PROBLEMAS SECADO CON AIRE CALIENTE

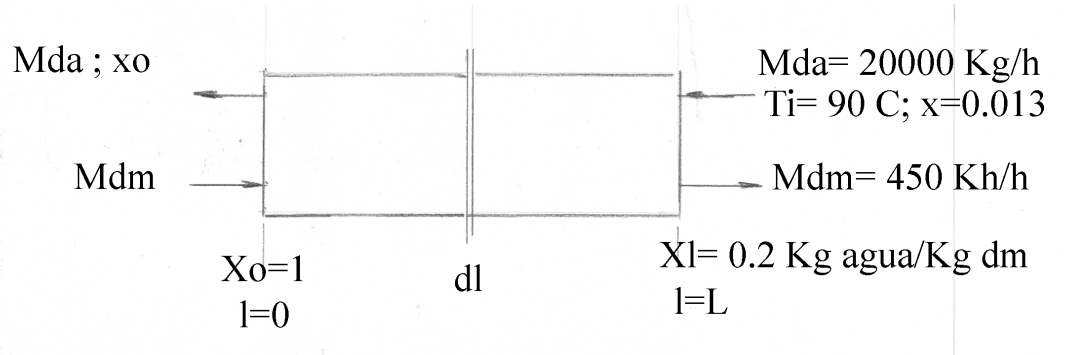
Estos problemas sobre secado, en inglés y de origen Finlandia, se descargaron de Internet. Además de traducirlos, se ampliaron las soluciones agregando el diagrama de Mollier y fórmulas alternativas para el cálculo. Ing. Alfredo Rendina; alfredorendina@yahoo.com

Problema # 1

Arena húmeda se seca en un túnel de secado a contracorriente.

masa de arena 100% seca, Mdm= 450 Kg/h, con humedad absoluta de entrada Xo= 1 Kg agua/Kg arena seca y humedad de salida, Xl=0.2 Kg agua/Kg arena seca.

masa de aire 100% seco ,Mda=20000Kg/h, con temperatura de entrada al túnel ,Ti=90 C, con x_i= 0.013 Kg agua/Kgda y humedad salida x_o .

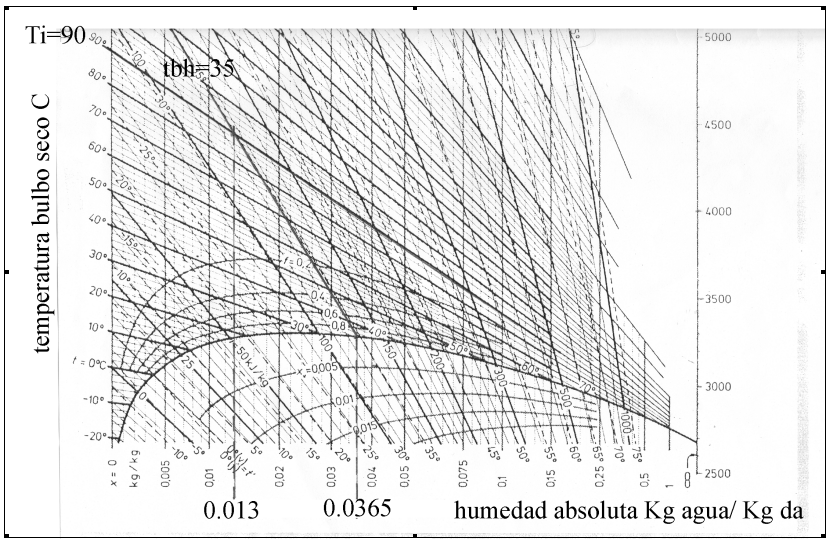


El secador es adiabático y se supone que la temperatura de la arena en el interior del túnel es constante e igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire que ingresa al túnel. El area de secado efectiva de la arena es de $\propto$=2 m^2/ m de longitud del túnel.

La evaporación ,DR en Kg agua/m^2*h , de acuerdo a pruebas de laboratorio:

DR=300*(x tbh-x), siendo x la humedad absoluta dentro del túnel y x tbh la humedad absoluta del aire saturado a la temperatura de bulbo húmedo.

