



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA TORRE DE REFRIGERACIÓN

**Apellidos y nombre:** Velázquez Martí, Borja ([borvemar@dmta.upv.es](mailto:borvemar@dmta.upv.es))<sup>1</sup>

**Departamento/Centro:** <sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria  
Universitat Politècnica de València

## Índice general

1. Resumen de las ideas clave	2
2. Introducción	2
3. Objetivos	3
4. Funcionamiento de las torres de refrigeración	3
5. Balances en las torres de refrigeración	4
6. Cierre	9
7. Ejercicios propuestos	10
8. Bibliografía	10

## 1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se va a analizar el funcionamiento de las *torres de refrigeración*, que son dispositivos utilizados para enfriar el agua disipadora de energía en los condensadores. El funcionamiento de las torres de refrigeración conlleva el análisis de tres balances: balance de aire seco, balance de agua, balance de energía en el volumen de control. Conociendo las condiciones de entrada y salida que ha de tener el agua que ha de alimentar los condensadores, conociendo también las condiciones ambientales en cuanto a temperatura y humedad relativa del aire que utiliza la torre de refrigeración, el objetivo es calcular el caudal de aire necesario y el agua de reposición para mantener el sistema en estado estacionario.

## 2 Introducción

Una torre de refrigeración es un dispositivo cuya finalidad es enfriar el agua que se utiliza como foco caliente en los condensadores. Como es sabido, un sistema de refrigeración por compresión está formado por cuatro elementos esenciales: los evaporadores, los compresores, los condensadores y válvulas de expansión. El evaporador extrae el calor del foco frío, siendo absorbido por un refrigerante. En el condensador el refrigerante con elevada temperatura cede calor a un foco llamado caliente. Para que el refrigerante pueda ceder calor al foco caliente éste debe estar a una temperatura más alta que el mismo.

Si la temperatura del refrigerante es lo suficientemente alta y la temperatura del ambiente es lo suficientemente baja, no hay problema en la cesión de calor del refrigerante al aire ambiental en el condensador. Sin embargo, si la temperatura del refrigerante no es lo suficientemente alta, o la del ambiente no es suficientemente baja, sino que por condiciones atmosféricas el ambiente también tiene una temperatura elevada, la transferencia de calor del refrigerante al aire ambiental en el condensador no se puede realizar. Entonces, la transferencia de calor del refrigerante en el condensador ha de realizarse a una corriente agua, que normalmente está a una temperatura más baja que la del aire ambiental. Esta necesidad de utilizar agua de refrigeración en el condensador puede conllevar a un gasto excesivo de la misma. Para evitar ese gasto se utiliza un sistema en circuito casi cerrado para mantener el agua a baja temperatura a través del dispositivo denominado torre de refrigeración.

Este dispositivo es de uso común en centrales térmicas o en instalaciones de climatización donde no se dispone de corrientes de agua naturales, de forma que es un dispositivo de ahorro de agua de refrigeración.



Figura 1: Imágenes de torres de refrigeración

### 3 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

1. Explicar el funcionamiento de las torres de refrigeración.
2. Calcular el flujo de aire y el agua de reposición requerida para tratar el agua que proviene de los condensadores y mantener sus condiciones de alimentación.

### 4 Funcionamiento de las torres de refrigeración

El funcionamiento de una torre de refrigeración se basa en la pulverización del agua a enfriar en un volumen de control cayendo sobre un lecho poroso. El agua circula por el lecho poroso por acción de la gravedad, haciendo circular a través del mismo una corriente de aire que absorbe calor y humedad saliendo hacia el exterior. La absorción de humedad por parte del aire hace que sea necesaria una pequeña reposición para que el flujo de agua que entra en la torre desde los condensadores vuelva a ellos fría en la misma cantidad.

