

GUÍA 8 - Humidificación

Problema 5

1° Cuatrimestre - 2026

Enunciado

En una torre de enfriamiento se enfrían 2000 kg/h de agua de 40°C a 28°C. La torre opera en contracorriente con un caudal de aire húmedo de entrada de 2475 m³/h. Se sabe que el aire ingresa a la torre con una temperatura de 15,5°C y una humedad relativa del 10%.

Determinar:

- a) La temperatura de bulbo húmedo del aire que sale de la torre.
- b) La humedad relativa del aire de salida.
- c) La cantidad de agua evaporada por hora.
- d) Los valores de temperatura, humedad y entalpía en la interfase y los perfiles correspondientes a la entrada y a la salida de la torre.

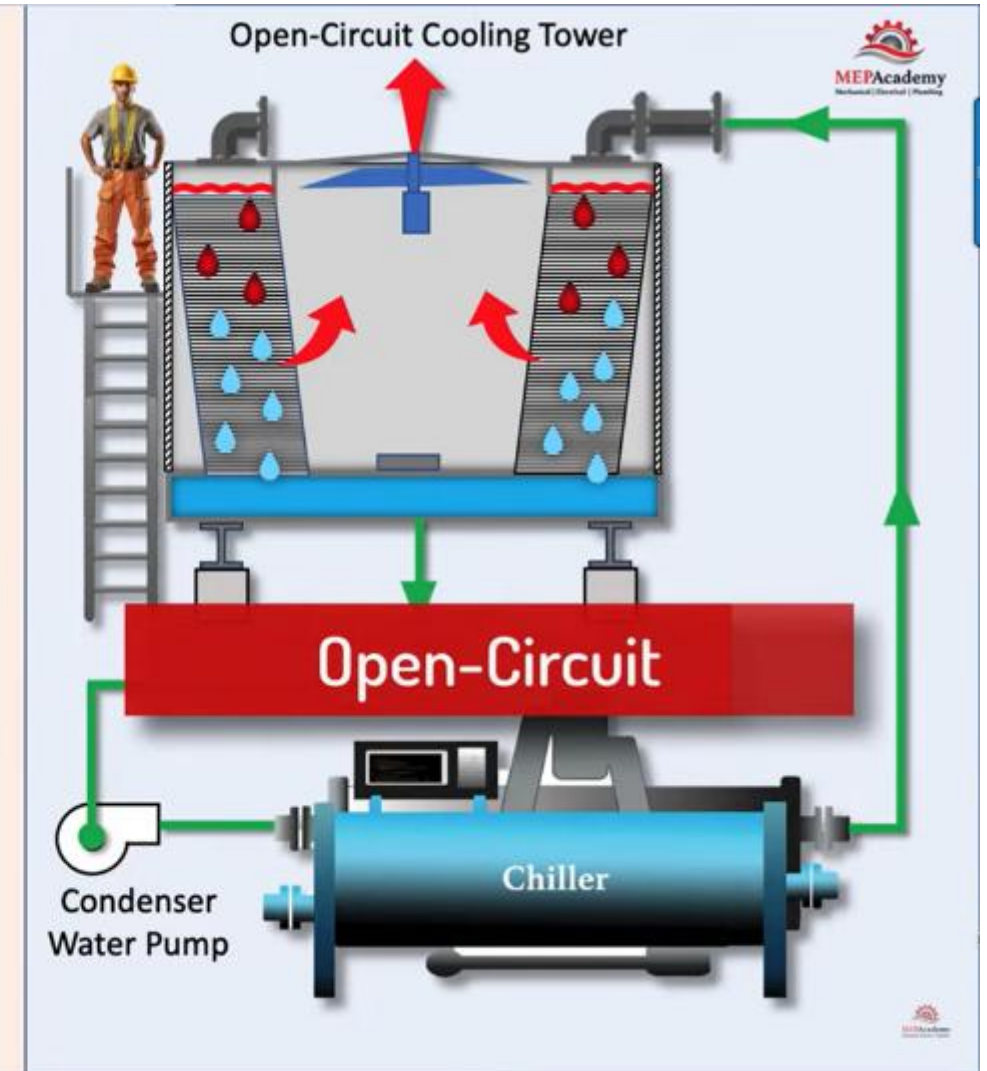
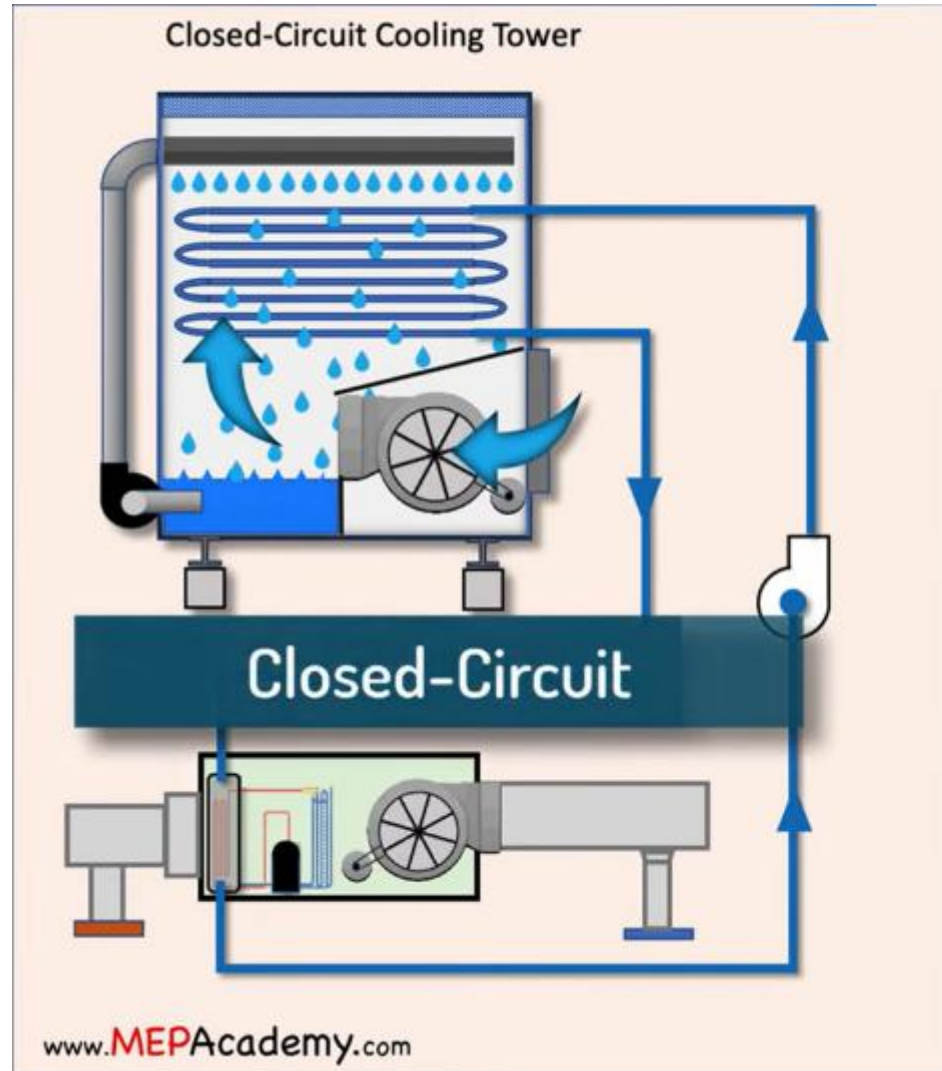
Datos:

