

OPERACIONES UNITARIAS

UT 10

HUMIDIFICACION

Ejercicios resueltos

Ejercicio 1: Para un determinado proceso que opera con aire de temperatura y humedad controladas se necesitan 7500 kg de aire seco por hora, con humedad del 20 % y temperatura de 55 °C. Este aire se ha de obtener acondicionando aire del 10% de humedad y 21 °C:

- Calentándolo primero.
- Humidificándolo adiabáticamente después hasta la humedad deseada.
- Calentando finalmente hasta 55 °C el aire humidificado.

La etapa de humidificación se lleva a cabo en una cámara de pulverización.

Suponiendo que el aire que sale de la cámara de pulverización está a 2°C por encima de la temperatura de saturación adiabática,

Calcular:

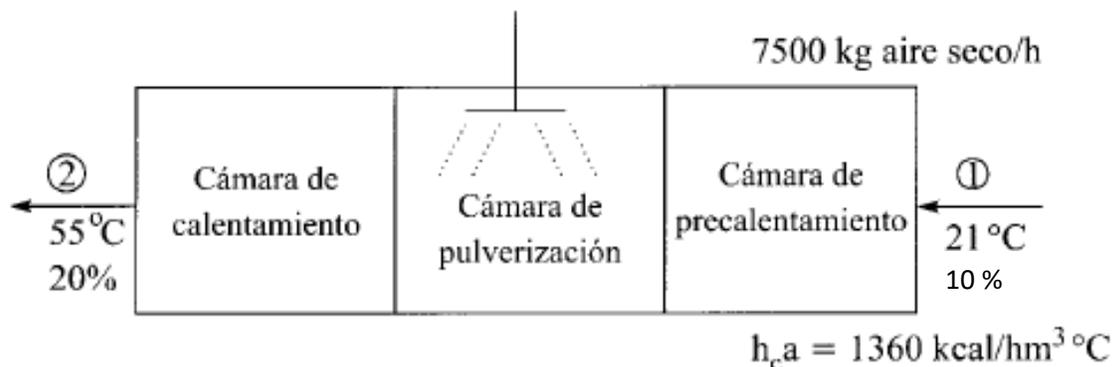
La temperatura a la que hay que precalentar el aire, la temperatura a la que saldrá de la cámara, la cantidad de calor necesario para el precalentamiento, y el volumen que ha de tener la cámara de pulverización.

Datos y notas:

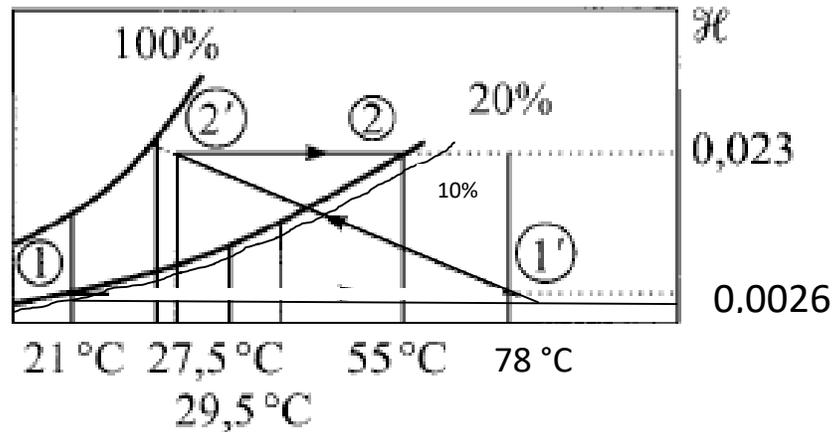
Tóme $h_{c,a} = 1360 \text{ Kcal}/(\text{hm}^3 \text{ } ^\circ\text{C})$.

Utilíce el diagrama de humedad o psicrométrico.

Solución



En la figura se representa dentro del diagrama de humedad, el camino temperatura-humedad que sigue el aire.



