CAPÍTULO 5. PRÁCTICA DE PROCESOS PSICROMÉTRICOS

5.1. Objetivo de la práctica

La práctica de laboratorio consiste en la realización de tres procesos psicrométricos básicos, a saber:

- 1. Calentamiento sensible.
- 2. Enfriamiento y deshumidificación.
- 3. Humidificación isoterma.

Para ello se emplea la unidad de laboratorio de aire acondicionado Hilton *A-575*, la cual consta de los equipos de tratamiento de aire necesarios.

Los objetivos, para cada uno de los tres procesos estudiados, se resumen en:

- La toma de contacto con los equipos diseñados para el tratamiento del aire húmedo (baterías, inyectores de vapor, etc...), así como con los demás elementos auxiliares (ventilador, elementos de instrumentación, etc...).
- Cuantificar las transferencias de masa y energía asociadas, planteando y resolviendo, para ello, las correspondientes ecuaciones de balance.
- Situar las diferentes evoluciones del aire húmedo tratado sobre el diagrama psicrométrico e identificar para cada caso las componentes sensible y latente de la energía total transferida.

5.2. Fundamentos teóricos

Un *proceso psicrométrico* se define como la operación o conjunto de operaciones por medio de las cuales se modifica el estado termohigrométrico del aire. Mediante balances globales, establecidos entre las condiciones iniciales y finales del proceso, es posible cuantificar las cantidades de masa y energía asociadas al proceso de tratamiento que experimenta el aire en cada uno de los equipos.

Teniendo en cuenta que en la unidad de trabajo en el laboratorio no existen equipos de contacto directo con recirculación de agua, las corrientes de entrada y salida en cualquiera de estos equipos serán, en su forma más general, como las indicadas en la *Figura 5.1*:



Figura 5.1. Proceso psicrométrico genérico en un equipo de tratamiento de aire

Las ecuaciones de balance de masa y energía asociadas a este proceso psicrométrico genérico vendrán dadas, respectivamente, por:

$$m_a \,\omega_{ae} + m_L = m_a \,\omega_{as} \quad \Rightarrow \quad m_a (\omega_{as} - \omega_{ae}) = m_L$$
$$m_a \,h_{ae} + Q^* + m_L \,h_L = m_a \,h_{as} \quad \Rightarrow \quad m_a (h_{as} - h_{ae}) = m_L \,h_L + Q^*$$

Para cada uno de los tres procesos estudiados, y gracias a las medidas realizadas, los estados termohigrométricos del aire a la entrada y a la salida serán conocidos; la resolución de las ecuaciones de balance en cada equipo proporcionan así los valores de los aportes realizados a la corriente de aire, bien en forma de agua (en estado líquido, m_L , o en estado vapor, m_v) o bien en forma de calor (Q^*).

Tras la resolución de los balances, el proceso puede ser representado en el diagrama psicrométrico (véase *Figura 5.2*).



Figura 5.2. Proceso de tratamiento de aire sobre el diagrama psicrométrico

Sobre el diagrama será posible visualizar, además del vector asociado al proceso, las variaciones en la entalpía específica del aire, en sus componentes sensible y latente:

$$\Delta h = \Delta h_{sen} + \Delta h_{lat}$$

5.3. Montaje experimental

5.3.1. Descripción de la unidad

En la *Figura 5.3* se muestra un esquema de la unidad de laboratorio. En ella se observa una conducción principal, en el interior de la cual circula la corriente de aire a tratar,

gracias a la acción de un ventilador de velocidad variable. A su paso por la conducción, el aire va encontrando los distintos equipos de tratamiento; según cuáles de ellos se encuentren accionados, el proceso seguido por el aire será uno u otro.



Figura 5.3. Equipos de tratamiento en la unidad de laboratorio Hilton A-575

De todos ellos, en la realización de la práctica intervendrán únicamente:

- El precalentador eléctrico, en el proceso de calentamiento sensible.
- La batería de frío, en el proceso de enfriamiento y deshumidificación.
- El humidificador, para el proceso de humidificación isoterma (para el proceso de enfriamiento y deshumidificación también se inyecta vapor, con el objetivo de que el aire a la entrada de la batería posea un contenido de humedad tal que la cantidad de caudal de condensado en la deshumidificación sea significativa).