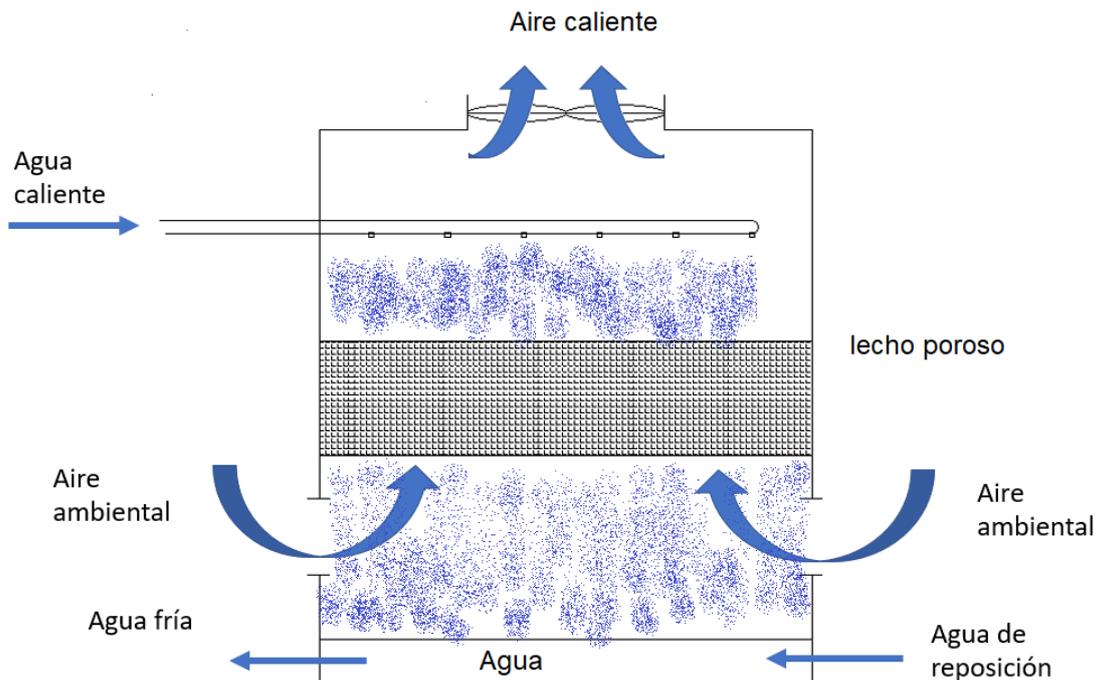


Figura 2: Esquema de una torre de refrigeración

## 5 Balances en las torres de refrigeración

En el análisis de las torres de refrigeración hay que atender a tres balances en el volumen de control: balance de aire, balance de agua y balance de energía. El objetivo es determinar cual es el caudal de aire y agua de reposición necesarios para conseguir una prestaciones.

- **Balance de aire:** El flujo de aire seco que entra en el volumen de control ( $\dot{m}_{aire e}$ , kg/s) es igual al flujo que sale ( $\dot{m}_{aire s}$ , kg/s).

$$\dot{m}_{aire e} = \dot{m}_{aire s}$$

- **Balance de agua:**

El flujo de agua que entra en la torre debe ser igual al flujo de agua que sale de la misma.

Considerando las variables:

$\dot{m}_{agua c}$	flujo del agua caliente proveniente de los condensadores que entra en la torre en kg/s
$\dot{m}_{agua s}$	flujo del agua fría que sale de la torre que alimenta los condensadores en kg/s
$\dot{m}_{agua rep}$	flujo del agua de reposición que se pretende calcular, que es el que entra en la torre para compensar el arrastrado por el aire en kg/s
$\dot{m}_{aire}$	flujo del aire que entra y sale de la torre que se pretende calcular en kg/s
$\omega_1$ y $\omega_2$	son la humedad absoluta del aire a la entrada y salida de la torre ( $\text{kg}_{agua}/\text{kg}_{aire seco}$ )

La formulación del balance de agua resulta como:

$$\dot{m}_{agua c} + \dot{m}_{agua rep} = \dot{m}_{agua s} + \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1)$$

$\dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1)$  es la variación del vapor de agua en el aire entre las condiciones ambientales (1) y las condiciones de salida del aire húmedo (2).

Como se debe cumplir que

$$\dot{m}_{agua c} = \dot{m}_{agua s}$$

Se deduce que

$$\dot{m}_{agua rep} = \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1)$$

- **Balance de energía**

La energía disipada en la torre debe ser equivalente a la que absorbe el aire que atraviesa la torre y el agua de reposición.

Considerando las variables:

$h_{agua c}$	entalpía específica del agua caliente proveniente del condensador en kJ/kg
$h_{agua rep}$	entalpía específica del agua de reposición en kJ/kg
$h_{agua s}$	entalpía del agua fría que sale de la torre que alimenta los condensadores en kJ/kg
$h_1$	entalpía del aire que entra de la torre en kJ/kg

$h_2$  entalpía del aire que sale de la torre en kJ/kg

Se debe cumplir que

$$\dot{m}_{agua\ c} \cdot h_{agua\ c} + \dot{m}_{agua\ rep} \cdot h_{agua\ rep} = \dot{m}_{agua\ s} \cdot h_{agua\ s} + \dot{m}_{aire} \cdot (h_2 - h_1)$$

El balance se puede desdoblar en el balance de energía en el humidificador y balance de energía en la cubeta de decantación.

