

CAPÍTULO 4.

INSTRUMENTACIÓN

4.1. Puntos de medida en la unidad

A modo de introducción, recordaremos en primer lugar cuáles son los puntos de la unidad (bien sobre el ciclo del aire a tratar, o bien sobre el ciclo de frío que sigue el fluido refrigerante) en los que existen estaciones de medida de variables. Indicaremos igualmente, para cada uno de esos puntos, qué variables son objeto de medida y cuáles son los instrumentos empleados para obtenerlas. En todo momento puede utilizarse como ayuda el esquema general de la unidad proporcionado en el *Capítulo II (Figura 2.1)*.

Posteriormente, en los restantes apartados de este capítulo, serán descritos de manera más detallada cada uno de los instrumentos utilizados, agrupados en función de la variable a la que se encuentran asociados (esto es: temperatura, presión y caudal).

4.1.1. Estaciones de medida sobre el ciclo del aire

A lo largo de la conducción principal existen 4 puntos de medida. En cada uno de ellos se obtienen las medidas de las variables que se indican a continuación:

- *Punto A*: situado a la entrada del ventilador (o, equivalentemente, a la entrada de la unidad). Consta de un termómetro seco (T_A) y un termómetro de bulbo húmedo (T_{HA}).
- *Punto B*: situado a la salida del conjunto ventilador-humidificador-precalentador, y a la entrada de la batería de frío. Consta de un termómetro seco (T_B) y un termómetro de bulbo húmedo (T_{HB}).
- *Punto C*: situado a la salida de la batería y a la entrada del recalentador. Consta de un termómetro seco (T_C) y un termómetro de bulbo húmedo (T_{HC}).
- *Punto D*: situado a la salida del recalentador y, al mismo tiempo, a la salida de la conducción principal. Consta de un termómetro seco (T_D), un termómetro de bulbo húmedo (T_{HD}) y un orificio de pared delgada, calibrado y conectado a un manómetro inclinado (Δp_D); ésta medida de presión permite obtener de forma indirecta el caudal másico de aire en la conducción principal, m_a .

En cada uno de estos puntos, la pareja de medidas (T , T_H) nos permite conocer el estado termohigrométrico del aire. Además de los puntos anteriores, existe una salida de agua precipitada en la batería de frío. Al final de este conducto es colocado un matraz con escala, para medir el volumen de condensado, V_L , durante el periodo de tiempo correspondiente (lo que nos da el caudal másico de condensado, m_L).

4.1.2. Estaciones de medida sobre el ciclo de refrigeración

Las variables que son objeto de medida (y los instrumentos empleados para ello) sobre el ciclo de frío dependen del punto del que se trate. Tomando de nuevo como referencia el esquema general de la *Figura 2.1*, se tienen:

- *Punto 1*: salida del evaporador y entrada al compresor. Consta de un termómetro seco (T_1) y un manómetro de *tubo Burdon* (p_1).

- *Punto 2:* descarga del compresor y entrada al condensador. En este punto se utiliza un *termómetro de contacto* o *termopar*, el cual nos proporciona la temperatura superficial del conducto de descarga del compresor. Esta temperatura podrá aproximarse, con un error perfectamente asumible, como la temperatura del fluido en el punto de descarga (T_2).
- *Punto 3:* salida del depósito de líquido y entrada en la válvula de expansión. Consta de un termómetro seco (T_3), un manómetro de *tubo Burdon* (p_3) y un *rotámetro*, del que se toma la medida del caudal másico de *R-134a*, m_r , que circula en el ciclo.
- *Punto 4:* salida de la válvula de expansión y entrada al evaporador. Consta de un termómetro seco (T_4).

4.2. Termómetros

4.2.1. Termómetros de mercurio

Consisten en un vidrio sellado con mercurio en su interior; el cambio uniforme del volumen del mercurio con la temperatura se visualiza en una escala graduada en *grados Celsius*.

Los termómetros suministrados son del tipo *IM3/2*, de 12'' (véase *Figura 4.1*), con un rango de 0÷50 °C. Para sujetar los termómetros en la conducción principal se proporcionan patas amortiguadoras de caucho, que deslizan sobre cada termómetro desde la parte superior hasta el bulbo de medición. La altura de los amortiguadores hay que ajustarla de manera que, cuando se inserten en los agujeros de la conducción, los bulbos de medición queden aproximadamente a la altura media del conducto (con el objetivo de obtener temperaturas lo más uniforme posibles).



Figura 4.1. Termómetro de bulbo seco

Para los termómetros que se fueran a emplear en las medidas sobre el ciclo de frío, ya se comentó en el *Capítulo II* (véase el apartado 2.4.1. *Consideraciones generales*) la conveniencia de rellenar las aberturas donde son encajados los termómetros con aceite térmico, con el objetivo de mejorar el contacto térmico entre la superficie de los conductos y los bulbos.

En cuanto a la precisión de los termómetros, ésta afectará a la precisión de los balances de energía sobre las corrientes de aire o refrigerante. Al respecto, puede consultarse en el *Anexo III* (véase el apartado 3.6. *Tablas de calibración de termómetros*): tanto los termómetros secos como los de bulbo húmedo han sido calibrados respecto al termómetro *Nº 3*, que es el tomado como referencia. Así, al registrar las variaciones con respecto a la referencia (termómetro *Nº 3*), se pueden sumar o restar las variaciones individuales de las medidas realizadas con los demás termómetros.

4.2.2. Termómetros de bulbo húmedo

Consisten en un termómetro de mercurio, con el bulbo envuelto en una mecha de material absorbente empapada en agua. Cuando se sumergen en una corriente de aire, el agua presente en la mecha se evapora hasta entrar en equilibrio con el vapor de agua disuelto en el aire, lo que permite obtener la temperatura húmeda de la corriente. Con la unidad Hilton A-575 han sido suministrados 4 termómetros de bulbo húmedo premontados, tipo IM12/3, con un rango de 0÷50 °C, como el que se muestra en la *Figura 4.2*.