5.3.2. Medida de variables

Para cada uno de los tres procesos que son estudiados, y según se muestra en el esquema de la *Figura 5.3*, las medidas a realizar son:

5.3.2.1. Medida del caudal de aire

La unidad de laboratorio dispone de una *placa-orificio*, con una toma de presión conectada a un manómetro inclinado, situada en la sección de salida del aire. Según la calibración del orificio respecto al flujo de aire, la relación entre el caudal de aire, m_a (*kg/s*), y la medida de presión a la salida proporcionada por el manómetro inclinado, Δp_D (*mm c.a.*), es la dada por:

$$m_a = 0.0504 \sqrt{\frac{\Delta p_D}{v_D}}$$

donde $v_D (m^3/kg)$ es el volumen específico del aire en el *Punto D* (sección de salida de la conducción principal de la unidad). Este dato será calculado sobre el diagrama psicrométrico, a partir de las condiciones termohigrométricas del aire dadas por las medidas de *T* y T_H en la estación de medida *D* (sección de salida de la unidad).

5.3.2.2. Medidas de temperatura

Existe una pareja de termómetros, de bulbos seco y húmedo, colocados a la entrada y a la salida de cada equipo. De este modo son obtenidas los valores de las temperaturas seca y húmeda en cada una de las estaciones de medida A, B, C o D (véase *Figura 5.3*), y que a su vez permiten la obtención del resto de variables psicrométricas (entalpía

específica, volumen específico, etc...) asociadas al estado del aire en cada uno de esos puntos.

5.3.2.3. Medida del caudal de condensado

En el proceso de enfriamiento y deshumidificación, el caudal de condensado m_L que precipita en la batería de frío es uno de los datos proporcionados por la resolución de los balances de masa y energía en el equipo.

No obstante, emplearemos una probeta colocada a la salida del condensado de la batería para medir el volumen de agua precipitada en un cierto periodo de tiempo. Así, el dato obtenido de manera experimental podrá ser comparado con el que resulta de la resolución analítica de las ecuaciones de balance.

5.4. Toma de datos

Se muestra a continuación la hoja de medidas, *Tabla 5.1*, donde encontramos las tomas de variables para cada uno de los tres procesos psicrométricos estudiados.

			Calentamiento sensible		Enfriamiento y deshumidificación		Humidificación isoterma		
Ventilador			V _{0.75}		V _{0.75}		V _{0.75}		
Caldera C.			Cl	-		ON		ON	
			<i>C2</i>	-		ON		ON	
		С3	-		OFF		OFF		
Precalentador		<i>P1</i>	ON		-		-		
			P2	ON		-		-	
Ciclo de refrigeración			-		ON		ON		
Aire	A	$T_A(^{o}C)$		25.2	25.3	24.8	24.9	24.8	24.9
		T_{HA} (°C)		15.9	15.7	16.9	16.7	16.9	16.7
	В	$\overline{T_B(^{o}C)}$		40.4	40.2	27.8	27.6	27.8	27.6
		$T_{HB}(^{o}C)$		20.1	20.0	23.8	23.7	23.8	23.7
	С	$T_C(^{o}C)$		-	-	20.8	20.8	20.8	20.8
		$T_{HC}(^{o}C)$		-	-	20.0	19.7	20.0	19.7
	D	$T_D(^{o}C)$		39.7	39.8	20.8	20.6	20.8	20.6
		$T_{HD}(^{o}C)$		19.8	19.9	20.0	20.1	20.0	20.1
$\Delta p_D (mm \ c.a.)$			9.1		8.6		8.6		
Condensado –		$V_L(mL)$		-		210		-	
		<i>t</i> (<i>s</i>)		-		600		-	

Tabla 5.1. Hoja de datos para la toma de medidas

Conviene realizar algunas aclaraciones en relación con el modo de completar la tabla de medidas. Así, en primer lugar, los apartados relativos al ventilador indican la posición en que es accionado el control de velocidad, directamente proporcional al caudal de aire impulsado. Este dato es relevante debido al salto de temperaturas que experimenta el aire a su paso por el ventilador, y que tendrá que ser tenido en cuenta, a modo de corrección, a la hora de considerar las condiciones reales del aire a la entrada del equipo que corresponda (véase *Tabla 5.2*).