(1): 21 °C, H1: 0,0026

$H_2 = 0,023$ El aire que sale de la cámara de pulverización tiene la misma humedad y está 2 °C por encima de la temperatura de saturación adiabática o bien cuando se alcanza el 90 % de saturación ya que no conviene que el aire llegue a saturación debido al tamaño de la cámara, es decir se corresponde con el punto 2'

$T_{sal} = 27,5 \text{ °C}$ (1) $H_2 = 0,023$, $T = 27,5 + 2 = 29,5 \text{ °C}$

$H_1 = 0,0026$ Para alcanzar la línea de enfriamiento adiabático correspondiente a la temperatura de 27,5°C, la temperatura del aire de salida del precalentador (intersección de la horizontal $X = 0,0026$ con la línea de humidificación adiabática correspondiente a 27,5 °C), tiene que ser: 78 °C

Para obtener estos datos se parte en el gráfico del punto 2 (aire de salida) se traza una recta hasta cortar la línea del 90 % de humedad relativa, (punto 2') de ahí se baja por la línea de saturación adiabática hasta cortar la horizontal que se traza por el punto 1. En la intersección se encuentra el punto 1'.

Del diagrama de humedad

Calor húmedo del aire original $C_{p_{in}} = 0,241 \text{ kcal/kg aire seco °C}$ A 21°C y H 0,0031)

Calor húmedo del aire saliente $C_{p_{sal}} = 0,250 \text{ Kcal / (kg aire seco °C)}$

$$C_p = (0,241+0,250)/2 = 0,2455 \text{ Kcal}/(\text{kg aire seco } ^\circ\text{C})$$

Calor necesario para precalentar el aire:

$$Q_{in} = G \cdot C_{p_{in}} (T_2 - T_1) = 7500 \text{ Kg/h} * 0,241 \text{ Kcal /Kg aire seco } ^\circ\text{C} (78-21) ^\circ\text{C} = 103027 \text{ Kcal/h}$$

Idem para calentar el aire

$$Q_{sal} = G \cdot C_{p_{sal}} (T_2 - T_1) = 7500 \text{ Kg/h} * 0,250 \text{ Kcal /Kg aire seco } ^\circ\text{C} (55-29,5) ^\circ\text{C} = 47800 \text{ Kcal/h}$$

Calor total necesario

$$Q_T = 97600 + 47800 = 150827 \text{ Kcal/kg}$$

Volumen de la cámara de pulverización. Se supone humidificación adiabática:

$$z = \frac{\frac{M_s}{S}}{hcac} \ln\left(\frac{T'1 - T_s}{T'2 - T_s}\right)$$

$$zS = \text{Volumen} = \frac{M_s}{hcac} \ln\left(\frac{T'1 - T_s}{T'2 - T_s}\right)$$

$$vol = 7500 * \frac{0,2455}{1360} \ln\left(\frac{78 - 27,5}{29,5 - 27,5}\right) = 4,37 \text{ m}^3$$

Ejercicio 2.

Se desea calcular una torre de enfriamiento para una planta que se mantendrá conectada a una serie de intercambiadores de calor. El caudal másico que circula es de 1500 gal/min. El agua sale de los enfriadores con 120 ° F y deberá ser enfriada en la torre hasta 86 ° F. Teniendo en cuenta que la misma será instalada en la Ciudad de San Carlos, Mendoza, calcular:

- 1- Area de piso necesaria.
- 2- Flujo necesario de aire.
- 3- Altura de la torre.
- 4- Cantidad de agua de recambio.

Los datos necesarios para resolver el cálculo de la torre son los siguientes:

- Flujo de agua a enfriar y temperaturas de entrada y salida.
- Condiciones reinantes del aire del lugar.

Las temperaturas de ingreso y salida del agua ya las tenemos, 120 ° F Y 86 ° F respectivamente, al igual que el flujo de circulación de agua, 1500 gal/min.

Para conocer las condiciones del aire reinante en el lugar, tomamos en cuenta las Estadísticas del Servicio Meteorológico Nacional, que pueden consultarse en cualquier Aeropuerto o en Centros de Estadísticas.