En el humidificador, si  $h_{agua\ int}$  es la entalpía en la zona intermedia, entre el lecho poroso y la cubeta de decantación se tiene:

$$\dot{m}_{agua\ c} \cdot h_{agua\ c} - (\dot{m}_{agua\ c} - \dot{m}_{rep}) \cdot h_{agua\ int} = \dot{m}_{aire} \cdot (h_2 - h_1)$$

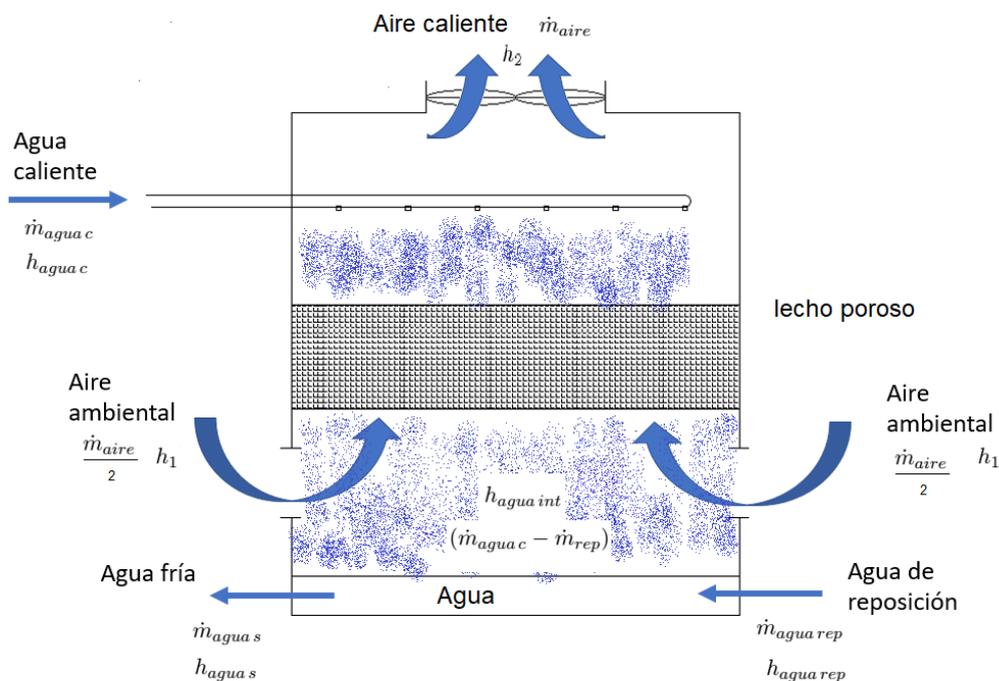


Figura 3: Variables en las torres de refrigeración

En la cubeta de decantación:

$$\dot{m}_{agua\ s} \cdot h_{agua\ s} = \dot{m}_{agua\ int} \cdot h_{agua\ int} + \dot{m}_{agua\ rep} \cdot h_{agua\ rep}$$

Generalmente son conocidos el flujo de agua caliente que proviene de los condensadores y su temperatura. También son conocidas las condiciones del agua que se desea a la salida de la torre, las condiciones ambientales del aire (temperatura y humedad relativa) y la temperatura del agua de reposición.

Considerando que el lecho poroso de la torre tiene un comportamiento similar a los humidificadores, se define un parámetro característico, denominado *eficiencia* ( $\varepsilon_{sat}$ ) que relaciona las

condiciones del aire antes y después de haber pasado por el lecho poroso, adquiriendo humedad. Definiendo como  $T_{sat}$ ,  $h_{sat}$  y  $\omega_{sat}$  la temperatura del agua, la entalpía y humedad del aire saturado a la temperatura del aire en el lecho poroso, se tiene que

$$\varepsilon_{sat} = \frac{T_2 - T_1}{T_{agua} - T_1} = \frac{h_2 - h_1}{h_{sat} - h_1} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_{sat} - \omega_1}$$

$$h_2 = h_1 + \varepsilon_{sat} \cdot (h_{sat} - h_1)$$

$$T_2 = T_1 + \varepsilon_{sat} \cdot (T_{sat} - T_1)$$

$$\omega_2 = \omega_1 + \varepsilon_{sat} \cdot (\omega_{sat} - \omega_1)$$

El calor sensible ( $\dot{Q}_{sen}$ ), calor latente ( $\dot{Q}_{lat}$ ) y calor total  $\dot{Q}_{tot}$  intercambiado en el aire húmedo resulta:

$$\dot{Q}_{sen} = \dot{m}_{aire} \cdot (C_{p_{aire}} + \omega_2 \cdot C_{p_{vapor}}) \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\dot{Q}_{lat} = \dot{m}_{aire} \cdot (\lambda + C_{p_{vapor}} \cdot T_1) \cdot (\omega_2 - \omega_1)$$