Velocidad	m_a (kg/s)	ΔT_{vent} (°C)
V_{min}	0.114	0.4
$V_{0.25}$	0.130	0.4
$V_{0.50}$	0.150	0.4
$V_{0.75}$	0.164	0.4
V _{max}	0.181	1.1

Tabla 5.2. Saltos de temperatura del aire en el ventilador

En cuanto a las medidas de temperatura, observamos que para cada dato (tanto de temperatura seca como húmeda) aparecen dos valores. Sucede que la segunda es obtenida tras aplicar la tabla de calibración de termómetros (véase *Anexo III*). De este modo, el dato situado a la izquierda se corresponde con la medida realizada, mientras que el dato situado a la derecha se corresponde con la medida corregida, que será la que posteriormente se emplee en los cálculos.

Por último, indicar que el tiempo *t* durante el cual se controla la caída de condensado en la probeta es un dato arbitrario, resultando válido cualquier intervalo de, al menos, unos pocos minutos.

5.5. Cálculo y presentación de resultados

5.5.1. Calentamiento sensible

Obtenemos en primer lugar el caudal de aire impulsado por el ventilador, dado como:

$$m_a = 0.0504 \sqrt{\frac{\Delta p_D}{v_D}}$$

El volumen específico se obtiene de las medidas realizadas en *D*, gracias al empleo de un calculador psicrométrico:

$$T_D = 39.8 \,^{\circ}C \quad ; \quad T_{HD} = 19.9 \,^{\circ}C \implies v_D = 0.902 \, \frac{m^3}{kg}$$

Por tanto:

$$\Delta p_D = 9.1 \, mm \, c.a. \quad \Rightarrow \quad m_a = 0.0504 \sqrt{\frac{9.1}{0.902}} = 0.16 \, \frac{kg}{s}$$

Usando de nuevo el calculador psicrométrico se obtienen los valores de humedad y entalpía específica del aire en los puntos de entrada y salida del equipo. Así, a la entrada (*Punto A'*), teniendo en cuenta el calentamiento sensible que experimenta el aire en el ventilador (véase *Tabla 5.2*):

$$T_{A} = 25.3 \circ C \quad ; \quad T_{HA} = 15.7 \circ C \quad \Rightarrow \quad \omega_{A} = 7.176 \frac{gr}{kg \ as}$$

$$V_{0.75} \quad \Rightarrow \quad \Delta T_{vent} = 0.4 \circ C \quad \Rightarrow \quad T_{A'} = T_{A} + \Delta T_{vent} = 25.3 + 0.4 = 25.7 \circ C$$

$$T_{A'} = 25.7 \circ C \quad ; \quad \omega_{A'} = \omega_{A} = 7.176 \frac{gr}{kg \ as} \quad \Rightarrow \quad h_{A'} = 44.04 \frac{kJ}{kg}$$

Igualmente, a la salida del calentador, y teniendo en cuenta que el aire no experimenta variación en su contenido de humedad:

$$T_B = 40.2 \circ C$$
 ; $\omega_B = \omega_{A'} = 7.176 \frac{gr}{kg \ as} \Rightarrow h_B = 59.01 \frac{kJ}{kg}$

Una vez conocidas todas las variables psicrométricas a la entrada y a la salida, podemos resolver las ecuaciones de balance. En concreto, la ecuación de balance de masa ya ha sido planteada de manera implícita al imponer la condición de humedad constante, asociada a la naturaleza del proceso (*calentamiento sensible*):

$$\omega_{A'} = \omega_{B} \implies \Delta \omega = 0$$

En cuanto al balance de energía, de su resolución obtendremos el flujo de calor aportado a la corriente de aire:

$$Q_{cs} = m_a \Delta h = m_a (h_B - h_{A'}) = 0.16 (59.01 - 44.04) = 2.395 \, kW$$

En la *Figura 5.4* se muestra la evolución del aire tratado sobre el diagrama psicrométrico, donde puede apreciarse el calentamiento experimentado en el equipo (proceso A'-B) a humedad constante.