Se debe calcular la longitud L del túnel de secado y x_0.



x tbh se obtiene del diagrama de Mollier transformado (Soininen). De la intersección de Ti=90 C y x_l=0.013, se obtiene la temperatura de bulbo húmedo 35 C. Proyectando donde la recta de t_{bh}=35 C (de mayor pendiente que la recta Ti=90) intersecta a la curva del 100% de humedad relativa. tenemos

x_{tbh}=0.0365. Nos queda : DR=300*(0.0365-x)

Balance de masas agua y aire, entre la entrada y salida del túnel

Mdm*Xo+Mda*x_l=Mdm*X_l+Mda*x_0 ;

450*1+20000*0.013=450*0.2+20000*x_0 ; resulta x_0=0.031 Kg agua/ Kg da

debe cumplirse que x_0< 0.0365 (x_{tbh} para 35 C)

la ecuación diferencial para el balance de agua: (d_l, diferencial de longitud)

Mda* d_x=DR*∝*d_l= 300*(0.0365-x)*∝*d_l ; despejando :
d_l=(20000*d_x)/(300*(0.365-x)*2)=33.33*(d_x/0.0365-x)

Recordar que: ∫(d_x/x)=ln | x | + cte , la integral tiene como límite inferior x_0=1 y como límite superior x_l=0.2

L=33.33*(-∫(-d_x/(0.365-x))0; resolviendo la integral entre los dos límites:

L=33.33*(-ln((0.0365-0.2)/(0.0365-1)))= 33.33*(ln((0.0365-1)/(0.0365-0.2)))=

L=59 metros

En un secador adiabático, se cumple

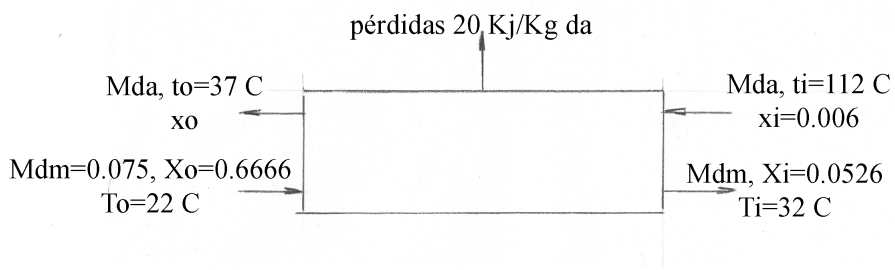
d_i/d_x=(i_{bh}-i)/(x_{bh}-x)=c_w*t_{bh} , siendo c_w calor específico del agua, 4.19 Kj/Kg*C

el cambio de estado del aire, se dá sobre una recta de t_{bh}.

Problema #2

Material en partículas,Mdm= 0.125 Kg/s con 40% humedad, entra a un secador con aire Mda (a contracorriente). El material entra a 22 C y sale a 32 C, con 5% humedad. El aire entra a 112 C con x_i=0.006 . Las pérdidas por radiación del aire caliente 20 Kj/Kg da. Calcular la humedad absoluta de salida del aire x_0 y el caudal Mda.

Los calores específicos : (material seco) c_{dm}= 0.88 Kj/Kg dm*C ; (aire seco) c_a=1.01 Kj/Kg da*C ; (vapor de agua) c_v=1.88 Kj/Kg vapor*C ; (agua) c_w=4.19 Kj/Kg agua*C; (calor de vaporización) r=2501 Kj/Kg vapor.(da, aire seco)



Fórmula general entalpía aire húmedo: i= c_a*t + x*(r+c_v*t)

Material seco :Mdm =0.125* 0.6= 0.075 Kg/s ;(entrada) Xo=(1/0.6)-1=0.6666 Kg agua/Kg dm (dm, material seco)

(salida) Xl=(1/0.95)-1= 0.0526 Kg agua/Kg dm (dm, material 100% seco)

Balance agua: $0.075*0.6666 + Mda*0.006 = 0.075*0.0526 + Mda*x_0$

$Mda*(x_0-0.006)=0.0465$ (ecuación #1)

Balance de entalpías

Suponemos que la entalpía del material a la entrada al túnel es cero, por lo tanto las entalpías del material a la salida, del aire a la entrada y salida se calcularán como diferencias entre las temperaturas de cada uno y 22C.

entalpía material a la salida

(0.88 Kj/Kg dm*C)*(32-22)C + (0.0526 Kg agua/Kg dm)*(4.19 Kj/Kg agua*C)*(32-22)C= 11 Kj/Kg dm

entalpía aire entrada (referida a la temperatura 22 C, del material a la entrada)

i_{ai}=(1.01 Kj/Kg da*C)*(112-22)C + (0.006 Kg agua/Kg da)*(2501 Kj/Kg vapor + 1.88 Kj/Kg vapor*C*90C)

i_{a1}= 106.92 Kj/Kg da

entalpía aire salida (referida a la temperatura 22 C, del material a la entrada)

