

## Objetivo

1. Mostrar instrumentación típica de los sistemas de acondicionamiento ambiental (HVAC): termo-higrómetros, bombas, compresores, manómetros, reguladores, filtros, etc.
2. Practicar con diversos higrómetros.
3. Comprobar cálculos sencillos de calibración e incertidumbre de los instrumentos.
4. Comprobar el enfriamiento evaporativo forzado sobre agua en calma.
5. Comprobar el funcionamiento de una torre húmeda: balances máscicos y energético.

## Resumen de Actividades

1. Estimar el tiempo que tardaría en hervir el agua en el calentador.
2. Calcular la velocidad y el gasto de aire.
3. Medir la velocidad del aire a la salida.
4. Plantear el balance energético del circuito del aire.
5. Plantear el balance energético del circuito del agua.
6. Plantear el balance energético de la torre.
7. Hacer los cálculos y comentar resultados.
8. Evaluación de la incertidumbre de los resultados obtenidos.

## Equipo

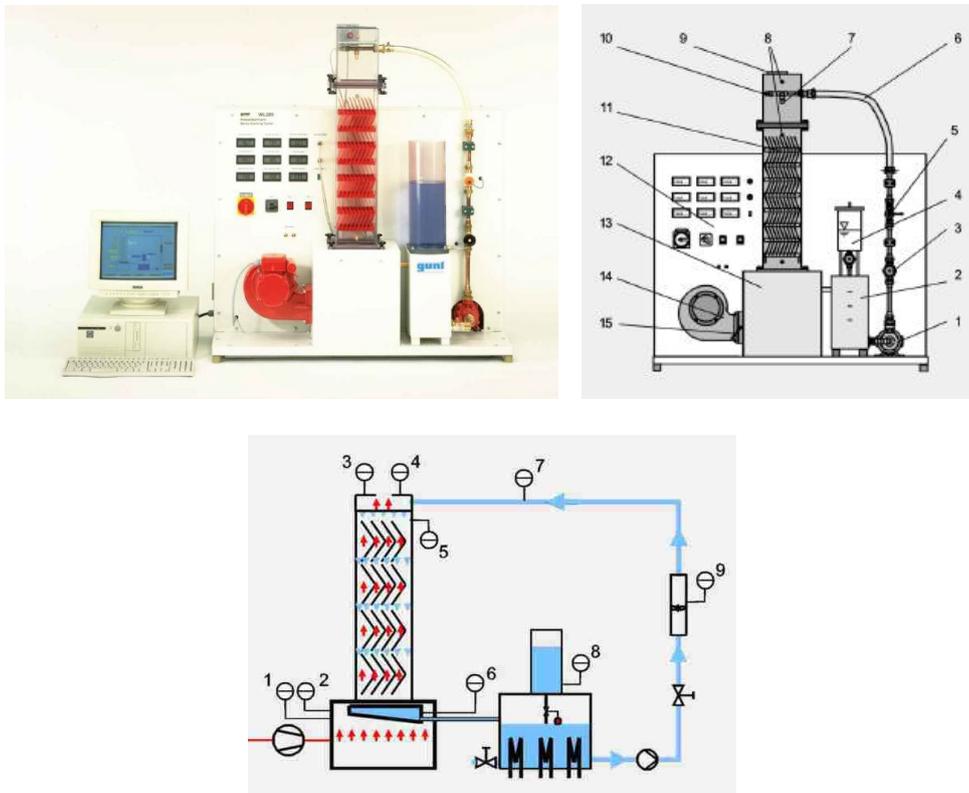


Fig. 1. Foto, componentes y diagrama de la instalación de la torre didáctica Gunt WL-320.

## Desarrollo

Una torre de refrigeración (*cooling tower*) es un intercambiador de calor. Aunque se suele reducir a  $Q_{in}=Q_{out}$ , el balance energético en un caso general es  $dE/dt = \dot{Q} + \dot{W} + \sum \dot{m}_i h_i$ .

Es un intercambiador de calor por contacto directo agua-aire.

El objetivo de una torre de refrigeración es enfriar agua (e.g. de refrigeración de una máquina), u otro líquido por medio del agua.

La carga térmica real (e.g. agua de refrigeración de un motor) se simula con una resistencia eléctrica.

El aire entra del ambiente y sale más húmedo (y normalmente más caliente).

El agua recircula dentro de la torre simulando una de las dos configuraciones (Fig. 2):

- Una torre abierta cuya agua viniese caliente desde una carga térmica lejana.
- Una torre cerrada donde el agua recirculante tomaría el calor en un intercambiador de calor del agua del circuito cerrado cuya agua viniese caliente desde una carga térmica lejana.