Las tablas indican 5 valores de temperaturas: máximas absolutas, máximas medias (promedio de las temperaturas máximas del mes durante los 10 años), temperatura del aire (promedio mensual), mínimas medias y mínimas absolutas. Además se indica el valor de la humedad relativa del aire, con la cual podemos conocer el estado del aire en el lugar.

Ahora bien, como las condiciones del aire varían a lo largo del año, debemos saber cuál valor tomar. En (1) y (3) se indica que el valor a adoptar, debe corresponder al 95 % de los casos, es decir, sólo el 5 % por encima de la temperatura de diseño. La temperatura válida en este caso será promediar la máxima media con la máxima absoluta del mes más cálido. Esto asegura la temperatura de bulbo húmedo muy cercana a la temperatura del 95% de los casos.

En nuestro caso y observando la tabla de valores, las mayores temperaturas en el año se tienen en el mes de febrero, donde:

T.Max. Abs.: 36,2 °C = 97 ° F

T.Max. Med.: 28,7 °C = 84 ° F

T.Med.: 19,9 °C = 67,8 ° F

H.Relativa: 61 %

T Intermedia entre Max.Med. y Max.Abs. 90.5 °F (Aproximadamente cubre el 95 % de los casos).

Del diagrama psicrométrico, obtenemos las condiciones del aire:

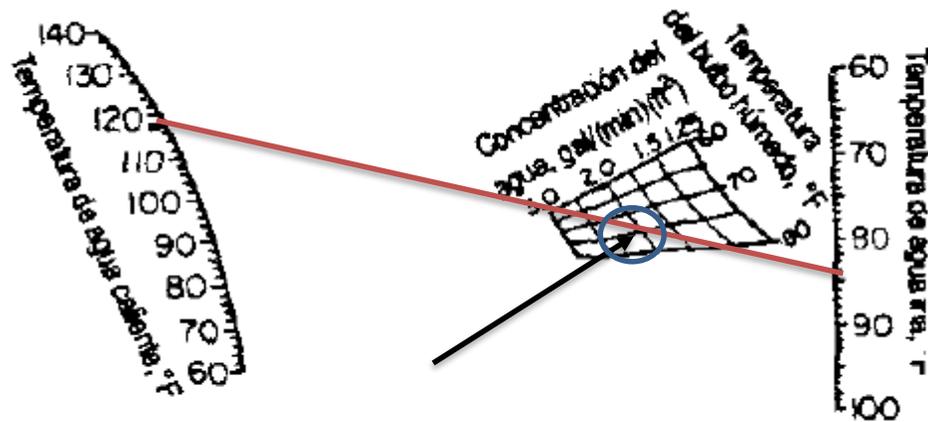
TBS = 90,5 °F, Humedad Absoluta: 0,015 lb/lb, Temperatura de bulbo húmedo: 75 °F

Disponemos ahora de todos los datos necesarios, por lo tanto, pasamos a resolver:

1-Area de piso de la torre.

La concentración de agua, es decir, la cantidad de agua que desciende por unidad de área y por unidad de tiempo, está estipulada entre 2 y 5 gal/min.ft² de área de torre (2). Existe un ábaco en función de las condiciones de la torre: T₂ = 85 °F; T₁ = 120 °F ; TBH = 75 °F. Esto se encuentra en (1) ó (3). De aquí se obtiene la concentración de agua: 2,1 gal/min.ft². Esta representa el área mínima necesaria para un funcionamiento específico de una torre de tiro inducido y a contraflujo.

Se ha encontrado que el máximo contacto y el mejor rendimiento se obtienen con torres que poseen una concentración de agua de 2 a 5gal/min.ft² de área de suelo



Una vez determinada la concentración de agua, encontramos el área de piso necesario dividiendo el flujo de agua por la concentración de agua:

$$\text{Area de piso: } 1500 \text{ gal/min} / 2,1 \text{ gal/min.ft}^2 = 714 \text{ ft}^2$$

Se adopta sección cuadrada de 27 ft de lado, área 729 ft².

