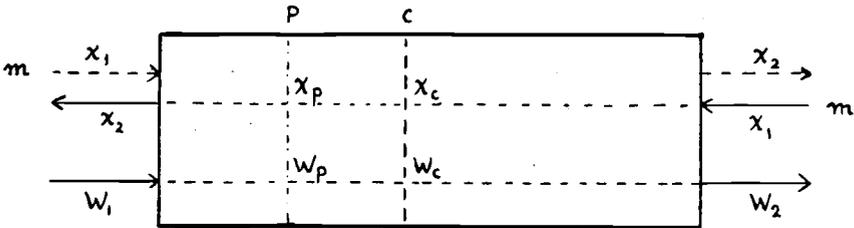


FIG. 15.—Condiciones en un desecador continuo con corriente de aire

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:

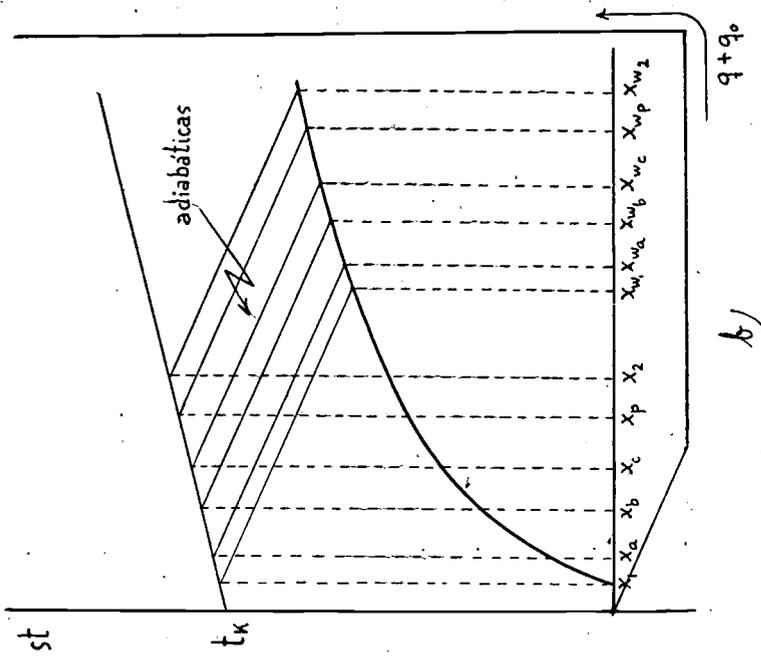
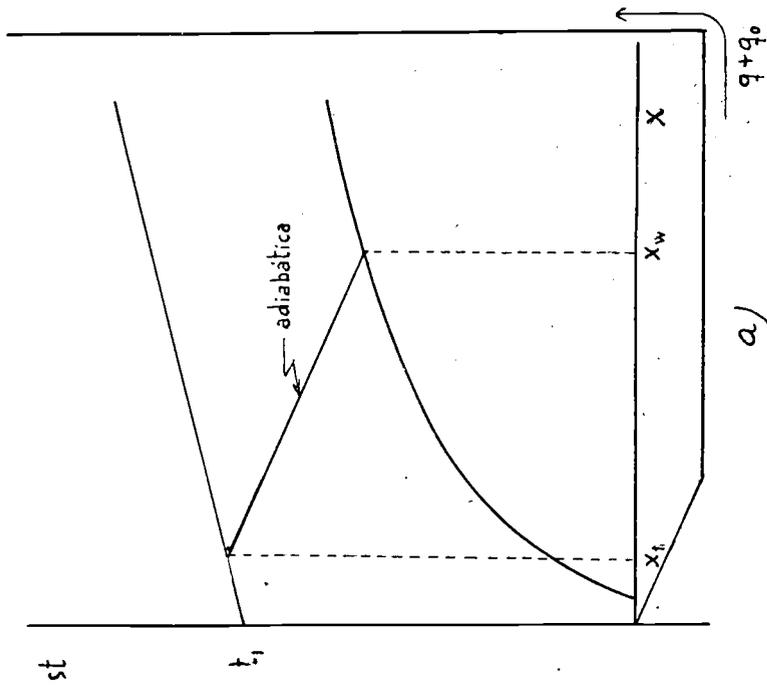


FIG. 16.—Cálculo de  $x_w$

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  $\theta_I$  y el área entre los límites  $W_c$  y  $W_2$ , será  $\theta_{II}$ . La suma de ambos tiempos, o sea el área total entre  $W_1$  y  $W_2$  será el tiempo total  $\theta_T$ , de desecación.

DESECCION

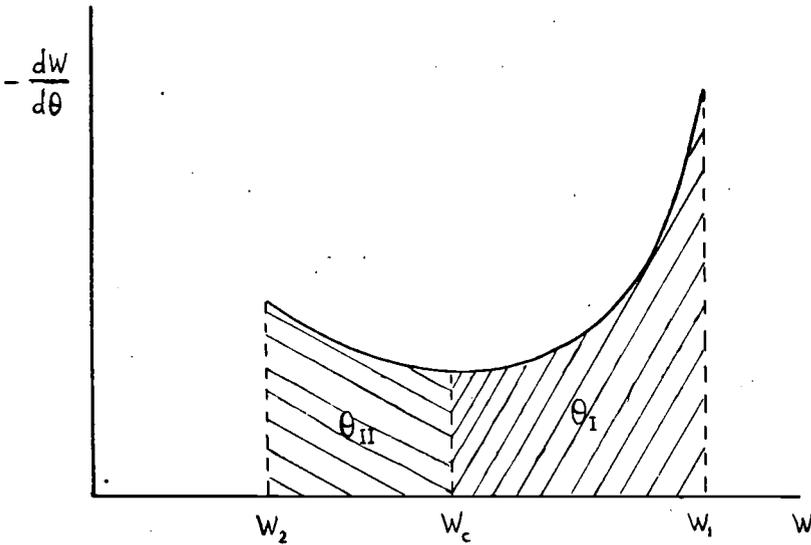


FIG. 17.—Integración gráfica  $\theta = \int \frac{d\theta}{dW} dW$

*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  $\theta_T$ , 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