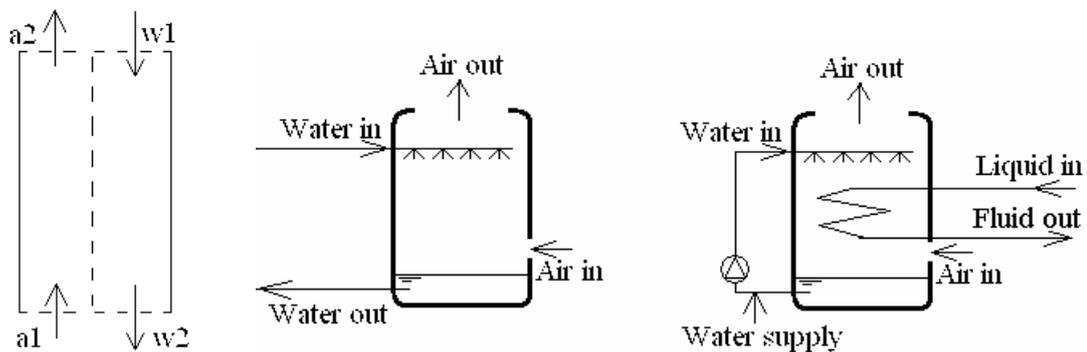


Fig. 2. Esquema de cambiador de calor por contacto, y de torre abierta y torre cerrada.

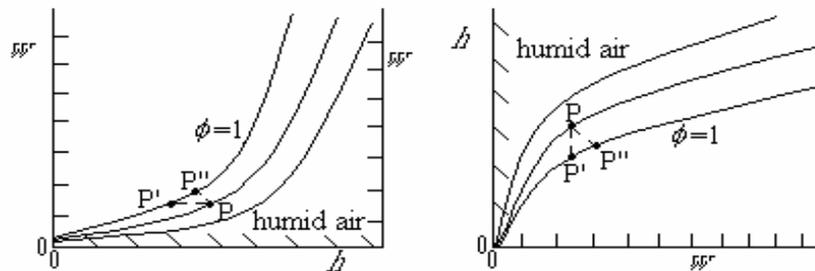


Fig. 3. Diagrama psicrométrico de Carrier.

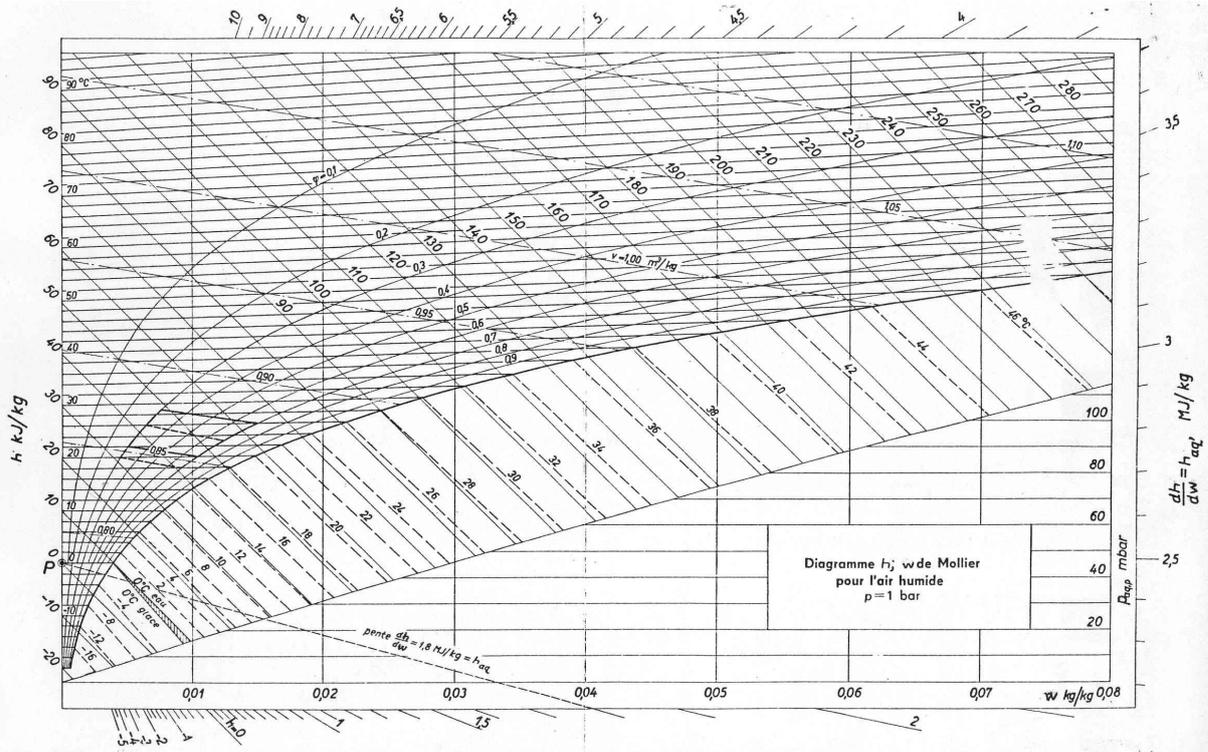


Fig. 4. Diagrama psicrométrico de Mollier.

