





## T 09.- Psicrometría

### Objetivos:

Este tema está destinado a conocer las propiedades del aire húmedo y sus transformaciones. Se presenta el diagrama psicrométrico y su potencial en la resolución rápida de problemas.

- 1.- Introducción
- 2.- Psicrometría
- 3.- El diagrama psicrométrico
- 4.- Las transformaciones psicrométricas

## 1.- Introducción

•El aire puede presentar contaminantes que pueden tener gran incidencia sobre la salud o el confort

- |                 |          |           |
|-----------------|----------|-----------|
| - Calor         | - Ruido  | - Gases   |
| - Vapor de agua | - Olores | - Pelusas |
| - Velocidad     | - Polvo  | - Humo    |

## 2.- Psicrometría (I)

El aire que nos rodea es "aire húmedo", contiene **vapor de agua**

La **psicrometría** estudia las propiedades de la mezcla aire-vapor

Dentro de las **propiedades del aire** se habla de las propiedades del aire seco (as), del vapor de agua (va), y de la mezcla: el aire húmedo (ah)

Las propiedades del **aire seco**:

- El volumen: 
$$V_{as} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg.as}} \right] = \frac{R_{as} \left[ \frac{29,27 \text{ m}^3/\text{K}}{\text{kg}} \right] T [\text{K}]}{p_{as} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}$$

- El calor específico;  $f(T, p)$ , a 760 mm.Hg: 
$$c_{p,as} = 0,24 \left[ \frac{\text{kCal}}{\text{kg K}} \right] = 1 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$$

- La entalpía: 
$$h_{as} = 0,24 (T - T_a) \left[ \frac{\text{kCal}}{\text{kg}} \right] = (T - T_a) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Si se referencia a 0°C y 760 mm.Hg  
siendo  $T$  la temperatura de bulbo seco en °C

$$h_{as} = 0,24 T \left[ \frac{\text{kCal}}{\text{kg}} \right] = T \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

## 2.- Psicrometría (II)

Las propiedades del **vapor de agua**:

- El volumen: 
$$V_{va} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg.va}} \right] = \frac{R_{va} [47,1 \text{ m}^3/\text{K}] T [\text{K}]}{\rho_{va} [\text{kg}/\text{m}^3]}$$

- El calor específico: 
$$c_{p,va} = 0,46 \left[ \frac{\text{kCal}}{\text{kg K}} \right] = 1,86 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$$

- La entalpía: 
$$h_{va} = (595 + 0,46 T) W \left[ \frac{\text{kCal}}{\text{kg}} \right] = (2.501 + 1,86 T) W \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$W$  la humedad específica del aire (kg va / kg as)  
595 el calor latente de evaporación [kCal/kg]

Las propiedades de la **mezcla**:

- El volumen: 
$$V_{ah} = V_{as} = V_{va}$$

- La presión total: 
$$p_{ah} = p_{as} + p_{va}$$

- La entalpía: 
$$h_{ah} = h_{as} + h_{va} =$$

$$= (0,24 T) + [(595 + 0,46 T) w] \left[ \frac{\text{kCal}}{\text{kg}} \right] =$$

$$= T + (2.501 + 1,86 T) W \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

## 2.- Psicrometría (III)

*Aire saturado:*  $p_v = p_{\text{sat}} (T)$

*Temperatura de rocío:*  $T \Rightarrow p_{\text{actual}} = p_{\text{sat}}$  (condensación de la humedad ambiente)

*Humedad específica (x):* es la cantidad de vapor de agua por masa de aire, [kg vapor agua / kg aire seco]

$$x = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}$$

*Humedad relativa ( $\varphi$ , HR):* la relación entre  $p_v$  y  $p_{\text{sat}}$  en %

$$\varphi = \text{HR} = \frac{p_v}{p_{\text{vs}}} 100$$

*Saturación adiabática:* aporte de agua hasta la sat. en una cámara térmicamente aislada

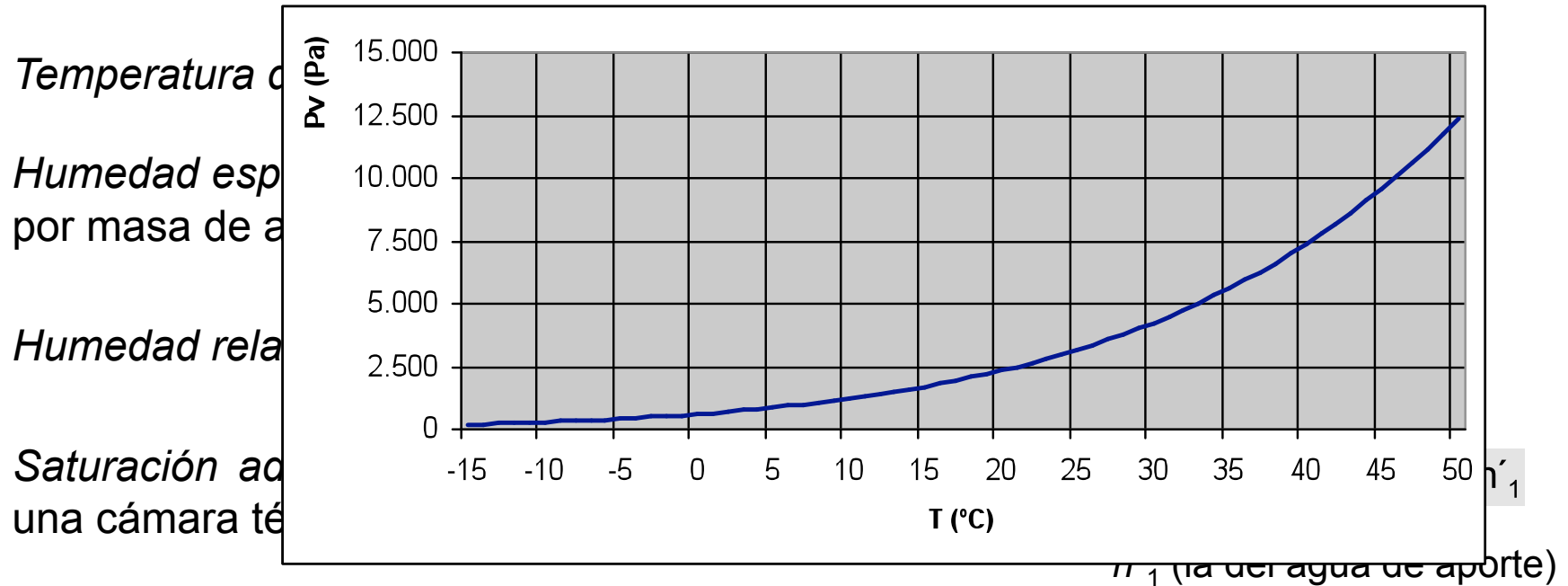
$$h_s = h_0 + (w_s - w_0) h'_1$$

$h'_1$  (la del agua de aporte)

*Temperatura de bulbo húmedo:* es la  $T_{\text{sat}}$  adiabática

2.- Psicrometría (III)

Aire saturado:  $p_v = p_{\text{sat}}(T)$   $\log(p_v) = 7,5 \frac{T_{\text{sat}}}{(T_{\text{sat}} + 273) - 35,85} + 2,7858$   $p_v$  en Pa y  $T_{\text{sat}}$  en °C



Temperatura de bulbo húmedo: es la  $T_{\text{sat}}$  adiabática

## 2.- Psicrometría (IV)

Temperatura de bulbo seco,  $T_{BS}$  ( $T_{\text{aire}}$ )

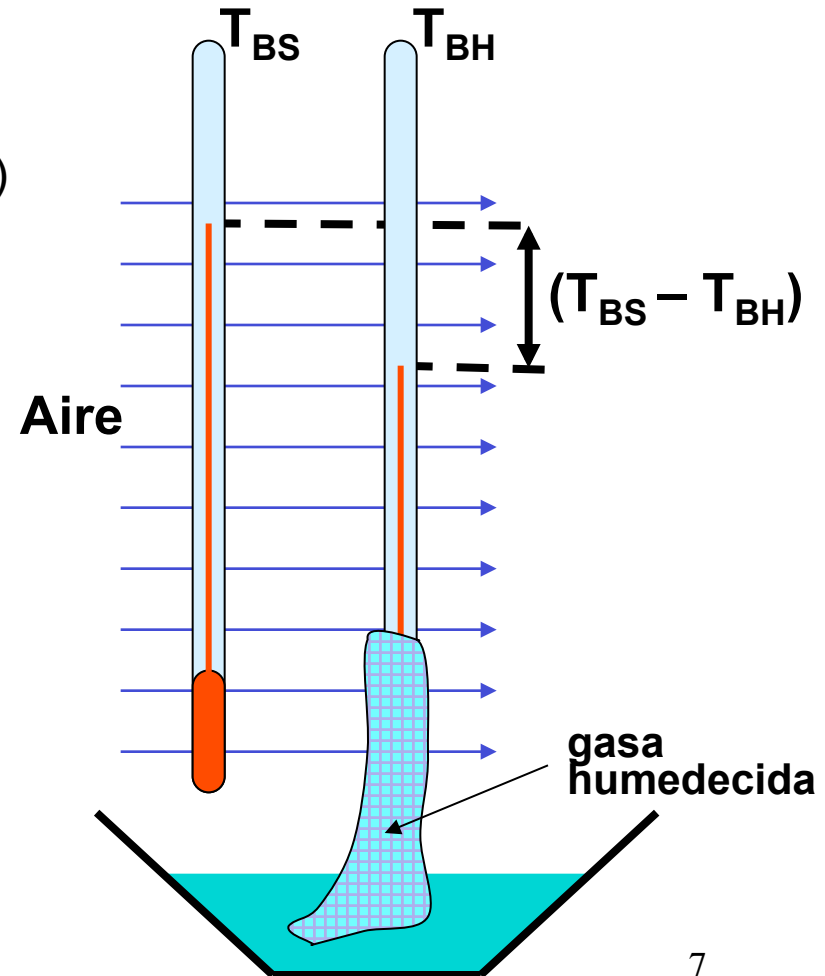
Temperatura de bulbo húmedo,  $T_{BH}$  ( $T_{\text{agua}}$ )

$T_{BS} = T_{BH} \Rightarrow$  aire saturado

$T_{BS} > T_{BH} \Rightarrow$  aire no saturado

$(T_{BS} - T_{BH})$  en tablas  $\rightarrow$  HR

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } (T_{BS} \gg T_{BH}) \Rightarrow \text{HR baja} \\ \text{Si } (T_{BS} \approx T_{BH}) \Rightarrow \text{HR alta} \end{array} \right.$





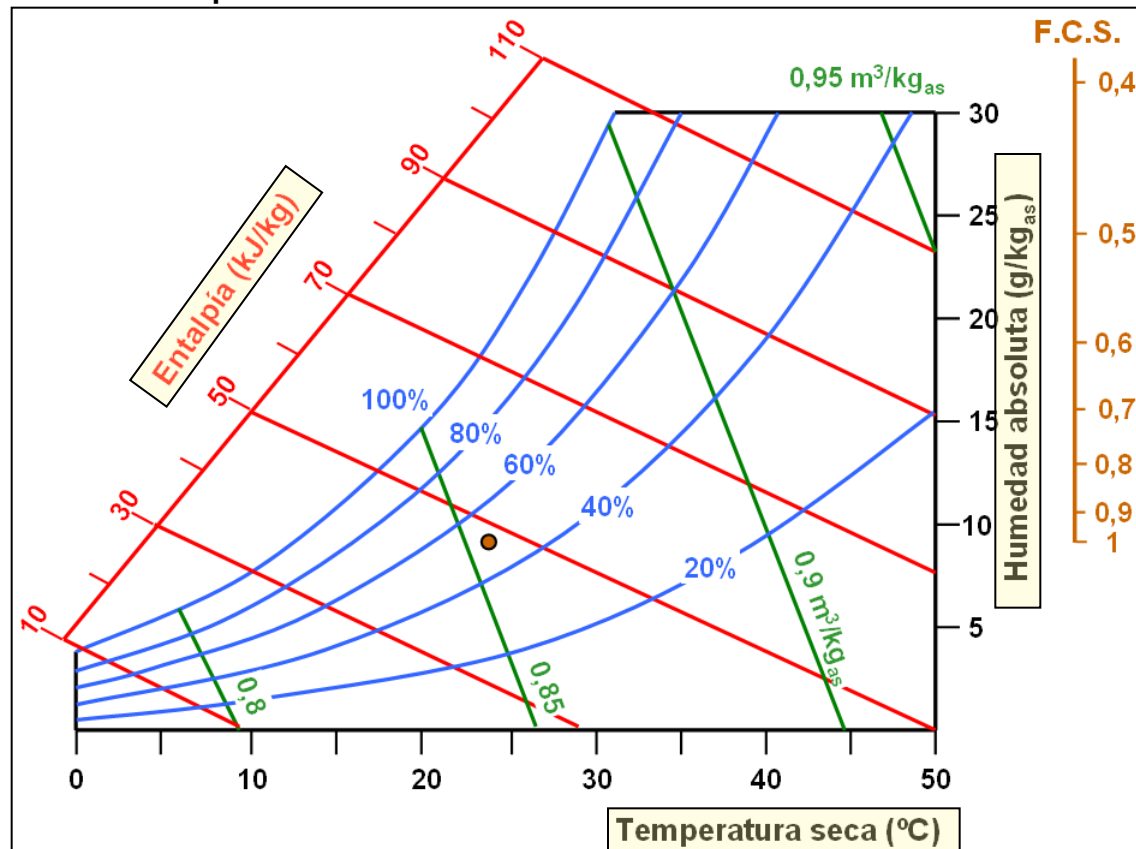
### 3.- El Diagrama Psicrométrico (I)