- $$\frac{h_L \cdot a}{k_y \cdot a \cdot c_L} = 1$$

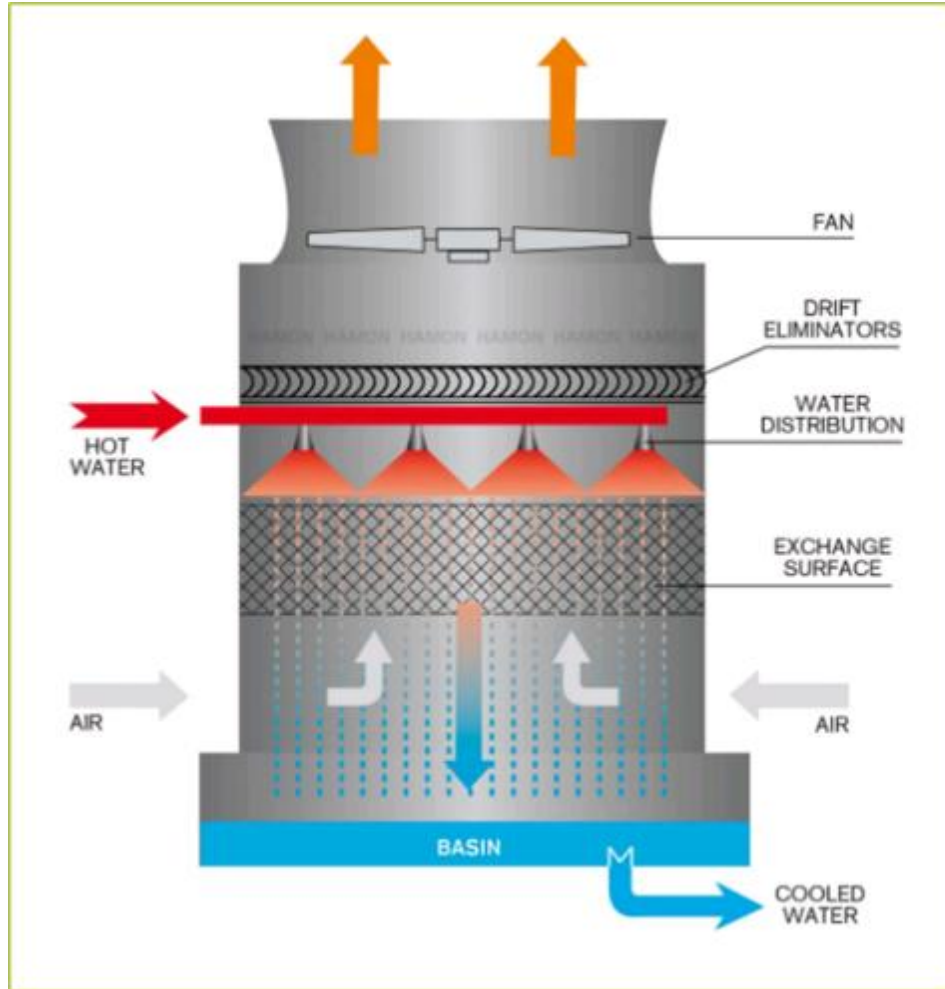
Ejemplos a nivel industrial

Según nuestro sistema, los requerimientos de enfriamiento, disponibilidad en layout, costo de inversión inicial, calidad del agua requerida, cantidad de make-up deseado se suelen distinguir dos opciones para torres de enfriamiento:

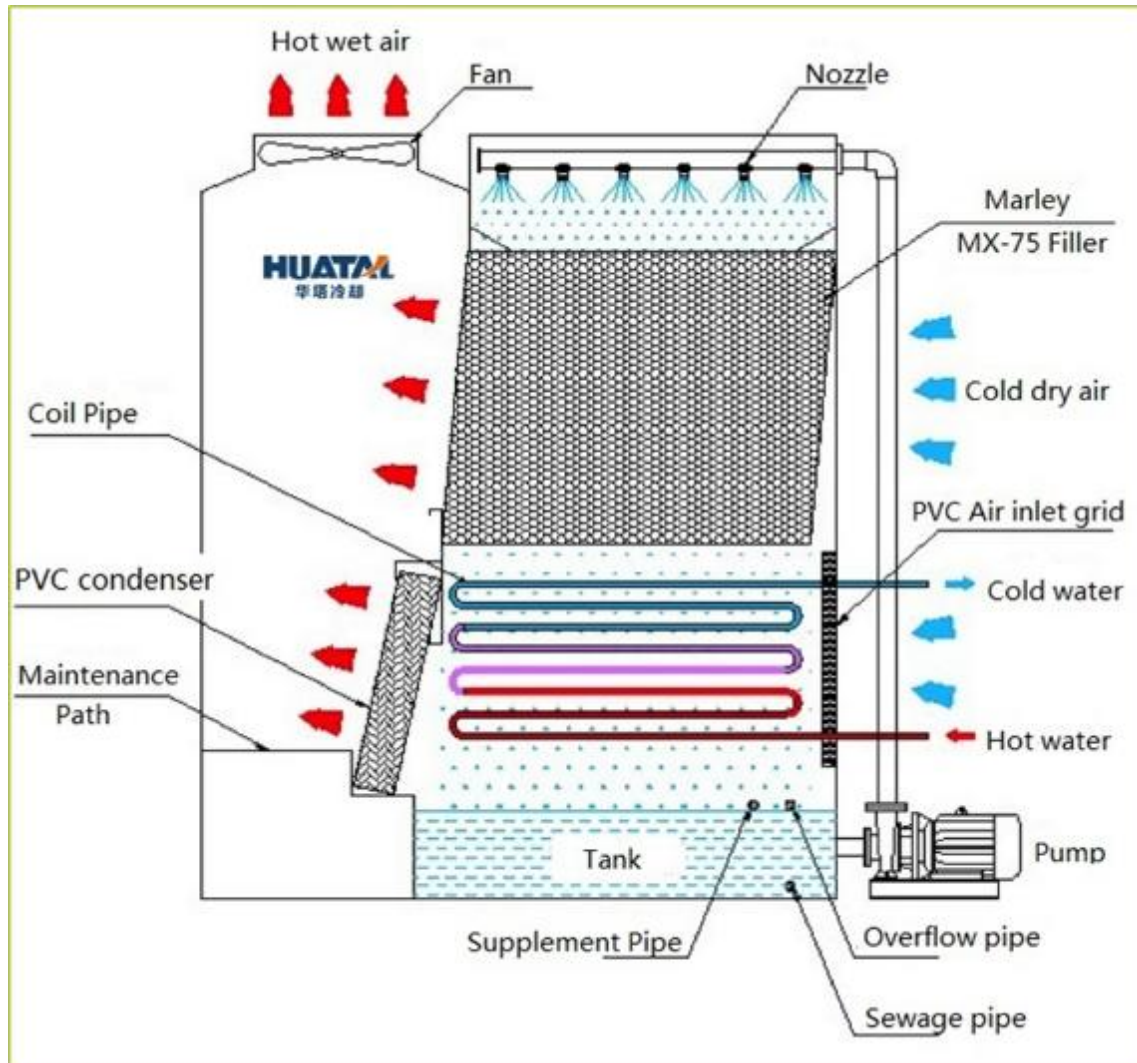
- Circuito cerrado
- Circuito abierto



Ejemplos a nivel industrial (cont.)



Ejemplos a nivel industrial (cont.)



