

## Integración III

### Secador

Aplicación de higrometría.

Un material húmedo se pone en contacto con una corriente de aire previamente calentada. El agua del material lo abandona junto con la corriente de aire de salida. La corriente de aire se asegura mediante dos sopladores, un preforzador y un postforzador. Ninguno de estos equipos es considerado en el presente planteo.

Para calcular la entalpía tanto del material húmedo como la del aire se recurre a los siguientes principios: se toma como referencia la temperatura de 0 °C tanto para el agua líquida como para el sólido y el aire.

La entalpía del aire (sin considerar al sólido) es la suma de la del aire más el del agua. En este último caso debe incluirse su calor latente a 0°C:

$$\overline{\Delta H}_{AH} = \overline{\Delta H}_{AIRE} + \overline{\Delta H}_{AGUA}$$

$$\overline{\Delta H}_{AH} = w_{AIRE}^{AH} \times \overline{Cp}_{AIRE} \times (t_{AH} - 0) + w_{AGUA}^{AH} \times [\overline{\lambda}_{AGUA} + \overline{Cp}_{AGUA} \times (t_{AH} - 0)]$$

Siendo:  $w_{AIRE}^{AH} = 1 - w_{AGUA}^{AH}$  Fracciones en peso

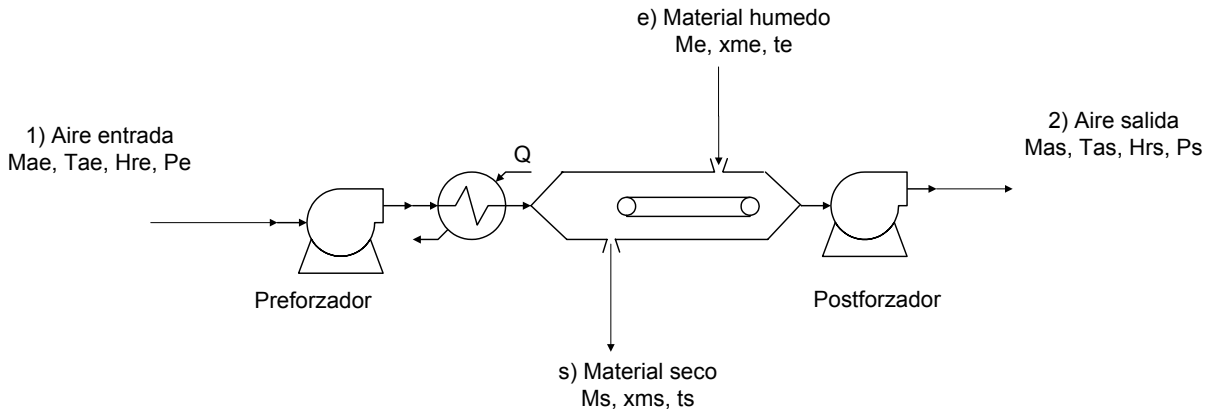
$$\overline{\Delta H}_{AH} = (1 - w_{AGUA}^{AH}) \times \overline{Cp}_{AIRE} \times t_{AH} + w_{AGUA}^{AH} \times [\overline{\lambda}_{AGUA} + \overline{Cp}_{AGUA} \times t_{AH}]$$

$$\overline{\Delta H}_{AH} = \overline{Cp}_{AIRE} \times t_{AH} - \overline{Cp}_{AIRE} \times t_{AH} \times w_{AGUA}^{AH} + w_{AGUA}^{AH} \times [\overline{\lambda}_{AGUA} + \overline{Cp}_{AGUA} \times t_{AH}]$$

El mismo razonamiento podemos hacer para el materia sólido considerando que sólo el agua se evapora y no contiene aire:

$$\overline{\Delta H}_{MH} = \overline{Cp}_{SOLIDO} \times t_{MH} + w_{AGUA}^{MH} \times [\overline{\lambda}_{AGUA} + (\overline{Cp}_{AGUA} - \overline{Cp}_{SOLIDO}) \times t_{MH}]$$

