

PRÁCTICA DE TRANSMISIÓN DE CALOR

1. Objetivo de la práctica

La práctica de laboratorio consiste en el cálculo de las pérdidas térmicas hacia el ambiente en una caldera eléctrica para generación de vapor.

En concreto, se realizarán dos pruebas, correspondientes a diferentes condiciones de producción de vapor (y, por tanto, diferentes aportes de energía al generador), con los siguientes objetivos:

- La toma de contacto con el generador de vapor (dimensiones del equipo, funcionamiento, etc...) y con el resto de elementos auxiliares (válvula de solenoide, inyector de vapor, elementos de instrumentación, etc...).
- Calcular el coeficiente transferencia exterior, asociado a la transferencia de calor convectivo-radiante desde la pared de la caldera hacia el aire ambiente, para obtener una estimación de las pérdidas térmicas.
- Cuantificar la cantidad de vapor generada y la energía aportada a la caldera (mediante las correspondientes ecuaciones de balance), así como su rendimiento térmico.

2. Fundamentos teóricos

En una caldera para producción de vapor existen tres corrientes de energía significativas, como se muestra en la *Figura 1*. En primer lugar, tenemos el aporte realizado a la caldera desde el exterior, Q_{cal} , para la generación de vapor. Esta energía puede ser introducida en el equipo bien a través de un combustible (por ejemplo, en el caso de calderas alimentadas con gas o fuel-oil) o bien mediante energía eléctrica (como será el caso a estudiar en esta práctica), gracias a la potencia térmica disipada por la acción de resistencias eléctricas alimentadas desde la red.

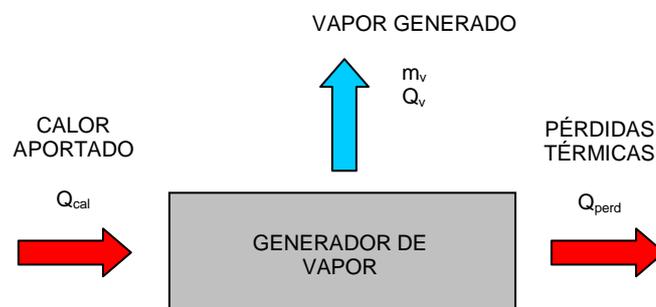


Figura 1. Corrientes de energía en un generador de vapor

En segundo lugar, encontramos el efecto útil producido en la caldera, que no es otro que el caudal de vapor generado, m_v . Si h_v es la entalpía del vapor en el estado correspondiente a las condiciones de generación, entonces:

$$Q_v = m_v h_v \Rightarrow m_v = \frac{Q_v}{h_v}$$

La última corriente de interés son las pérdidas térmicas disipadas al ambiente, Q_{perd} , que representan un efecto negativo, pues se trata de una parte de la energía aportada que no está siendo empleada en producir vapor. Dicho flujo de calor es transferido hacia el aire ambiente (a temperatura T_{amb}) por convección y por radiación, siendo:

$$Q_{perd} = Q_{conv} + Q_{rad}$$

$$Q_{conv} = A_{cal} \bar{h} (T_S - T_{amb})$$

$$Q_{rad} = A_{cal} \epsilon \sigma (T_S^4 - T_{amb}^4)$$

donde A_{cal} es el área exterior y T_S la temperatura superficial exterior de la caldera; si ésta trabaja a presión atmosférica, el vapor saturado producido se encontrará a 100 °C, y la temperatura superficial tendrá un valor inferior (cuánto de inferior dependerá del aislamiento térmico del equipo), por lo cual:

$$T_S - T_{amb} < 100 \text{ °C} \Rightarrow T_S^4 - T_{amb}^4 \approx 4 \left(\frac{T_S + T_{amb}}{2} \right)^3 (T_S - T_{amb})$$

Definiendo el *coeficiente radiante*, h_{rad} (con ambas temperaturas en K), el flujo de calor por radiación queda:

$$h_{rad} = 4 \epsilon \sigma \left(\frac{T_S + T_{amb}}{2} \right)^3 \Rightarrow Q_{rad} = A_{cal} h_{rad} (T_S - T_{amb})$$