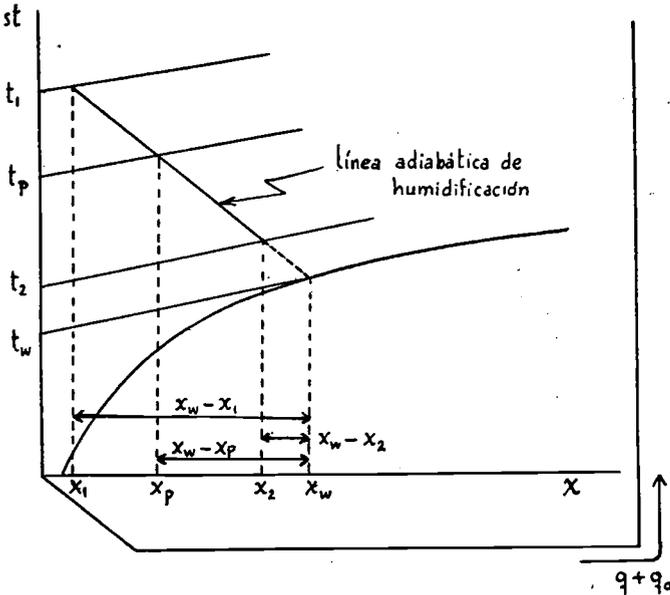


FIG. 18.—Desecación adiabática

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.

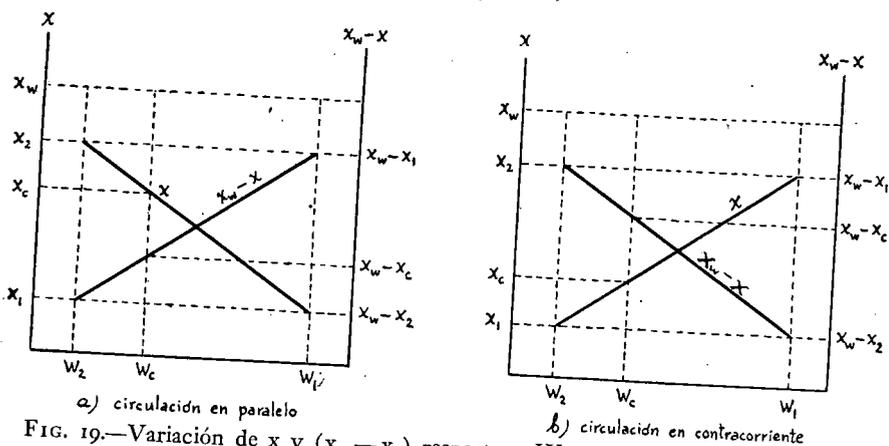


FIG. 19.—Variación de  $x$  y  $(x_w - x_1)$  respecto a  $W$  en un desecador adiabático

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

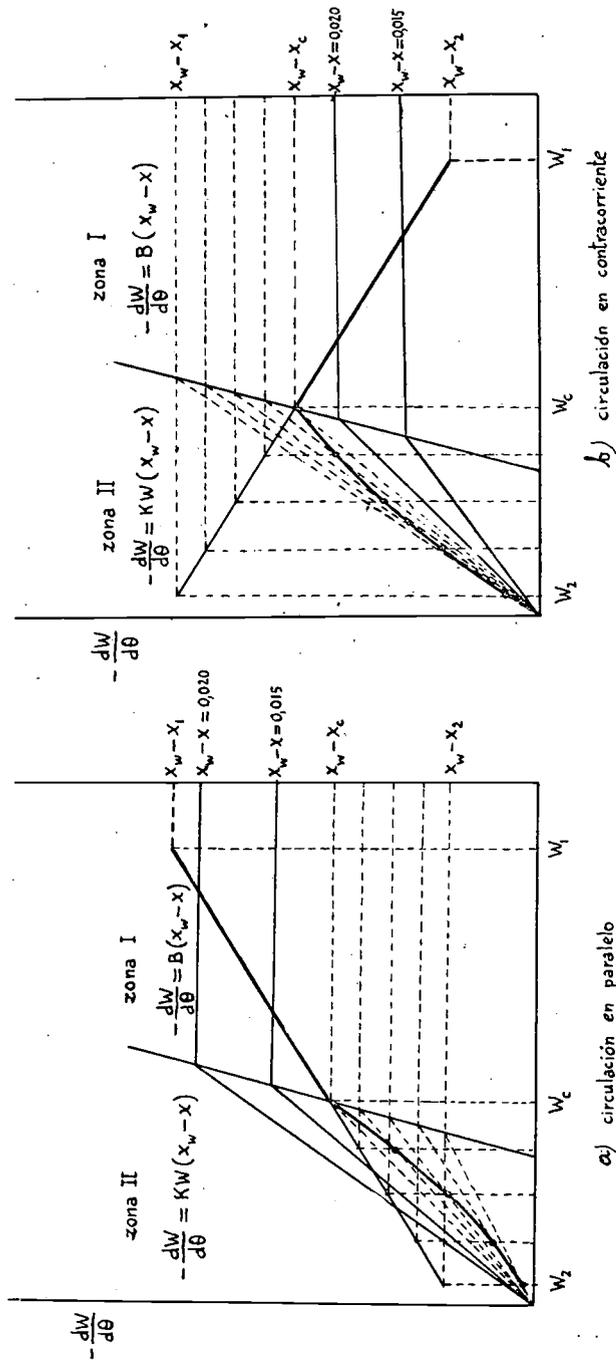


FIG. 20.—Desecación adiabática

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  $\theta$ .

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.

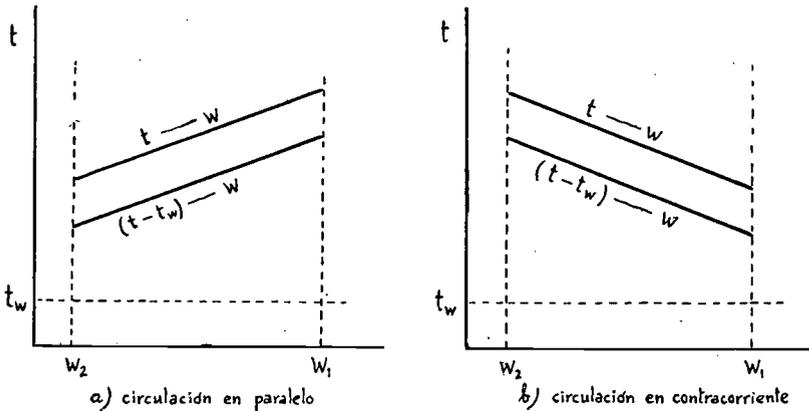


FIG. 21.—Variación de  $t$  y  $(t - t_w)$  respecto a  $W$  en un desecador adiabático