Resolución – Ítem a) t_{BH} de salida

Hipótesis:

$$L \cong cte (\Delta L \text{ de } 1 - 3\%)$$

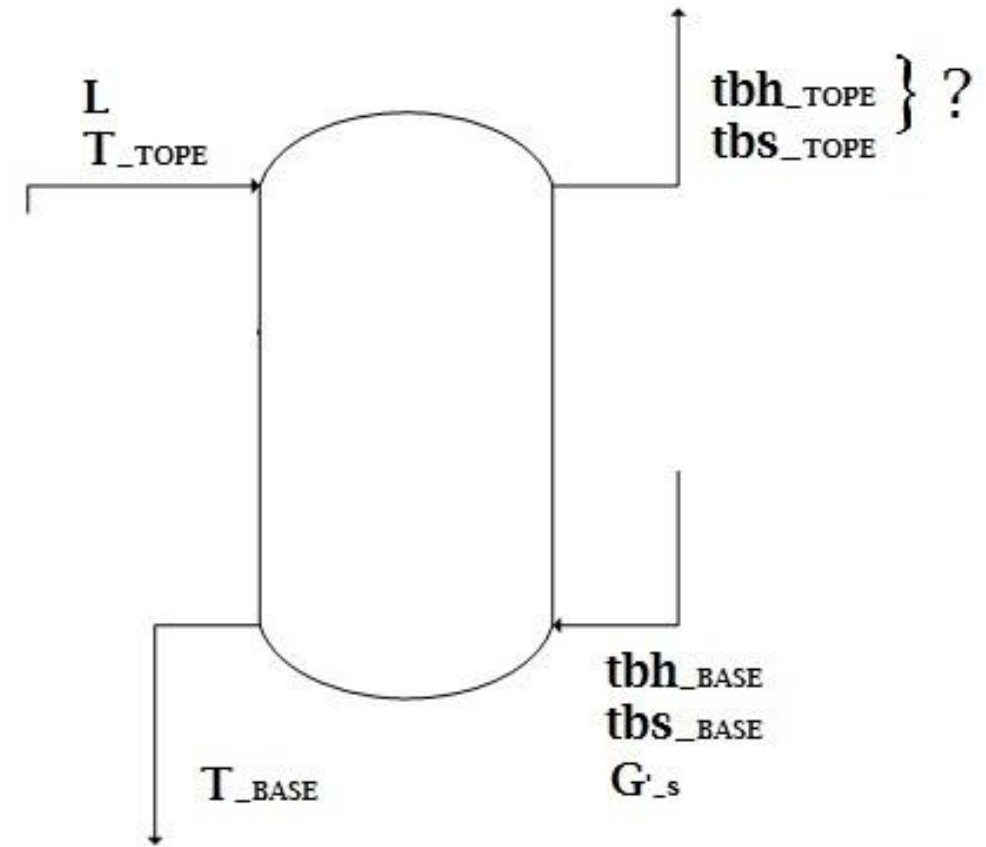
$$\lambda, C_S, C_L \neq f(T)$$

$$Le = 1$$

BME:

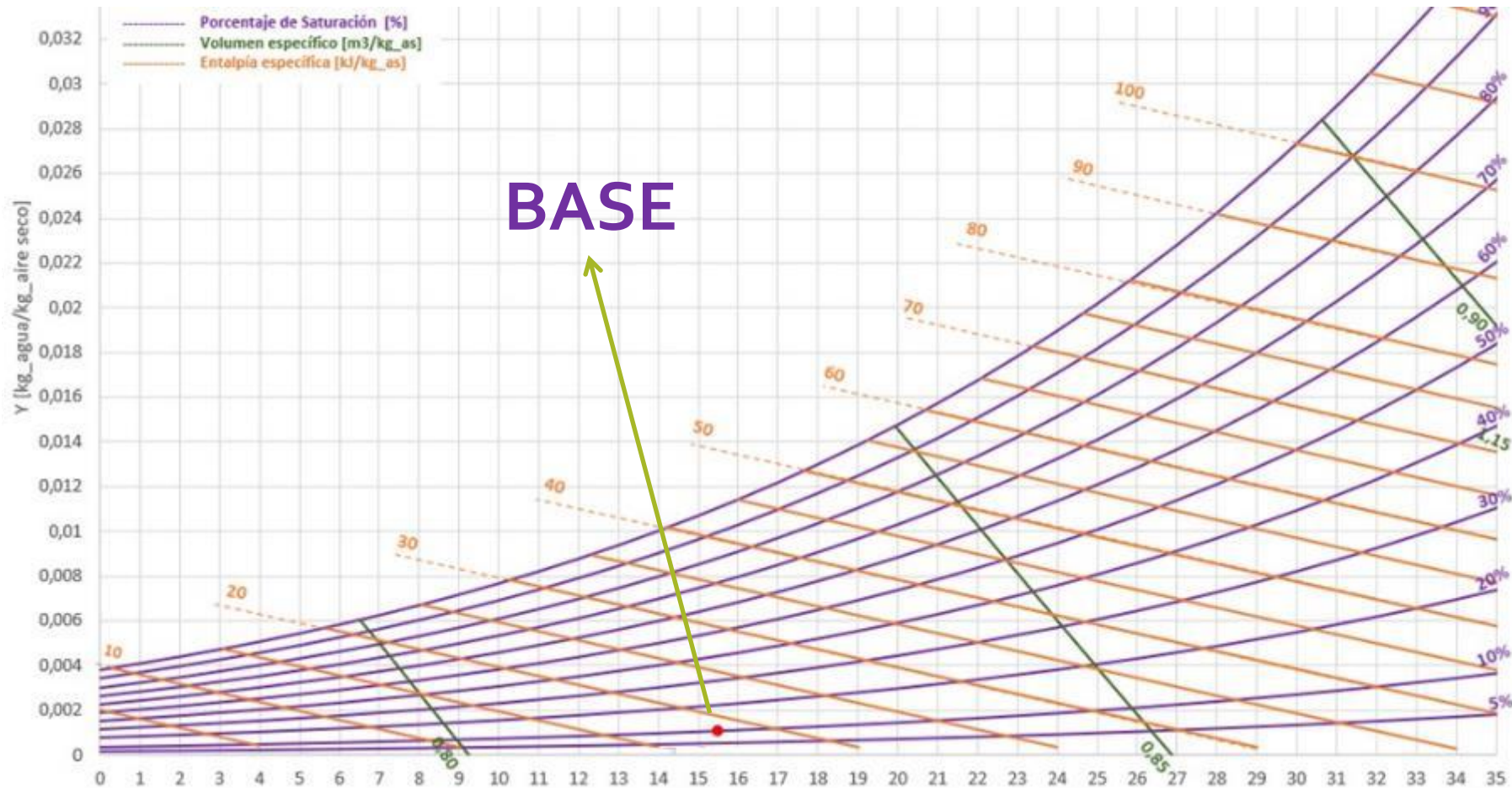
$$L \cdot c_L \cdot T_T + G_S \cdot H_B = L \cdot c_L \cdot T_B + G_S \cdot H_T$$

$$\frac{L \cdot c_L}{G_S} = \frac{H_T - H_B}{T_T - T_B}$$



Datos de entrada

Conociendo dos datos del punto de entrada, se puede ubicar en el diagrama. Lo obtenemos con temperatura y humedad relativa de entrada.



$$H_B = 19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco}}$$

$$Y_B = 0,00105 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$$

$$v_{h_B} = 0,82 \frac{\text{m}^3 \text{ aire húmedo}}{\text{kg aire seco}}$$

Resolución – Ítem a) t_{BH} de salida

Además, con el dato del volumen específico, podemos calcular caudal másico de aire:

$$G_s = \frac{G_B^V}{v h_B} = \frac{2475 \text{ m}^3/\text{h}}{0,82 \text{ m}^3/\text{kg}_{as}} = 3018,3 \frac{\text{kg}_{as}}{\text{h}}$$

Resolución – Ítem a) t_{BH} de salida

Con el dato del volumen específico, podemos calcular caudal másico de aire:

$$G_s = \frac{G_B^V}{v h_B} = \frac{2475 \text{ m}^3/\text{h}}{0,82 \text{ m}^3/\text{kg}_{as}} = 3018,3 \frac{\text{kg}_{as}}{\text{h}}$$