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{m}_{aire} \cdot (h_2 - h_1)$$

Donde:

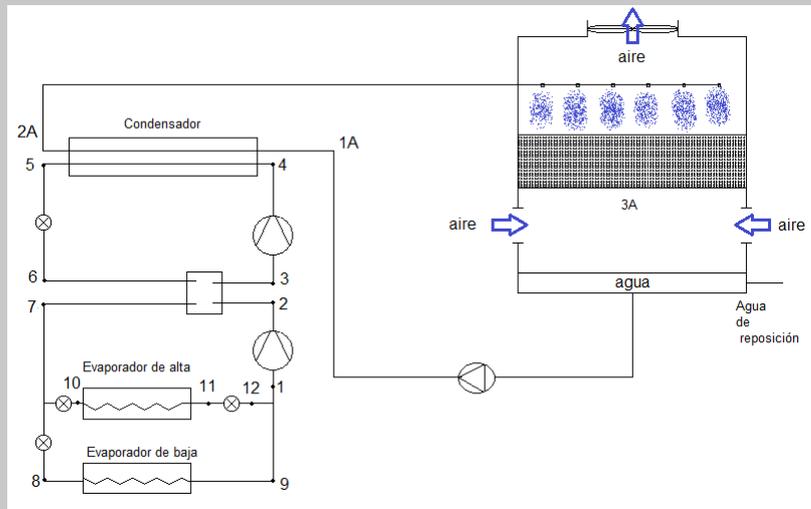
- $\lambda$  es el calor latente de cambio de estado del agua a presión atmosférica kJ/kg
- $C_{p_{aire}}$  es el calor específico del aire, 1.005 kJ/kg°C
- $C_{p_{vapor}}$  es el calor específico del vapor a presión atmosférica, 1,86 kJ/kg°C

El sistema de ecuaciones se obtiene el flujo de aire necesario para mantener el sistema en estado estacionario y el flujo del agua de reposición necesaria.

A continuación se muestra un ejemplo.

### Ejemplo 1

La instalación frigorífica de la figura utiliza amoníaco como refrigerante, consta de dos evaporadores que mantienen diferentes temperaturas de conservación en sendas cámaras frigoríficas. La temperatura del aire ambiental es 30°C y humedad relativa 50%. El calor disipado en el condensador es 63,35 kW. En el condensador se utiliza agua de refrigeración con un caudal de 0,5 kg/s. La temperatura del agua de refrigeración que sale de la torre hacia el condensador debe ser 20°C, la temperatura del agua de reposición es de 10°C. La eficiencia del humidificador de la torre de refrigeración es del 75%.



Determinar:

- Caudal de aire que debe ser impulsado al interior de la torre de refrigeración.
- Caudal del agua de reposición

**Resolución**

a) Primero se determinan las temperaturas y entalpías de los distintos puntos de la instalación.

La entalpía del agua que entra en el condensador procedente de la torre es

$$h_{agua1A} = C_{p_{agua}} \cdot T_{ag1A} = 4,18 \cdot 20 = 83,6 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}.$$

Por tanto, la temperatura del agua a la salida del condensador es:

$$T_{agua2A} = \frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{m}_{agua} \cdot C_{p_{agua}}} + T_{agua1A} = 50,31^{\circ}\text{C}$$

Esta es la temperatura con la que el agua entra en la torre. La humedad y entalpía del aire saturado a esta temperatura es respectivamente  $\omega_{sat} = 0,0877 \text{ kg agua/kg}_{as}$  y  $h_{sat} = 278,01 \text{ kJ/kg}$

La entalpia del agua a la salida del condensador que se pulveriza en la torre es

$$h_{agua2A} = C_{p_{agua}} \cdot T_{ag2A} = 4,18 \cdot 50,31 = 210,30 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}.$$

Las condiciones del aire ambiental a la entrada de la torre se muestran en la siguiente tabla