El coeficiente de película medio, asociado al término Q_{conv} , se obtendrá empleando la correspondiente correlación de convección libre sobre una placa plana vertical. A partir de ambos coeficientes de transferencia, la expresión para Q_{perd} puede ser planteada en función del *coeficiente convectivo-radiante exterior*, h_{cre} , como:

$$h_{cre} = \bar{h} + h_{rad} \Rightarrow Q_{perd} = A_{cal} h_{cre} (T_S - T_{amb})$$

De todo lo anterior, podemos plantear la ecuación de balance de energía en el generador como:

$$Q_{cal} = Q_v + Q_{perd}$$

es decir: una parte de la energía aportada al generador se emplea en producir vapor, mientras que otra parte es desperdiciada por transmisión hacia el ambiente. Indicamos, no obstante, que en el planteamiento de dicho balance no se ha considerado la corriente de energía asociada al agua en estado líquido que entra en el equipo para ser transformada en vapor, por tratarse de un término muy poco significativo frente a los demás que sí han sido descritos.

La importancia relativa de las pérdidas térmicas frente a la energía total aportada al equipo viene cuantificada a través del *rendimiento térmico* de la caldera, definido como:

$$\eta_{cal} = \frac{Q_{cal} - Q_{perd}}{Q_{cal}} = \frac{Q_v}{Q_{cal}}$$

Cuanto más cercano a la unidad sea el valor de η_{cal} , menores serán las pérdidas térmicas frente a la energía aportada, y, por tanto, mejor será el funcionamiento del equipo.

3. Montaje experimental

3.1. Descripción de la unidad

En la *Figura 2* se muestra un esquema de la unidad de laboratorio. En ella podemos observar el generador eléctrico de vapor, que consiste en un tanque de planta rectangular. El valor de la superficie exterior es:

$$A_{cal} = 0.2 \text{ m}^2$$

La caldera opera a presión atmosférica, por lo que el vapor es generado en condiciones de saturación a 100 °C, siendo su entalpía específica:

$$h_v = 2676.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

La energía necesaria es aportada mediante tres elementos calentadores (las resistencias eléctricas C1, C2 y C3), que pueden ser accionados por separado.

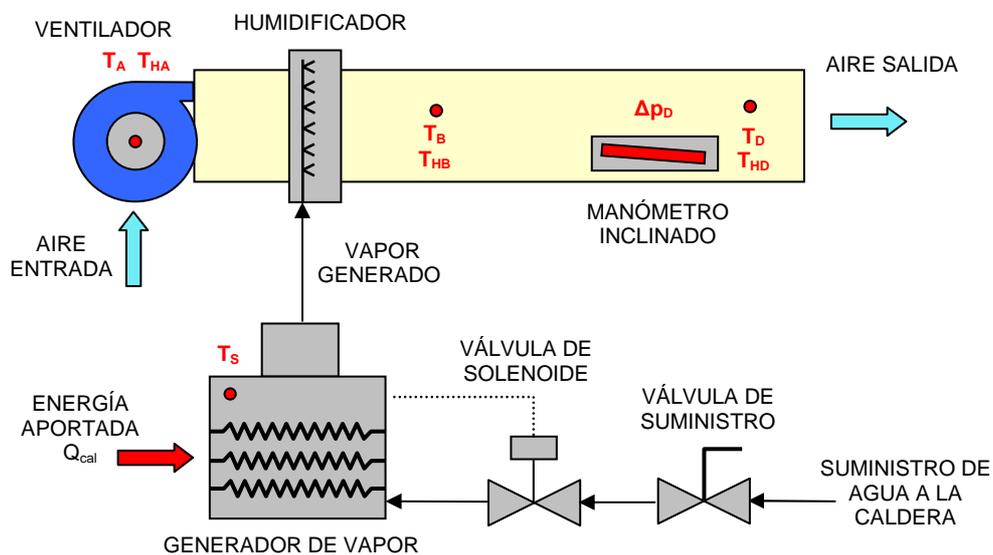


Figura 2. Generador de vapor en la unidad de laboratorio Hilton A-575

En la cara superior encontramos la línea de vapor que viaja hacia los inyectores; éstos se encuentran en el interior de una conducción principal, para humidificar una corriente de aire que circula gracias a la acción de un ventilador. Mediante un balance de energía sobre el aire a su paso por el inyector, es posible obtener la energía asociada a la corriente de vapor como:

$$Q_V = m_a (h_B - h_A)$$

La válvula de solenoide, situada en la entrada del agua de red al recipiente, es quien regula el llenado del tanque del generador. Está controlada por un interruptor de flotador de nivel de agua, y consta de un motor eléctrico que acciona su cierre o apertura, según la información que recibe del sensor de flotador situado en el interior del tanque. Con el generador en funcionamiento, la válvula trabaja casi de forma continua, abriéndose y cerrándose según el sensor de nivel avise del vaciado del tanque (debido al vapor generado y enviado al humidificador) o de su correcto llenado (debido al agua procedente de la red, cuando la válvula de solenoide se encuentra abierta).

Finalmente, para la obtención del coeficiente de película medio (necesario a la hora de cuantificar la transferencia de calor desde la pared exterior del generador) tomaremos como longitud característica el alto de la caldera, dado por:

$$L = 0.144 \text{ m}$$

Asimismo, la emisividad ε de la superficie de la caldera puede suponerse como la del acero inoxidable, igual a 0.22.

3.2. Medida de variables

Serán realizadas dos pruebas, correspondientes a dos velocidades diferentes de generación de vapor. Para cada uno de estos procesos, y según se muestra en el esquema de la *Figura 2*, las medidas a realizar son:

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).

3.2.2. Medidas de temperatura

Existe una pareja de termómetros, de bulbos seco y húmedo, colocados a la entrada y a la salida del humidificador. De este modo son obtenidas los valores de las temperaturas seca y húmeda en las estaciones de medida *A* y *B* (véase *Figura 7.1*), y que a su vez permiten la obtención de la entalpía específica asociada al estado del aire en esos puntos. Estos valores serán necesarios para resolver la ecuación de balance que proporciona el valor de la energía Q_V . La temperatura seca tomada en *A* nos da, además, el valor de la temperatura del aire ambiente, T_{amb} , necesaria para el cálculo de las pérdidas, Q_{perd} .

Para la medida de la temperatura superficial exterior de la caldera, T_S , se emplea un termopar, cuyo sensor es aplicado directamente sobre la pared del generador.

4. Toma de datos

Se muestra a continuación la hoja de medidas, *Tabla 1*, donde encontramos las tomas de variables para cada uno de las dos pruebas realizadas.

			<i>Prueba I</i>	<i>Prueba II</i>
<i>Caldera</i>		<i>C1</i>		
		<i>C2</i>		
		<i>C3</i>		
<i>Aire</i>	<i>A</i>	T_A (°C)		
		T_{HA} (°C)		
	<i>B</i>	T_B (°C)		
		T_{HB} (°C)		
	<i>D</i>	T_D (°C)		
		T_{HD} (°C)		
Δp_D (mm c.a.)				
T superficial	T_S (°C)			

Tabla 7.1. Hoja de datos para la toma de medidas

5. Resultados y cuestiones

Para cada una de las dos pruebas realizadas, se pide:

1. Determinar la energía asociada a la corriente de vapor, así como el caudal másico de vapor generado.
2. Calcular el coeficiente de transferencia convectivo-radiante exterior y, a partir de él, las pérdidas térmicas de la caldera por transmisión hacia el ambiente.
3. Calcular la energía aportada al generador, junto con su rendimiento térmico.

Se pide, como cuestión adicional, describir qué otras corrientes de energía existen asociadas al proceso de generación y al posterior transporte del vapor hacia el humidificador, así como justificar, de manera cualitativa, el motivo por el que estas corrientes de energía no son tenidas en cuenta a la hora de resolver las ecuaciones de balance.