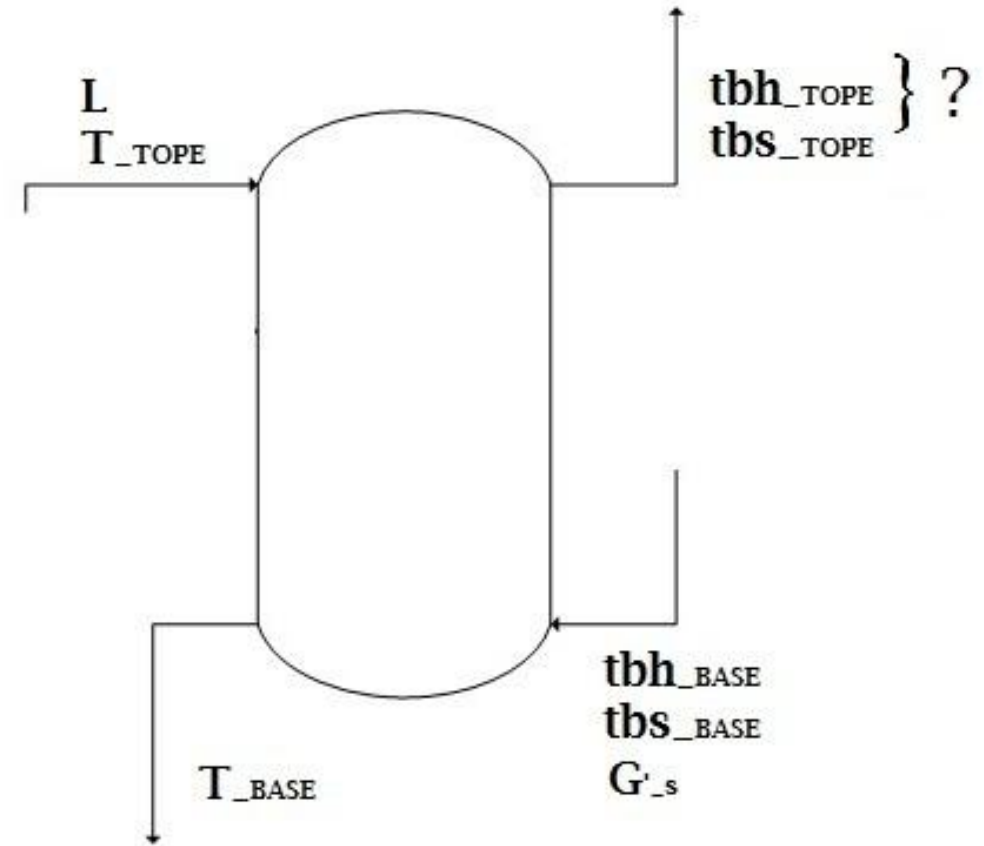
Retomando el BME:

$$\frac{L \cdot c_L}{G_s} = \frac{H_T - H_B}{T_T - T_B}$$

$$\frac{2000 \cdot 4,18}{3018,3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{as}} = \frac{H_T - 19}{40 - 28}$$

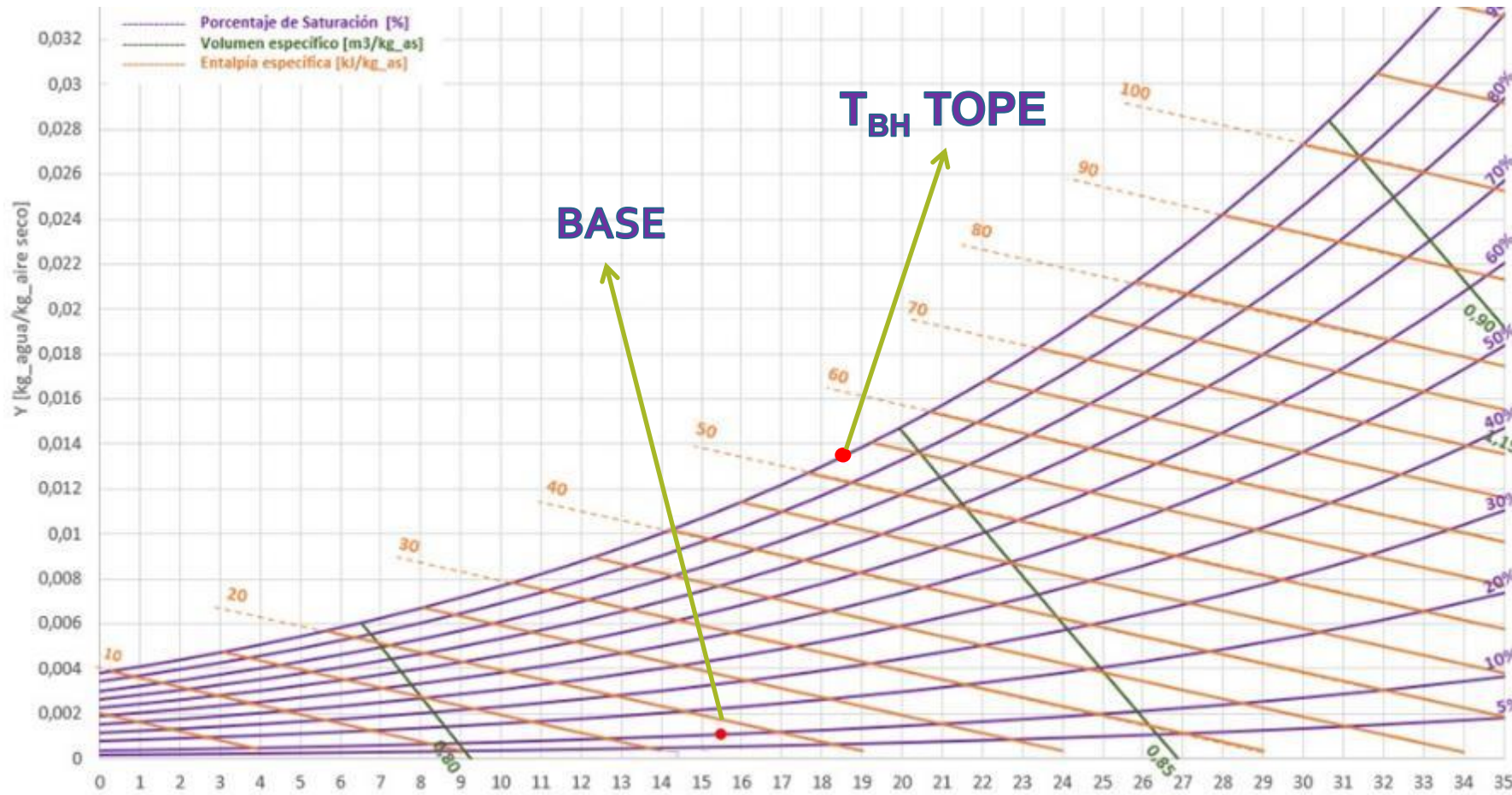
$$c_L = 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$H_T = 52,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{as}}$$



Resolución – Ítem a) t_{bh} de salida

Ubicamos la temperatura de bulbo húmedo del tope a partir del dato de la entalpía de tope.



$$t_{bh}^T = 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Resolución – Ítem b) Φ de salida (%hr)

Ecuación de Diseño:

Partimos de la Ec. de diseño para una torre de enfriamiento y buscamos la **vinculación con la interfase**:

$$\delta Q = L * Cp_L * dT = h_L * a * (T - t_i) * dV \quad [\text{lado líquido}]$$

$$\delta Q = L * Cp_L * dT = k_y * a * (H_i - H) * dV \quad [\text{lado gas}]$$

Dividiendo las expresiones, se obtiene:

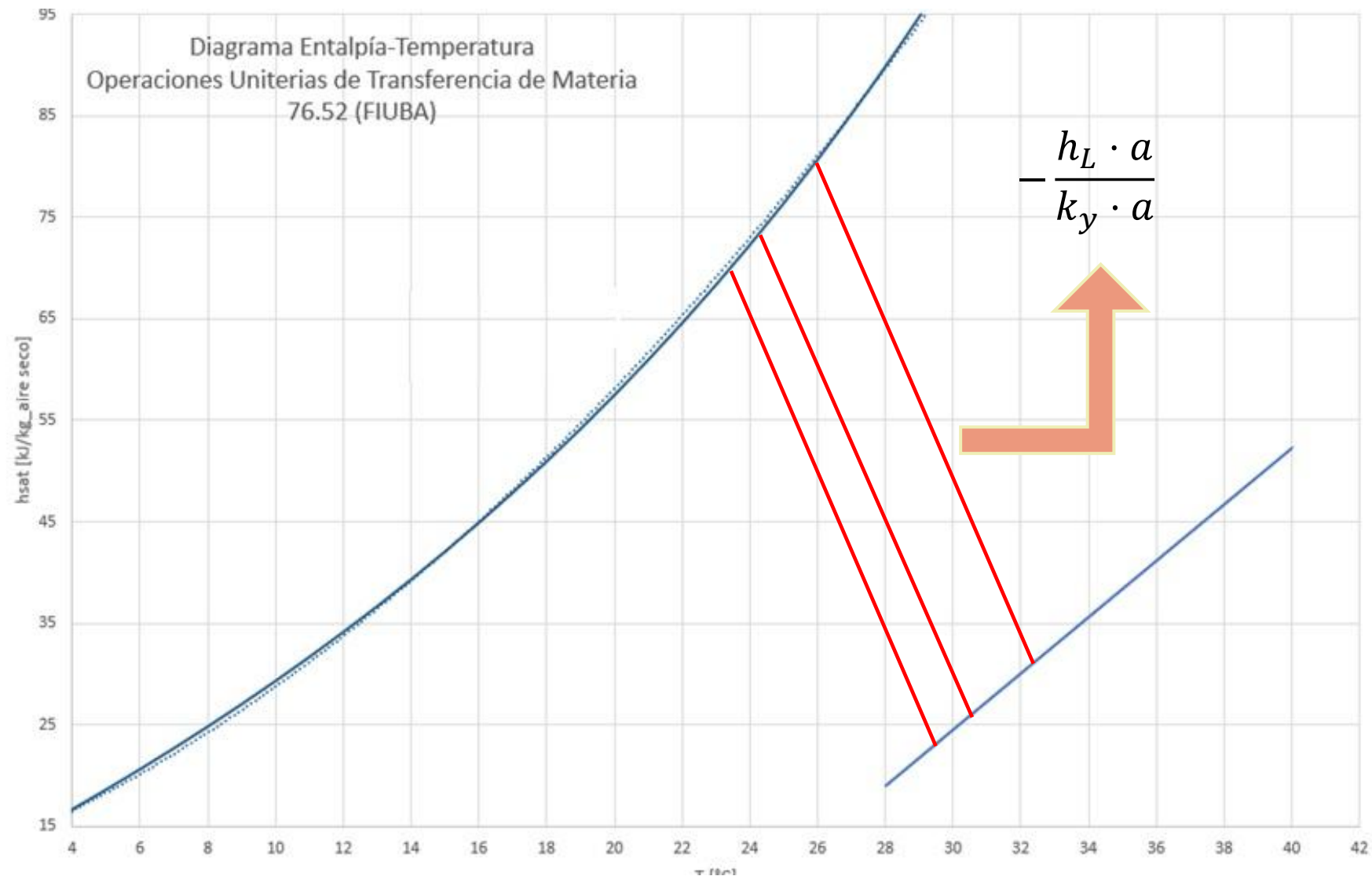
$$-\frac{h_L \cdot a}{k_y \cdot a} = \frac{H_i - H}{t_i - T}$$

Con este resultado podemos conocer la interfase asociada a cualquier punto de la recta de operación; cada punto se encuentra unido a su interfase correspondiente mediante una recta de pendiente:

$$-\frac{h_L \cdot a}{k_y \cdot a} = c_L = 4,186 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

Resolución – Ítem b) Φ de salida (%hr)

Gráficamente:



Resolución – Ítem b) Φ de salida (%hr)

Evolución de Mickley:

Para conocer la evolución del gas en función de la temperatura, partimos de:

$$dQ = G'_S * dH = k_y * a * (H_i - H) * dV$$

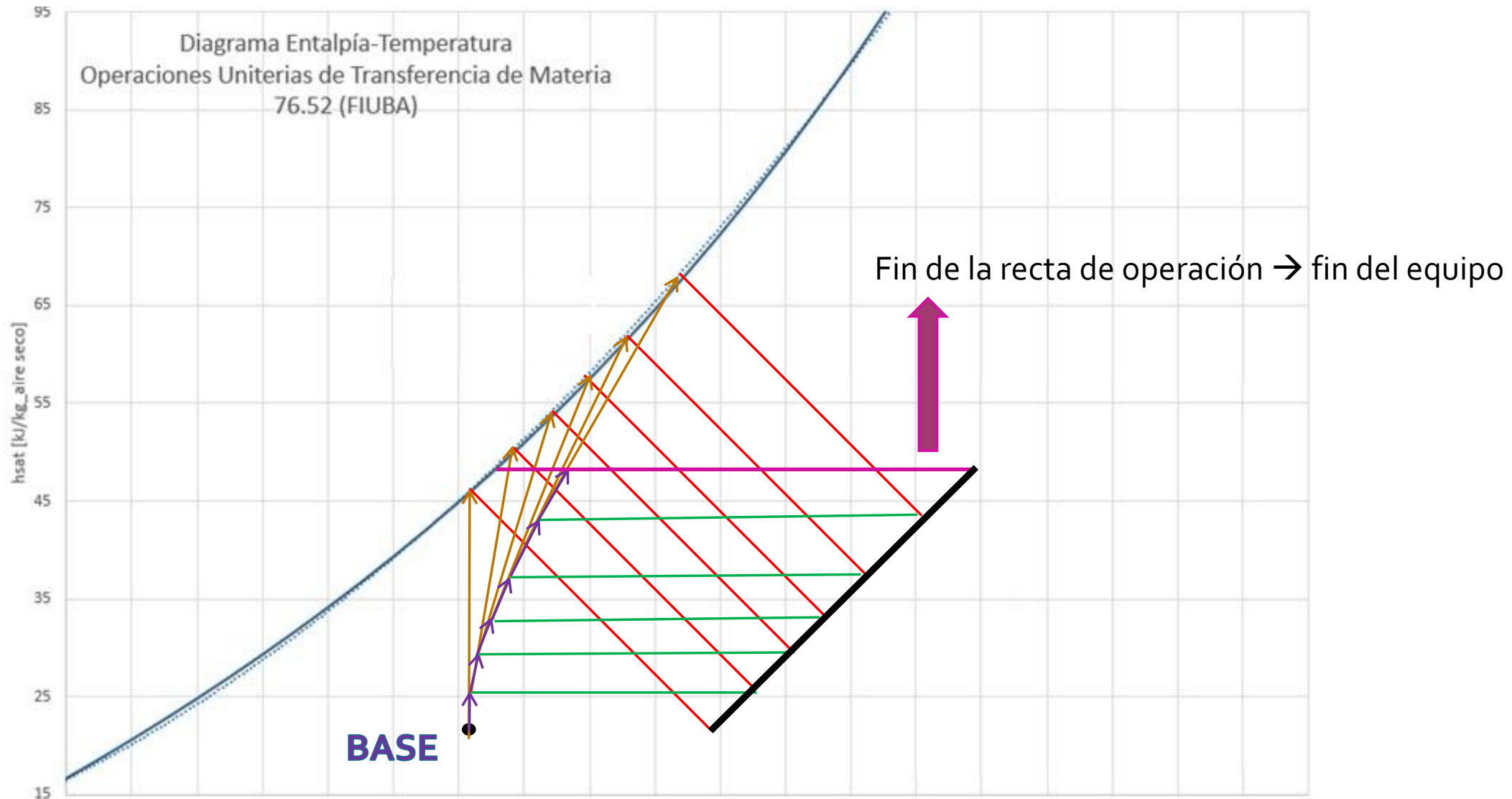
$$dQ_{sensible} = G'_S * C_S * dt = h_L * a * (t_i - t) * dV$$