Figura 5.4. Proceso de calentamiento sensible

Asimismo, resulta trivial obtener las componentes sensible y latente del calor total transferido. De las ecuaciones de balance, y tal y como se aprecia en la *Figura 5.4*, se tienen:

$$\Delta \omega = 0 \implies \Delta h_{lat} = 0 \implies Q_{lat} = 0$$
$$\Delta h_{sen} = (h_B - h_{A'}) \implies Q_{sen} = Q_{cs} = 2.395 \ kW$$

Por tanto, los factores característico j y de calor sensible, *FCS*, tomarán los valores dados respectivamente por:

$$j = \frac{\Delta h}{\Delta \omega} = +\infty$$
; $FCS = \frac{\Delta h_{sen}}{\Delta h} = 1$

5.5.2. Enfriamiento y deshumidificación

Obtenemos en primer lugar el caudal de aire impulsado por el ventilador, dado como:

$$m_a = 0.0504 \sqrt{\frac{\Delta p_D}{v_D}}$$

El volumen específico se obtiene de las medidas realizadas en *D*, gracias al calculador psicrométrico:

$$T_D = 20.6 \,^{\circ}C$$
; $T_{HD} = 20.1 \,^{\circ}C \implies v_D = 0.858 \, \frac{m^3}{kg}$

Por tanto:

$$\Delta p_D = 8.6 \ mm \ c.a. \quad \Rightarrow \quad m_a = 0.0504 \sqrt{\frac{8.6}{0.858}} = 0.16 \ \frac{kg}{s}$$

Usando de nuevo el calculador psicrométrico se obtienen los valores de humedad y entalpía específica del aire en los puntos de entrada y salida del equipo. Así, a la entrada (*Punto B*), se tiene:

$$T_{B} = 27.6 \,^{\circ}C$$
; $T_{HB} = 23.7 \,^{\circ}C \implies \omega_{B} = 16.879 \,\frac{gr}{kg \, as}$; $h_{B} = 70.82 \,\frac{kJ}{kg}$

. .

Igualmente, a la salida de la batería (*Punto C*):

$$T_{C} = 20.8 \,^{\circ}C$$
; $T_{HC} = 19.7 \,^{\circ}C \implies \omega_{C} = 13.956 \frac{gr}{kg \, as}$; $h_{C} = 56.35 \frac{kJ}{kg}$

En la *Figura 5.5* se representa la evolución del aire tratado sobre el diagrama psicrométrico. En ella pueden distinguirse los procesos asociados al intercambio de energía latente (proceso B-B') y al intercambio de energía sensible (proceso B'-C).



Figura 5.5. Proceso de enfriamiento y deshumidificación

Una vez conocidas todas las variables psicrométricas a la entrada y a la salida, podemos resolver las ecuaciones de balance. En concreto, de la resolución del balance de masa se obtiene la cantidad de agua precipitada en el equipo, m_L , que es igual a la cantidad de humedad perdida por el aire a su paso por la batería:

$$m_L = m_a \Delta \omega = m_a (\omega_B - \omega_C) = 0.16 (16.879 - 13.956) = 0.468 \frac{gr}{s}$$