$i_{a0}=1.01*(37-22) + x_0*(2501 + 1.88*15)=15.15 + x_0* 2529.2$

balance de energía

$Mda*106.92=0.075*11 + Mda*(15.15 + x_0* 2529.2 + 20)$

$Mda*(106.92-(15.15 + x_0*2529.2 + 20))$ (ecuación #2)

Resolviendo las ecuaciones #1 y #2, tenemos Mda=2.073 Kg/s, x_0=0.02822

Problema #3

107 Kg de material con 25% humedad, se secan hasta 6% humedad. El área de secado α=10 m^2. Calcular el tiempo de secado, dada la curva DR=*f* (X)

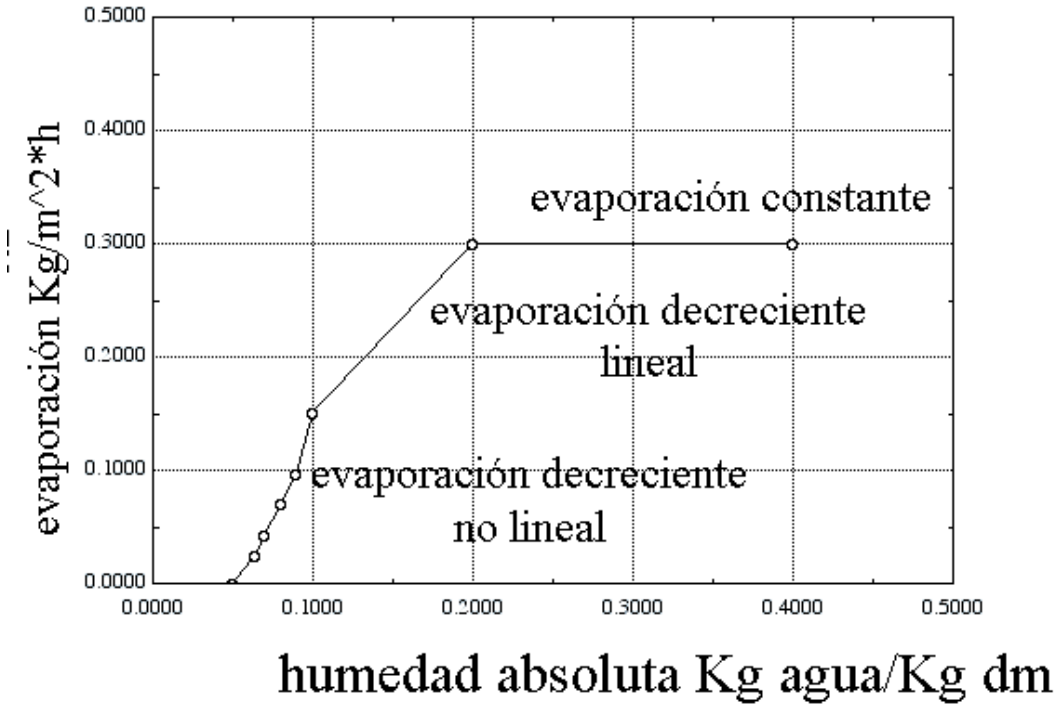
material seco (dm) $m_s^=$ 107*0.75= 80.25 Kg .

para 75% seco, X=(1/0.75)-1= 0.333

para 94% seco, X=(1/0.94)-1= 0.064

Tenemos evaporación constante DR= 0.30 Kg/m^2*h, para X=0.2 (primer punto crítico). El Segundo punto crítico es para DR= 0.15 Kg/m^2*h y X=0.1 (evaporación lineal decreciente). Los valores para la evaporación decreciente no lineal, están en la tabla adjunta.

X	DR	1/DR	delta(1/DR)	delta X	delta X/DR
0.2	0.3				
0.1	0.15	6.667			
			8.488	0.01	0.085
0.09	0.097	10.309			
			12.297	0.01	0.123
0.08	0.07	14.286			
			18.771	0.01	0.188
0.07	0.043	23.256			
			31.628	0.01	0.190
0.064	0.025	40			
0.05	0.00				
				sumatoria	0.585



tiempo durante la evaporación constante

$t_1=m_s/(\alpha*DR)*(\text{delta } X)=(80.25/(10*0.3))*(0.333-0.2)=3.56$ horas

tiempo durante la evaporación decreciente lineal, desde X=0.2 a X=0.1

para un punto intermedio : $(0.30-0.15)/(0.2-0.1)=(DR_x-0.15)/(X-0.1)$

despejando : $DR_x=1.5*X$; la ecuación diferencial: $\alpha*DR_x*d_t=-m_s*d_x$

$t_2=(m_s/\alpha)*\int d_x/(1.5*x)= =(m_s/(\alpha*1.5))*\int d_x/x$, la integral entre 0.2 y 0.1

