

**PSICROMETRÍA**

15. El aire que rodea una fábrica situada cerca del mar, se encuentra a 20°C y su humedad relativa es del 70%.
- Calcular su humedad absoluta.
  - Para utilizarlo como agente de secado en una planta de fermentación, dicho aire se calienta hasta 85°C en un cambiador de calor, alimentándose a continuación a un secadero adiabático del que sale con una humedad relativa del 80%. Calcular:
    - Temperatura de salida del secadero
    - Cantidad de vapor de agua que elimina del secado cada kg de aire seco
    - Cantidad de calor que es necesario comunicar en el cambiador de calor por cada kg de aire seco.
    - Temperaturas de rocío y húmeda del aire efluente del secadero.
16. Se dispone de una cierta cantidad de aire a 54°C con una humedad relativa  $\phi = 0,40$  y una presión total de 760 mm Hg.
- ¿Cuál es la presión parcial del vapor de agua en el aire en mm Hg?
  - ¿Cuál es la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener este aire a 54°C, expresada en kg de agua por kg de aire seco?
  - ¿Cuál es el punto de rocío del aire?
  - ¿Cuánto calor se requiere para calentar 1 kg de aire seco más la humedad que contiene desde 54 a 66°C?
  - Si se permite que el aire se humedezca adiabáticamente y se enfría de este modo a 46°C, ¿cuál será su humedad resultante?
  - ¿Cuál será la máxima humedad posible que este aire podría alcanzar en condiciones de humidificación adiabática y cuál sería la temperatura del aire al alcanzar tal condición?
  - ¿Cuál sería la temperatura del agua en el humidificador adiabático a que se refiere el apartado f)?
  - Si un volumen del aire considerado se mezcla con un volumen igual de aire a 54°C y 760 mm de presión total y saturado de humedad, ¿cuál sería la humedad porcentual del aire resultante?
17. Si las temperaturas húmeda y seca de una mezcla de metanol y aire a la presión atmosférica son respectivamente 24 y 38°C, ¿cuáles son los valores de las humedades absoluta y relativa, el punto de rocío y la temperatura de saturación adiabática?
- Datos:  
 Calores latentes de vaporización del metanol,  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ :  
 a 0°C: 1187;                      a 65°C: 1141  
 Considerar el calor específico del metanol vapor constante e igual a  $1,40 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .  
 Ecuación de Antoine para el metanol:
- $$\ln p_s = 18,5875 - \frac{3626,55}{(T - 34,29)} \quad p_s = \text{mm Hg}; \quad T = \text{K}$$
- Para el sistema metanol-agua, experimentalmente se encontró:  $h/K' = 1,22 \text{ s}$ .
18. Una mezcla de aire y benceno a presión atmosférica con un contenido de 0,01 kg de benceno/kg de aire seco, se encuentra a 85°C y tiene una temperatura húmeda de 19,5°C.
- Calcular:
- La relación  $h_c/k'$  para el benceno.
  - Cómo debe ser la temperatura de saturación adiabática para dicha mezcla: ¿mayor, menor o igual que la temperatura húmeda? (no es necesario obtener el valor de  $t_s$ ).
  - La humedad relativa de benceno en el aire. Discuta el valor obtenido.

- Datos:Calor húmedo de la mezcla aire-benceno:  $s = 1,1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ Calor latente de vaporización del benceno:  $r = 434 \text{ kJ}/\text{kg}$ 

(s y r pueden suponerse constantes)

Coeficiente  $\alpha = (h_c + h_r)/h_c = 1$ 

Presión de vapor del benceno:

T, °C	19,5	80,1	85
P <sub>s</sub> (mm Hg)	74,5	760	880

19. Construir los diagramas de Mollier y psicrométrico para el sistema tolueno-aire a 101 kPa de presión total, trazando:

- Una curva para  $\phi$  constante en ambos diagramas.
- Una isoentálpica y una isoterma en el diagrama de Mollier
- Una línea de saturación adiabática en el diagrama psicrométrico.