$$Le = \frac{h_L}{k_y * C_S} = 1$$

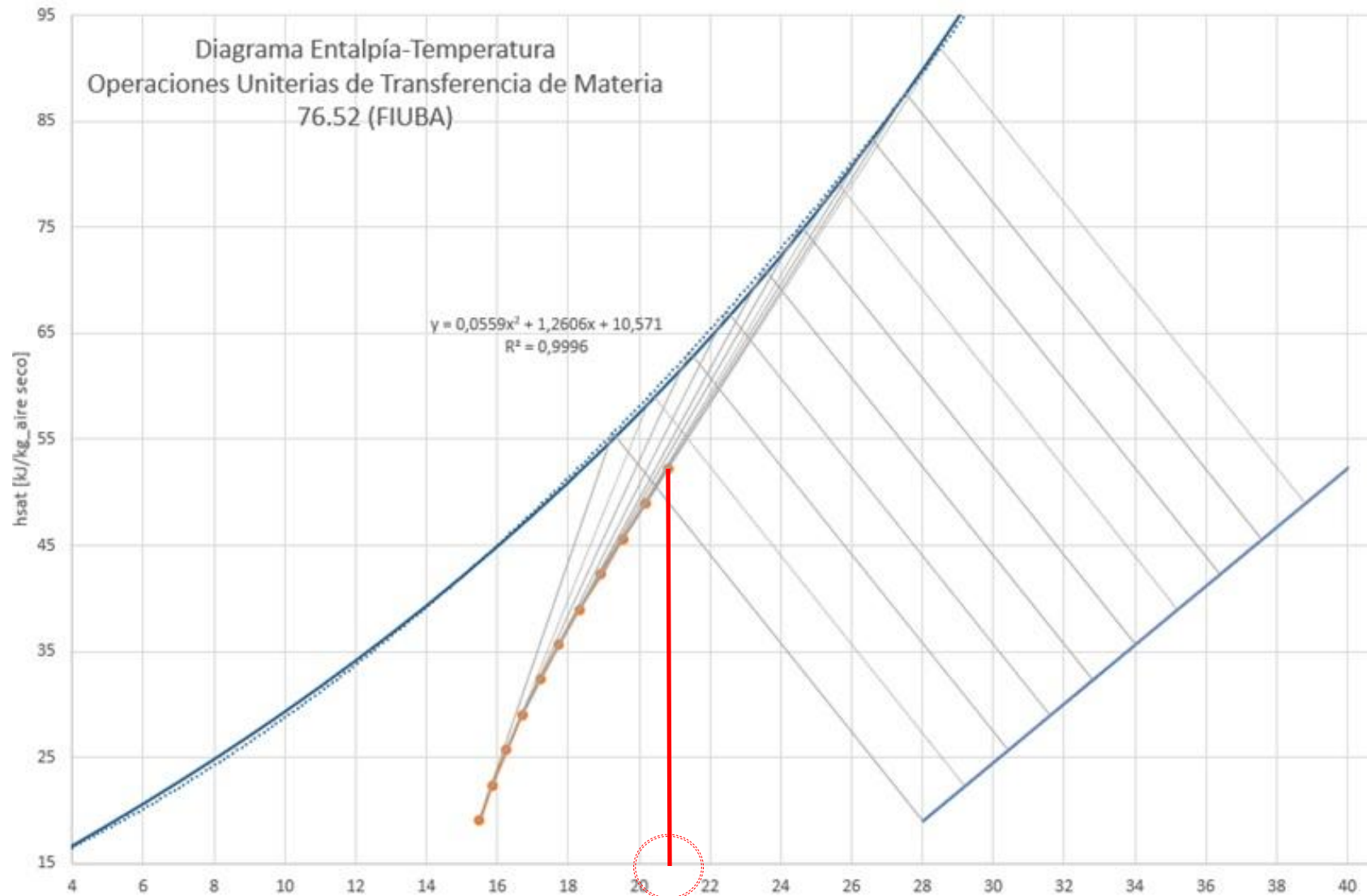
Se dividen las primeras dos ecuaciones y se simplifica considerando el valor del Lewis (=1):

$$\frac{dH}{dt} = \frac{H_i - H}{t_i - t}$$

Resolución – Ítem b) Φ de salida (%hr)