Es el empleado para resolver los problemas del aire húmedo

Hay que considerar la presión (altitud)

$$P [\text{Pa}] = 101.325 (1 - 2,2610^{-5} H [\text{m}])^{5,26}$$

Existen diferentes tipos



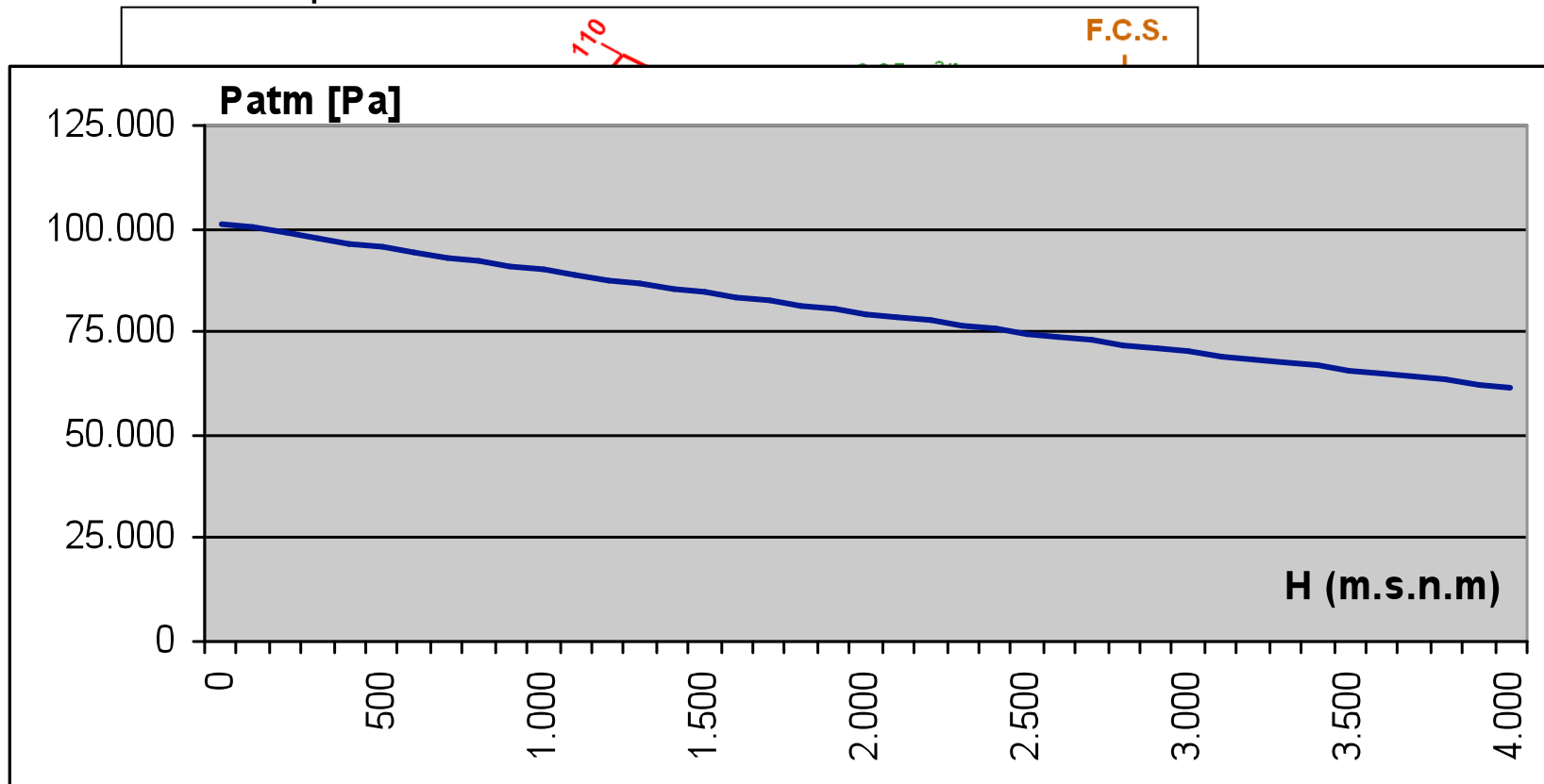
### 3.- El Diagrama Psicrométrico (I)

Es el empleado para resolver los problemas del aire húmedo

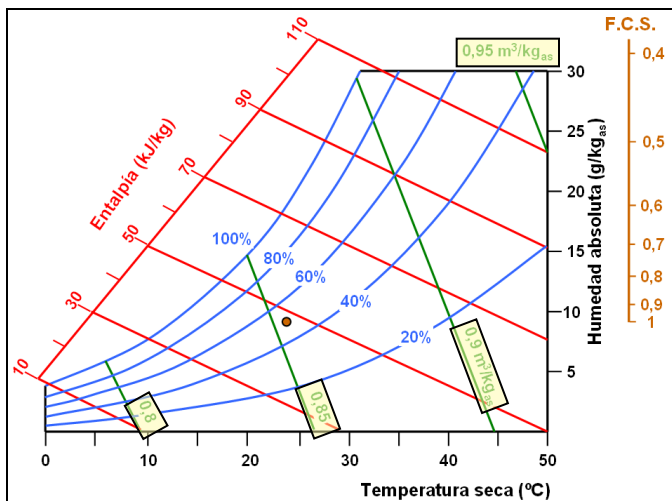
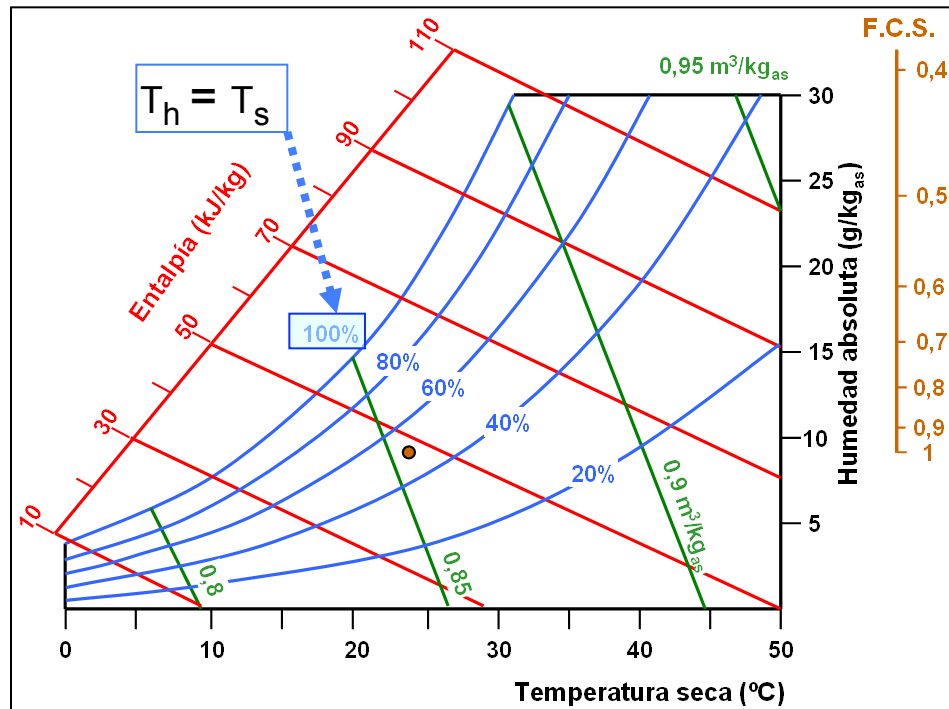
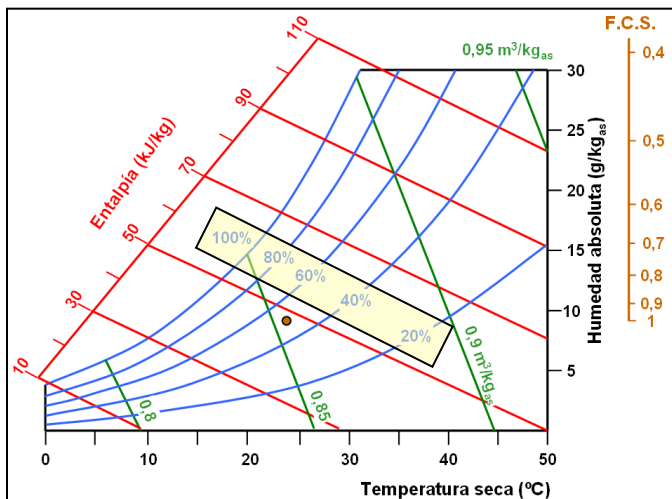
Hay que considerar la presión (altitud)