- Datos:Calor latente de vaporización:  $362 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .Calor específico del aire:  $1,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .Calor específico del tolueno vapor:  $1,066 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Ecuación de Antoine para el tolueno:

$$\ln p_s = 16.0137 - \frac{3096,52}{(T - 53,67)} \quad p_s = \text{mm Hg}; \quad T = \text{K}$$

Para el tolueno  $h/K' = 1,85$ 

20. Se desean enfriar  $650 \text{ m}^3$  de aire por minuto desde  $35$  a  $24^\circ\text{C}$  utilizando una cámara de pulverización, que pulveriza el agua recirculada contra la corriente de aire. La temperatura del agua adicionada para suplir la evaporada es de  $27^\circ\text{C}$ . El punto de rocío del aire inicial es de  $14,4^\circ\text{C}$  y la presión atmosférica la normal.

Calcular:

- Número de pulverizadores que se requieren y dimensiones de la cámara para alojarlos.
- Litros de agua recirculados por minuto y potencia teórica necesaria para las boquillas de los pulverizadores.
- Litros de agua repuesta por minuto.

- Datos y notas:Supóngase que se hacen fluir  $5,5 \text{ kg}/\text{min}$  de agua por pulverizador;Supóngase que se sitúan 20 pulverizadores por  $\text{m}^2$  de superficie transversal de la cámara y que las filas de éstos están distanciadas  $2,5 \text{ m}$  en la dirección de circulación del aire.Para estas condiciones ( $h_{G,a}$ ) puede suponerse igual a  $1,69 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ .La presión de agua en las boquillas puede suponerse igual a  $250 \text{ kPa}$  para el caudal de circulación indicado.

21. Se desean enfriar  $5 \text{ kg}/\text{h}$  de agua desde  $25$  a  $15^\circ\text{C}$  poniéndola en contacto en una torre de rejillas de madera con aire que circula en contracorriente y que tiene una temperatura húmeda de  $10^\circ\text{C}$ . El caudal de aire será un  $50\%$  superior al mínimo posible. Calcular la altura de la torre si la altura de la unidad de transferencia global (referida a un coeficiente global constante para toda la columna) es igual a  $2,5 \text{ m}$ .

22. Se desea proyectar una torre de relleno para enfriar agua desde 49 a 29°C. Se acuerda utilizar una velocidad másica de aire de 11000 kg de aire seco/(h.m<sup>2</sup>). El aire inicial tiene una humedad relativa  $\phi = 0,63$  y una temperatura de 29°C.

- ¿Cual será la máxima razón de caudales de agua y aire que puede utilizarse?
- Calcular la altura de relleno requerida para una razón de caudales de agua a aire seco de 0,565.
- ¿Como varían la humedad y la temperatura del aire a lo alto de la torre?

- Datos:

$$k' = 59,3 \text{ kg}/(\text{h.m}^2.\Delta x) ; a = 67 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$h_L$  muy grande comparado con  $k'$

Ecuación  $H_s-t_s$  para el equilibrio de saturación:

$$H_s = 69,26 - 3,6897.t_s + 0,1551.t_s^2 \quad (H_s = \text{kJ.kg}^{-1}; t_s = ^\circ\text{C})$$

23. Se quiere proyectar una torre de relleno para enfriar continuamente 10000 kg/h de agua desde 50 a 30°C, utilizando una razón:

$$\frac{\text{aire seco de entrada a presión atmosférica}}{\text{agua de entrada}} = 0,75$$

Se decide utilizar una velocidad másica de gas equivalente a 9750 kg de aire seco/h.m<sup>2</sup> de sección transversal de la torre.

El aire tiene su entrada a una temperatura de 30°C y una presión de 1 atm, con una humedad relativa,  $\phi = 0,75$ .