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

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

ésta podrá integrarse así:

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

o sea

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

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:

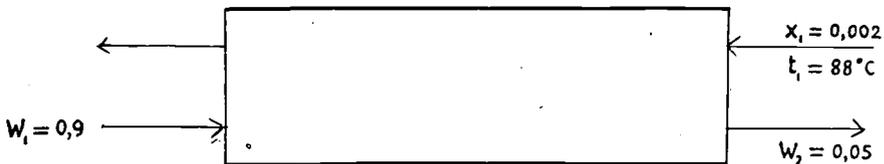
D E S E C A C I O N

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:

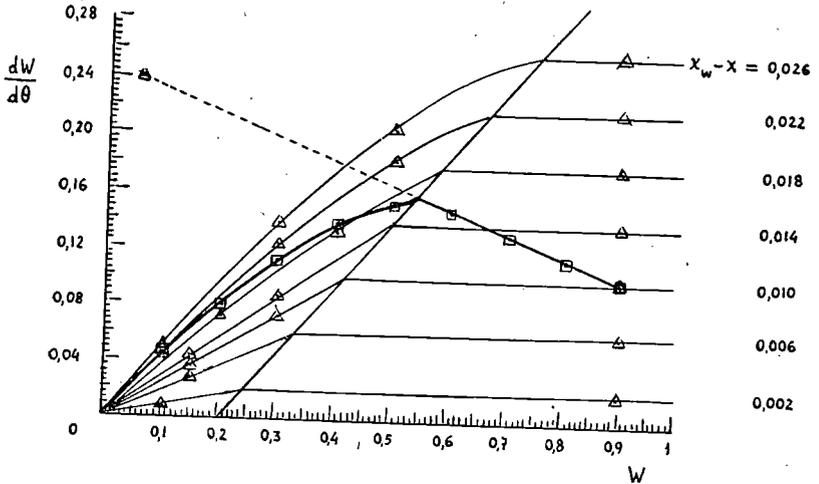
$$x_w = 0,0261$$

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:

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

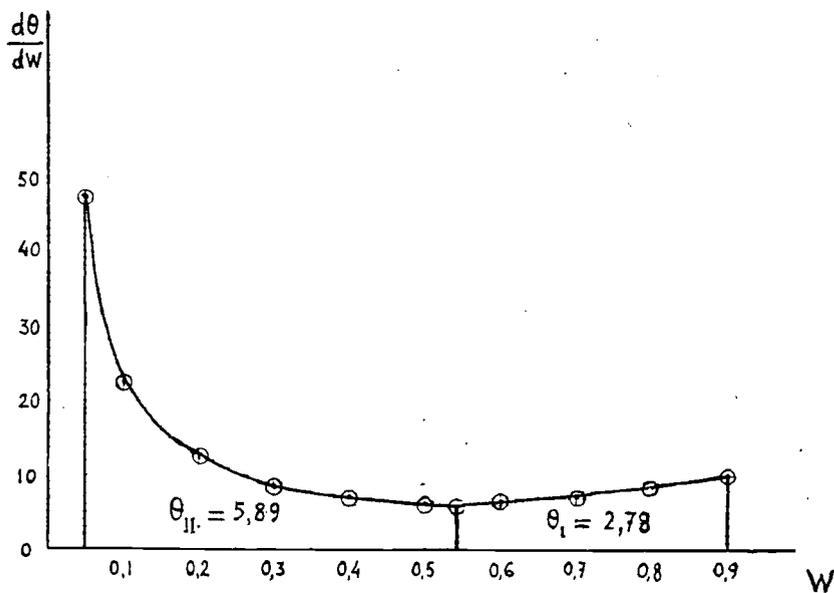
b) Del gráfico:

$$W_c = 0,54$$

$$x_w - x_c = 0,01598$$

$$x_c = 0,01012$$

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:

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

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

## 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  $x$ .

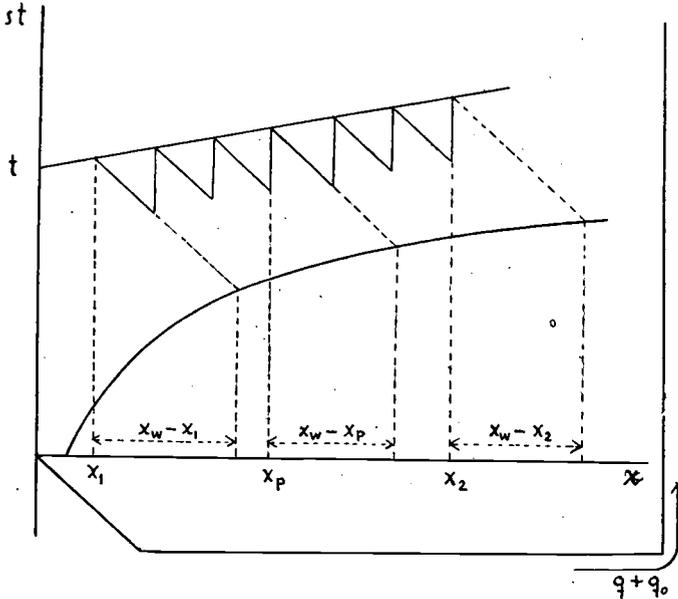


FIG. 22.—Desecación a temperatura media constante

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.

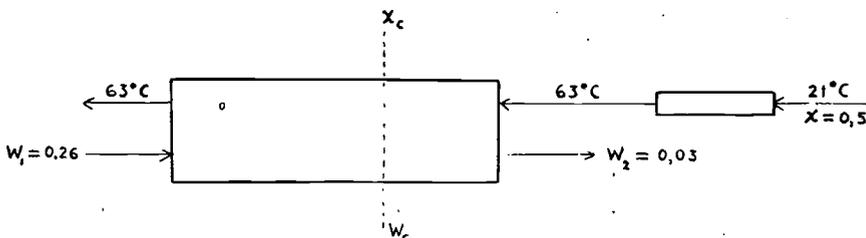
Para el transporte del material se dispone de unas vagonetas provistas de bandejas

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.<sup>2</sup>) (°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:

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

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:

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

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.