$$P \text{ [Pa]} = 101.325 \left(1 - 2,2610^{-5} H \text{ [m]}\right)^{5,26}$$

Existen diferentes tipos



### 3.- El Diagrama Psicrométrico (II)

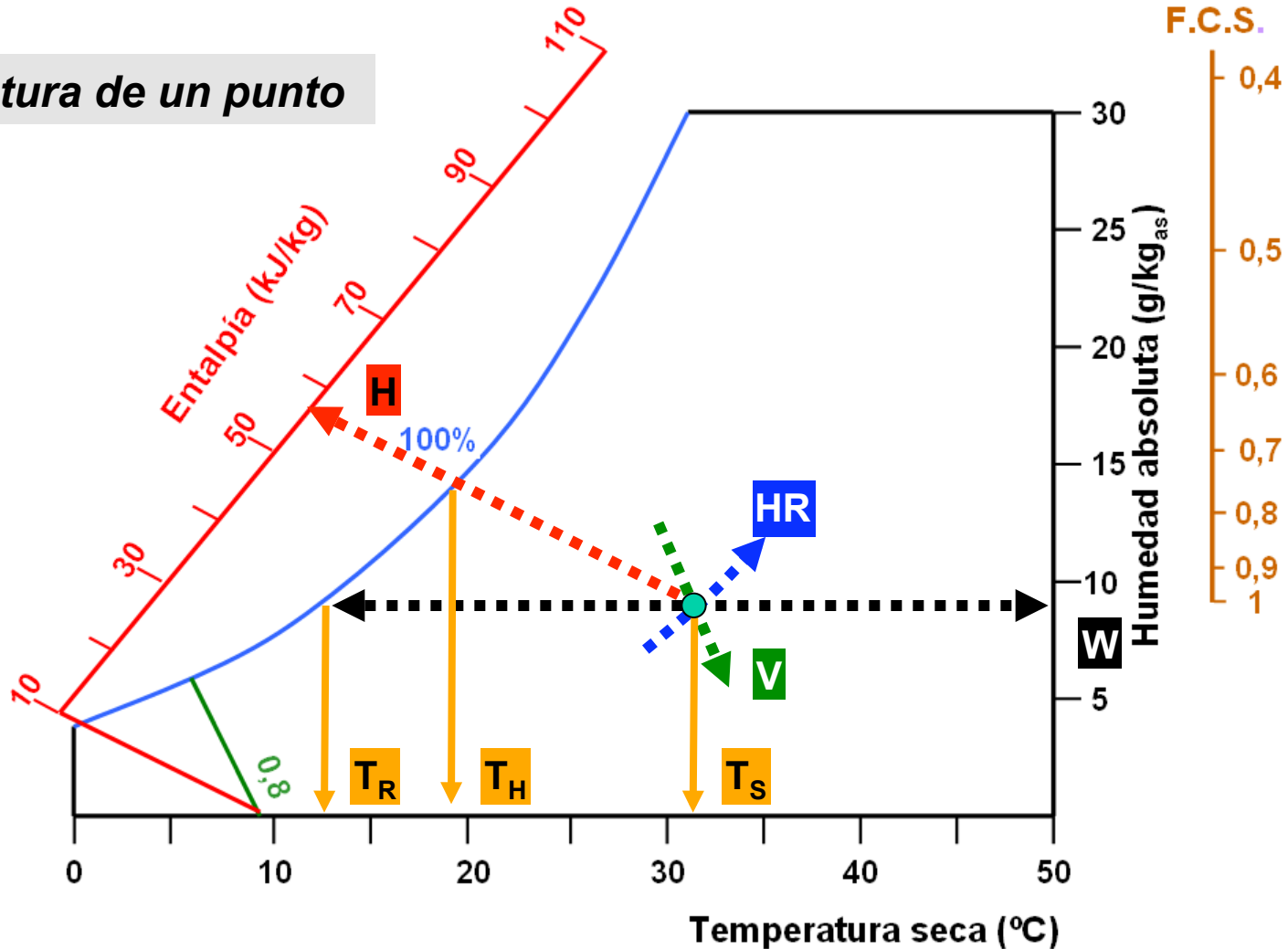


$h \text{ cte} \approx T_h \text{ cte}$

h cte      T<sub>h</sub> cte

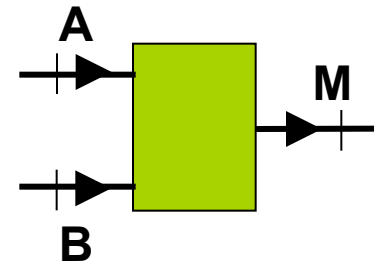
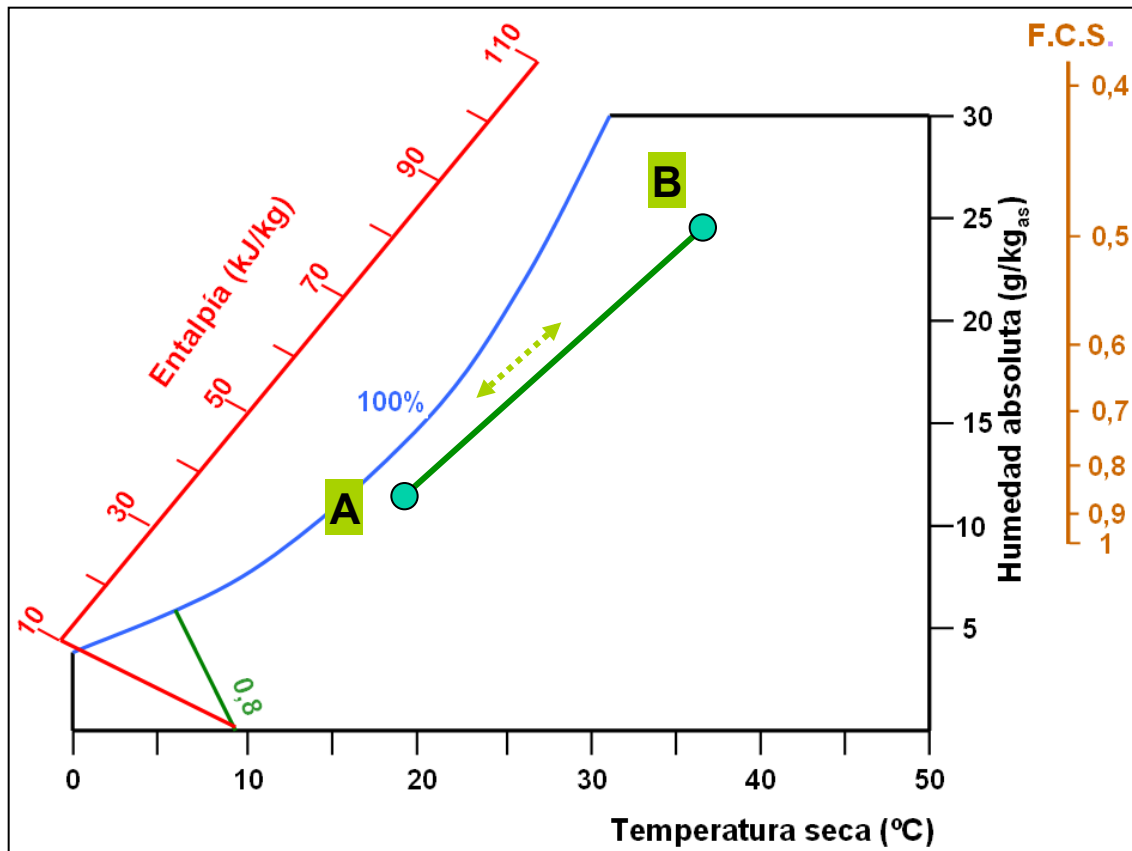
3.- El Diagrama Psicrométrico (III)

*Lectura de un punto*



## 4.- Las Transformaciones Psicrométricas (I)

**Mezcla adiabática de dos masas de aire (A y B) con distinta humedad**  
la mezcla (M) situada en la recta que une los dos puntos



$G$  es la masa de aire (kg)  
 $w$  humedad específica  
 $h$  entalpía (kJ/kg)

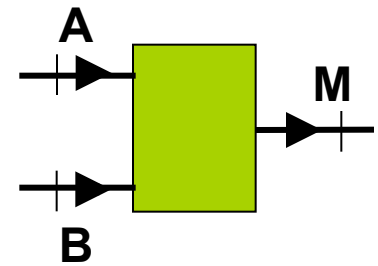
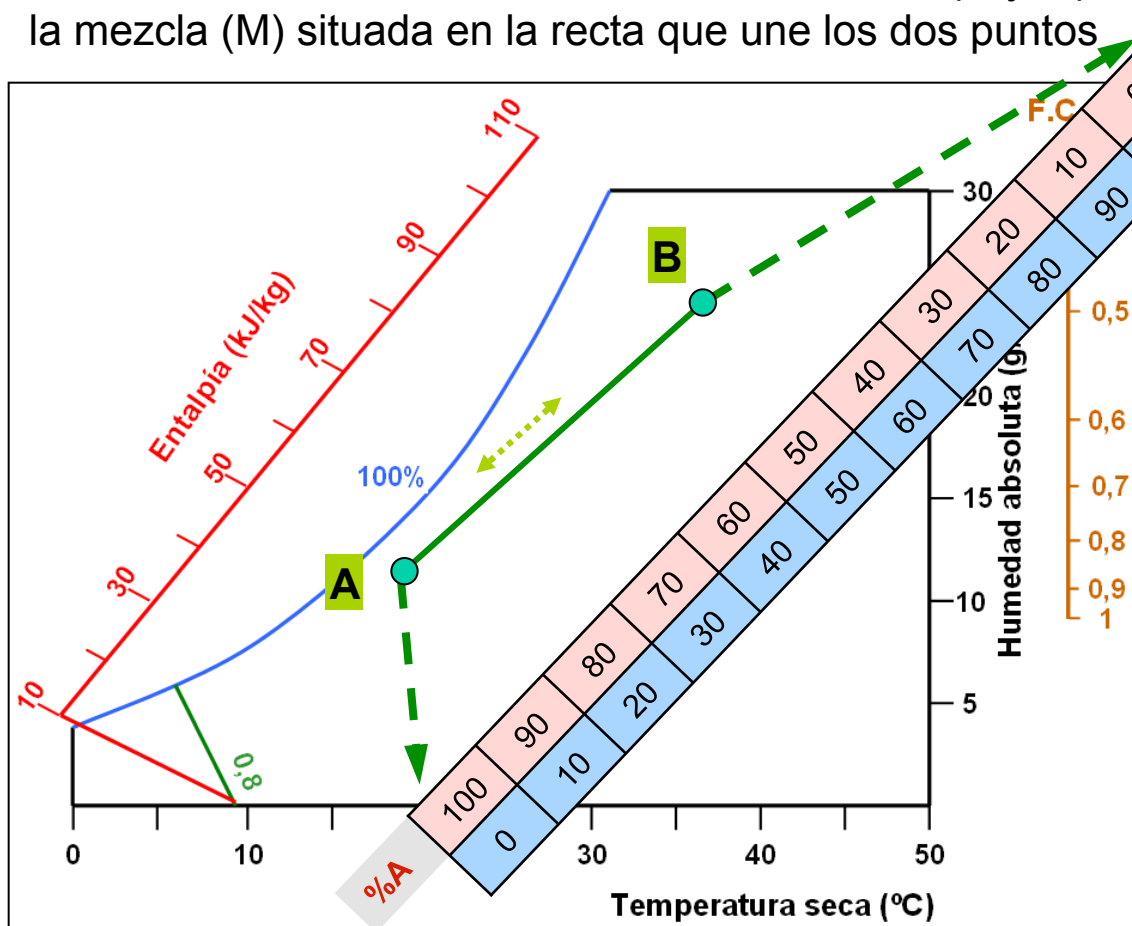
$$G_A + G_B = G_M$$

$$G_A w_A + G_B w_B = G_M w_M$$

$$G_A h_A + G_B h_B = G_M h_M$$

4.- Las Transformaciones Psicrométricas (I)

**Mezcla adiabática de dos masas de aire (A y B) con distinta humedad**  
la mezcla (M) situada en la recta que une los dos puntos



$G$  es la masa de aire (kg)  
 $w$  humedad específica  
 $h$  entalpía (kJ/kg)

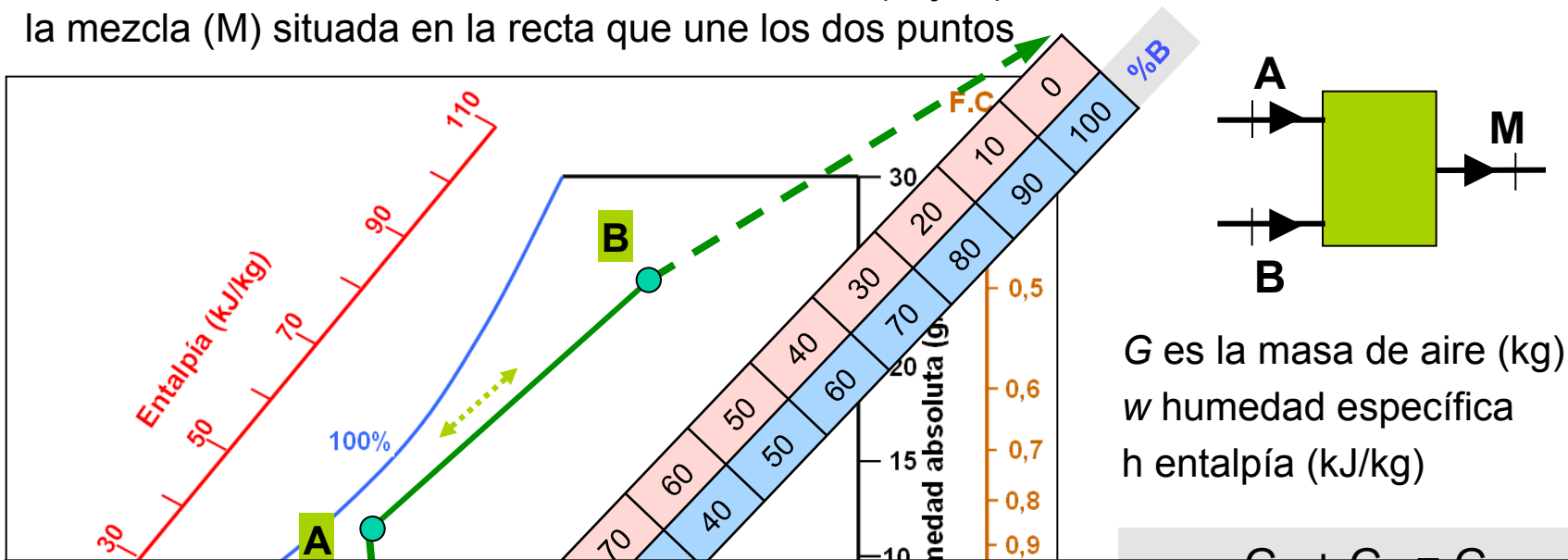
$$G_A + G_B = G_M$$

$$G_A w_A + G_B w_B = G_M w_M$$

$$G_A h_A + G_B h_B = G_M h_M$$

4.- Las Transformaciones Psicrométricas (I)

**Mezcla adiabática de dos masas de aire (A y B) con distinta humedad**  
la mezcla (M) situada en la recta que une los dos puntos