	T(°C)	HR (%)	$\omega$ (kg agua/kg <sub>as</sub> )	h (kJ/kg as)
entrada de aire	30	50	0,0133	64,13

Definiendo las condiciones del aire ambiental que entra en la torre como condiciones (1), y las condiciones del aire que sale de la torre como condiciones (2), se tiene que la eficiencia del humidificador es

$$\varepsilon_{sat} = \frac{T_2 - T_1}{T_{sat} - T_1} = \frac{h_2 - h_1}{h_{sat} - h_1} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_{sat} - \omega_1} = 0,75$$

Téngase en cuenta que  $T_{agua\ 2A} = T_{sat}$

A partir de la eficiencia podemos calcular las condiciones del aire a la salida de la torre de refrigeración

$$h_2 = h_1 + \varepsilon_{sat} \cdot (h_{sat} - h_1) = 64,13 + 0,75 \cdot (278,01 - 64,13) = 224,29 \text{ kJ/kg}_{as}$$

$$T_2 = T_1 + \varepsilon_{sat} \cdot (T_{sat} - T_1) = 35,07 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\omega_2 = \omega_1 + \varepsilon_{sat} \cdot (\omega_{sat} - \omega_1) = 0,0691 \text{ kg/kg}_{as}$$

El caudal del agua de reposición vendría dado por

$$\dot{m}_{rep} = \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \quad (\text{ec. 1})$$

El calor disipado por el aire resulta:

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{m}_{aire} \cdot (h_2 - h_1) \quad (\text{ec. 2})$$

Entonces analizamos el balance de energía en el lecho poroso.

Las condiciones del agua a la salida de la torre con dirección hacia el condensador serán 1A, las condiciones de estado del agua que proviene del condensador se definen como 2A, y las condiciones del agua tras pasar el lecho poroso serán 3A.

b) Una vez se tienen los valores de temperatura y entalpía de los distintos puntos de la instalación se evalúan los balances.

El balance de energía en el lecho poroso viene dado por:

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{m}_{agua} \cdot h_{2A} - (\dot{m}_{agua} - \dot{m}_{rep}) \cdot h_{3A} \quad (\text{ec. 3})$$

Sustituyendo la ecuación 1 y 2 en la ecuación 3 se tiene la ecuación (4)

$$\dot{m}_{aire} \cdot (h_2 - h_1) = \dot{m}_{agua} \cdot h_{2A} - (\dot{m}_{agua} - \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1)) \cdot h_{3A}$$

$$h_{3A} = \frac{\dot{m}_{agua} \cdot h_{2A} - \dot{m}_{aire} \cdot (h_2 - h_1)}{\dot{m}_{agua} - \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1)} \quad (\text{ec. 4})$$

Si el agua que sale hacia los condensadores debe estar a 20°C,  $h_{1A} = 83,6 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ , y el agua de reposición entra a 10°C,  $h_{rep} = 41,8 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ .

Por balance de energía en la cubeta de decantación de la torre se tiene que:

$$\dot{m}_{agua} \cdot h_{1A} = (\dot{m}_{agua} - \dot{m}_{rep}) \cdot h_{3A} + \dot{m}_{rep} \cdot h_{rep} \quad (\text{ec. 5})$$

Sustituyendo las ecuaciones (1) y (4) en la ecuación (5) se tiene

$$\dot{m}_{agua} \cdot h_{1A} = (\dot{m}_{agua} - \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1)) \cdot h_{3A} + \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_{rep}$$

Resultando la siguiente ecuación que es equivalente al balance global en la torre de refrigeración:

$$\dot{m}_{agua} \cdot h_{1A} = (\dot{m}_{agua} - \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1)) \cdot \frac{\dot{m}_{agua} \cdot h_{2A} - \dot{m}_{aire} \cdot (h_2 - h_1)}{\dot{m}_{agua} - \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1)} + \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_{rep}$$

$$\dot{m}_{agua} \cdot h_{1A} = \dot{m}_{agua} \cdot h_{2A} - \dot{m}_{aire} \cdot (h_2 - h_1) + \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_{rep}$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{\dot{m}_{agua} \cdot (h_{2A} - h_{1A})}{(h_2 - h_1) - (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_{rep}} = 0,401 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{rep} = \dot{m}_{aire} \cdot (\omega_2 - \omega_1) = 0,401 \cdot (0,0691 - 0,0133) = 0,022 \text{ kg/s}$$