- Calcular la sección transversal de torre.
- Calcular la razón teórica máxima de agua a aire que podría utilizarse.
- Calcular la altura de relleno necesaria considerando  $k'a = 1600 \text{ kg}/\text{h.m}^3.\Delta X$

- Nota: Suponer despreciable la resistencia ofrecida por la película líquida ( $h_{La} \cong \infty$ ).

24. Una columna de enfriamiento de agua, se alimenta por su parte superior con 3800 l/min de agua a una temperatura de 38°C. Por la base de la columna sale agua a 26°C. El aire penetra por la base a presión atmosférica con una temperatura de 21°C y una humedad relativa del 50%, saliendo por la parte superior de la columna a 30°C y con 90% de humedad relativa.

Sabiendo que el coeficiente de transmisión de calor ( $h_c a$ ) vale 2,24 kW.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>, y que  $h_L$  es muy grande comparado con  $k'$ , calcular:

- Caudal de aire seco que se introduce a la columna.
- Caudal de agua evaporada.
- Valor medio del coeficiente de transferencia de vapor ( $k'a$ ).
- Volumen de relleno de la columna de enfriamiento.

- Datos:

Presión de vapor del agua en función de la temperatura:

$$\ln(p) = 20,6088 - 5200,13/T \quad T \text{ (K); } p \text{ (mm Hg)}$$

25. Una empresa dispone de una torre de enfriamiento de agua con 6 m de relleno. Se efectúa un ensayo en el que se determinan las siguientes temperaturas:

- Aire ambiente:                      Temperatura: 49°C
- Temperatura húmeda: 21°C
- Aire a la salida de la torre:      Temperatura: 38,3°C.
- Temperatura húmeda: 35,5°C
- Agua:                                      Temperatura de entrada: 45°C
- Temperatura de salida: 32,2°C.

La velocidad másica de agua es 11000 kg.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>.

La columna opera a 101 kPa.

Calcular los coeficientes volumétricos de transferencia de materia y transmisión de calor para la torre.

(Con estos coeficientes se puede simular el funcionamiento de la torre y ensayar modificaciones de diseño).

26. Se desea deshumidificar aire a  $150^{\circ}\text{C}$  con una humedad absoluta de 0,15 hasta una humedad de 0,065 haciéndolo circular en una torre de relleno de anillos Raschig de 1" con agua en contracorriente a presión atmosférica que se introduce a la torre a  $22^{\circ}\text{C}$ .

Las velocidades másicas de entrada de agua y aire húmedo son  $9600$  y  $2500 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectivamente. Los coeficientes volumétricos de transmisión de calor para aire y agua son:

$$h_{g,a} = 5,46 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}$$

$$h_{l,a} = 49,34 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}$$

- Calcular la temperatura del aire que abandona la torre, aplicando el método de Mickley
- Calcular la altura de relleno necesaria.

- Datos:

Ecuación  $H_s-t_s$  para el equilibrio de saturación:

$$H_2 = 69,26 - 3,6897 \cdot t_s + 0,1551 t_s^2 \quad (H_s = \text{kJ}/\text{kg}^{-1}; \quad t_s = ^{\circ}\text{C})$$

Presión de vapor del agua en función de la temperatura:

$$p_s = \exp(20,6088 - 5200,13/T) \quad (p_s = \text{mm Hg}; \quad T = \text{K})$$

Calor latente de vaporización del agua, en función de la temperatura:

$$r_s = 2535 - 2,905 \cdot t_s \quad (r_s = \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}; \quad t_s = ^{\circ}\text{C})$$

Razón psicrométrica para el sistema aire-agua  $h_{g,a}/[(k'a)\cdot s_{\text{med}}] = 1$

27. Un ingeniero tiene que diseñar una columna de deshumidificación que tratará  $50 \text{ m}^3/\text{min}$  de aire con una humedad relativa de 70% y que entrará a  $54^{\circ}\text{C}$  y que debe abandonar la columna con una humedad absoluta de  $0,046 \text{ kg}/\text{kg}$  aire seco. La columna operará a una presión total de  $95 \text{ kPa}$ . Se dispone de agua a  $23^{\circ}\text{C}$  que puede abandonar la columna a  $32^{\circ}\text{C}$ .