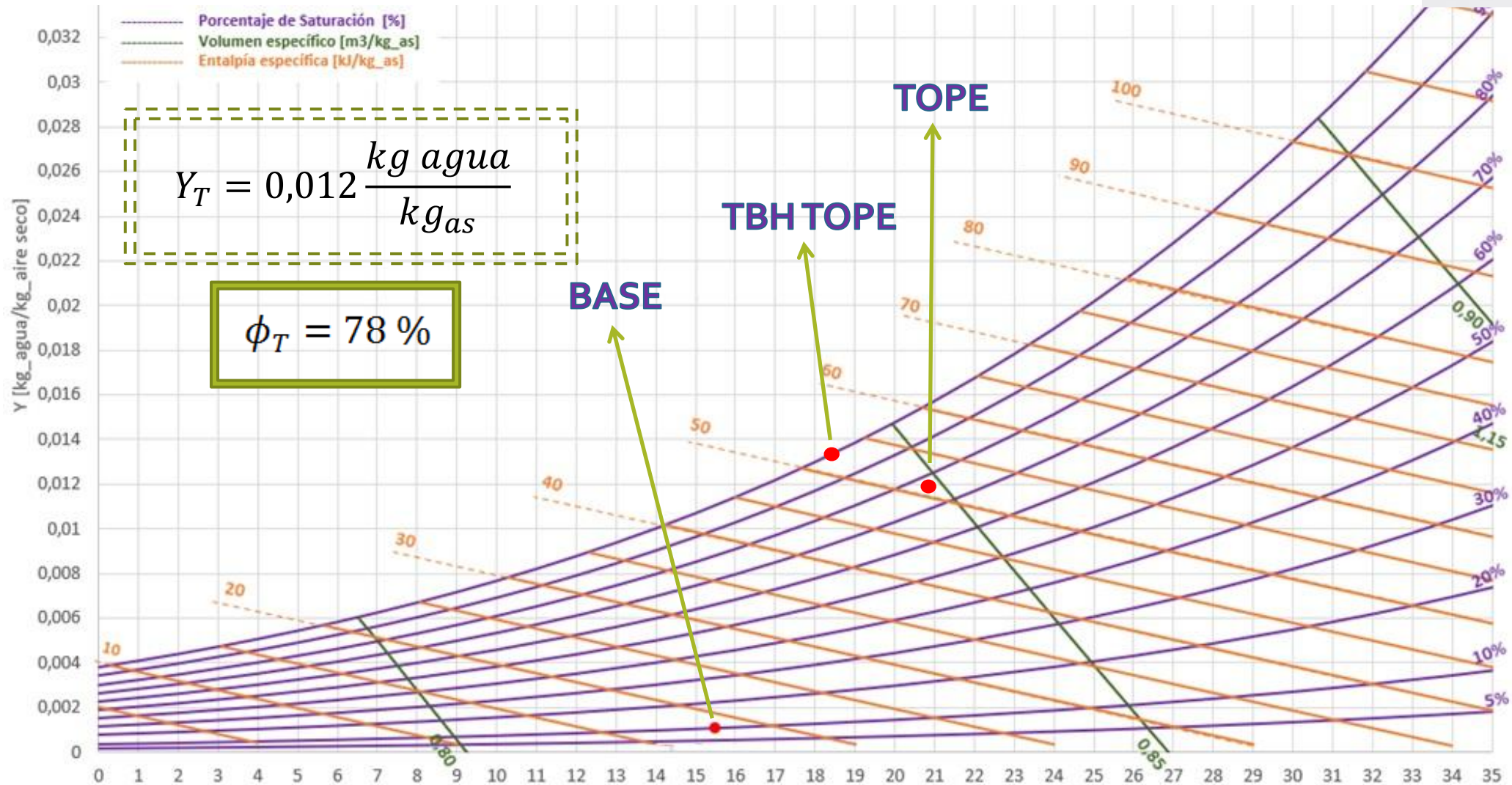


Resolución – Ítem b) Φ de salida (%hr)



$$t_T = 20,8\text{ °C}$$

Resolución – Ítem b) Φ de salida (%hr)



Cálculo analítico de Mickley

Se parte de la base y se divide la torre en intervalos regulares de variación de temperatura

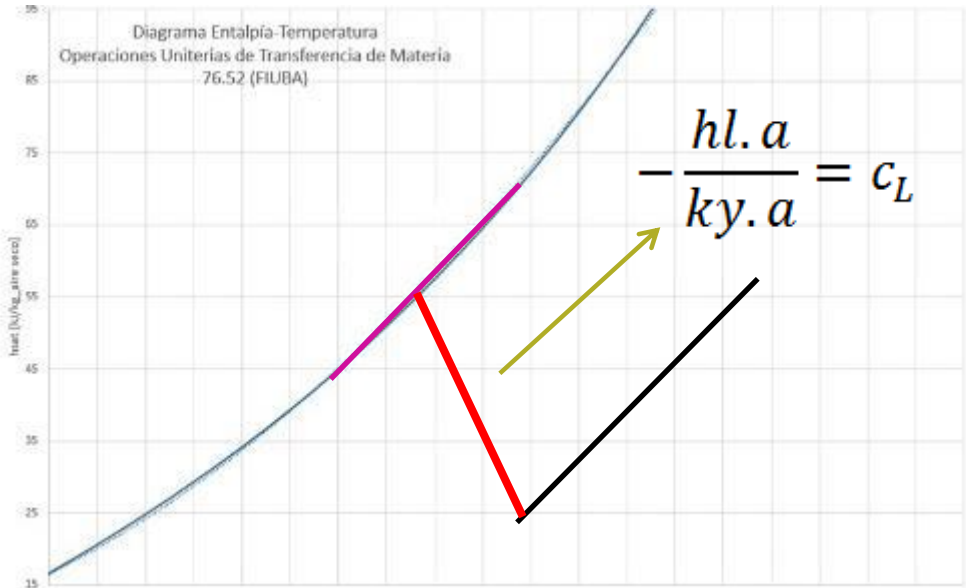
Se conoce la entalpía en la base, la temperatura del agua y la temperatura del aire.

Se calcula la condición en la interfase (se puede modelar el equilibrio entre puntos contiguos como recta)

Al definir el número de intervalos, queda establecido de cuánto será cada “salto” de entalpía. En este caso, como la diferencia de entalpía entre tope y base es de 33,3 kJ/kg_{as}, cada salto de entalpía será de 3,33 kJ/kg_{as}.

Con la expresión de Mickley se obtiene la variación de temperatura del aire, y como conocemos la temperatura que tenía el aire, se obtiene la siguiente temperatura:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{H_i - H}{t_i - t}$$



Paso	H (kJ/kg as)	T (°C)	t (°C)	Ti (°C)	Hi (kj/kg as)	H siguiente (kJ/kg as)	t siguiente (°C)
1	19	28	15.5	19.3	55.6	22.3	15.84

Cálculo analítico de Mickley

Paso	H (kJ/kg as)	T (°C)	t (°C)	Ti (°C)	Hi (kJ/kg as)	H siguiente (kJ/kg as)	t siguiente (°C)
1	19	28	15,5	19,26	55,59	22,33	15,84
2	22,33	29,2	15,84	20,35	59,37	25,66	16,25
3	25,66	30,4	16,25	21,42	63,23	28,99	16,71
4	28,99	31,6	16,71	22,48	67,16	32,31	17,21
5	32,31	32,8	17,21	23,52	71,15	35,64	17,75
6	35,64	34	17,75	24,55	75,21	38,97	18,32
7	38,97	35,2	18,32	25,56	79,32	42,30	18,92
8	42,30	36,4	18,92	26,56	83,49	45,63	19,54
9	45,63	37,6	19,54	27,55	87,71	48,96	20,17
10	48,96	38,8	20,17	28,52	91,99	52,29	20,82
11	52,29	40	20,82	29,52	96,50	-	-

Resolución – Ítem c) agua evaporada

Para conocer la cantidad de agua evaporada, se realiza un BM para el aire:

$$\text{Líquido evaporado} = G_S \cdot (Y_T - Y_B)$$

$$Y_T = 0,012 \frac{kg_{agua}}{kg_{as}}$$

$$G_S = 3018,3 \frac{kg_{as}}{h}$$

$$Y_B = 0,00105 \frac{kg_{agua}}{kg_{as}}$$

$$\text{Líquido evaporado} = 33,1 \frac{kg}{h}$$

Requiere reposición de 1,65%

Resolución – Ítem d) Perfiles

Como en el ítem b), a partir de los puntos de base y tope, se los vincula con el equilibrio mediante la siguiente recta:

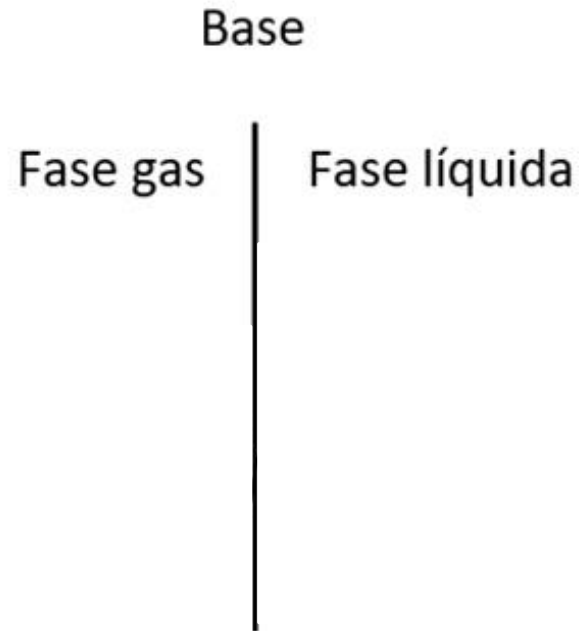
$$-\frac{h_L \cdot a}{k_y \cdot a} = c_L$$

De esta forma podemos obtener los datos en la interfase de la temperatura y entalpía tanto en la base como en el tope.