$t_2=80.25/(10*1.5)*\ln(0.2/0.1)=3.70$ horas

tiempo durante la evaporación decreciente no lineal, desde X=0.1 a X=0.064

$t_3=(m_s/\alpha)*\int d_x/DR$; el valor de la integral entre X=0.1 y X=0.064 está dado por la sumatoria de delta X/DR= 0.585 (ver tabla)

$t_3=(80.25/10)*0.585=4.70$ horas

el tiempo total $t=t_1+t_2+t_3=3.56+3.70+4.70=11.95$ horas

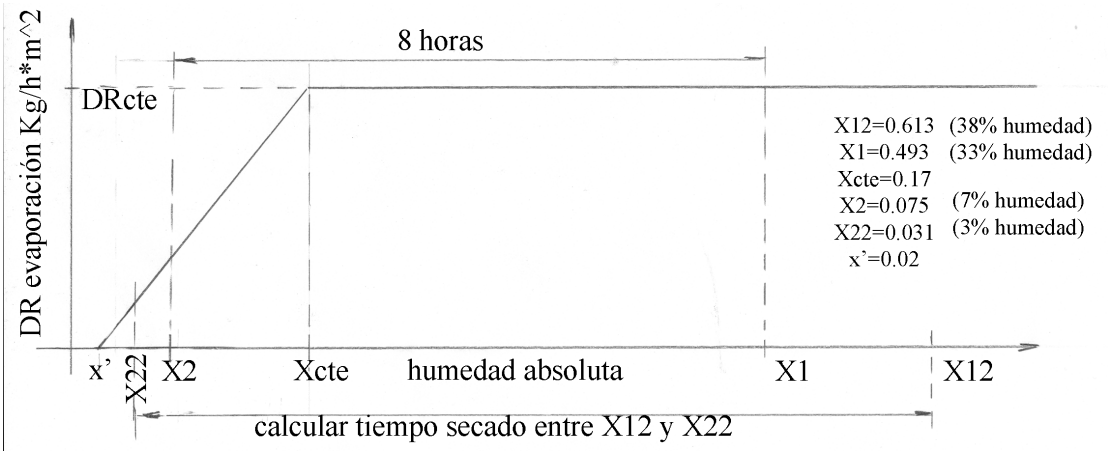
Problema #4

Para un material, por experiencias de laboratorio,se ha determinado que DR=0 para x'=0.02 y que a partir de Xcte=0.17 hay evaporación constante. El mismo material con 33% de humedad ($X_1=0.493$) fue secado durante 8 horas ,finalizando con una humedad del 7% ($X_2=0.075$).

Para el mismo material partiendo de una humedad del 38% ($X_{12}=0.613$) y finalizando con 3% ($X_{22}=0.031$), se debe determinar el tiempo de secado.

$m_{s,}$, masa del material totalmente seco

α, area de secado m_2 ; DR evaporación , Kg agua/m_2*h



El tiempo de secado se mide sobre 'x', pero de derecha a izquierda

la ecuacion diferencial: $\alpha*DR*d_t=-m_s*dx$; $\int d_t=(-m_s/\alpha)*\int d_x/DR$

Durante las 8 h(t_1+t_2) ,para la evaporación constante ,DRcte , de X_1 a X_{cte})

$t_1=(m_s/(\alpha*DRcte))*\int d_x=(m_s/(\alpha*DRcte))*(X_1-X_{cte})$

para la evaporación decreciente lineal, desde X_{cte}=0.17 a X_2=0.075

para un punto intermedio DRx/(X-x')= DRcte/(X_{cte}-x') ; recordar que x'=0.02.