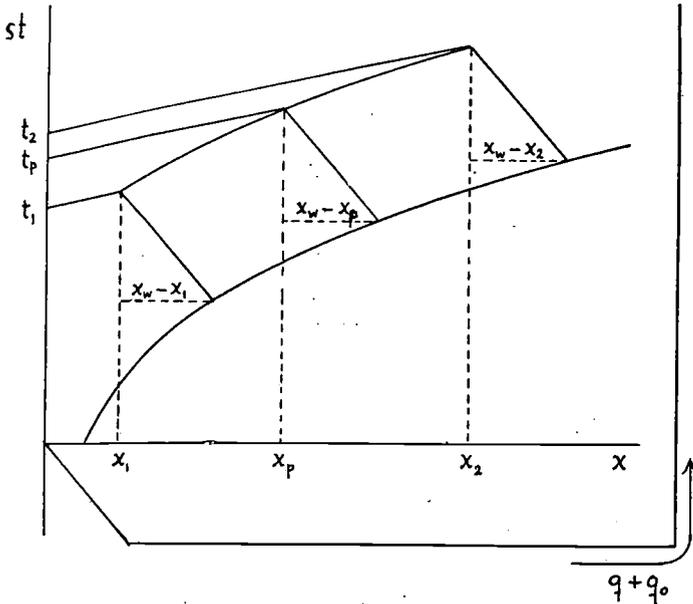


FIG. 23.—Desecación con humedad controlada

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  $\theta$  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),  $x_s = 0,01336$ . 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:

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

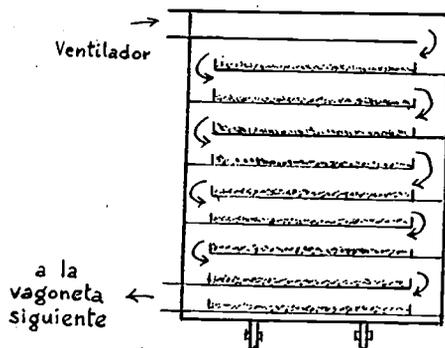
Este peso será por 1,32 metros de longitud de desecador, luego:

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

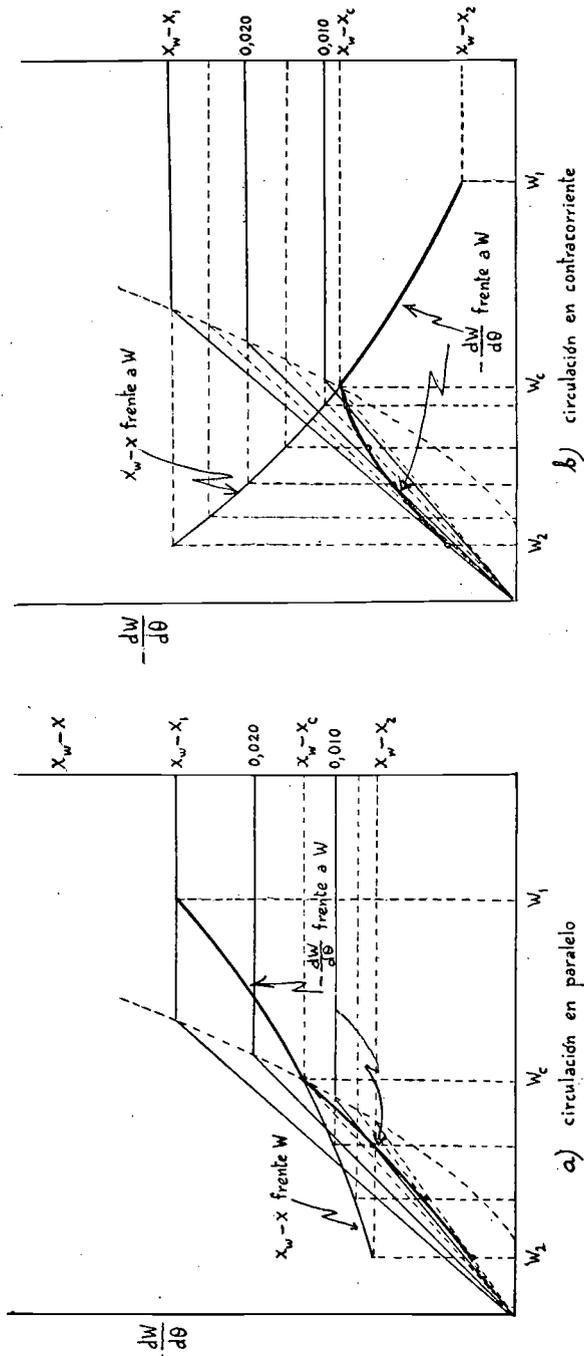


FIG. 24.—Desecación no adiabática

## 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. ° 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<sub>2</sub>, 2,05 por 100 de CO, 3,79 por 100 de O<sub>2</sub>, 79,81 por 100 de N<sub>2</sub>. Su punto de rocío a la entrada es de 24,4° C. (p<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 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.) (° C):

	0 — 70° C.	0 — 600° C.
CO <sub>2</sub>	9,3	9,9
CO	6,9	7,4
O <sub>2</sub>	7,1	7,6
N <sub>2</sub>	6,9	7,3
H <sub>2</sub> O	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:

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

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

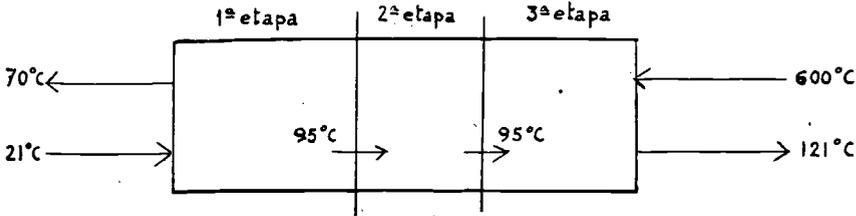
$$\text{Gasto másico a la salida} = 402 + (500) (0,15) = 477 \text{ Kgs. aire húmedo/hr.}$$

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.<sup>a</sup> 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.<sup>a</sup> 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.<sup>a</sup> 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  $t^{\circ}$  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. <sup>a</sup> Precalentación		Zona 2. <sup>a</sup> Evaporación		Zona 3. <sup>a</sup> 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:

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

Zona de evaporación:

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

Zona de sobrecalentamiento:

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

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

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:

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

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:

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

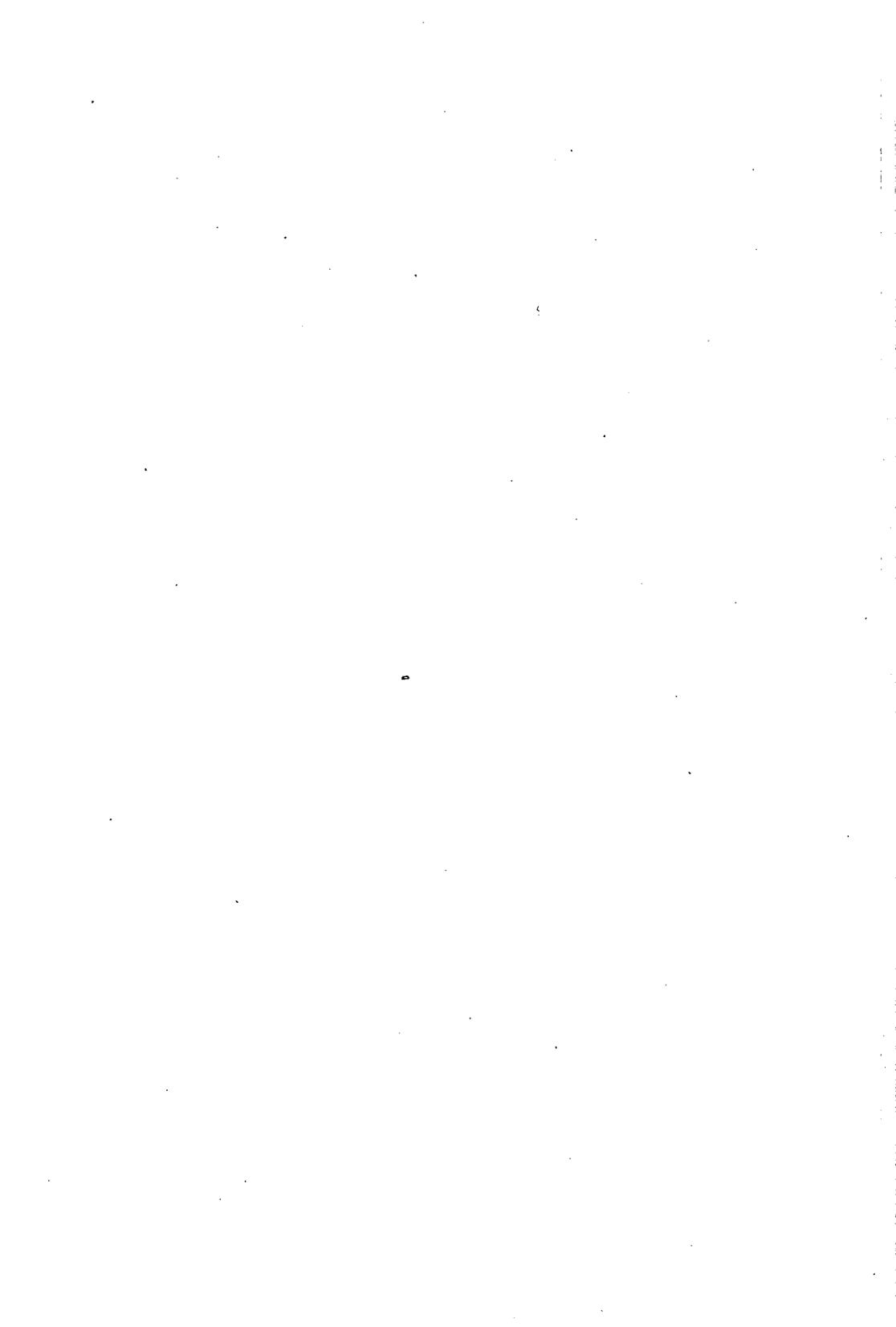
Como los valores (hA) son proporcionales a los volúmenes de desecador y recuperador:

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

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).



ANALES DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA

VOLUMEN 1.º — 1920-1921

CUADERNO 1.º—Nota preliminar. El presente de las Universidades y el porvenir en sus relaciones con el régimen autonómico. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1920 a 1921, por el *Dr. D. Adolfo Gil y Morte*, Catedrático de Medicina.—Acuerdos del Claustro de la Universidad referentes a la publicación de estos ANALES.—Asamblea Universitaria: convocatoria.—64 páginas.

CUADERNO 2.º—Instituto de Idiomas: Antecedentes, Reglamento y Memorias de los Cursos 1919-1920 y 1920-1921.—Instituto de Estudios Actuariales.—Instituto de Nipiología.—92 páginas.

CUADERNO 3.º—Don Rafael de Olóriz y sus fundaciones culturales, por el *Doctor D. Joaquín Ros*, Catedrático de Derecho.—Asamblea Universitaria.—48 páginas y cinco láminas.

CUADERNO 4.º—Intercambio Universitario.—Los estudios de Química Biológica en las Universidades de Zaragoza y Valencia: Conferencias de los *Doctores Rocasolano y Bermejo* y Crónica de los actos realizados.—Profilaxis del Paludismo por el cultivo de las algas caráceas: Conferencia del *Dr. Caballero*.—140 páginas, dos láminas y un grabado.

CUADERNOS 5.º A 8.º—Extensión Universitaria.—Facultad de Derecho: Conferencias de los *Doctores Villalonga, De Benito, Gallardo, Cabrera y Jordana*.—Nota de la Redacción.—Índice del volumen 1.º—178 páginas.

## VOLUMEN 2.º — 1921-1922

- CUADERNO 9.º.—Influencia de la Química en la Economía nacional. Discurso leído en la solemne apertura del Curso 1921 a 1922, por el *Dr. D. Enrique Castell y Oria*, Catedrático de Ciencias.—42 páginas.
- CUADERNO 10.—Documentos referentes a la Autonomía Universitaria y su implantación en la Universidad de Valencia.—136 páginas.
- CUADERNO 11.—La Enseñanza de Lenguas Modernas en los Estados Unidos.—Conferencias del *Profesor Wilkins*.—152 páginas.
- CUADERNOS 12 Y 13.—Memorias y Estadísticas de los Cursos 1919-1920 y 1920-1921, preparadas por la Secretaria general de la Universidad de Valencia.—130 páginas.
- CUADERNOS 14 A 16.—Extensión Universitaria.—Facultad de Filosofía y Letras: Conferencias de los Doctores *D. Pedro María López*, *D. Vicente Losada* y *D. Ramón Velasco y Pajares*.—Índice del volumen 2.º— 80 páginas. (Agotado).