En cuanto al balance de energía, su resolución proporciona el calor cedido por la corriente de aire en el equipo:

$$Q_{ed} = m_a \Delta h = m_a (h_B - h_C) = 0.16 (70.82 - 56.35) = 2.315 \, kW$$

Para cuantificar dichas transferencias sensible y latente es necesario determinar los valores de las variables psicrométricas asociadas al punto auxiliar B'. De la *Figura 5.5*, y empleando de nuevo el calculador psicrométrico, resulta:

$$T_{B'} = T_B = 27.6 \,^{\circ}C$$
; $\omega_{B'} = \omega_C = 13.956 \frac{gr}{kg \ as} \Rightarrow h_{B'} = 63.28 \frac{kJ}{kg}$

Por tanto:

$$\Delta h_{lat} = h_B - h_{B'} = 70.82 - 63.28 = 7.54 \frac{kJ}{kg} \implies Q_{lat} = m_a \Delta h_{lat} = 1.206 \, kW$$

$$\Delta h_{sen} = h_{B'} - h_C = 63.28 - 56.35 = 6.93 \frac{kJ}{kg} \implies Q_{sen} = m_a \Delta h_{sen} = 1.109 \, kW$$

comprobándose que, en efecto:

$$Q_{lat} + Q_{sen} = Q_{ed} = 2.315 \ kW$$

De lo anterior, los factores característico j y de calor sensible, *FCS*, tomarán los valores dados respectivamente por:

$$j = \frac{\Delta h}{\Delta \omega} = \frac{h_B - h_C}{\omega_B - \omega_C} = \frac{70.82 - 56.35}{16.879 - 13.956} = 4.95 \frac{kJ}{gr}$$
$$FCS = \frac{\Delta h_{sen}}{\Delta h} = \frac{\Delta h_{sen}}{\Delta h_{sen} + \Delta h_{lat}} = \frac{6.93}{6.93 + 7.54} = 0.48$$

5.5.3. Humidificación isoterma

Una vez más, obtenemos en primer lugar el caudal de aire impulsado por el ventilador, dado como:

$$m_a = 0.0504 \sqrt{\frac{\Delta p_D}{v_D}}$$

El volumen específico se obtiene de las medidas realizadas en *D*, gracias al calculador psicrométrico:

$$T_D = 20.6 \,^{\circ}C \quad ; \quad T_{HD} = 20.1 \,^{\circ}C \implies v_D = 0.858 \, \frac{m^3}{kg}$$

Por tanto:

$$\Delta p_D = 8.6 \ mm \ c.a. \implies m_a = 0.0504 \sqrt{\frac{8.6}{0.858}} = 0.16 \ \frac{kg}{s}$$

Usando de nuevo el calculador psicrométrico se obtienen los valores de humedad y entalpía específica del aire en los puntos de entrada y salida del equipo. Así, a la entrada (*Punto A'*), teniendo en cuenta el calentamiento sensible que experimenta el aire en el ventilador (véase *Tabla 5.2*):

$$T_{A} = 24.9 \circ C \quad ; \quad T_{HA} = 16.7 \circ C \quad \Rightarrow \quad \omega_{A} = 8.492 \frac{gr}{kg \ as}$$

$$V_{0.75} \quad \Rightarrow \quad \Delta T_{vent} = 0.4 \circ C \quad \Rightarrow \quad T_{A'} = T_{A} + \Delta T_{vent} = 24.9 + 0.4 = 25.3 \circ C$$

$$T_{A'} = 25.3 \circ C \quad ; \quad \omega_{A'} = \omega_{A} = 8.492 \frac{gr}{kg \ as} \quad \Rightarrow \quad h_{A'} = 46.99 \frac{kJ}{kg}$$

Igualmente, a la salida del humidificador:

$$T_{B} = 27.6 \,^{\circ}C \quad ; \quad T_{HB} = 23.7 \,^{\circ}C \implies \omega_{B} = 16.879 \,\frac{gr}{kg \, as} \quad ; \quad h_{B} = 70.82 \,\frac{kJ}{kg}$$