Puede utilizarse una velocidad másica de aire seco de  $6000 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  y un caudal de agua de  $110 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ .

En estas condiciones  $h_{c,a} = 5,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  y  $h_{l,a} = 28 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ .

- Calcular la altura y sección necesarios para la columna.
- Una vez construida la columna se comprueba que ha existido un error en el diseño y que el ingeniero manejó por error una humedad relativa de 60% en lugar del 70%.
  - ¿Cómo afectará este error al diseño?
  - ¿Qué modificaciones podrían efectuarse en las condiciones de operación para lograr la deshumidificación especificada?

28. Calcular la sección transversal de la torre necesaria para la operación del problema 19 si se utiliza un relleno de rejillas de  $1 \times 1 \times \frac{1}{4}$ " con un área específica de  $90 \text{ m}^2/\text{m}^3$  y una porosidad de 75% y se opera con un caudal igual al 70% del correspondiente al anegamiento.

¿Cómo se compara el valor obtenido con el recomendado en la bibliografía como más económico, equivalente a velocidades de paso a lecho vacío comprendidas entre 1,8 y 2,4 m/s?

¿Qué condiciones de mojado reinan en la columna para la sección calculada?

**SECADO**

29. Un material se deseca en condiciones de desecación constantes. 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
$W_T$ , kg agua total/kg material seco	0,82	0,64	0,54	0,42	0,282	0,1665

La humedad de equilibrio es 4 kg de agua por 100 kg 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.
30. Ensayos de laboratorio sobre la desecación de láminas de un cierto material bajo condiciones constantes de desecación indicaron que la velocidad de desecación en el período de velocidad constante podía expresarse mediante la ecuación:

$$-\frac{dW}{d\theta} = 10 (x_w - x)$$

Los mismos ensayos mostraron que la humedad crítica era  $W_c = 0,4$  constante e independiente de la velocidad del proceso en el período previo de velocidad de desecación constante. En todos los ensayos, la velocidad de desecación por debajo del contenido crítico de humedad fue directamente proporcional al contenido de humedad libre  $W$  del material e independiente del gradiente  $x_w - x$ . Han de desecarse láminas del mismo material en un desecador adiabático en contracorriente desde un contenido de agua libre  $W_1 = 1$  hasta otro  $W_2 = 0,20$  kg de agua /kg de material seco.

El aire entra en el desecador a 71°C con una temperatura húmeda de 30°C y abandona el mismo a 38°C. Calcular el tiempo de desecación en el desecador continuo.

31. Se quieren desecar 2500 kg/h de un material con 48% de humedad (base húmeda) hasta un contenido de agua de 8% (base húmeda). Se decide utilizar un desecador de túnel adiabático. El material circulará en paralelo con el aire que a su entrada tienen una temperatura de 56°C y una temperatura húmeda de 27°C. La temperatura seca de salida se desea sea 32°C.

- a) Calcular el caudal másico de aire.  
 b) ¿Cuáles son las condiciones críticas?  
 c) ¿Cuál es la máxima velocidad de desecación?  
 d) Calcular el tiempo de desecación necesario.  
 e) Calcular la longitud de desecador que se requiere.

- Datos y notas:

La humedad de equilibrio es despreciable.

Para el transporte de material se dispone de unas vagonetas provistas de bandejas con fondo de tela metálica. Es posible colocar 50 kg de material húmedo por cada m<sup>2</sup> de bandeja, correspondiendo 80 m<sup>2</sup> de superficie de las mismas por cada metro de longitud de desecador.