## VOLUMEN 3.º — 1922-1923

- CUADERNO 17.—Intereses españoles derivados de la Oceanografía. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1922 a 1923, por el *Dr. D. Ramón Velasco y Pajares*, Catedrático de la Facultad de Filosofía y Letras.—92 páginas.
- CUADERNO 18.—Extensión Universitaria.—Facultad de Filosofía y Letras: Conferencias del *Doctor D. Rafael Altamira* y sumario de las del *Doctor D. José Deleito*.—40 páginas.
- CUADERNO 19.—El antiguo patrimonio de la Universidad de Valencia.—Memoria del *Dr. D. Carlos Riba*.—144 páginas y dos láminas.
- CUADERNOS 20 A 24.—Estudios monográficos y servicios clínicos de la Facultad de Medicina.—Índice del volumen 3.º—228 páginas, un grabado y ocho láminas.

## VOLUMEN 4.º — 1923-1924

- CUADERNO 25.—La hipótesis de una primitiva reliquia totémica ante la Prehistoria y la Etnología. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1923 a 1924, por el *Doctor D. Manuel Cabrera y Warleta*, Catedrático de Derecho.—68 páginas.
- CUADERNO 26.—Extensión Universitaria.—Facultad de Derecho: Conferencias de los *Sres. Maeztu y Atard González*.—48 páginas.
- CUADERNOS 27 Y 28.—Facultad de Derecho: Conferencias de los *Doctores Ots Capdequi y De Benito*.—La R. P. en Bélgica, por el *Dr. D. Mariano Gómez y González*.—124 páginas. (Agotado).
- CUADERNOS 29 Y 30.—Memorias y Estadísticas de los Cursos 1921-1922 y 1922-1923, preparadas por la Secretaría general de la Universidad de Valencia.—136 páginas.
- CUADERNOS 31 Y 32.—La vida de la Universidad de Valencia desde 1919 a 1924, por el *Dr. Deleito y Piñuela*.—La reforma de la Segunda Enseñanza, Ponencia de la Facultad de Filosofía y Letras.—El «Colegio de San Pablo» y el de «Na Monforta».—Índice del volumen 4.º—88 páginas.

## VOLUMEN 5.º — 1924-1925

- CUADERNO 33.—¡Amemus patriam!—La influencia española en la cultura mundial. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1924 a 1925, por el *Dr. D. Vicente Peset y Cervera*, Catedrático de Medicina.—120 páginas.
- CUADERNO 34.—Don Ignacio Tarazona y el Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia.—54 páginas y 8 láminas.
- CUADERNOS 35 A 38.—Precedentes de la Universidad de Valencia, por el *Dr. D. Antonio de la Torre y del Cerro*, Catedrático de la Universidad de Barcelona.—128 páginas.

CUADERNOS 39 y 40.—Memorias y Estadísticas de los Cursos 1923-1924 y 1924-1925, preparadas por la Secretaría general de la Universidad de Valencia.—Índice del volumen 5.º.—120 páginas.

#### VOLUMEN 6.º — 1925-1926

CUADERNO 41.—La Botánica en España. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1925 a 1926, por el *Doctor Don Francisco Beltrán Bigorra*, Catedrático de Ciencias.—66 páginas.

CUADERNOS 42 A 44.—Extensión universitaria.—Facultad de Derecho: Conferencias acerca de «La Organización y las actividades de la Sociedad de las Naciones».—156 páginas y 4 láminas.

CUADERNOS 45 A 47.—La enseñanza de la Patología General en la Facultad de Medicina de Valencia, por el *Dr. D. Ramón Vila y Barberá*, Catedrático titular de dicha asignatura.—76 páginas, 3 grabados y 6 láminas.

CUADERNO 48.—«Premio Olóriz».—Estudio histórico-crítico del Código Penal Argentino de 1922, por *D. Elías Izquierdo Maronda*, Doctor en Derecho.—El tercero en nuestro sistema hipotecario, por *D. José María Casado Pallarés*, Licenciado en Derecho.—82 páginas.

#### VOLUMEN 7.º — 1927-1928

CUADERNO 49.—San Francisco de Asís. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1926 a 1927, por el *Dr. D. José Casado y García*, Catedrático de la Facultad de Filosofía y Letras.—72 páginas.

CUADERNOS 50 y 51.—Memorias y Estadísticas de los Cursos 1925-1926 y 1926-1927, preparadas por la Secretaría general de la Universidad de Valencia.—128 páginas.

CUADERNOS 52 A 54.—La Representación Profesional en las Asambleas Legislativas, por *D. José Medina Echevarría*, alumno pensionado por la Universidad de Valencia.—90 páginas.

CUADERNOS 55 y 56.—(Sin publicar).

## VOLUMEN 8.º — 1927-1928

- CUADERNO 57.—Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1927 a 1928, por el *Ilmo. Sr. Dr. D. Joaquín Ros y Gómez*, Catedrático de la Facultad de Derecho.—62 páginas. (Agotado).
- CUADERNOS 58 Y 59.—Memorias y Estadísticas de los Cursos 1927-1928 y 1928-1929, preparadas por la Secretaría general de la Universidad de Valencia.—122 páginas.
- CUADERNOS 60 A 64.—(Sin publicar).

## VOLUMEN 9.º — 1928-1929

- CUADERNO 65.—Orientación quirúrgica. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1928 a 1929, por el *Dr. D. Enrique López Sancho*, Catedrático de la Facultad de Medicina.—70 páginas.
- CUADERNOS 66 Y 67.—Biografías de Francisco Pérez Bayer y José Iborra García, por el *Dr. D. Francisco Cantó Blasco*.—52 páginas y 2 láminas.
- CUADERNOS 68 Y 69.—Memorias y Estadísticas de los Cursos 1929-1930 y 1930-1931, preparadas por la Secretaría general de la Universidad de Valencia.—112 páginas.
- CUADERNOS 70 A 72.—(Sin publicar).

## VOLUMEN 10 — 1929-1930

- CUADERNO 73.—La Química al servicio de la patria. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1929 a 1930, por el *Dr. D. José Gascó y Oliag*, Catedrático de la Facultad de Ciencias.—62 páginas.
- CUADERNO 74.—La poesía del Cancionero de Uppsala, por *D. Leopoldo Querol Roso*.—118 páginas.

CUADERNOS 75 y 76.—Memorias y Estadísticas de los Cursos 1931-1932 y 1932-1933, preparadas por la Secretaría general de la Universidad de Valencia.—76 páginas.