G es la masa de aire (kg)  
w humedad específica  
h entalpía (kJ/kg)

$$G_A + G_B = \frac{G_A w_A + G_B w_B}{w_M} \Rightarrow G_A (w_A - w_M) = G_B (w_M - w_B) \Rightarrow$$

$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{w_M - w_B}{w_A - w_M}$$

$$G_A + G_B = \frac{G_A h_A + G_B h_B}{h_M} \Rightarrow G_A (h_A - h_M) = G_B (h_M - h_B) \Rightarrow$$

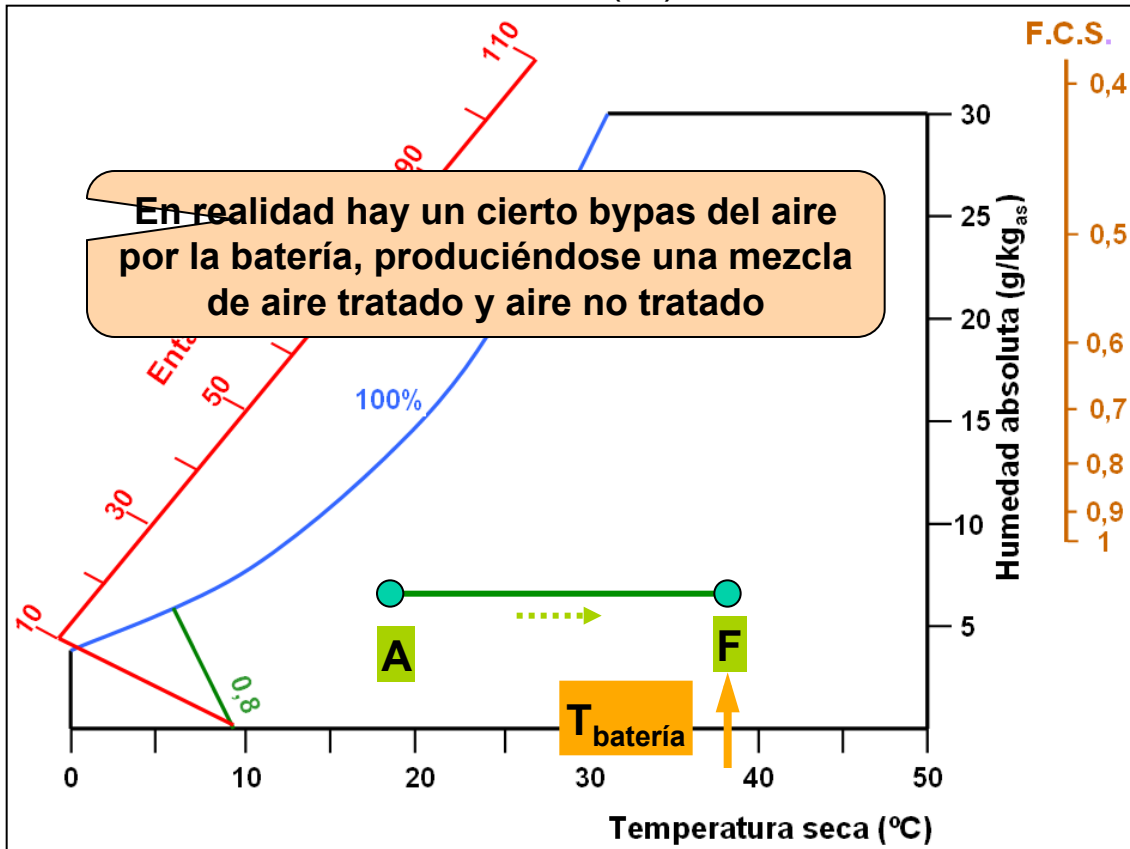
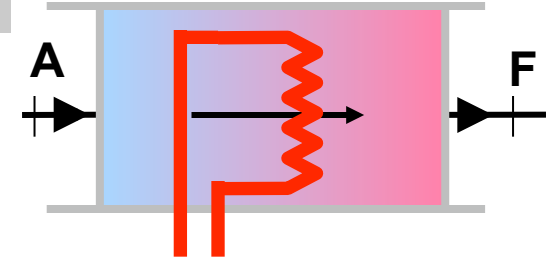
$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{h_M - h_B}{h_A - h_M} \approx \frac{T_M - T_B}{T_A - T_M}$$

## 4.- Las Transformaciones Psicrométricas (II)

**Calentamiento sensible**, no varía W

Paso por una batería caliente, resistencia eléctrica

No varía la humedad absoluta (W)



Q calor aportado (kCal / h)

$$Q = 0,24 M_{\text{aire}} (T_F - T_A)$$

$$Q = M_{\text{aire}} (h_A - h_F)$$

$$FB = \frac{M_{\text{aire no tratada}}}{M_{\text{aire total}}}$$

- nº filas
- Aletas
- Separación entre filas
- Separación entre aletas
- Velocidad del aire

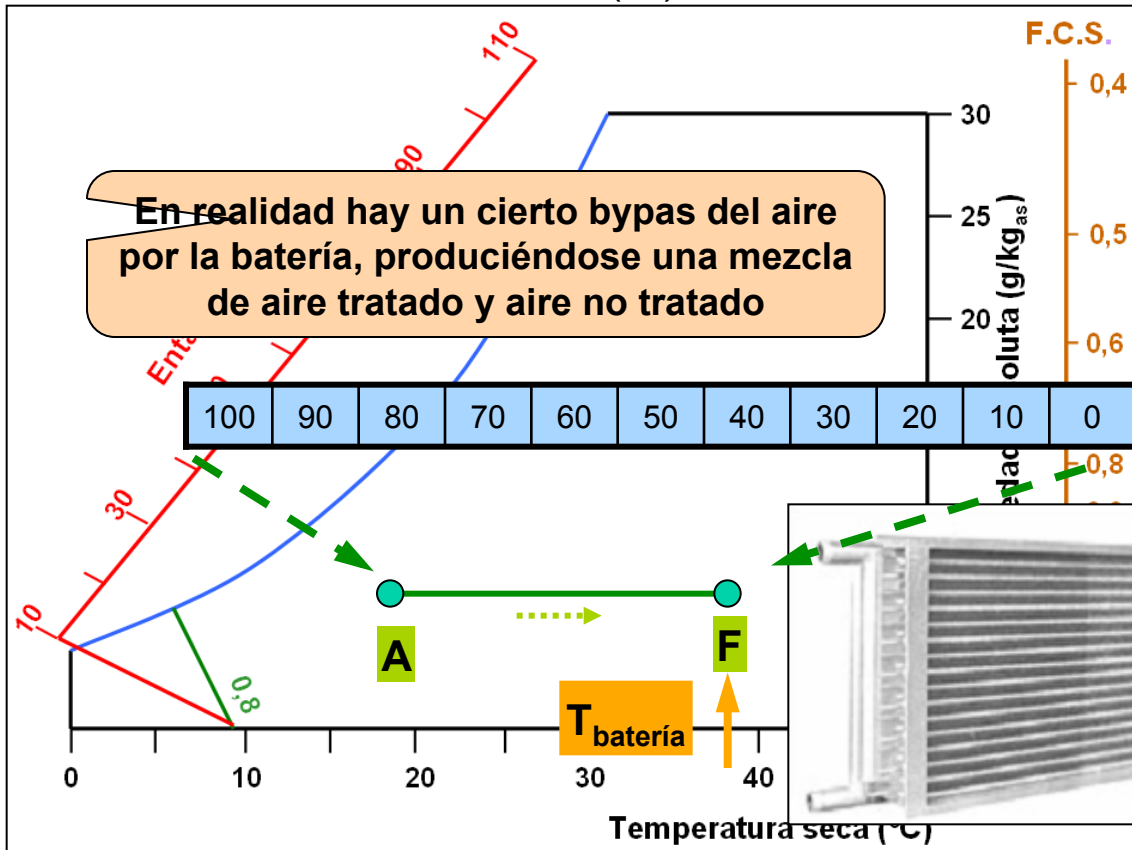
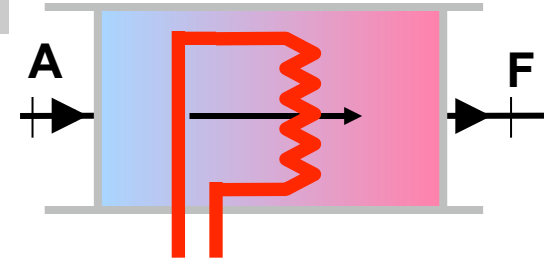


4.- Las Transformaciones Psicrométricas (II)

**Calentamiento sensible**, no varía W

Paso por una batería caliente, resistencia eléctrica

No varía la humedad absoluta (W)



Q calor aportado (kCal / h)

$$Q = 0,24 M_{\text{aire}} (T_F - T_A)$$

$$Q = M_{\text{aire}} (h_A - h_F)$$

$$FB = \frac{M_{\text{aire no tratada}}}{M_{\text{aire total}}}$$

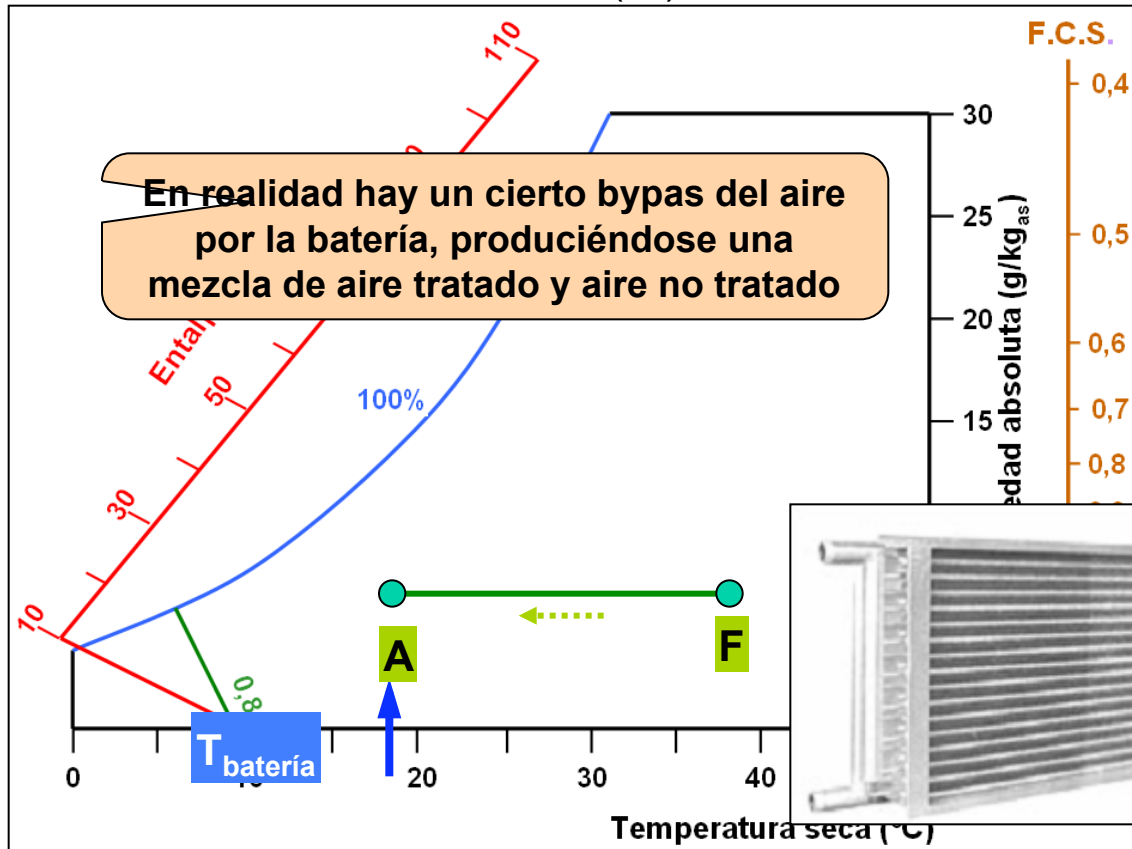
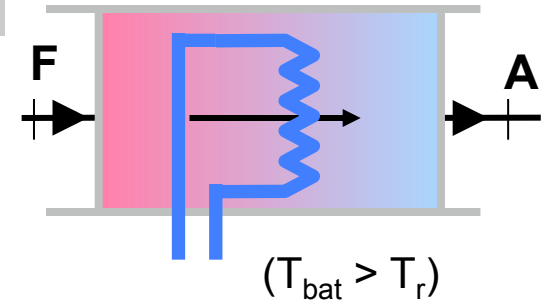
- nº filas
- Aletas
- Separación entre filas
- Separación entre aletas
- Velocidad del aire