Los datos de laboratorio obtenidos en condiciones de desecación constantes con el material dispuesto en igual forma que luego ha de tener en el desecador industrial son:

Gradiente de humedades	Contenido acuoso de la sustancia kg agua/kg materia seca	Velocidad desecación (kg agua/kg mat. seca.h)
$x_w - x$	$W$	$-dW/d\theta$
0,002	0,9	0,020
	0,11	0,009
0,0060	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 sobre una recta de ecuación:

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

32. En una fermentación para obtener masa celular, la separación se lleva a cabo en un filtro rotatorio a cuya salida el sólido contiene una humedad de 50 kg de agua or 100 kg de sólido seco. Se desea desecar hasta que su humedad sea de 3 kg de agua por 100 kg de sólido seco. Para ello se piensa utilizar un secadero de túnel adiabático con circulación en contracorriente de sólido y aire.

El aire entra en el secadero a 72°C con una humedad relativa del 10% y a la salida su temperatura de rocío es de 32,5°C. Calcular:

- La humedad absoluta del aire en las condiciones de entrada y salida y su temperatura de salida.
- La humedad crítica del sólido.
- El tiempo necesario para que se alcance en el sólido su humedad crítica.
- El tiempo total necesario para el secado.

- Datos y notas:

La humedad de equilibrio del sólido es de 1 kg de H<sub>2</sub>O por 100 kg de sólido seco.

La velocidad de secado puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{si } W \geq W_c : -\frac{dW}{d\theta} = 15 (x_w - x) \quad \text{kg H}_2\text{O/h.kg sólido seco}$$

$$\text{si } W \leq W_c : -\frac{dW}{d\theta} = 50 W (x_w - x) \quad \text{kg H}_2\text{O/h.kg sólido seco}$$

donde  $(-dW/d\theta)$  se expresa en kg de agua/kg sólido seco.h y  $(x_w - x)$  en kg de agua/kg de aire seco.

33. En la producción de ácido cítrico por vía fermentativa, una vez separada la biomasa en un filtro rotativo, se obtiene una disolución con una concentración de 88 kg de ácido por m<sup>3</sup>. Dicha disolución se somete a una evaporación en la que cristaliza el ácido, que se separa por centrifugación. El sólido resultante, cuya humedad libre es de 0,8 kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco, se seca en un secadero túnel isoterma con circulación del aire en contracorriente, hasta que su humedad libre sea de 0,05 kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco.

El aire entra en el secadero a una temperatura de 75°C, con una humedad relativa del 10% y a la salida su temperatura de rocío es de 47,5°C. Calcular:

- Humedad absoluta del aire en las condiciones de entrada y salida.
- Los kg de aire seco que habrán de utilizarse por kg de sólido seco.
- Humedad libre crítica del sólido.
- Tiempo de secado.

- Datos y notas:

La velocidad de secado puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{si } W_L \geq W_{Lc} : -\frac{dW_L}{d\theta} = 16 (x_w - x)$$

$$\text{si } W_L \leq W_{Lc} : -\frac{dW_L}{d\theta} = 50 W_L (x_w - x)$$

en las que  $(-dW/d\theta)$  se expresa en kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco.h y  $(x_w - x)$  en kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco.

34. Se desea proyectar un secadero que operará a presión atmosférica con circulación de aire y sólido en paralelo para reducir el contenido de humedad libre de éste desde 1 a 0,15 kg de agua/kg de sólido seco. El aire entrará a 80°C con una temperatura de rocío de 11,5°C. En una primera sección se produce el secado adiabático hasta que el aire alcanza una humedad relativa del 80%. A continuación, el aire se calienta nuevamente hasta 80°C continuando el secado del sólido nuevamente de forma adiabática hasta el final del secadero. El aire abandona el secadero con una humedad relativa del 80%.

Deducir el tiempo de secado necesario en cada uno de los dos tramos del secadero.