## Proceso

### Antes de encender (POWER OFF)

- Estimar y medir las condiciones  $(p, T, \phi)$  del aire ambiente y dentro de la torre, y las temperaturas del agua.
- Estimar el tiempo que tardaría en hervir el agua en el calentador.  
(El volumen de agua en el calentador es de 3 litros hasta cubrir las resistencias y de 5,3 litros hasta el nivel del tubo de aporte. Cada  $70 \pm 1$  mm de altura en el cilindro es 1 litro. Los sensores de humedad no deben mojarse porque tardan mucho en secarse.)

### Circuito de aire, sin agua (FAN ON, PUMP OFF, HEATER OFF)

- Medir las condiciones  $(p, T, \phi)$  del aire a la entrada y a la salida.
- Calcular  $(w, h, T_h, \rho)$  del aire a la entrada y a la salida. Observar que hay un separador de gotas a la salida.
- Calcular el gasto de aire:  $\dot{m}_a = \rho v_{out} A_{out} = c \rho \sqrt{(2\Delta p / \rho)} A_{out} = c \sqrt{2\rho\Delta p} A_{out}$ , con un coeficiente empírico  $c=0,61$ ,  $\rho \approx 1,1 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Delta p$  medido y  $A_{out} = \pi 0,08^2 / 4 = 0,0050 \text{ m}^2$ .
- Estimar la potencia térmica evacuada en un proceso isoterma, y el gasto de agua evaporado correspondiente.
- Calcular la velocidad media del aire dentro ( $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$ ) y a la salida ( $0,08 \text{ m}$  de diámetro).
- Calibrar el gasto de aire midiendo con un anemómetro de mano la velocidad a la salida.

### Calentador de agua sin flujos (HEATER ON, FAN OFF, PUMP OFF)

- Calcular el tiempo en que se alcanzan  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  con  $1500 \text{ W}$ . Ejecutarlo y medirlo con termómetro de mano.
- Calibrar el calentador con un vatímetro y con el tiempo que tarda en calentarse el agua.

### Circuito de agua sin calentador ni aire (PUMP ON, FAN OFF, HEATER OFF)

- Calibrar el caudalímetro de agua con un depósito y un reloj. La válvula tiene 6,5 vueltas de 10 divisiones; cerrada a tope corta todo y abierta a tope da el caudal máximo, que depende del incremento de presión (desconectado de la tobera da 7 litro/min, y montado todo 2 litro/min; sin tuberías daría 40 litro/min). Nótese que el transitorio de la bomba dura 8 s.
- Observar la tobera nebulizadora inyectando sobre un barreño. Se necesita gran diferencia de presión para nebulizar (aquí parece que hay una caída de 100 kPa en la tobera y de casi 300 kPa en el resto del circuito: filtro, caudalímetro y tubería).
- Calcular la velocidad media del agua en la tubería.
- Calcular el incremento de temperatura del agua en circulación si no hubiese transmisión de calor. El motor de la bomba consume 370 W.

### Medidas con calentador (enfriamiento) (PUMP ON, FAN ON, HEATER ON)

- Plantear el balance energético del circuito del agua.
- Plantear el balance energético del circuito del aire.
- Plantear el balance energético de la torre.
- Ejecutar y archivar los datos transitorios hasta el estado cuasi-estacionario.
- Hacer los cálculos para el análisis.
- Comentar los resultados (previsiones, incertidumbres, mejoras,..)
- Resultado: con gastos máximos y en régimen, el agua recoge unos 1800 W entubada (la bomba ya es de 370 W) y los cede al aire en la torre.

### Medidas sin calentador (refrigeración) (PUMP ON, FAN ON, HEATER OFF)

- Pensar en el balance energético e indicar lo que se espera.
- Ejecutar y archivar los datos transitorios hasta el estado cuasi-estacionario.
- Resultado: con gastos máximos y en régimen, el agua recoge unos 590 W entubada (la bomba ya es de 370 W) y los cede al aire en la torre.

## Notas y datos

### Nomenclatura

Salto térmico,  $\Delta T_w = T_{w1} - T_{w2}$ , es la diferencia entre la temperatura del agua de entrada (mayor o igual que la ambiente) y la del agua a la salida (mayor o igual que la ambiente). Ejemplo: "Se desea enfriar una corriente de agua desde 40 °C hasta 30 °C...",  $\Delta T_w = 40 - 30 = 10$  °C.