4.- Las Transformaciones Psicrométricas (III)

**Enfriamiento sensible**, sin deshumidificación

Paso por una batería fría a  $T_{bat} > T_r$

No varía la humedad absoluta (W)



Q calor aportado (kCal / h)  
 $Q = 0,24 M_{aire} (T_F - T_A)$   
 $Q = M_{aire} (h_A - h_F)$

$$FB = \frac{M_{aire \text{ no tratada}}}{M_{aire \text{ total}}}$$

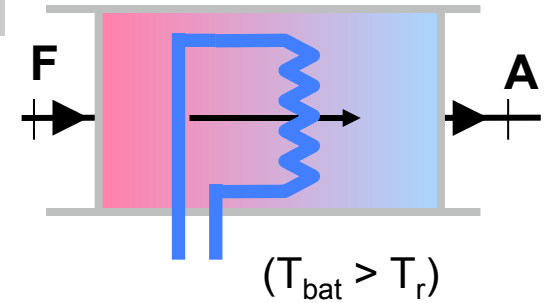
- nº filas
- Aletas
- Separación entre filas
- Separación entre aletas
- Velocidad del aire

4.- Las Transformaciones Psicrométricas (III)

**Enfriamiento sensible**, sin deshumidificación

Paso por una batería fría a  $T_{bat} > T_r$

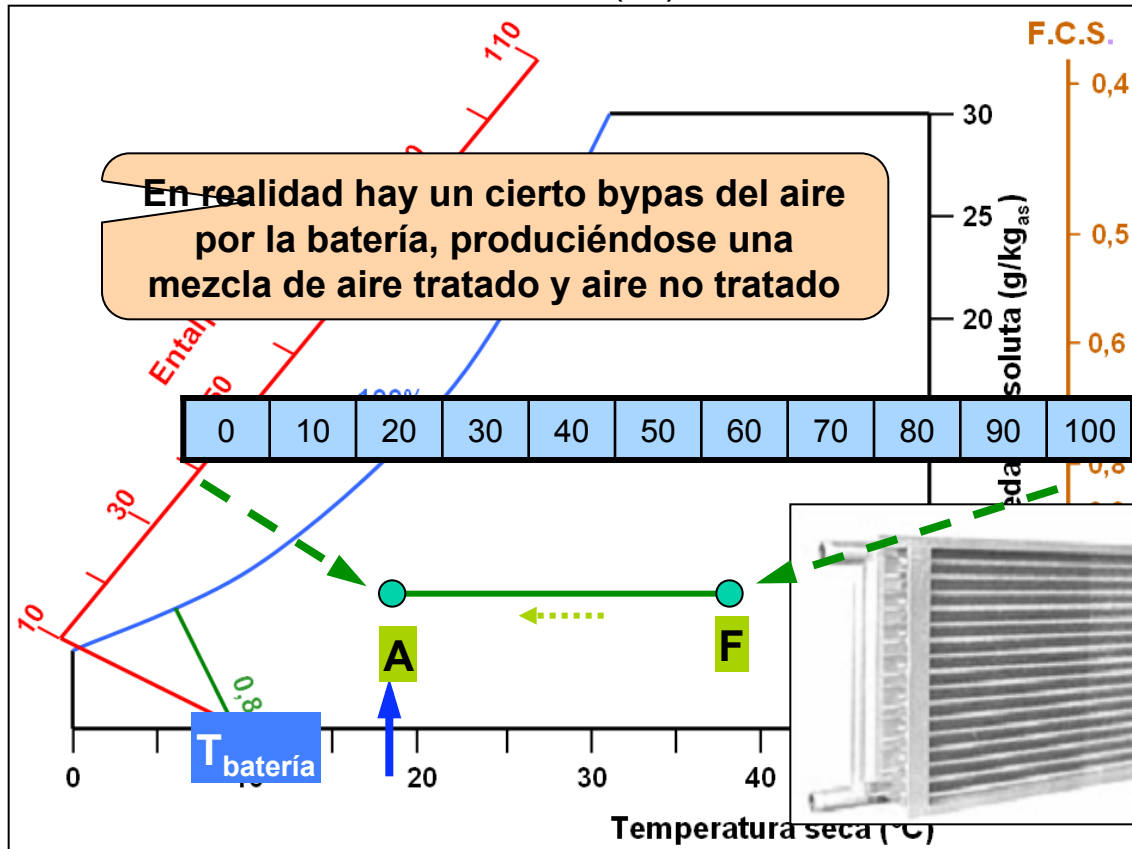
No varía la humedad absoluta (W)



Q calor aportado (kCal / h)  
 $Q = 0,24 M_{aire} (T_F - T_A)$   
 $Q = M_{aire} (h_A - h_F)$

$$FB = \frac{M_{aire \text{ no tratada}}}{M_{aire \text{ total}}}$$

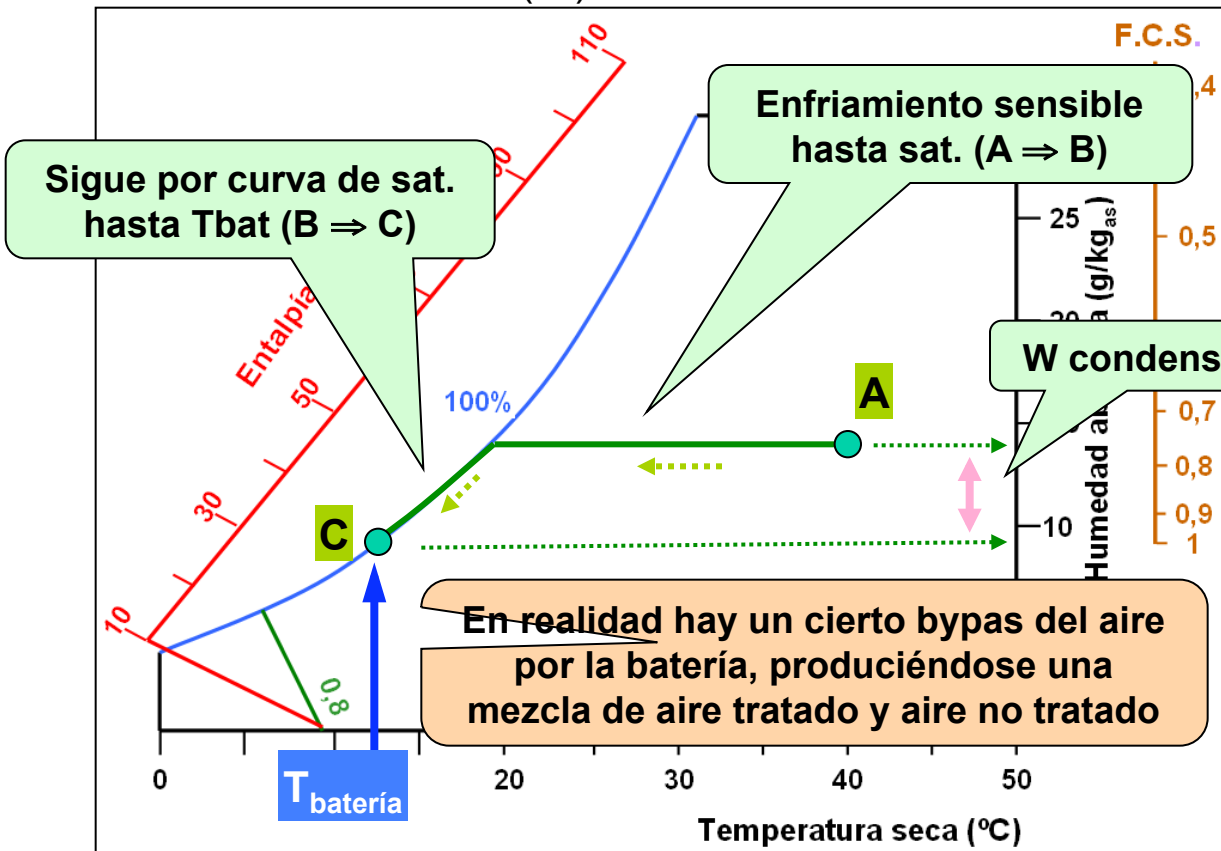
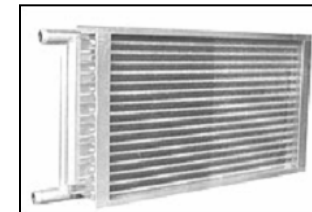
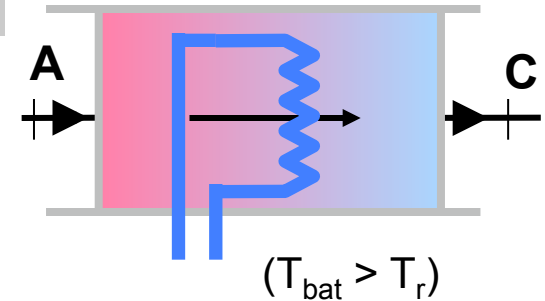
- nº filas
- Aletas
- Separación entre filas
- Separación entre aletas
- Velocidad del aire



4.- Las Transformaciones Psicrométricas (IV)

**Enfriamiento con deshumidificación**

Paso por una batería fría a  $T_{bat} < T_r$   
Condensa humedad (W)



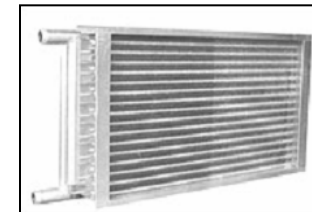
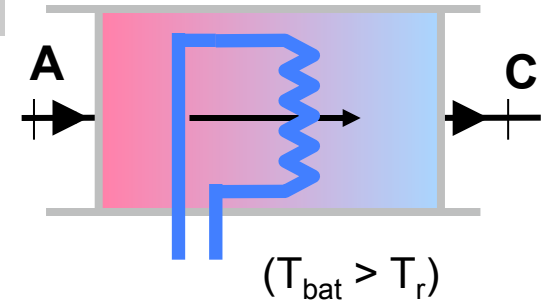
$$FB = \frac{M_{\text{aire no tratada}}}{M_{\text{aire total}}}$$

- nº filas
- Aletas
- Separación entre filas
- Separación entre aletas
- Velocidad del aire

4.- Las Transformaciones Psicrométricas (IV)

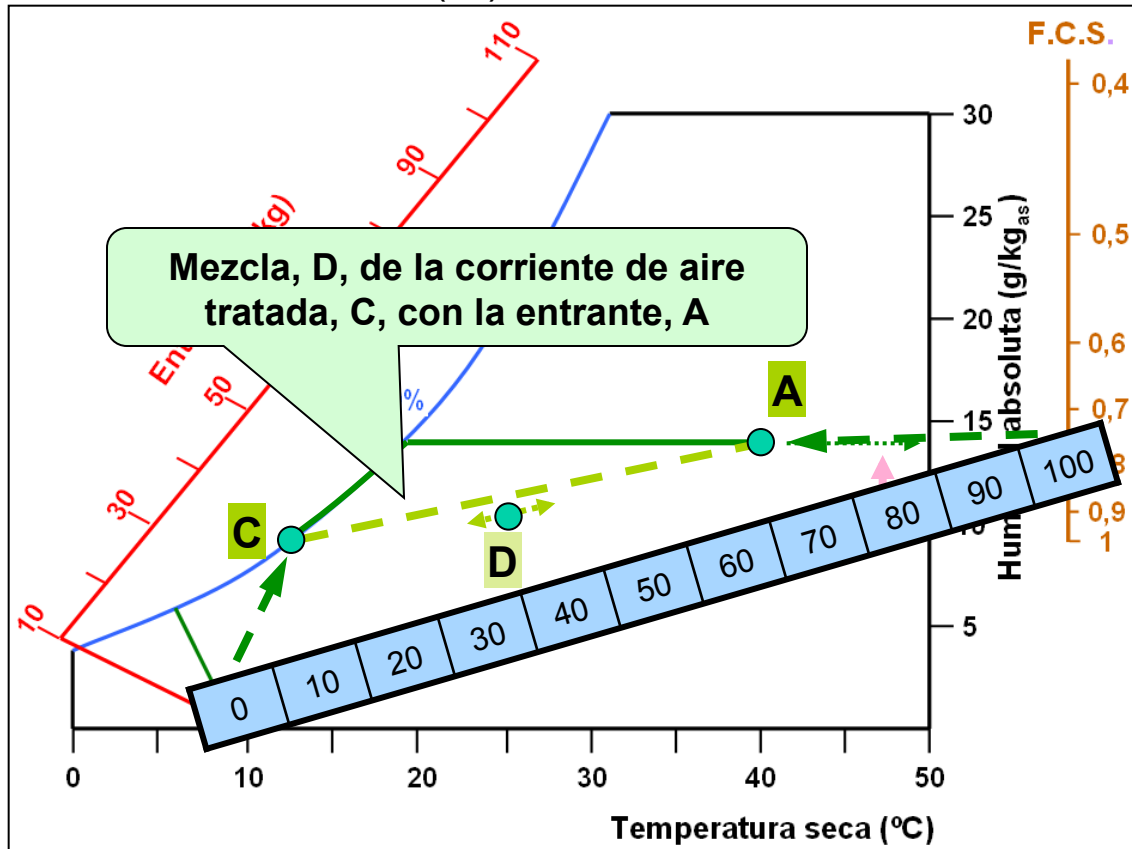
**Enfriamiento con deshumidificación**

Paso por una batería fría a  $T_{bat} < T_r$   
Condensa humedad (W)



$$FB = \frac{M_{\text{aire no tratada}}}{M_{\text{aire total}}}$$

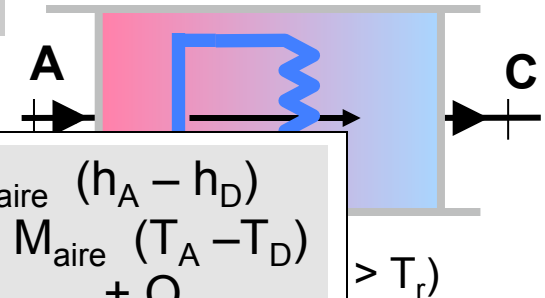
- nº filas
- Aletas
- Separación entre filas
- Separación entre aletas
- Velocidad del aire