DRx=DRcte*(X-x')/ **(X_{cte}-x') ; t_2=(m_s/(α*DRcte))*(X_{cte}-x')*∫ d_x/(X-x')**

; t_2=(m_s/(α*DRcte))*(X_{cte}-x')*ln((X_{cte}-x')/(X_2-x'))

8 horas=t_1+t_2=**(m_s/(α*DRcte))*(** (X_1-X_{cte})+ (X_{cte}-x')*ln((X_{cte}-x')/(X_2-x'))

El tiempo a calcular(t_{11}+t_{22}), durante la evaporación constante ,DRcte , de X_{12} a X_{cte})

t_{11}=(m_s/(α*DRcte)) *(X_{12}-X_{cte})

tiempo durante la evaporación decreciente lineal, desde X_{cte}=0.17 a X_{22}=0.031

t_{22}==**(m_s/(α*DRcte))*(**X_{cte}-x')*ln((X_{cte}-x')/(X_{22}-x'))

t_{11}+t_{22}=(m_s/(α*DRcte)) *((X_{12}-X_{cte})+ (X_{cte}-x')*ln((X_{cte}-x')/(X_{22}-x'))

para el cociente: (t_{11}+t_{22})/(t_1+t_2), se simplifica : **(m_s/(α*DRcte))**

t_{11}+t_{22}=(0.613-0.17)+(0.17-0.02)*ln((0.17-0.02)/(0.075-0.02))=

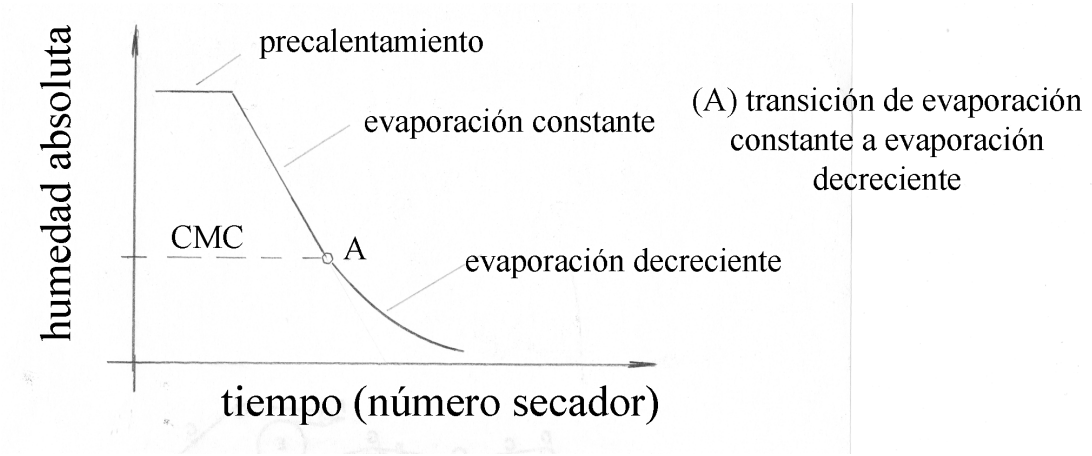
t_{11}+t_{22}=0.443+0.3919=0.8349 (7.48 horas+6.62 horas (#)= 14.1 horas)

t_1+t_2=(0.493-0.17)+(0.17-0.02)*ln((0.17-0.02)/(0.031-0.02))=

t_1+t_2=0.323+0.1505=0.4735 (5.46 horas+2.54 horas (#)= 8 horas)

(t_{11}+t_{22})/(t_1+t_2)=1.763; luego t_{11}+t_{22}= 1.763*8= 14.1 horas

(#) es interesante observar como aumenta el tiempo de secado en la parte de evaporación decreciente lineal cuando la humedad final en vez del 7%(X_2) ,es del 3%(X_{22}).



Comparando la curva de secado del material, con la curva de secado en una batería de secadores, el punto 'A', corresponde a la intersección de Xcte y DRcte. La evaporación constante es una recta con pendiente negativa en función del tiempo. Idem para el material si se grafica , humedad=$f_{unción}$ (tiempo).

CMC(critical moisture content) es la humedad crítica, en la cual se produce la transición de evaporación constante a evaporación decreciente.

En el problema #1, dados : t=90 C y x= 0.013; con el diagrama de Mollier, se obtenía tbh (temperatura de bulbo húmedo) y xv (humedad absoluta para la intersección de la recta de tbh= 35 C y la curva del 100% de humedad relativa).

También puede ser calculado con las fórmulas:

$$x = 0.013$$

$$t = 90$$

$$pv = \exp\left[11.78 \cdot \left(\frac{tbh - 99.64}{tbh + 230}\right)\right]$$

$$xv = \frac{0.622 \cdot pv}{1.013 - pv}$$

$$x = \frac{1.0048 \cdot (tbh - t) + xv \cdot (2501 - 2.3237 \cdot tbh)}{2501 + 1.86 \cdot t - 4.19 \cdot tbh}$$

obtenemos: tbh=34.86 C y xv=0.03644

La última formula, dados tbh y t , sirve también para calcular x.