CUADERNOS 77 A 80.—(Sin publicar).

#### VOLUMEN 11 — 1930-1931

CUADERNO 81.—El concepto romántico de la Historia. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1930 a 1931, por el *Dr. D. Juan de Contreras, Marqués de Lozoya*, Catedrático de la Facultad de Filosofía y Letras.—56 páginas.

CUADERNO 82.—Discurso leído por el *Excmo. Sr. Conde de Gimeno*, en la solemne sesión necrológica que la Facultad de Medicina de Valencia celebró el 6 de diciembre de 1930, en honor del ilustre sabio español *Jaime Ferrán*.—34 páginas.

CUADERNO 83.—Facultad de Filosofía y Letras. Seminario de Arte Valenciano. Historia de la Pintura Valenciana. Memoria y Trabajos de los Cursos 1928-1929 y 1929-1930.—152 páginas y 14 láminas.

CUADERNOS 84 A 88.—(Sin publicar).

#### VOLUMEN 12 — 1931-1932

CUADERNO 89.—Los sistemas sociales contemporáneos y sus direcciones convergentes. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1931 a 1932, por el *Dr. D. José Castán Tobeñas*, Catedrático de la Facultad de Derecho.—120 páginas.

CUADERNO 90.—Negros y mulatos de Nueva España. (Historia de su alzamiento en Méjico en 1612), por *D. Luis Querol y Roso*, Ex Profesor de la Universidad de Valencia y Catedrático de Geografía e Historia.—46 páginas.

CUADERNOS 91 A 96.—(Sin publicar).

VOLUMEN 13 — 1932-1933

CUADERNO 97.—Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1932 a 1933, por el *Dr. Jesús Bartrina Capella*, Catedrático de la Facultad de Medicina.—70 páginas. (Agotado).

CUADERNOS 98 A 104.—(Sin publicar).

VOLUMEN 14 — 1933-1934

CUADERNO 105.—El azar y los fundamentos del cálculo de probabilidades. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1933 a 1934, por el *Dr. D. Sixto Cámara Teedor*, Catedrático de la Facultad de Ciencias.—84 páginas.

CUADERNO 106.—Los cuantos de acción, por *D. Fernando Ramón y Ferrando*, Profesor de Física de la Universidad de Valencia.—72 páginas.

CUADERNO 107.—El nuevo derecho de propiedad individual. Monografía, por *D. Manuel Marqués y Segarra*, Licenciado en Derecho.—92 páginas.

CUADERNOS 108 A 112.—(Sin publicar).

VOLUMEN 15 — 1934-1935

CUADERNO 113.—Juan Ortiz de Zárate. Tercer Adelantado del Río de la Plata 1515?-1576, por *D. Emilio Gómez Nadal*.—152 páginas.

CUADERNOS 124 A 128.—(Sin publicar).

VOLUMEN 16 — 1939-1940

CUADERNO 121.—El concepto de Nación según José Antonio. Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1939 a 1940, por el *Ilmo. Sr. Dr. D. Francisco Alcayde y Vilar*, Catedrático y Decano de la Facultad de Letras.—32 páginas. (Agotado).

CUADERNO 122.—La nación como comunidad de existencia, por *Don Félix García Blázquez*, Doctor en Filosofía.—Platón y una idea actual del Estado, por *D. Manuel Souto Vilas*, Doctor en Filosofía.—58 páginas. (Agotado).

CUADERNO 123.—Fosfatasa y Fracturas: Contribución al estudio de la Bioquímica de la calcificación del callo, por *Don José Gascó Pascual*, Profesor Auxiliar de la Facultad de Medicina.—136 páginas y 48 grabados.

CUADERNOS 124 A 128.—(Sin publicar).

#### VOLUMEN 17 — 1940-1941

CUADERNO 129.—Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1940 a 1941, por el *Dr. D. Salvador Salóm Antequera*, Catedrático de la Facultad de Derecho.—80 páginas. (Agotado).

CUADERNO 130.—Discurso leído en la solemne apertura del Curso de 1940 a 1941, por *D. Guzmán Zamorano Ruiz*, Jefe del Distrito Universitario del S. E. U. de Valencia.—16 páginas. (Agotado).

CUADERNO 131.—Juan Luis Vives. Ofrenda de su Universidad en el IV Centenario de su muerte.—Aportaciones, Conferencias y Pensamientos, recopilados por el *Ilustrísimo Sr. D. Francisco Alcaide Vilar*, Decano de la Facultad de Letras.—308 páginas y 10 láminas. (Agotado).

CUADERNOS 132 A 136.—(Sin publicar).

#### VOLUMEN 18 — 1941-1942

CUADERNO 137.—Oración Inaugural. Curso Académico 1941 a 1942, leído por el *Excmo. Sr. Dr. D. Fernando Rodríguez Fornos y González*, Catedrático de la Facultad de Medicina y Rector de la Universidad.—50 páginas. (Agotado).

CUADERNOS 138 A 144.—(Sin publicar).

## VOLUMEN 19 — 1942-1943

- CUADERNO 145.—El Corcho. Discurso leído en la solemne inauguración del Curso Académico de 1942 a 1943, por *D. Ignacio Ribas Marqués*, Catedrático de la Facultad de Ciencias.—22 páginas. (Agotado).
- CUADERNO 146.—Discurso leído en la solemne apertura del Curso 1942 a 1943, por *D. Rafael Cerezo Enríquez*, Jefe del Distrito Universitario del S. E. U. de Valencia.—16 páginas.
- CUADERNO 147.—Constitución molecular de la quinhidrona, por *Don Octavio Rafael Foz Gazulla*, Catedrático de la Facultad de Ciencias.—84 páginas y 3 láminas.
- CUADERNOS 148 A 152.—(Sin publicar).

## VOLUMEN 20 — 1943-1944

- CUADERNO 153.—Valencia y los Reyes Católicos (1479-1493). Discurso leído en la solemne inauguración del Curso 1943 a 1944, por *D. Manuel Ballesteros Gaibrois*, Catedrático de la Facultad de Filosofía y Letras.—110-civ páginas.
- CUADERNO 154.—Discurso leído en la solemne apertura del Curso 1943 a 1944, por *D. Rafael Cerezo Enríquez*, Jefe del Distrito Universitario del S. E. U. de Valencia.—18 páginas.
- CUADERNOS 155 A 160.—(Sin publicar).