## Esquema:



### e) Material húmedo:

Flujo:	Me
Fracción de agua:	we
Temperatura:	te
Presión:	P1
Entalpía:	$\overline{\Delta H_e} = C_{p_{Sol}} \times te + we \times [\lambda + (1 - C_{p_{Sol}}) \times te]$
Cp Sólido:	Cp <sub>Sol</sub>
Calor Latente agua:	$\lambda$

### s) Material seco:

Flujo:	Ms
Fracción de agua:	ws
Temperatura:	ts
Presión:	P2
Entalpía:	$\overline{\Delta H_s} = C_{p_{Sol}} \times ts + ws \times [\lambda + (1 - C_{p_{Sol}}) \times ts]$
Cp Sólido:	Cp <sub>Sol</sub>
Calor Latente agua:	$\lambda$

### 1) Aire entrada:

Flujo:	Mae
Temperatura:	t <sub>ae</sub>
Presión:	Pe
Humedad Relativa:	HRe
Presión de saturación:	$P_{se} = 10^{\left(\frac{A-B}{C+te}\right)}$
Presión de vapor:	$P_{ve} = \frac{P_{se} \times HRe}{100}$
Fracción de agua:	$x_{ae} = \frac{P_{ve}}{P_e}$
Peso Molecular:	$PMe = xe \times 18 + (1 - xe) \times 28,84$

Fracción másica:  $w_{ae} = \frac{P_{ve}}{P_e} \frac{18}{P_{me}}$

Entalpía:  $\overline{\Delta H_{ae}} = 0,24 \times t_e + w_{ae} \times (595 + 0,22 \times t_e)$

## 2) Aire salida

Flujo:  $M_s$

Temperatura:  $t_{ae}$

Presión:  $P_s$

Humedad Relativa:  $HR_s$

Presión de saturación:  $P_{ss} = 10^{\left(\frac{A-B}{C+ts}\right)}$

Presión de vapor:  $P_{vs} = \frac{P_{ss} \times HR_s}{100}$

Fracción de agua:  $x_s = \frac{P_{vs}}{P_s}$

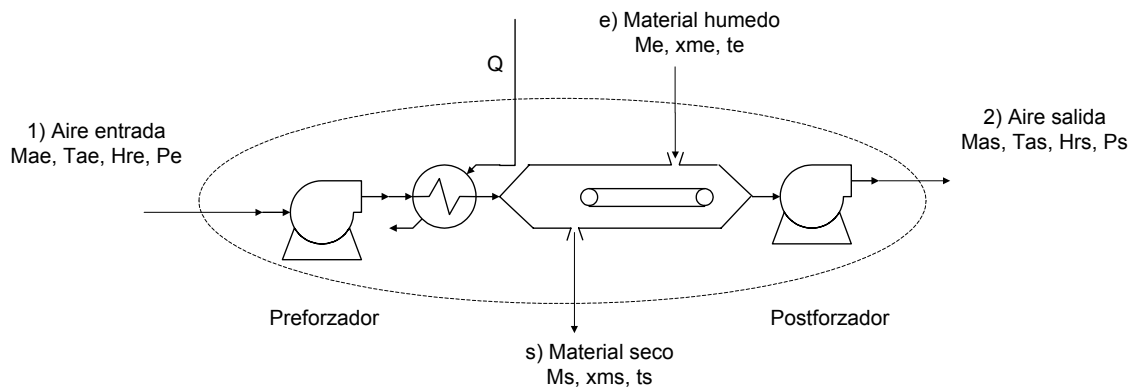
Peso Molecular:  $PM_s = x_s \times 18 + (1 - x_s) \times 28,84$

Fracción másica:  $w_{as} = \frac{P_{vs}}{P_s} \frac{18}{P_{ms}}$

Entalpía:  $\overline{\Delta H_{as}} = 0,24 \times t_s + w_{as} \times (595 + 0,22 \times t_s)$