4.- Las Transformaciones Psicrométricas (IV)

**Enfriamiento con deshumidificación**

Paso por una batería fría a  $T_{bat} < T_r$   
Condensa humedad (W)



$$Q_{sustraido} = M_{aire} (h_A - h_D)$$

$$Q_{sensible} = 0,24 M_{aire} (T_A - T_D)$$

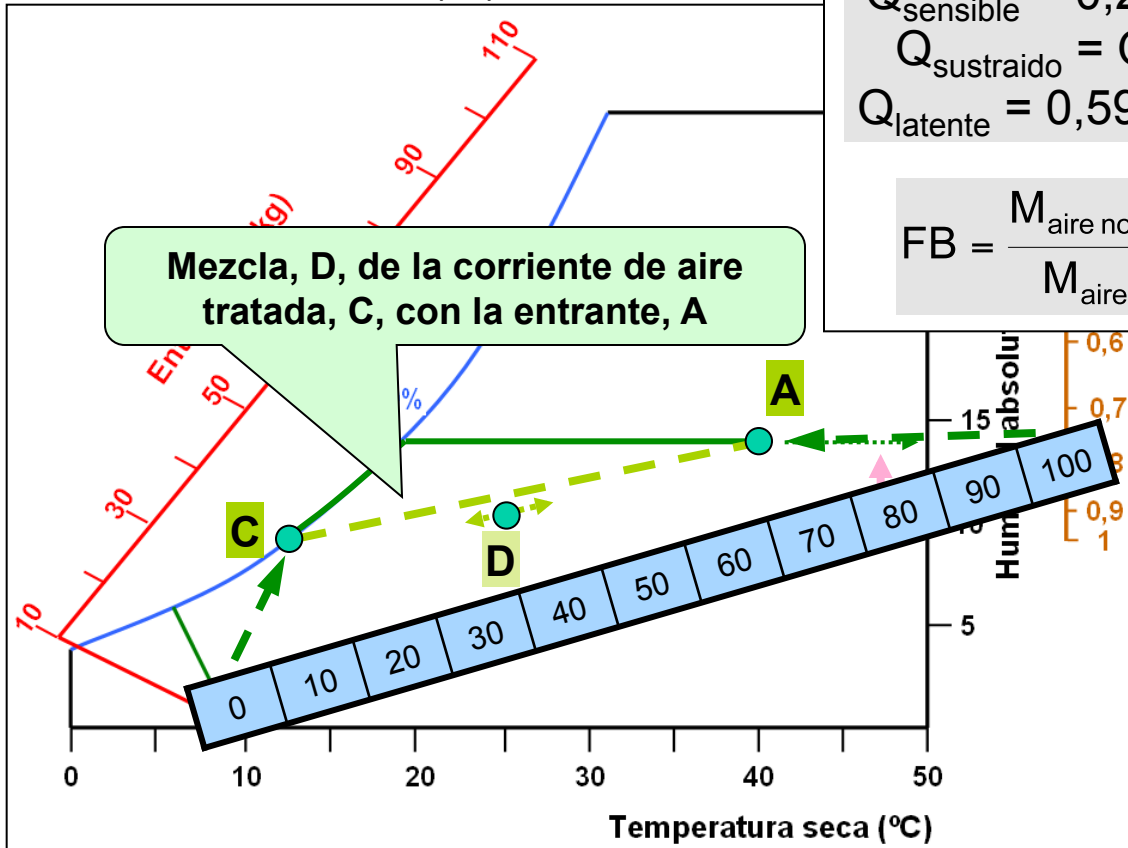
$$Q_{sustraido} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

$$Q_{latente} = 0,595 M_{aire} (w_A - w_D)$$

$$FB = \frac{M_{aire \text{ no tratada}}}{M_{aire \text{ total}}} \approx \frac{T_D - T_C}{T_A - T_C}$$

$$FB = \frac{M_{aire \text{ no tratada}}}{M_{aire \text{ total}}}$$

- nº filas
- Aletas
- Separación entre filas
- Separación entre aletas
- Velocidad del aire

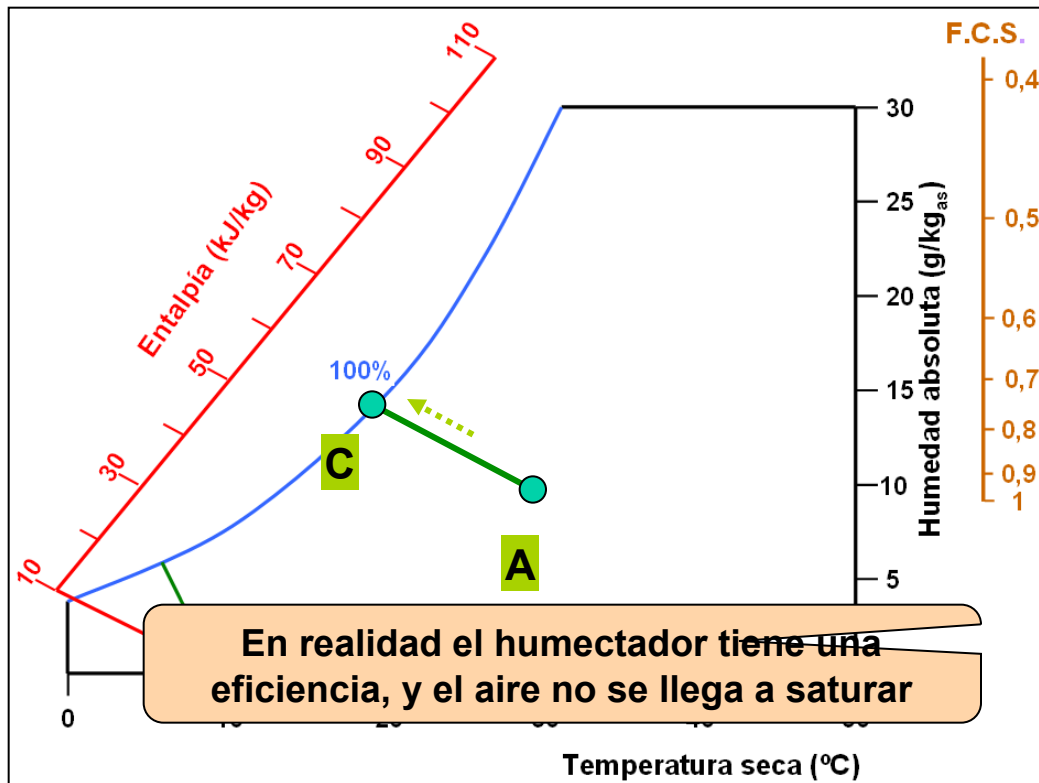
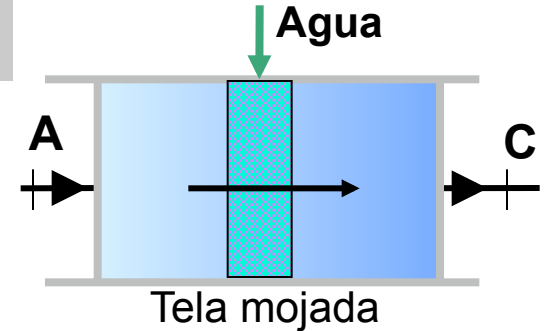


4.- Las Transformaciones Psicrométricas (V)

**Enfriamiento y humidificación**

Pasando aire por pulverizadores de agua recirculada en una cámara térmicamente aislada

Se realiza a  $T_h \approx cte \Rightarrow h \approx cte$



$T_C = T_h$  del aire y de equilibrio agua

Eficiencia de sat

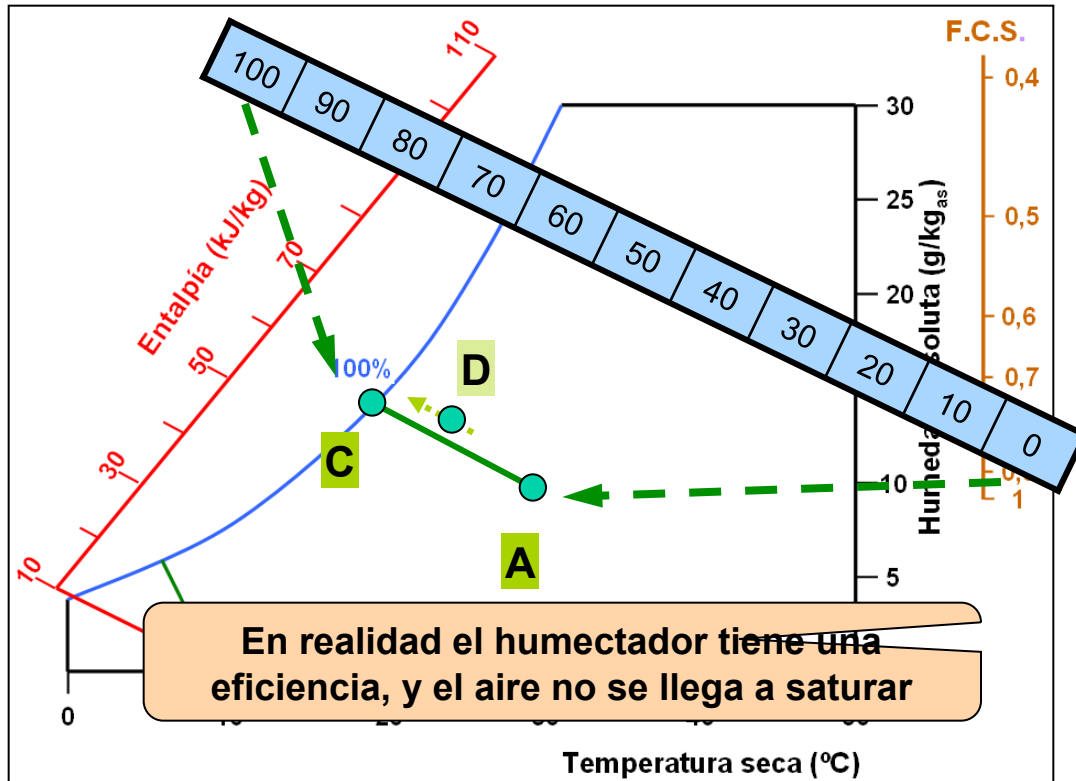
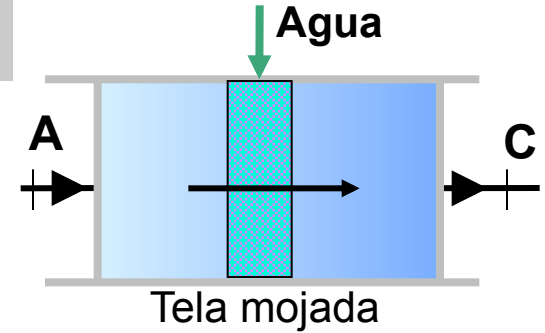
$$E = \frac{T_A - T_C}{T_A - T_B}$$

4.- Las Transformaciones Psicrométricas (V)

**Enfriamiento y humidificación**

Pasando aire por pulverizadores de agua recirculada en una cámara térmicamente aislada