Una vez conocidas todas las variables psicrométricas a la entrada y a la salida, podemos resolver las ecuaciones de balance. En concreto, de la resolución del balance de masa se obtiene la cantidad de vapor de agua inyectado, m_v , que es igual a la cantidad de humedad que gana la corriente de aire a su paso por el humidificador:

$$m_V = m_a \Delta \omega = m_a (\omega_B - \omega_{A'}) = 0.16 (16.879 - 8.492) = 1.34 \frac{gr}{s}$$

En cuanto al balance de energía, su resolución proporciona el calor total que absorbe la corriente de aire a su paso por el equipo:

$$Q_{hi} = m_a \Delta h = m_a (h_B - h_{A'}) = 0.16 (70.82 - 46.99) = 3.813 \, kW$$

En la *Figura 5.6* se representa la evolución del aire tratado sobre el diagrama psicrométrico, donde puede apreciarse la humidificación de la corriente a su paso por el inyector (proceso A'-B).



Figura 5.6. Proceso de humidificación isoterma

Para cuantificar las componentes sensible y latente de la energía total comunicada al aire es necesario determinar los valores de las variables psicrométricas asociadas al punto auxiliar B'. De la *Figura 5.6*, y empleando de nuevo el calculador psicrométrico, resulta:

$$T_{B'} = T_B = 27.6 \,^{\circ}C$$
; $\omega_{B'} = \omega_{A'} = 8.492 \frac{gr}{kg \ as} \implies h_{B'} = 49.33 \frac{kJ}{kg}$

Por tanto:

$$\Delta h_{lat} = h_B - h_{B'} = 70.82 - 49.33 = 21.49 \frac{kJ}{kg} \implies Q_{lat} = m_a \Delta h_{lat} = 3.439 \ kW$$

$$\Delta h_{sen} = h_{B'} - h_{A'} = 49.33 - 46.99 = 2.34 \frac{kJ}{kg} \implies Q_{sen} = m_a \Delta h_{sen} = 0.374 \ kW$$

comprobándose que, en efecto:

$$Q_{lat} + Q_{sen} = Q_{hi} = 3.813 \, kW$$

De lo anterior, los factores característico j y de calor sensible, *FCS*, tomarán los valores dados respectivamente por:

$$j = \frac{\Delta h}{\Delta \omega} = \frac{h_B - h_{A'}}{\omega_B - \omega_{A'}} = \frac{70.82 - 46.99}{16.879 - 8.492} = 2.84 \frac{kJ}{gr}$$
$$FCS = \frac{\Delta h_{sen}}{\Delta h} = \frac{\Delta h_{sen}}{\Delta h_{sen} + \Delta h_{lat}} = \frac{2.34}{2.34 + 21.49} = 0.098$$

5.6. Comentarios y análisis crítico

5.6.1. Exactitud de los balances de masa y energía

Consideremos la prueba correspondiente al proceso de calentamiento sensible. En ella, el calor cedido por el precalentador a la corriente de aire ha sido calculado a partir de los estados termohigrométricos del aire a la entrada y a la salida del equipo, conocidos gracias a las medidas realizadas:

$$Q_{cs} = m_a (h_B - h_{A'}) = 2.395 \, kW$$

No obstante (y al igual que en los otros dos procesos estudiados), nos encontramos con que los balances se encuentran sobredeterminados; en este proceso, por ejemplo, conocemos el valor de la potencia proporcionada por las resistencias del precalentador; en la *Tabla 5.3* se muestran las potencias efectivas disipadas por cada una de las resistencias, obtenidas en función de la medida de la tensión en red:

Precalentador	$R~(\Omega)$	$Q_{Pi} \ (kW)$
Calentador 1	47.1	1.153
Calentador 2	47.0	1.155

Tabla 5.3. Potencias efectivas disipadas por las resistencias del precalentador

Puesto que en la prueba son accionados ambos calentadores, debería verificarse que:

$$Q_{P1} + Q_{P2} = 1.153 + 1.155 = 2.308 \ kW = Q_{cs}$$

quedando de manifiesto la discrepancia entre ambos resultados. Nosotros hemos tomado como calor real el primero de ellos, obtenido de las medidas realizadas sobre los estados del aire a la entrada y a la salida del equipo. El motivo es la mayor fiabilidad de estos datos, frente a la de la medida del voltaje en el instante considerado, el cual se encuentra permanentemente sujeto a fluctuaciones asociadas a la propia red de suministro.