Figura 4.2. Termómetro de bulbo húmedo

Todo lo comentado anteriormente en cuanto a la colocación la precisión de los termómetros secos es también aplicable a los termómetros de bulbo húmedo. Además, resaltamos de nuevo la importancia que tiene el mantenimiento de los termómetros de bulbo húmedo para que su funcionamiento sea satisfactorio. Por ello, remitimos una vez más al lector al *Capítulo II* (véase el apartado 2.5.4. *Elementos de instrumentación*), si se quieren recordar las cuestiones relativas al almacenamiento de los termómetros en agua destilada y la conservación de las mechas.

4.2.3. Termopar

Se trata de un dispositivo electrónico utilizado para medir temperaturas a partir de la fuerza electromotriz generada al calentar la soldadura de dos metales diferentes.

El termopar utilizado en los experimento con la unidad Hilton A-575 se muestra en la *Figura 4.3*. Consta de una sonda que es puesta en contacto con la superficie que corresponda, apareciendo por pantalla la medida de temperatura.



Figura 4.3. Termopar utilizado en el punto de descarga del compresor

Como se indicó anteriormente, el termopar sólo es utilizado para la obtención de dos medidas:

- La temperatura de descarga del compresor (T_2), sobre el ciclo de refrigeración.
- La temperatura superficial del generador de vapor (T_5).

Todas las demás medidas de temperatura, bien del ciclo del aire en la conducción principal, o bien del ciclo del refrigerante en la unidad de refrigeración, son dadas por los termómetros de vidrio.

4.3. Manómetros

4.3.1. Manómetro de tubo inclinado

Los manómetros de tubo inclinado son utilizados para medir presiones manométricas inferiores a 250 mm c.a. La presión del fluido (aire, en nuestro caso) se mide a partir de su equilibrio con la columna de líquido, de gravedad específica conocida, presente en el tubo inclinado.



Figura 4.4. Manómetro inclinado situado a la salida del aire

El manómetro de tubo inclinado de la unidad Hilton A-575 (véase *Figura 4.4*) nos proporciona el salto de presión manométrica, Δp_D , en el punto D (salida del aire de la conducción principal). Como todos los manómetros comerciales, dispone de una escala

graduada que permite leer presiones en el rango de $0 \div 12.7 \text{ mm c.a.}$ El nivel del manómetro es ajustado una vez que la unidad se encuentra en su posición definitiva en el laboratorio.

4.3.2. Manómetro metálico de tubo Burdon

El *manómetro de tubo Burdon* es el instrumento industrial de medición de presiones más generalizado, debido a su bajo coste, su precisión y su duración. El *tubo Burdon* es un elemento tubular de sección elíptica, en forma de anillo casi completo, cerrado por uno de sus extremos (la presión a medir es aplicada en el extremo abierto). A medida que la presión interna aumenta, el tubo tiende a enderezarse; esta deformación es, entonces, transmitida a través de un sistema mecánico a una aguja indicadora.



Figura 4.5. Manómetro de tubo Burdon en el ciclo de producción de frío

Los manómetros de tubo Burdon miden la diferencia entre la presión interior y la exterior del tubo. Como la presión exterior es la atmosférica, la lectura sobre el instrumento será, entonces, la presión manométrica.

La unidad de laboratorio Hilton A-575 consta de dos manómetros metálicos de tubo Burdon (como el mostrado en la *Figura 4.5*), situados ambos en la unidad de refrigeración. Su rango de medida es $-100 \div 800 \text{ kN/m}^2$, y proporcionan la medida de la *presión de alta* (presión de condensación, p_3) y la *presión de baja* (presión de evaporación, p_1).

4.4. Caudalímetros

4.4.1. Placa-orificio con manómetro inclinado

Para medir el caudal de aire tratado en la conducción principal, la unidad de laboratorio Hilton A-575 dispone de una *placa-orificio* situada en la sección de salida, al final de la conducción principal (véase *Figura 4.6*). La *placa-orificio* es un medidor indirecto de caudal: el aire adquiere una presión diferencial al atravesar el orificio; ese incremento de presión está directamente relacionado con el cuadrado del caudal, por lo que es posible obtener éste de forma inmediata tras medir el salto diferencial de presiones en el orificio.



Figura 4.6. Sección con orificio calibrado a la salida de la unidad

En la sección final del conducto es donde se encuentra la toma de presión del manómetro de tubo inclinado anteriormente descrito. Según la calibración del orificio asociada 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 D .

4.4.2. Rotámetro

El *rotámetro* es un medidor de caudal, de área variable y de caída de presión constante. Consiste en un indicador o flotador que se mueve libremente dentro de un tubo vertical, ligeramente cónico, con el extremo angosto hacia abajo. El fluido entra por la parte inferior del tubo y hace que el flotador ascienda hasta que el área anular entre él y la pared del conducto sea tal que la caída de presión en ese estrechamiento equilibre el peso del flotador.



Figura 4.7. Rotámetro en el ciclo de producción de frío

La unidad de laboratorio Hilton A-575 dispone de un rotámetro en el ciclo de producción de frío (véase *Figura 4.7*), situado justo antes del sistema de expansión, que nos proporciona la lectura del caudal másico de fluido refrigerante, m_r , que circula en el ciclo. El tubo es de vidrio y lleva grabado una escala lineal, sobre la cual la posición del flotador indica el caudal. Su rango de medida es de $4 \div 30 \text{ gr/s}$.