Se realiza a  $T_h \approx cte \Rightarrow h \approx cte$



$T_C = T_h$  del aire y de equilibrio agua

Eficiencia de sat

$$E = \frac{T_A - T_C}{T_A - T_B}$$



## 4.- Las Transformaciones Psicrométricas (VI)

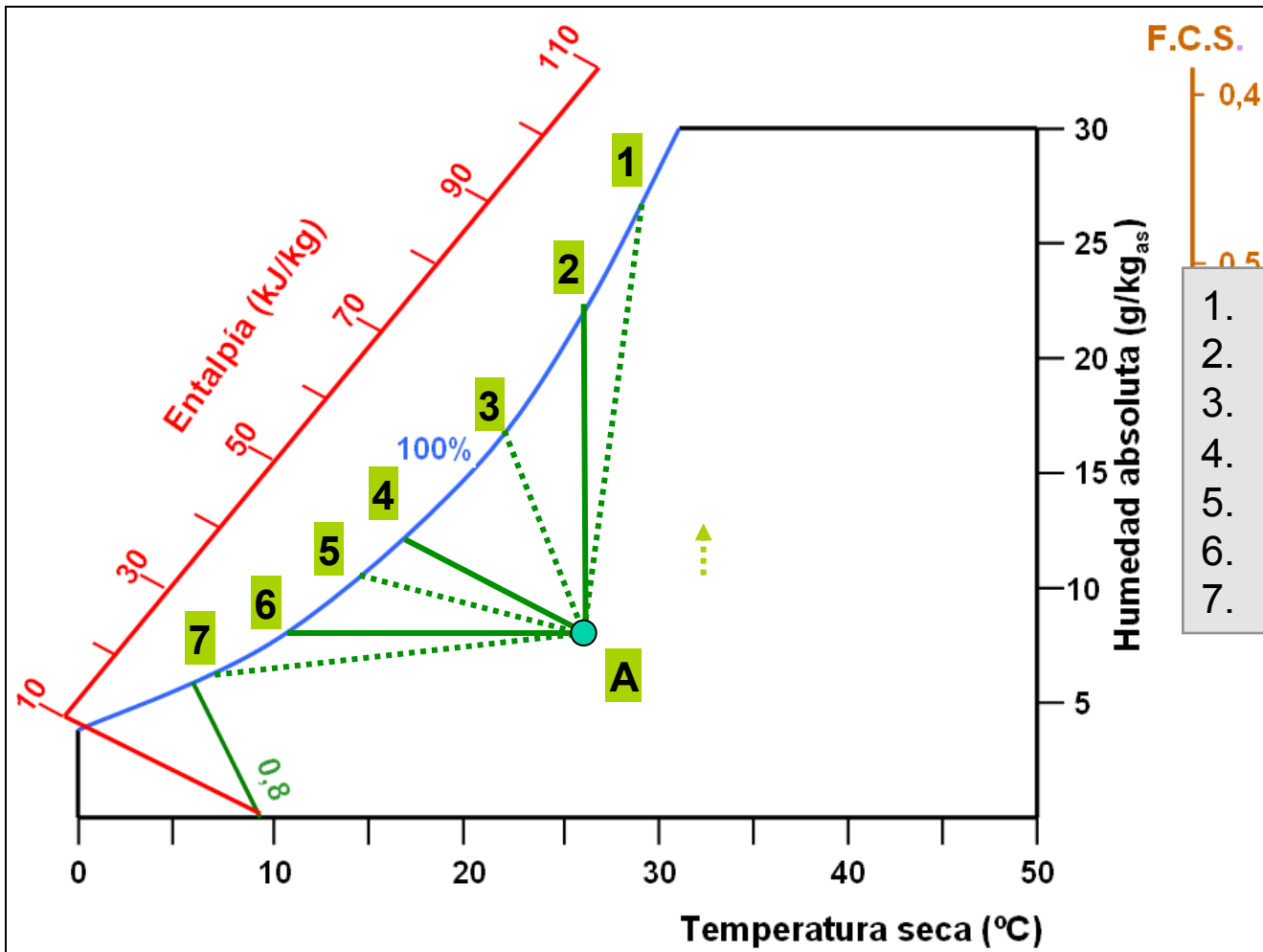
### ***Paso del aire por una cortina de agua (I):***

múltiples posibilidades  $f(T_s, T_h, T_{ag})$

1.  $T_{ag} > T_s$ , pulverizando agua caliente, o inyectando vapor de agua el aire se calienta y se humecta, por lo que su  $h$  aumenta
2.  $T_{ag} = T_s$ , el aire se humecta aumentando su  $h$
3.  $T_{ag} < T_s$ ,  $T_{ag} > T_h$ , el aire se enfría y se humecta, pero gana  $h$
4.  $T_{ag} = T_h$ , el aire se enfría y se humecta, con  $h$  cte (saturación adiabática)
5.  $T_{ag} < T_h$ ,  $T_{ag} > T_r$ , el aire se enfría y se humecta, pero perdiendo  $h$
6.  $T_{ag} = T_r$ , el aire se enfría sin cambio en su humedad, pierde  $h$
7.  $T_{ag} < T_r$ , el aire se enfría perdiendo humedad, por lo que pierde  $h$

4.- Las Transformaciones Psicrométricas (VII)

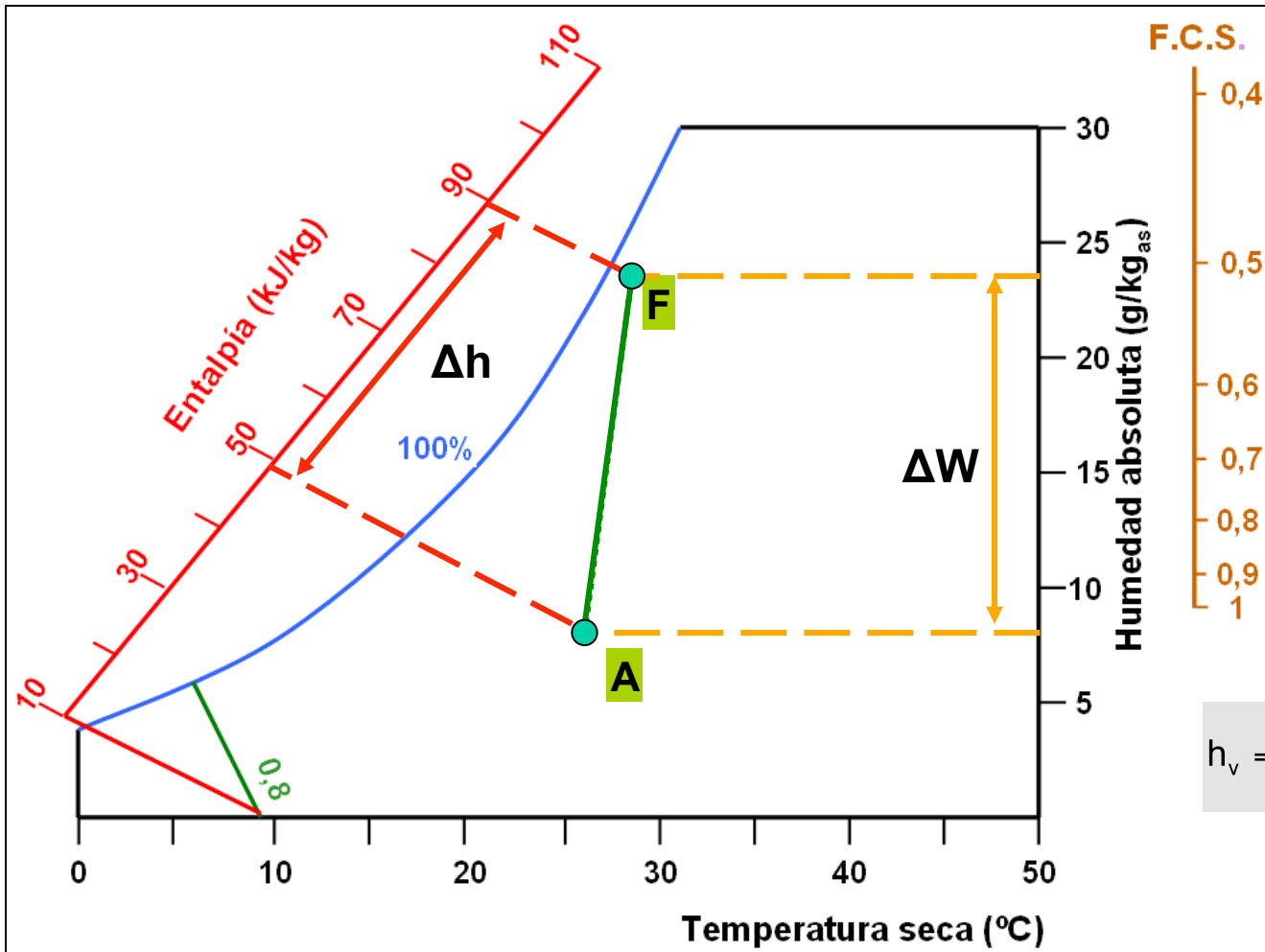
*Paso del aire por una cortina de agua (II):*



1.  $T_{ag} > T_s$
2.  $T_{ag} = T_s$
3.  $T_{ag} < T_s$ ,  $T_{ag} > T_h$
4.  $T_{ag} = T_h$
5.  $T_{ag} < T_h$ ,  $T_{ag} > T_r$
6.  $T_{ag} = T_r$
7.  $T_{ag} < T_r$

4.- Las Transformaciones Psicrométricas (VIII)

**Humectación con vapor de agua:**



$$W_F = W_1 + \Delta W_{\text{vapor}}$$

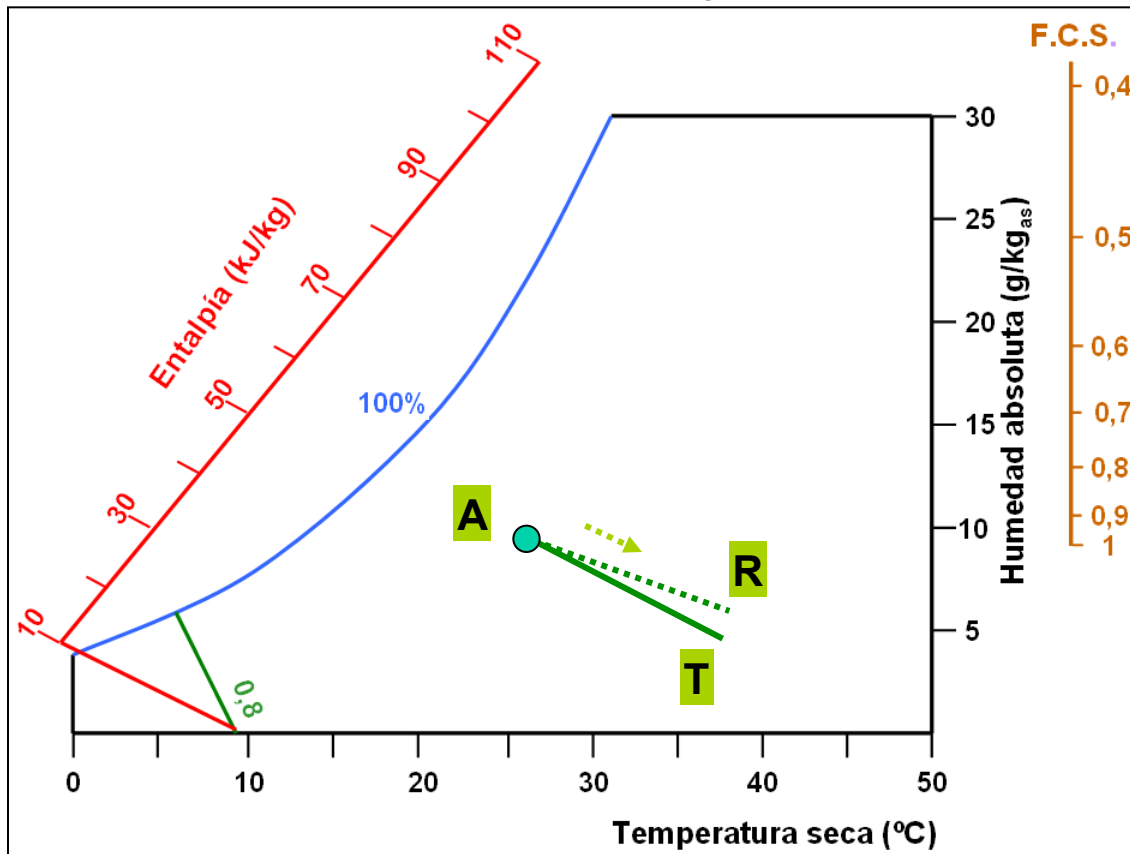
$$h_F = h_1 + h_v$$

$$h_v = (2.501 + 1,86 T_{\text{vapor}}) W \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