- Datos:

Velocidad de secado en el periodo de velocidad constante ( $W > W_c$ ):

$$-(dW/dt) = 10 (x_0 - x) \quad (h^{-1})$$

Velocidad de secado para el periodo de velocidad decreciente ( $W < W_c$ ):

independiente del gradiente de humedad:  $-(dW/dt) = 0,48 W^2$

Presión de vapor del agua en función de la temperatura:

$$\ln p_2 = 20,6088 - 5200,13/(273+t) \quad p_2 = \text{mm Hg}; \quad t = ^\circ\text{C}$$

35. Se desea desecar un material con 0,92 kg de agua por kg de sólido seco hasta un contenido de 0,08 kg de agua/kg de sólido seco en un desecador cuya temperatura se mantiene constante a 70°C. El material circula en contracorriente con aire, que se introduce al desecador a 70°C, con una humedad absoluta de 0,002 kg/kg de aire seco, y con un caudal de 50 kg de aire seco por cada kg de sólido seco alimentado.

- Calcular las condiciones críticas del secadero.
- Calcular el tiempo de residencia en cada zona del mismo (zona de velocidad de secado "constante" y zona de velocidad decreciente).
- Indique cualitativamente qué efecto tendría sobre el tiempo de secado la modificación del sentido de circulación en paralelo.

- Datos y notas:

En la figura adjunta se muestran las curvas de secado para diferentes valores de  $x_w - x$ .

La humedad de equilibrio del sólido puede considerarse despreciable.

**CRISTALIZACIÓN**

36. Para la cristalización de disoluciones acuosas de KCl en agua a 300 K, determine:
- Suponiendo que se produce únicamente nucleación homogénea con una tensión interfacial de  $85 \text{ erg cm}^{-2}$ , la sobresaturación necesaria para obtener una velocidad de nucleación de  $1 \text{ núcleo cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ .
  - En un experimento a escala de laboratorio con nucleación heterogénea se ha obtenido una velocidad de nucleación de  $350 \text{ núcleos cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$  para una sobre saturación del 5%. ¿Cuál es la tensión interfacial del sistema en esas condiciones? ¿Qué relación existe entre la velocidad de nucleación y la sobre saturación de la disolución? ¿Cómo varía el tamaño mínimo de los núcleos viables con el grado de sobresaturación?

Datos: Densidad del cristal de KCl =  $1,988 \text{ g cm}^{-3}$ .

37. 100 kg de una disolución saturada de  $\text{FeCl}_2$  a  $100^\circ\text{C}$  se enfría  $10^\circ\text{C}$ . Calcule la cantidad de cristales que se forman, teniendo en cuenta que el cloruro ferroso cristaliza a  $10^\circ\text{C}$  en forma de  $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Las solubilidades del  $\text{FeCl}_2$  en agua a 10 y  $100^\circ\text{C}$  son 64 y 106 g  $\text{FeCl}_2/100$  g de  $\text{H}_2\text{O}$ , respectivamente.

Datos: PM Fe = 55,85, PM Cl = 35,45, PM  $\text{H}_2\text{O}$  = 18.

38. Una corriente de 20 lb/is formada por una disolución de  $\text{MgSO}_4$  con 20% en peso a  $130^\circ\text{F}$  pasa por un cambiador de calor en el que se retiran 2800 Btu/s. Determine que fases están presentes en la corriente de salida del cambiador, y la proporción entre ellas.

39. Con objeto de obtener cristales de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  se parte de una disolución de  $\text{MgSO}_4$  en agua con una concentración del 30% en peso, que se encuentra a una temperatura de  $70^\circ\text{C}$ . La sobresaturación se consigue por enfriamiento hasta  $15,5^\circ\text{C}$ , introduciéndose en cristizador un caudal mágico de  $7000 \text{ kg h}^{-1}$  de disolución alimento. En experimentos de laboratorio se ha obtenido que la velocidad lineal de crecimiento de cristales en esas condiciones es de  $0,00055 \text{ m h}^{-1}$ . Suponiendo que el modelo MSMPR es aplicable al cristizador industrial, determinar:

- Caudal másico y rendimiento del producto cristalino
- Caudal de calor que es necesario eliminar del cristizador
- Volumen de magma y tiempo de residencia necesario para obtener cristales con un tamaño predominante en masa de 830 micras.
- Velocidad de nucleación
- Fracción numérica y mágica de cristales con tamaños comprendidos en un intervalo de  $\pm 20\%$  respecto del tamaño predominante en masa

Datos y notas:

Concentración de saturación a  $15,5^\circ\text{C}$ :  $0,24 \text{ kg MgSO}_4/\text{kg disolución}$

Entalpías de mezclas  $\text{MgSO}_4$  en agua al 30% a las temperaturas de interés, referidas al agua líquida a  $0^\circ\text{C}$ :

$$T=15,5^\circ\text{C}; h= -41,67 \text{ kcal kg}^{-1}$$

$$T=70^\circ\text{C}; h= 1,11 \text{ kcal kg}^{-1}$$

Densidad del magma a  $15,5^\circ\text{C}$  =  $1322 \text{ kg m}^{-3}$

Densidad de los cristales =  $1682 \text{ kg m}^{-3}$

40. Se trabaja con un cristizador MSMPR con la particularidad de que solamente se retiran los cristales que han alcanzado un tamaño máximo,  $L_{\text{max}}$  (justo en el momento que alcanzan ese tamaño). Deduzca la expresión para la densidad de población en este cristizador. Calcule la masa total de cristales por volumen de magma en este cristizador, en función de la densidad del cristal, su factor de forma y  $L_{\text{max}}$ .



41. Se dispone de dos cristalizadores continuos que tienen la misma densidad de núcleos, el mismo caudal alimentado y el mismo volumen. La diferencia estriba en que en uno se trabaja con separación de finos y en el otro no. En ambos casos son aplicables las suposiciones MSMPR con las excepciones necesarias para el cristalizador con separación de finos. El cristalizador MSMPR tiene un tiempo de residencia de 500 s y una velocidad de crecimiento de cristales de  $5 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ . La trampa de finos retira los cristales con  $L \leq 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ . El tiempo de residencia de los finos es diez veces inferior al del producto, que es igual al tiempo de residencia en el cristalizador MSMPR. Suponiendo que la masa de los finos retirados es despreciable en comparación con la del resto de cristales, calcule:
- Velocidad de crecimiento de los cristales en el cristalizador con separación de finos
  - Relación entre el número total de cristales en ambos cristalizadores
  - Relación entre el tamaño medio del producto en ambos cristalizadores

Datos:

$$\int x^3 \exp(-x) dx = -6 \exp(-x) \left( \frac{x^3}{3} + \frac{x^2}{2} + x + 1 \right) + C \quad \int x \exp(-x) dx = -\exp(-x)(x + 1) + C$$

42. Se dispone de dos cristalizadores continuos que tienen la misma densidad de núcleos, el mismo caudal alimentado, el mismo volumen y la misma concentración de magma. La diferencia estriba en que en uno se trabaja con retirada de producto clasificado y en el otro no. En ambos casos son aplicables las suposiciones MSMPR con las excepciones necesarias para el cristalizador con retirada de producto clasificado. El cristalizador MSMPR tiene un tiempo de residencia de 500 s y una velocidad de crecimiento de cristales de  $5 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ . La retirada de producto clasificado afecta a los cristales con  $L > 10^{-3} \text{ m}$ . El tiempo de residencia del producto clasificado es diez veces inferior al del resto de los cristales. Calcule:
- Velocidad de crecimiento de los cristales en el cristalizador con separación de finos
  - Relación entre el número total de cristales en ambos cristalizadores
  - Relación entre el tamaño medio del producto en ambos cristalizadores

Datos:

$$\int x^3 \exp(-x) dx = -6 \exp(-x) \left( \frac{x^3}{3} + \frac{x^2}{2} + x + 1 \right) + C \quad \int x \exp(-x) dx = -\exp(-x)(x + 1) + C$$