2- Flujo necesario de aire

Para resolver el flujo necesario de aire y la altura de la torre se debe realizar un gráfico de apoyo. De una carta psicrométrica para el sistema aire-agua, llevamos los valores que corresponden a la entalpía del aire saturado en un rango un poco mayor de las temperaturas en que estamos trabajando (70 ° F a 130° F).

Con estos valores construimos una gráfica en la que en abcisas tengamos temperaturas y en las ordenadas entalpías del aire y de este modo construimos la curva de saturación. Esta indicaría el estado del aire en la interfase.

Temperatura (° F)	Entalpía (Btu/lb)
70	34.09
80	43.69
90	55.93
100	72.70
110	93.80
120	121.50
130	155.90

Una vez construida la curva de saturación, hay que proceder a construir la "recta de operación", para ello, es necesario ubicar los parámetros indicativos de las condiciones en el fondo y en la cabeza de la torre.

a) Fondo de la torre: la temperatura de salida del agua es 86 °F, la entalpía correspondiente al ingreso de aire en el fondo de la torre, la encontramos si no la tuviéramos, considerando que el mismo ingresa saturado a la temperatura TBH, es decir, a 75 °F, es decir con una entalpía de 39,1 Btu/lb. Con este valor ubicamos el punto C del gráfico.

b) Parte superior de la Torre. Suponemos que el aire sale completamente saturado a la temperatura de 120 °F del agua ingresante. O sea que con 120 °F, levantamos una vertical hasta cortar a la curva de saturación en el punto B'. Esto nos da una recta de operación CB' correspondiente a una saturación total del aire y que hace necesaria una torre de altura infinita y flujo de aire mínimo.

Para calcular el flujo de aire para este caso ideal se calcula la pendiente de la recta CB':

$$(L/G)_{\min} = \frac{90 - 39,1}{110 - 86} = 2,12 \text{ Btu/lb.}^\circ\text{F}$$

Para la recta CB' se cumple que S (pendiente) 2.12 Btu/lb. °F

El caudal mínimo de aire será:

$G = L/S$; $G_{\min} = 1500 \text{ gal/min} / 2,12 = 707 \text{ gal/min}$ de aire, es decir, 0,97 gal/min.ft² es el caudal mínimo de aire. **Experimentalmente se conoce que el caudal de aire debe ser el doble del mínimo, de modo que la pendiente de la recta de operación se mantenga entre 0,75 y 1,5.**

Aumentamos el caudal de aire al doble y calculamos nuevamente S.

$$s = 1500 \text{ gal/min} / (707 * 2) \text{ gal/min} = 1,06$$

Por lo tanto el caudal de aire será: $1,06 * 1500 \text{ gal/min} = 1591 \text{ gal/min}$, o sea, 2,18 gal/min.ft².

3- Altura de la torre

Para encontrar la altura de la torre de enfriamiento, debemos completar el gráfico.

Para encontrar la otra coordenada de la recta de operación, calculamos en función de la ecuación de misma:

$$H_2 = H_1 + (L/G) \cdot (T_1 - T_2) = 39,1 + 1,06 \cdot (120 - 86) = 74,1 \text{ Btu/lb G}$$