## Resolución:

Tomando cómo límites la figura siguiente (ignorando los sopladores):



BM)  $M_e + M_{ae} = M_s + M_{as}$

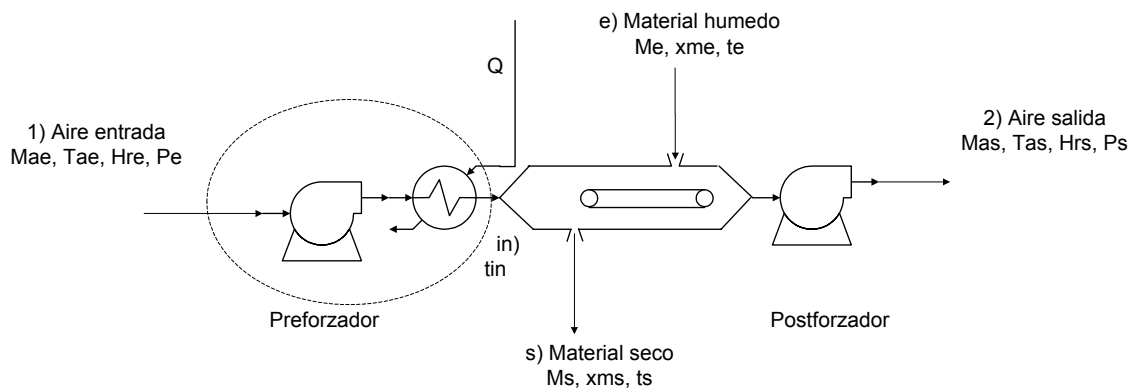
BM Agua)  $M_e \times w_e + M_{ae} \times w_{ae} = M_s \times w_s + M_{as} \times w_{as}$

BM Solido)  $M_e \times (1 - w_e) + M_{ae} \times 0 = M_s \times (1 - w_s) + M_{as} \times 0$

Energía)  $M_e \times \overline{\Delta H_e} + M_{ae} \times \overline{\Delta H_{ae}} + Q = M_s \times \overline{\Delta H_s} + M_{as} \times \overline{\Delta H_{as}}$

Balance alrededor del calentador:

Balance del calentador (ignorando el soplante):



$$\text{BE)} \quad M_{ae} \times \overline{\Delta H_{ae}} + Q = M_{ae} \times \overline{\Delta H_{in}}$$

$$Q = M_{ae} \times (\overline{\Delta H_{in}} - \overline{\Delta H_{ae}})$$

### Ejemplo numérico:

Una corriente de 1000 [Kg/hr] de un material con 20 % de humedad se seca con aire que ingresa a 1 atm, 25 °C y 30 % de humedad relativa. El aire se precalienta antes de ingresar al precalentador. Con los datos que se dan a continuación calcular:

- La cantidad de aire fresco necesario.
- La cantidad de calor requerido
- La temperatura a la que se precalienta el aire

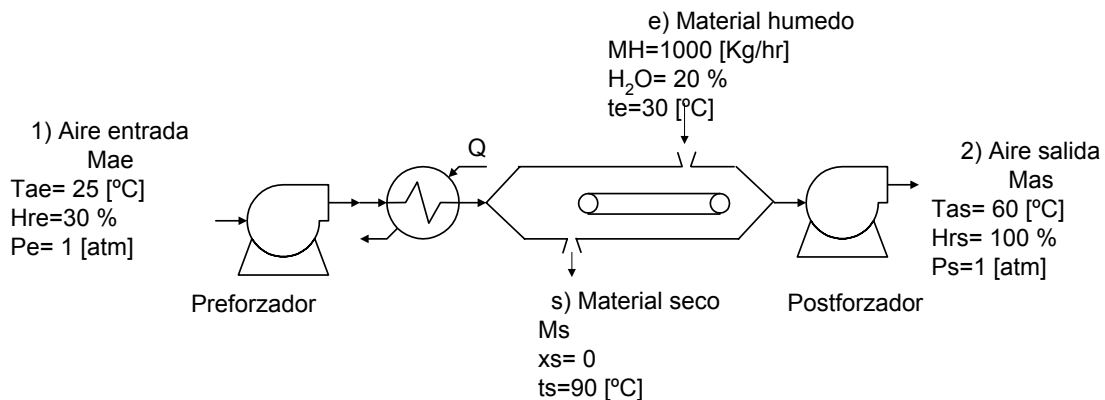
### Datos:

Cp sólido seco=  $C_{p_{SOL}} = 0,66$  [Kcal/Kg °C]

Cp agua líquida=  $C_{P_W} = 1$  [Kcal/Kg °C]

Calor latente evp agua=  $\lambda = 595$  [Kcal/Kg]

### Esquema:



### Resolución:

#### e) Material húmedo:

Flujo:  $M_e = 1000$  [Kg/hr]

Fracción de agua:  $w_e = 0,2$

Temperatura:  $t_e = 30$  [°C]

Presión:  $P_1 = 1$  [atm]

Entalpía:  $\overline{\Delta H_e} = 0,66 \times 30 + 0,20 \times [595 + 0,34 \times 30] = 140,8 \left[ \frac{Kcal}{Kg} \right]$

#### s) Material seco:

Flujo:  $M_s$

Fracción de agua:  $w_s = 0,0$

Temperatura:  $t_s = 90$  [°C]  
Presión:  $P_2 = 1$  [atm]

$$\overline{\Delta H}_s = 0,66 \times 90 + 0,00 \times [595 + 0,34 \times 30] = 59,4 \left[ \frac{Kcal}{Kg} \right]$$

### 1) Aire entrada:

Flujo:  $M_{ae}$   
Temperatura:  $t_{ae} = 25$  [°C]  
Presión:  $P_e = 1$  [atm]  
Humedad Relativa:  $H_{Re} = 30$  %

$$\text{Presión de saturación: } P_{se} = 10^{\left(\frac{A-B}{C+25}\right)} = 23,69 \text{ [mmHg]}$$

$$\text{Presión de vapor: } P_{ve} = \frac{23,69 \times 30}{100} = 7,107 \text{ [mmHg]}$$

$$\text{Fracción de agua: } x_e = \frac{P_{ve}}{P_e} = \frac{7,107}{760} = 0,009351$$

$$\text{Peso Molecular: } P_{Me} = 9,351 \times 10^{-3} \times 18 + (1 - 9,351 \times 10^{-3}) \times 28,84 = 28,74 \left[ \frac{Kg}{Kmol} \right]$$

$$\text{Fracción másica: } w_e = \frac{7,107}{760} \frac{18}{28,74} = 0,005857$$

$$\text{Entalpía: } \overline{\Delta H}_{ae} = 0,24 \times 25 + 0,005857 \times (595 + 0,22 \times 25) = 9,517 \left[ \frac{Kcal}{Kg} \right]$$

### 2) Aire salida

Flujo:  $M_{as}$   
Temperatura:  $t_{as} = 60$  [°C]  
Presión:  $P_s = 1$  [atm]  
Humedad Relativa:  $H_{Ras} = 100$  %

$$\text{Presión de saturación: } P_{sas} = 10^{\left(\frac{A-B}{C+60}\right)} = 149,0 \text{ [mmHg]}$$

$$\text{Presión de vapor: } P_{vas} = \frac{149,0 \times 100}{100} = 149,0 \text{ [mmHg]}$$

$$\text{Fracción de agua: } x_{as} = \frac{P_{vas}}{P_s} = \frac{149,0}{760} = 0,1961$$

$$\text{Peso Molecular: } P_{Mas} = 0,1961 \times 18 + (1 - 0,1961) \times 28,84 = 26,71 \left[ \frac{Kg}{Kmol} \right]$$

$$\text{Fracción másica: } w_{as} = \frac{149,0}{760} \frac{18}{26,71} = 0,1321$$

$$\text{Entalpía: } \overline{\Delta H}_{as} = 0,24 \times 60 + 0,1321 \times (595 + 0,22 \times 60) = 94,74$$