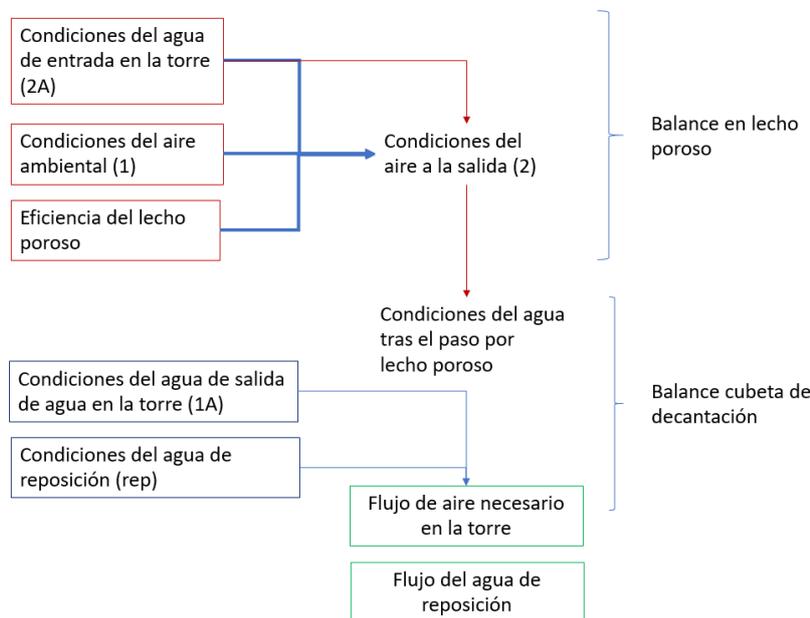
Como se ha comprobado se obtiene el flujo de aire y el agua de reposición necesarios.

No obstante, se puede obtener también la entalpía específica del agua tras su paso por el lecho poroso,  $h_{3A} = 85,56 \text{ kJ/kg}$ , eso significa que tiene una temperatura de  $20,47^\circ\text{C}$

## 6 Cierre

Como ha podido comprobarse, la secuencia de análisis de la torre de refrigeración comienza con conocer las condiciones de entrada y salida del agua, también de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa del aire de entrada), la eficiencia del lecho poroso por donde discurre el agua en la torre y la temperatura del agua de reposición. A partir de estos datos se realiza balance de energía en el lecho y en la cubeta de decantación.

A partir de los balances se calcula el caudal de aire necesario introducir en la torre para refrigeración del agua en la torre, y el caudal de reposición para que funcione en estado estacionario.



**Figura 4:** Esquema de los cálculos del análisis de una torre de refrigeración

## 7 Ejercicios propuestos

### Ejercicio 1

Del condensador de una instalación de refrigeración salen 5 kg/s de agua a 45°C hacia la torre de refrigeración. El agua que sale de la torre hacia el condensador es de 30°C. Las condiciones ambientales son 35°C y 35 % de humedad relativa. La eficiencia del humidificador es del 80 %. La temperatura del agua de reposición es de 8°C. Determínese el aire necesario en la torre y el caudal del agua de reposición.

[Solución](#)

## 8 Bibliografía

Albright, L. D. (1990). Environment control for animals and plants. Ed. American Society of Agricultural Engineers.

ATECYR (2010). Fundamentos de climatización: para instaladores e ingenieros recién titulados. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)

ATECYR (2016). Fundamentos de refrigeración. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)(Fernández Seara, J. et al.)

Bakker, J. C., Bot, G. P. A., Challa, H., van de Braak, N. J. (Eds.). (1995). Greenhouse climate control: an integrated approach. Wageningen Academic Publishers.

Carbó Ballester, J. (2021). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Ed. Marcombo.

DTIE 3.01, psicrometría (Pinazo Ojer, José Manuel | García Lastra, Arcadio | ATECYR)

DTIE 7.05, cálculo de cargas térmicas (Pinazo Ojer, José Manuel | Soto Francés, Víctor Manuel | García Lastra, Arcadio | ATECYR)

Fenton, Donald L. (2010). Fundamentals of refrigeration I-P. Ed. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

Pinazo, JM (1996) Cálculo de instalaciones frigoríficas. Editorial UPV

[Real Decreto 1027/2007](#), de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.

[Real Decreto 552/2019](#), de 27 de septiembre, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias.

Stoecker, Wilbert F. (1998). Industrial refrigeration handbook. Ed. McGraw-Hill Education

Velázquez Martí, B. (2017). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Ed. UPV-Reverté. 885 pp.