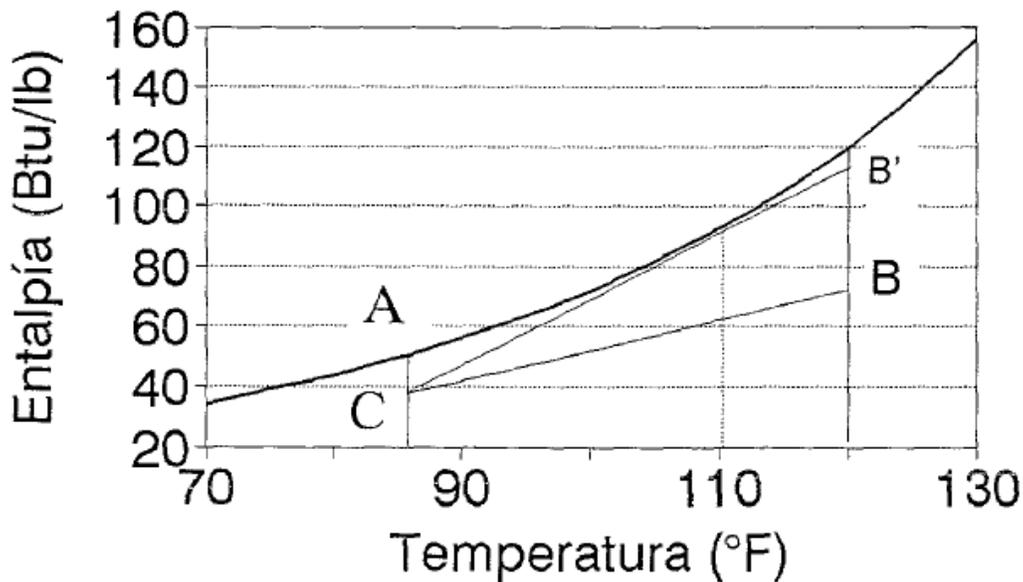
Se marca el punto B, dado por $H_a = 74,1 \text{ Btu/lb}$ y $T_a = 120 \text{ }^\circ\text{F}$. Se unen luego los dos puntos de la recta de operación. Esta representa las condiciones en el seno del aire. La curva representa las

condiciones en la interfase agua – aire. La diferencia entre ambas nos está dando el potencial de enfriamiento en cada punto.

La ecuación de Merkel modificada expresada en forma integrada como:

$$z = \frac{G}{K_y a} * \int \frac{dH}{H' - H}$$

Cálculo de la Torre de Enfriamiento



Esta integral se representa por medio del área entre la curva de equilibrio y la recta de operación.

Este valor se conoce como característica de la torre y para conocer su valor lo calculamos mediante una La diferencia de ordenadas entre la curva correspondiente a la interfase y la recta de operación, nos dará el potencial de transferencia de masa correspondiente a ese punto.

Realizamos el cálculo según lo indicado en la página siguiente. El gráfico indica las posiciones relativas de la curva de equilibrio y la recta de operación.

Esta integral indica el número de unidades de transferencia. Recordemos que de acuerdo a la experiencia, el valor de K.a. G/ L debe estar entre 0,5 y 2,5 (2).



Temp	H'	H	(H'-H)	(H'-H)*m	dT/((H'-H)*m)
70	34,1				
75	39,1				
80	43,7				
85	49,4				
86	50,7	39,1	11,56		
90	55,9	43,26	12,67	6,335	0,631413
95	63,3	48,46	14,885	13,7775	0,362911
100	71,7	53,66	18,04	16,4625	0,303721
105	81,4	58,86	22,205	20,2725	0,24664
110	92,3	64,06	28,28	25,3924	0,196909
115	105	69,26	35,76	32,02	0,156152
120	119,5	74,46	45,08	40,42	0,123701
125					
130					
Σ					2.02

La altura Z de la torre se dá entonces de la siguiente manera

$$Z = \frac{nd * L}{K. a} = \left(\frac{2,02 * 1028 \frac{lb}{hr * ft^2}}{250 \frac{lb}{hr. ft^2}} \right) = 8,3 ft$$

4- Cantidad de agua de recambio: La masa de agua de recambio será la correspondiente a la evaporación más la correspondiente al arrastre fuera de la torre

$W_r = W_e + W_d =$ (Consultar en Perry Manual del Ing Químico)

$W_e = 0,00085 \text{ L (T}_1\text{-T}_2) = 0,00085 * 1500 \text{ gal/min} * (120-85) = 44,6 \text{ gal/min}$

$W_d =$ entre el 0,1 y 0,2 %, dependiendo del diseño del eliminador de arrastre.

$W_r = 44,6 \text{ gal/min} + 3 \text{ gal/min} = 47,6 \text{ gal/min}$