Asimismo, si fuese posible obtener los valores reales instantáneos de Q_{P1} y Q_{P2} , encontraríamos que su suma seguiría sin coincidir con el valor Q_{cs} obtenido del balance sobre el aire, resultando que:

$$Q_{P1} + Q_{P2} > Q_{cs}$$

lo cual se explica al considerar las pérdidas por transmisión hacia la propia carcasa de la conducción principal de la unidad; en efecto, una pequeña parte del calor disipado por las resistencias no es transferida a la corriente de aire, sino que es empleada en calentar por radiación las paredes de la conducción.

Aunque en los otros dos procesos no actúa el precalentador, podemos encontrar discrepancias análogas a las aquí detalladas. Por esta razón se ha considerado en todos los casos como calor real intercambiado con la corriente, el resultante de los balances planteados en función de los estados del aire a la entrada y a la salida de los equipos.

No obstante, las propias medidas realizadas con los termómetros (y a partir de las cuales se resuelven los balances que nos dan los resultados considerados *reales*) también se encuentran sujetas a errores. En efecto, y considerando de nuevo el proceso de calentamiento sensible, se muestran a continuación los valores de la humedad absoluta resultantes de las medidas realizadas en los puntos de entrada y salida del precalentador (obtenidos ambos mediante el calculador psicrométrico):

$$T_{A} = 25.3 \circ C \quad ; \quad T_{HA} = 15.7 \circ C \quad \Rightarrow \quad \omega_{A} = 7.176 \frac{gr}{kg \ as} = \omega_{A'}$$
$$T_{B} = 40.2 \circ C \quad ; \quad T_{HB} = 20.0 \quad \Rightarrow \quad \omega_{B} = 6.319 \frac{gr}{kg \ as} \neq \omega_{A'}$$

lo cual, obviamente, no es posible, por no existir ninguna manera física de que el aire pierda humedad a su paso por el precalentador. Este hecho es debido exclusivamente a errores de apreciación a la hora de obtener la lectura del termómetro: unas décimas de grado de más o de menos pueden implicar desplazamientos significativos de la humedad absoluta real sobre el diagrama psicrométrico. Por esto, para el planteamiento del balance de masa en este proceso se impuso:

$$\omega_{A} = \omega_{A'} = \omega_{B} = 7.176 \frac{gr}{kg \ as}$$

De este modo, se subsana el error comentado y aseguramos que las ecuaciones de balance representen el proceso físico real experimentado por la corriente de aire.

5.6.2. Inyección de vapor previa al enfriamiento y deshumidificación

Como puede observarse en la hoja de medidas (*Tabla 5.1*), para el proceso de enfriamiento y deshumidificación en la batería de frío se lleva a cabo una

humidificación previa de la corriente de aire, mediante la puesta en marcha de los calentadores C1 y C2 del generador de vapor.

El objetivo de este procedimiento es la obtención en la batería de una deshumidificación del aire significativa; en efecto, los experimentos anteriores han sido realizados en invierno. Por esta razón, el estado del aire ambiente resultaba poco propenso a la deshumidificación, habiéndose obtenido en pruebas previas, sin el generador de vapor accionado, caudales de condensado verdaderamente insignificantes. Mediante la humidificación previa de la corriente de aire se consiguió finalmente un caudal de condensado apreciable en la batería, lo cual entendemos es fundamental si se quiere tener una visión física del proceso.

Además, como ventaja adicional, encontramos un importante ahorro de tiempo, pues cuando comencemos la prueba de humidificación, la generación de vapor se encontrará en régimen permanente, y no tendremos que esperar a que el sistema se estabilice.