Salto límite,  $\Delta T_{w,limit} = T_{w1} - T_{a1,ad}$ , es la diferencia entre la temperatura del agua de entrada y la de saturación adiabática del aire de entrada. Ejemplo: "¿Cuanto se puede enfriar una corriente de agua a 40 °C con aire a 30 °C y 60% de HR?",  $\Delta T_{w,limit} = 40 - 24 = 16$  °C.

Approximación,  $\Delta T_{w,a} = T_{w2} - T_{a1,ad}$ , es la diferencia entre la temperatura del agua de salida y la de saturación adiabática del aire de entrada. Ejemplo: "Se desea enfriar una corriente de agua desde 40 °C hasta 30 °C con aire a 30 °C y 60% de HR?",  $\Delta T_{w,a} = 30 - 24 = 6$  °C.

Rendimiento,  $\eta = \Delta T_w / \Delta T_{w,limit}$ . El rendimiento del ejemplo anterior sería de  $10/16 = 63\%$ .

Carga,  $\dot{Q}_w \equiv \dot{m}_w c_w (T_{w1} - T_{w2})$ .

### Datos de los componentes

#### Interruptor general

Puede asegurarse con candados, pero basta con no tener el equipo enchufado permanentemente a la red.

#### Ventilador

$P_e = 250$  W,  $\Delta p_{max} = 430$  Pa,  $\dot{m} = 0,2$  kg/s (o 13 m<sup>3</sup>/min, o 700 m<sup>3</sup>/h).

## Bomba

$P_e=370$  W,  $h_{\max}=40$  m,  $\dot{m}=0,7$  kg/s (40 L/min). Gira a 2800 rpm.

## Calentador

Puede dar 0, 500 W, 1000 W o 1500 W. Tiene termostato de seguridad a 50 °C.

## Relleno

Placas de PVC al tresbolillo de 100 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (verlo en Fig. 1).

## Sensor de temperatura

Termistores. Rango de -40 °C a 150 °C.

## Sensor higrométrico Siemens QFM65

Sensor de humedad capacitivo con circuito acondicionador de 10..90% HR a 1.9 V. HR  $\pm 3\%$  entre 40..60% RH ( $\pm 5\%$  fuera). Inercia 20 s. **ATENCIÓN:** si se moja marca mal y tarda mucho en secarse.

Sensor térmico Pt100 (*thin film*) con circuitería con dos salidas: una que pasa 0..50 °C a 0..10 V y la otra para -35..35 °C a 0..10 V.  $\pm 0,7$  K. Inercia térmica 20 s.

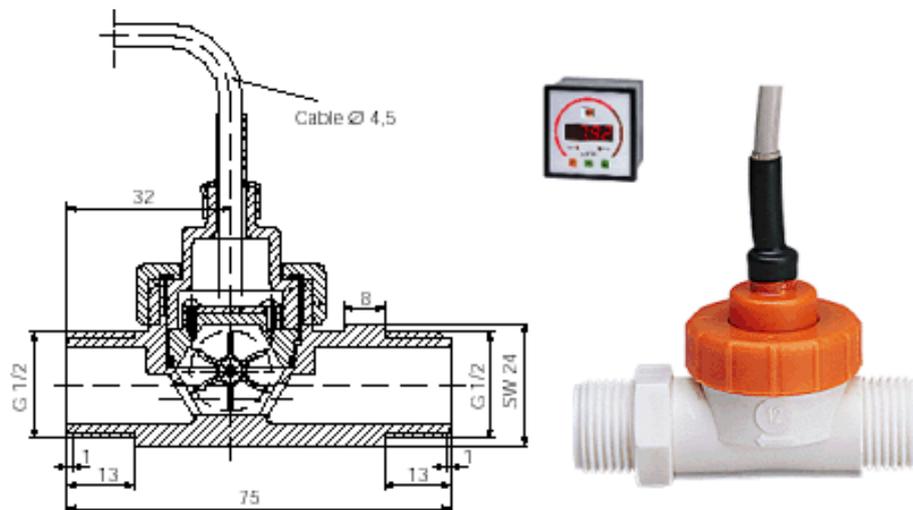
Alimentación a 24 V-AC, consumo 0,5 W

Salida < 1 mA



## Sensor de caudal

Tipo turbina. Rango 12..360 l/h, con salida lineal a 0..5 V. Alimentación 24 V-DC.



## Sensor de presión diferencial

Rango 0..1 kPa, con salida lineal a 0..10 V. Alimentación 24 V-DC.

[Back to lab](#)