Del diagrama psicrométrico: a partir de la temperatura y entalpía de interfase de base y tope, se leen los valores de las humedades correspondientes:

	$T_i (^{\circ}\text{C})$	$H_i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg as}} \right)$	$Y_i \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg as}} \right)$
Base	19,26	55,59	0,014
Tope	29,52	96,50	0,0265

Resolución – Ítem d) Perfiles - BASE



	$T_i (^{\circ}C)$	$H_i \left(\frac{kJ}{kg \text{ as}} \right)$	$Y_i \left(\frac{kg}{kg \text{ as}} \right)$
Base	19,26	55,59	0,014

$$t_B = 15.5^{\circ}C$$

$$T_B = 28^{\circ}C$$

$$Y_B = 0.00105 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}}$$

Resolución – Ítem d) Perfiles - *TOPE*

Tope

Fase gas	Fase líquida
----------	--------------

	$T_i (^{\circ}C)$	$H_i \left(\frac{kJ}{kg \text{ as}} \right)$	$Y_i \left(\frac{kg}{kg \text{ as}} \right)$
Tope	29,52	96,50	0,0265

$$t_T = 20.82 ^{\circ}C$$

$$T_T = 40^{\circ}C$$

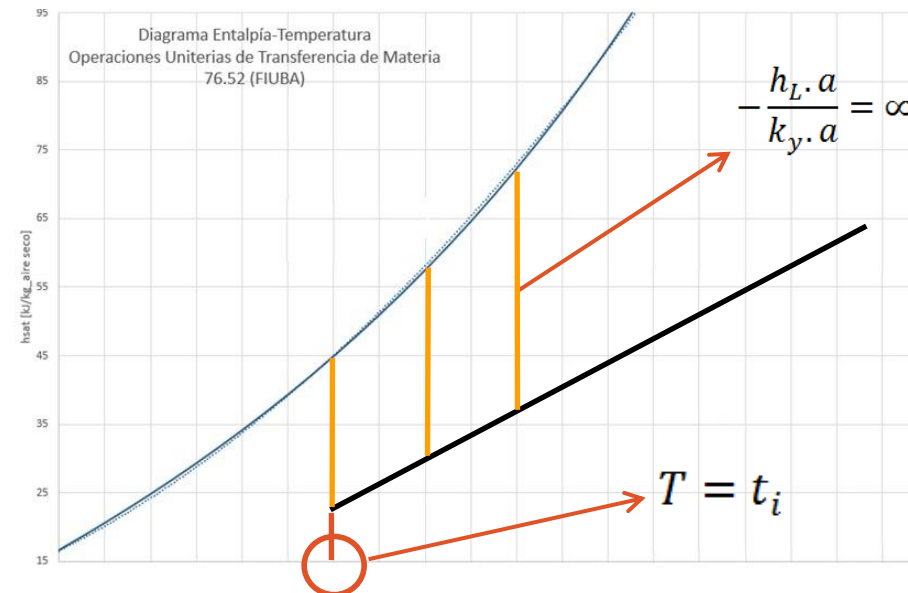
$$Y_T = 0.012 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}}$$

Adicional: Fuerza impulsora máxima

Si le dicen que dispone de “la máxima fuerza impulsora posible”, ¿Qué interpreta?

$$\frac{1}{h_L} \rightarrow 0 \longrightarrow T = t_i \longrightarrow -\frac{h_L \cdot a}{k_y \cdot a} = \infty$$

Pasamos a verlo gráficamente:



Adicional: Punto niebla

¿Qué pasa si al hacer la evolución con Mickley toco el equilibrio?

A esto se le llama **punto niebla...**

¿Qué significa esto?

¿¿Puedo seguir transfiriendo???

La respuesta es **SI**:

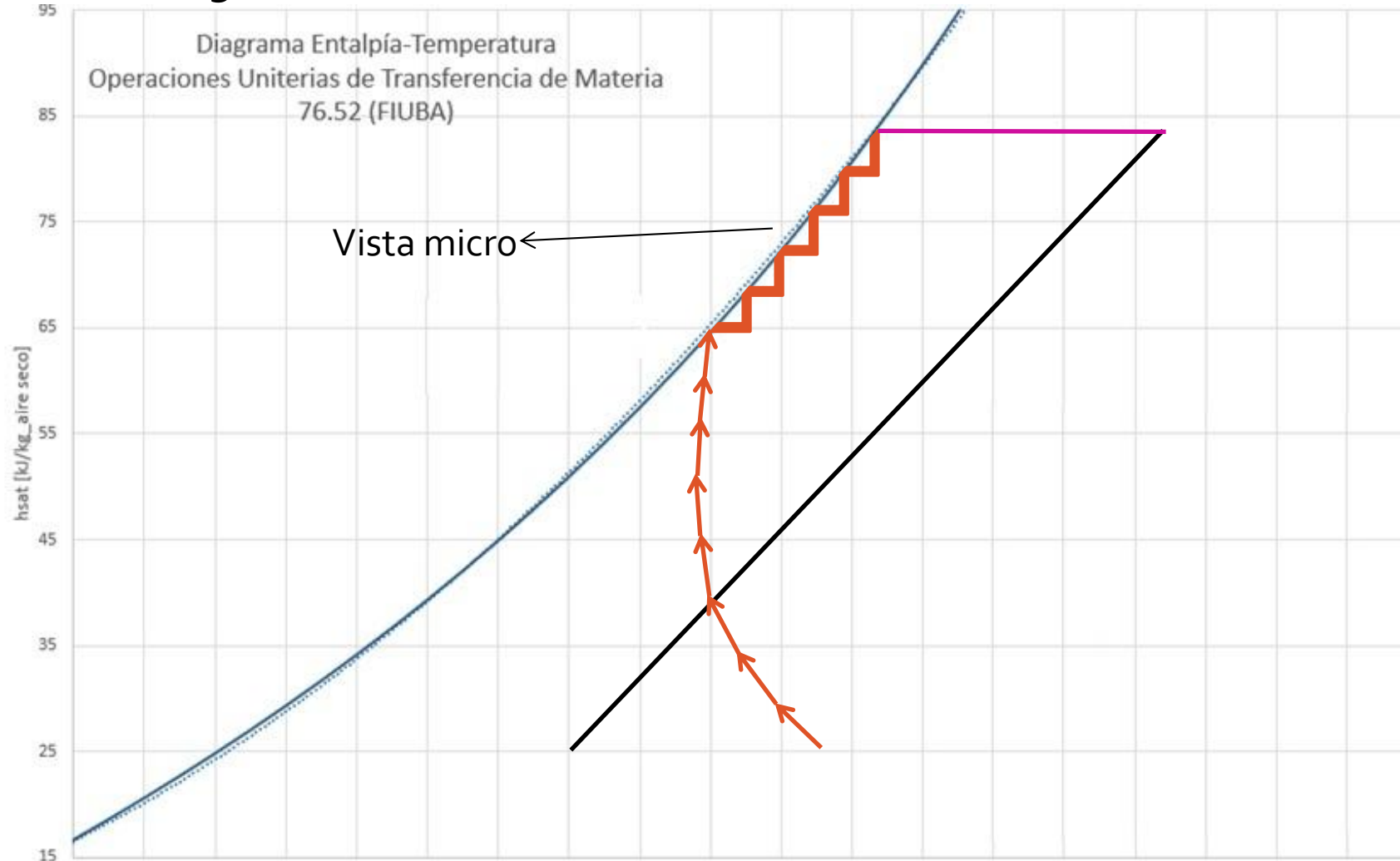
A pesar de que el aire está saturado (y ya no acepta líquido por transferencia de masa; no hay más evaporación / flujo de calor latente), como el agua está más caliente que el aire, sí hay **intercambio de calor sensible**, y por lo tanto, el aire "se aleja un poquito" del equilibrio.

¡Excelente Servicio!

Ahora el aire puede aceptar un poco más de agua... aunque rápidamente llega al punto de saturación nuevamente

Adicional: Punto Niebla

Viéndolo gráficamente:





¿PREGUNTAS?