## 4.- Las Transformaciones Psicrométricas (IX)

### **Calentamiento con deshumidificación;**

pasando el aire por un material absorbente sólido, el aire se calienta y crece porque el absorbente libera algo del calor de condensación al aire



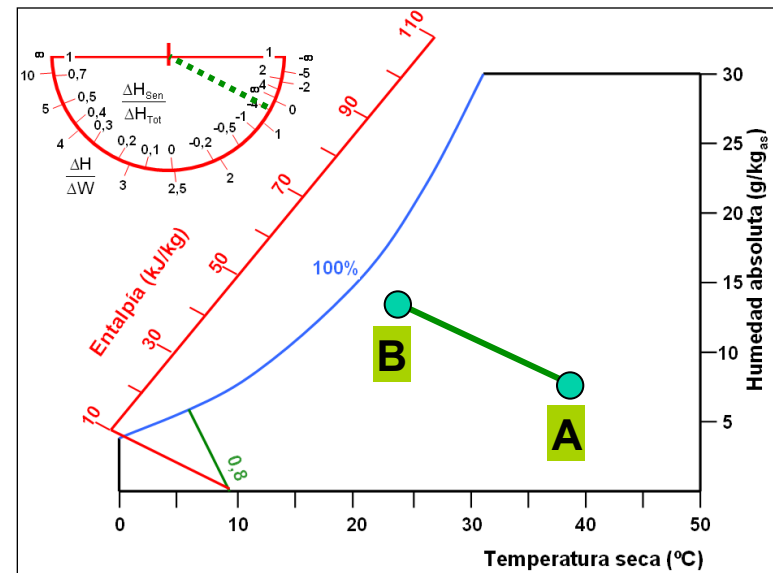
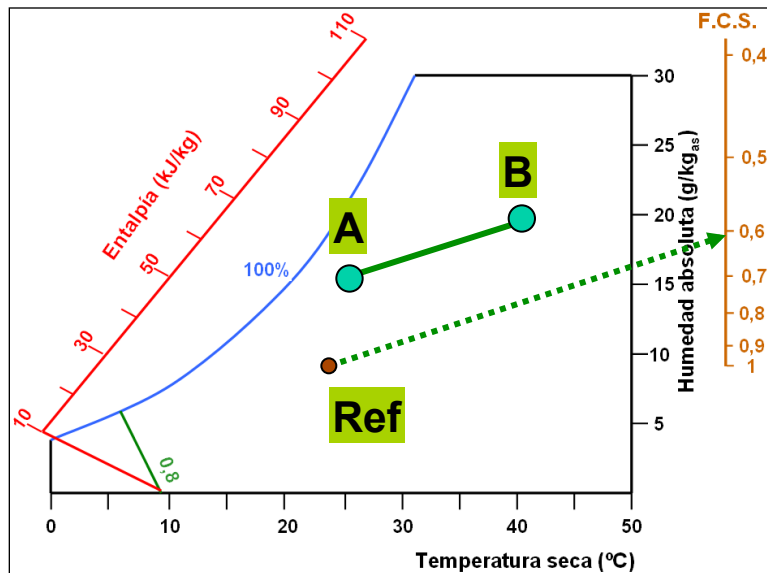
## 4.- Las Transformaciones Psicrométricas (X)

En las **transformaciones con sólo una corriente de aire**

**El FCS:** porcentaje de calor sensible sobre el calor total

Una escala en la dcha del diagrama, referida a  $T_s$  24°C y 50% HR

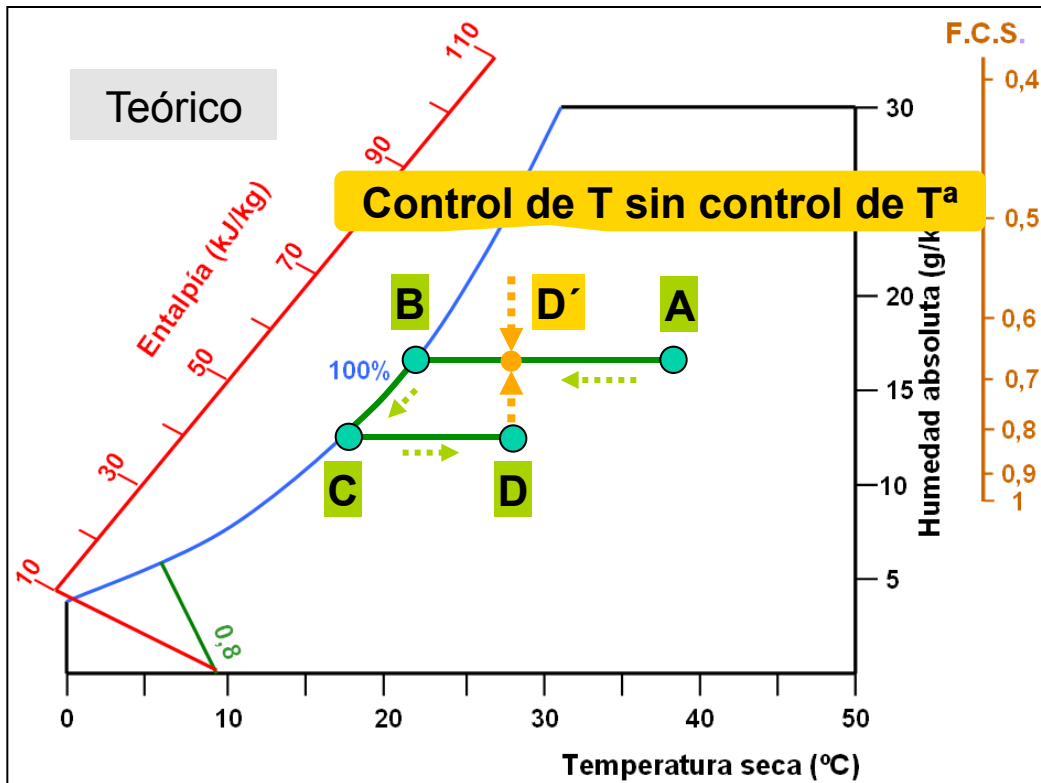
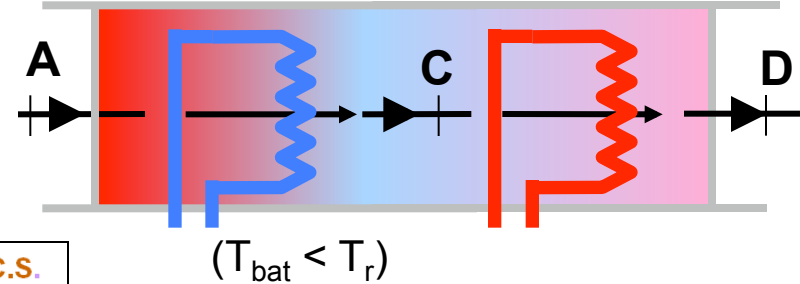
La **recta de maniobra** en un semicírculo en la parte superior del diagrama, relaciona el porcentaje de calor sensible como la humedad aportada al aire



## 4.- Las Transformaciones Psicrométricas (XI)

### Control de T y HR en verano

(enfriamiento con deshumidificación y postcalentamiento)



**Gran gasto energético**

$$Q_{AC} = m_{as} (h_A - h_C) \text{ Ref.}$$

$$Q_{CD} = m_{as} (h_D - h_C) \text{ Cal.}$$

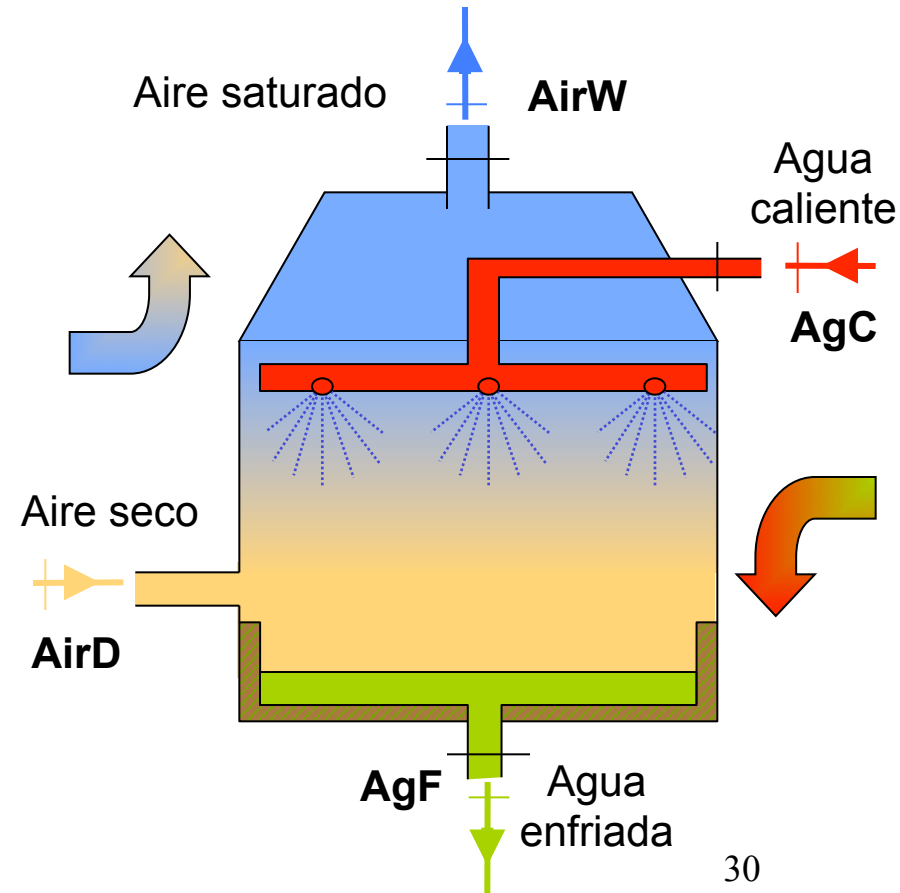
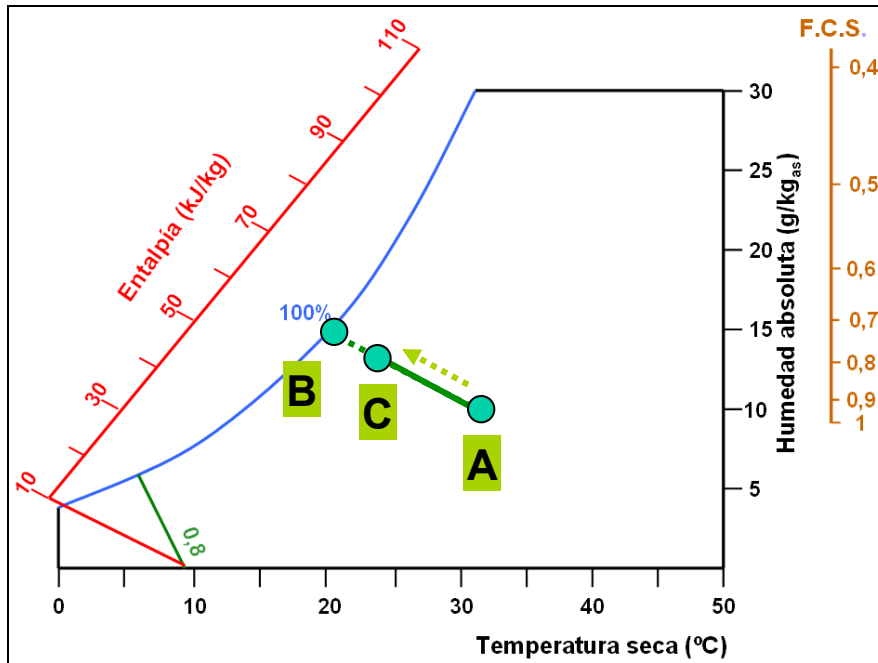
$h_A$ ,  $h_C$ , y  $h_D$  las del aire húmedo

$$Q_{AD'} = m_{as} (h_A - h_{D'}) \text{ Ref.}$$

4.- Las Transformaciones Psicrométricas (XII)

**Torre de refrigeración**

El aire se satura adiabáticamente



$$m_{as} (w_{AirW} - w_{AirD}) = m_{AgC} - m_{AgF}$$

$$Q_{Ag} = Q_{Air} \Rightarrow m_{as} c_{pas} \Delta T_{Air} = m_{ag} c_{pag} \Delta T_{ag}$$