### Balances:

$$\text{BM)} \quad Me + Mae = Ms + Mas$$

$$\text{BM Agua)} \quad Me \times we + Mae \times wae = Ms \times ws + Mas \times was$$

$$\text{BM Solido)} \quad Me \times (1 - we) + Mae \times 0 = Ms \times (1 - ws) + Mas \times 0$$

$$\text{Energía)} \quad Me \times \overline{\Delta H_e} + Mae \times \overline{\Delta H_{ae}} + Q = Ms \times \overline{\Delta H_s} + Mas \times \overline{\Delta H_{as}}$$

$$\text{Del balance del sólido: } 100 \times (1 - 0,2) = Ms \times (1 - 0)$$

$$Ms = \frac{1000 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right] \times 0,8}{1} = 800 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right]$$

$$\text{Del balance global: } 1000 + Mae = 800 + Mas$$

$$Mas = 1000 + Mae - 800$$

$$\text{Del balance del agua: } 1000 \times 0,2 + Mae \times 0,005857 = Ms \times 0 + Mas \times 0,1321$$

$$200 + Mae \times 0,005857 = (1000 + Mae - 800) \times 0,1321$$

$$200 + Mae \times 0,005857 = 132,1 + 0,1321 \times Mae - 105,7$$

$$Mae \times (0,1321 - 0,005857) = 200 - 132,1 + 105,7$$

$$Mae = \frac{200 - 132,1 + 105,7}{(0,1321 - 0,005857)} = \frac{173,6}{0,1262} = 1376 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right]$$

$$\text{a) La cantidad de aire fresco necesario es: } 1376 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right]$$

$$\text{El caudal de salida del aire: } Mas = 1000 + 1376 - 800 = 1576 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right]$$

$$\text{Del balance de energía: } 1000 \times 140,8 + 1376 \times 9,517 + Q = 800 \times 59,4 + 1576 \times 94,74$$

$$Q = 800 \times 59,4 + 1576 \times 94,74 - (1000 \times 140,8 + 1376 \times 9,517) = 4,2935 \times 10^4 \left[ \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}} \right]$$

$$\text{b) L cantidad de calor requerida es: } 4,2935 \times 10^4 \left[ \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}} \right]$$

Si  $t_{in}$  es la temperatura intermedia del aire y  $\overline{\Delta H_{in}}$  su entalpía:

$$\overline{\Delta H_{in}} = 0,24 \times tin + 0,005857(595 + 0,22 \times tin)$$

$$\overline{\Delta H_{ae}} = 0,24 \times 25 + 0,005857 \times (595 + 0,22 \times 25) = 9,517 \left[ \frac{Kcal}{Kg} \right]$$

Balance de energía en el calentador

$$Mae \times \overline{\Delta H_{ae}} + Q = Mae \times \overline{\Delta H_{in}}$$

$$Q = Mae \times (\overline{\Delta H_{in}} - \overline{\Delta H_{ae}})$$

$$4,2935 \times 10^4 = 1376 \times [(0,24 \times tin + 0,005857(595 + 0,22 \times tin)) - 9,517]$$

$$4,2935 \times 10^4 = 330,2 \times tin + 4795 + 1,773 \times tin - 13095$$

$$tin \times (330,2 + 1,773) = 4,2935 \times 10^4 - 4795 + 13095$$

$$tin = \frac{4,2935 \times 10^4 - 4795 + 13095}{(330,2 + 1,773)} = \frac{51235}{331,9} = 154,3 [^{\circ}C]$$

c) El aire debe precalentarse hasta los  $154,3 [^{\circ}C]$



## Código EMSO

**#\* Balance \*#**

using "types";

FlowSheet Secador

**PARAMETERS**

Cps as Real;

Cpw as Real;

L as Real;