## VOLUMEN 21 — 1944-1945

- CUADERNO 161.—La situación anormal del comerciante y sus soluciones legales. Discurso leído en la solemne inauguración del Curso 1944 a 1945, por el *M. I. Sr. Dr. D. Ricardo Mur Sancho*, Catedrático de Derecho Mercantil.—94 páginas. (Agotado).

CUADERNO 162.—Discurso leído en la solemne apertura del Curso 1944 a 1945, por *D. Rafael Cerezo Enriquez*, Jefe del Frente de Juventudes del Distrito Universitario de Valencia.—18 páginas.

CUADERNOS 163 A 168.—(Sin publicar).

#### VOLUMEN 22 — 1945-1946

CUADERNO 169.—Influencia social de la Medicina. Discurso leído en la solemne inauguración del Curso 1945 a 1946, por el *Dr. D. Miguel Martí Pastor*, Catedrático de la Facultad de Medicina.—54 páginas.

CUADERNO 170.—Discurso leído en la solemne apertura del Curso 1945 a 1946, por el camarada *Rafael Cerezo Enriquez*, Jefe del Frente de Juventudes del Distrito Universitario de Valencia.—20 páginas.

CUADERNOS 171 A 176.—(Sin publicar).

#### VOLUMEN 23 — 1946-1947

CUADERNO 177.—Orientaciones analíticas para el estudio químico de los subproductos del arroz. Discurso leído en la solemne inauguración del Curso 1946 a 1947, por *D. Francisco de A. Bosch Ariño*, Vicedecano de la Facultad de Ciencias.—86 páginas.

CUADERNOS 178 A 184.—(Sin publicar).

#### VOLUMEN 24 — 1950-1951

CUADERNO I.—*Filosofía y Letras*. Las pasiones como enlace entre el alma y el cuerpo, por *D. Francisco Alcayde Vilar*.—116 páginas.

CUADERNO II.—*Ciencias*. Avances en la Tecnología de los agríos y del arroz, por el *Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias*.—148 páginas.

CUADERNO III.—Crónica de la Vida Universitaria en el curso 1950-51. 162 páginas.

VOLUMEN 25 — 1951-52

- CUADERNO I.—*Ciencias*. La técnica fotográfica en física nuclear y radiación cósmica, por *D. Joaquín Catalá de Alemania*.—XVI + 76 páginas.
- CUADERNO II.—*Derecho*. Lección de Pío XII a los juristas, por *D. José Corts Grau*; Evolución y problemas del Derecho presupuestario, por *D. José M.<sup>a</sup> Naharro Mora*; Polémica española sobre el «Ensayo», de Donoso Cortés, por *D. Diego Sevilla Andrés*. Notas y comentarios.—185 páginas.
- CUADERNO III.—*Medicina*. Ferrán: hombre de ciencia, por *D. Luis Barjau Gallach*; Ferrán: Bacteriólogo y sanitario, por *D. Juan Durich Espuñes*; Ferrán y el cólera del 85 en Valencia, por *D. Vicente Sanchis Bayarri*; Ferrán: Caballero español, por *D. José Martí Mateu*.—Notas y comunicaciones: Estudio sobre las lesiones Anatómopatológicas del reumatismo cardíaco deducidas en una estadística de mil autopsias locales, por *D. Antonio Llombart Rodríguez*; Las universidades canadienses y los estudios de medicina.—La Universidad Mc. Gill de Montreal, por *D. Wenceslao Calvo*.
- CUADERNO IV.—*Filosofía y Letras*. Génesis y ascendencia de Celestina, por *D. Francisco Sánchez-Castañer y Mena*. (En prensa.)
- CUADERNO V.—Crónica de la vida universitaria en el curso 1951-52.

VOLUMEN 26 — 1952-53

- CUADERNO I.—*Filosofía y Letras*. La lección política de los Reyes Católicos, por *D. Pablo Álvarez Rubiano*. 139 páginas.

## OTRAS PUBLICACIONES

- Catálogo de una serie de cartas de los Reyes Católicos, por *C. Abenia y R. Báguena*, con una introducción de *D. Manuel Ballesteros-Gai-brois*. Valencia, 1945. 15 pesetas.
- Bases para el estudio de la Patología Quirúrgica, por *D. José Gasco Pascual*. Valencia, 1944. 12 pesetas.
- El trastorno mental transitorio, por *D. Leopoldo López Gómez*. Valencia, 1945. 10 pesetas.
- Intoxicaciones por los hongos, por *D. Leopoldo López Gómez*. Valencia, 1947. 18 pesetas.
- La Academia Valenciana de Bellas Artes, por *D. Felipe Garín Ortiz*. Valencia, 1945. 15 pesetas.
- Lecciones de clínica hidrológica, por *D. Tomás Alcober*. Valencia, 1947. 45 pesetas.
- Memoria anual de la Universidad de Valencia. Curso 1945-46.
- Estudios acerca de calores de disolución y dilución, por *D. Manuel Colomina Barberá*. Valencia, 1947. 27 pesetas.
- Catalogus Seminum in Horto Botanico Universitatis Valentinae (Publicación anual).
- El clima de la España cuaternaria y los factores de su formación, por *D. Luis García-Sainz*. Valencia, 1947. 100 pesetas.
- Penumbra y primeros albores en la génesis y evolución del mito quijotesco, por *D. Francisco Sánchez-Castañer y Mena*. Valencia, 1948. 60 pesetas.
- Las dos fases del regionalismo internacional, por *D. José Ramón de Orúe*. Valencia, 1949. 30 pesetas.
- Evolución de la Quimioterapia, por el *Dr. D. Vicente Belloch Montecosinos*. Valencia, 1949. 50 pesetas.

*Distribución de las publicaciones de la Universidad de Valencia:*  
Librería Científica Medinaceli. Medinaceli, 4. Madrid.

EL PRESENTE FASCICULO, CUADERNO  
II DEL VOLUMEN XXVI DE *ANALES  
DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA*,  
CORRESPONDIENTE AL CURSO 1952-53,  
DEDICADO A *CIENCIAS*, FUE TERMI-  
NADO DE IMPRIMIR EN LA TIPOGRA-  
FIA MODERNA, DE LA CIUDAD DE  
VALENCIA, EL DIA 2 DE FEBRERO  
DE 1953, FESTIVIDAD DE LA VIRGEN  
DE LA CANDELARIA

L A U S † D E O