5.6.3. Medida del caudal de condensado en la batería

Una comprobación a realizar es la relativa al caudal de condensado obtenido de la batería. De las medidas realizadas, y teniendo en cuenta el valor de la densidad del agua:

$$\left(\frac{mL}{s}\right)_{W} \approx \left(\frac{gr}{s}\right)_{W} \implies m_{L} = \frac{V_{L}}{t} = \frac{210}{600} = 0.350 \frac{gr}{s}$$

Éste sería el resultado experimental para el caudal de condensado m_L , en comparación con los 0.468 *gr/s* obtenidos de manera analítica a partir del balance de masa. Entre ambos, se toma éste último como resultado real. El motivo es, una vez más, la mayor fiabilidad del dato obtenido del balance de masa, debido a los posibles errores de precisión a la hora de leer la medida de volumen en la probeta de condensado

5.6.4. Transferencia sensible en el proceso de humidificación

Como se observa en la *Figura 5.6*, el proceso no es del todo isotermo, existiendo una pequeña fracción de energía que es transferida a la corriente de aire en forma de calor sensible. Esto se debe exclusivamente a la transmisión por convección desde la corriente de vapor, por encontrarse ésta a un nivel térmico superior respecto a la corriente de aire.

No obstante, el porcentaje de esta transferencia en forma sensible respecto al incremento total de entalpía es pequeñísimo. De hecho, el factor de calor sensible obtenido tomaba el valor:

$$FCS = \frac{\Delta h_{sens}}{\Delta h} = 0.098$$

Esto indica precisamente que la transferencia de energía hacia el aire tratado lo es casi en su totalidad en forma de calor latente (esto es, como vapor de agua incorporado a la corriente de aire).

5.6.5. Análisis paramétrico

Debido al carácter básico de los procesos psicrométricos estudiados, no encontramos de gran interés realizar un estudio paramétrico formal. Por esto, simplemente tomaremos como ejemplo el proceso de calentamiento sensible, para el cual detallaremos la

influencia en el incremento de entalpía del aire de las variables sobre las que nos es posible actuar.

Así, recordemos que los balances de masa y energía sobre el aire vendrán dados por:

$$\omega_{A'} = \omega_B$$
$$Q_{cs} = m_a \Delta h = m_a (h_B - h_{A'})$$

Si, manteniendo constante el calor disipado por los calentadores, aumentamos el caudal de aire impulsado por el ventilador:

$$Q_{cs} = CTE$$
 ; $m_a \uparrow \Rightarrow (h_B - h_{A'}) = \frac{Q_{cs}}{m_a} \downarrow$

es decir: el salto de entalpía sufrido por el aire sería menor, resultando una temperatura de salida más baja (previsible, por otro lado: con el mismo calor, calentamos más el aire cuanto menor es la masa a calentar).

Por otro lado, si para un mismo caudal de aire variamos la potencia del precalentador (por ejemplo, accionando sólo una de las dos resistencias), entonces:

$$Q_{cs} \downarrow$$
; $m_a = CTE \implies (h_B - h_{A^{\circ}}) = \frac{Q_{cs}}{m_a} \downarrow$

es decir: el salto de entalpía sería, de nuevo, menor, pues estaríamos cediendo menos calor a la misma masa de aire, con lo que ésta se calentaría menos, presentando una temperatura de salida más baja.

5.6.6. Uso de las tablas de calibración de termómetros

Por último, resaltamos la escasa dependencia de los resultados obtenidos respecto al empleo o no de las tablas de calibración de los termómetros.

En efecto, para los tres procesos considerados se han calculado los principales datos de interés de ambas maneras: tomando los valores obtenidos de la lectura directa de los termómetros, por un lado, y corrigiendo dichas medidas mediante las tablas de calibración, por otro.

Al comparar ambos resultados no se observaron desviaciones significativas, por lo que llegamos a la conclusión de que el uso de las tablas de calibración no es necesario. Por esta razón, la hoja de datos del enunciado de la práctica (véase la separata adjunta) carece de celdas destinadas a las medidas de temperatura corregidas. Bastará, pues, emplear directamente las lecturas de los termómetros en el cálculo del resto de variables psicrométricas.