A as Real;

B as Real;

C as Real;

xme as Real;

xms as Real;

**VARIABLES**

**# Sólido Humedo**

Me as Real;

te as Real;

he as Real;

**# Sólido seco**

Ms as Real;

ts as Real;

hs as Real;

**# Aire frio**

Mae as Real;

tae as Real;

Pe as positive;

HRe as Real;

Pse as positive;

Pve as Real;

we as Real;

wme as Real;

xae as Real;

Pme as Real;

xmae as Real;

hae as Real;

**# Aire saturado**

Mas as Real;

tas as Real;  
Ps as Real;  
HRs as Real;  
Pss as positive;  
Pvs as positive;  
ws as Real;  
wms as Real;  
xs as Real;  
Pms as Real;  
xmas as Real;  
has as Real;

#### # Calentador

Q as Real;  
hin as Real;  
tin as Real;

#### EQUATIONS

##### # Sólido humedo

Me= 1000;  
te= 30;  
he=Cps\*te+xme\*(L+(Cpw-Cps)\*te);

##### # Sólido seco

ts= 90;  
hs=Cps\*ts+xms\*(L+(Cpw-Cps)\*ts);

##### # Aire frio

tae=25;  
Pe=760;  
HRe=30;  
Pse=10<sup>(A-B/(C+tae))</sup>;  
Pve=HRe\*Pse/100;  
we=Pve/(Pe-Pve);  
wme=0.622\*we;  
xae=Pve/Pe;  
Pme=xae\*18+(1-xae)\*28.84;  
xmae=18/Pme\*xae;  
hae=0.24\*tae+xmae\*(595+0.22\*tae);

##### # Aire saturado

tas=60;  
Ps=760;  
HRs=100;  
Pss=10<sup>(A-B/(C+tas))</sup>;

```

Pvs=HRs*Pss/100;
ws=Pvs/(Ps-Pvs);
wms=0.622*ws;
xs=Pvs/Ps;
Pms=xs*18+(1-xs)*28.84;
xmas=18/Pms*xs;
has=0.24*tas+xmas*(595+0.22*tas);

# Balances secador
Me+Mae=Mas+Ms;
Me*xme+Mae*xmae=Ms*xms+Mas*xmas;
Me*(1-xme)=Ms*(1-xae);
Me*he+Mae*hae+Q=Ms*hs+Mas*has;

# Balance Calentador
hin=0.24*tin+xmae*(595+0.22*tin);
Q+Mae*hae=Mae*hin;

SET
Cps= 0.66;
Cpw= 1;
L= 595;

A= 8.07131;
B=1730.63;
C=233.426;
xme=0.2;
xms=0.0;

INITIAL

GUESS

OPTIONS
TimeStart=0;
TimeEnd=100;
TimeStep=1;
TimeUnit='h';
DAESolver(File="dassl");
Dynamic=false;

end

```

**Resultados:**

- a) Mae= 1382 [Kg(hr)]  
b) Q= 4,321x10<sup>4</sup> [Kcal/hr]  
c) tin= 154,5 [°C]

Variable	Valor
Cps	0,6600
Cpw	1,0000
L	595,0000
A	8,0713
B	1730,6300
C	233,4260
xme	0,2000
xms	0,0000
Me	1000,0000
te	30,0000
he	140,8400
Ms	807,5510
ts	90,0000
hs	59,4000
Mae	1382,4400
tae	25,0000
Pe	760,0000
HRe	30,0000
Pse	23,6864
Pve	7,1059
we	0,0094

Variable	Valor
wme	0,0059
xae	0,0093
Pme	28,7386
xmae	0,0059
hae	9,5166
Mas	1574,8900
tas	60,0000
Ps	760,0000
HRs	100,0000
Pss	149,0380
Pvs	149,0380
ws	0,2439
wms	0,1517
xs	0,1961
Pms	26,7142
xmas	0,1321
has	94,7638
Q	43214,6000
hin	40,7764
tin	154,5530