



© 1995-2026 by Isidoro Martínez

## 8. THERMODYNAMICS OF HUMID AIR

- 8.1. Un día seco y caluroso en Madrid se registraron los siguientes datos meteorológicos: temperatura 40 °C, presión 705 mm de Hg, humedad relativa del aire 30%. Se desea calcular:
- La humedad específica.
  - La temperatura de rocío.
  - La temperatura de saturación adiabática.
  - El calor a evacuar por m<sup>3</sup> de aire para alcanzar la temperatura de rocío.
  - La cantidad de agua a añadir por m<sup>3</sup> de aire para alcanzar la temperatura de saturación adiabática.
- 8.2. En un recipiente de 5 litros, en una atmósfera a 90 kPa, 27 °C y 50% de humedad relativa, se vierten 3 litros de agua y a continuación se cierra herméticamente. Se pide:
- Calcular la cantidad de vapor de agua en el instante inicial y en el equilibrio final.
  - Calcular el calor intercambiado con el exterior.
  - Calcular la producción de entropía en el proceso.
  - Posteriormente se calienta el recipiente hasta que la presión interior alcanza los 450 kPa. Suponiendo que el nivel de líquido apenas varía, calcular la temperatura alcanzada y la masa de agua evaporada.
  - Calcular el calor comunicado en el caso anterior.
- 8.3. Calcular la cantidad de agua que hay que añadir para pasar aire atmosférico de 2 °C y 70% de humedad a 26 °C y 40% de humedad.
- 8.4. Se trata de determinar la variación de la humedad relativa con la presión en una evolución isentrópica de aire húmedo. Se pide:
- Calcular la pendiente  $\left. \frac{\partial \phi}{\partial p} \right|_s$ .
  - Calcular la humedad relativa a 200 kPa sabiendo que a 100 kPa es del 80%.
  - Estimar la presión a la que condensaría la mezcla.
- 8.5. Determinar las condiciones a la salida tras mezclar dos corrientes, una de 0,01 kg/s de aire húmedo a 200 kPa, 50 °C y 50% de humedad relativa, y la otra de 0,001 kg/s de vapor de agua saturado a 100 kPa, sabiendo que la salida es a 100 kPa.
- 8.6. En la etapa previa de una planta de licuación de aire, se comprime aire ambiente a 25 °C, 100 kPa y 50% de humedad hasta 10 MPa, y se deja enfriar. Calcular la cantidad de agua que condensa.
- 8.7. Se dispone de un depósito de 5 m<sup>3</sup> conteniendo vapor de agua a 200 °C y 1 MPa en presencia de una atmósfera a 15 °C, 100 kPa y 60% de humedad. Se pide:
- Trabajo máximo obtenible si sólo se contempla el atemperamiento a volumen constante.
  - Trabajo máximo obtenible si se contempla el equilibrio térmico y mecánico.
  - Trabajo máximo obtenible si se contempla el equilibrio térmico y mecánico y además se contabiliza el efecto de la dilución del agua en el aire.

- 8.8. Para refrigerar el condensador de una central nuclear de 1000 MW de rendimiento térmico de 0,33 se va a usar una torre húmeda que enfriará el agua 10 °C. Se pide:
- Calcular el gasto de agua que debe circular para enfriar el condensador.
  - Calcular el gasto de agua perdido por evaporación.
- 8.9. Se desea enfriar una corriente de agua de 100 kg/s desde 40 °C hasta 33 °C en una torre por contacto con aire atmosférico a 30 °C, 93 kPa y 50% de humedad. Suponiendo que el aire alcanza el equilibrio termodinámico con el agua, se pide:
- Temperatura de rocío, temperatura de saturación adiabática y humedad absoluta de la atmósfera.
  - Humedad absoluta a la salida.
  - Gasto de aire necesario.
  - Gasto de agua evaporado.
  - Calor evacuado.
- 8.10. Para el acondicionamiento de verano de un local a 21 °C y 50% de humedad, estando el exterior a 35 °C de bulbo seco y 25 °C de bulbo húmedo, se utiliza un refrigerador para enfriar el aire y saturarlo, seguido de un calentador posterior. Sabiendo que el local recibe 20 kW y que se hace recircular el 80% del aire, el cual sale del local a 25 °C y 45% de humedad, se pide:
- Flujo de aire necesario.
  - Estado del aire suministrado al local.
  - Potencias de refrigeración y calefacción necesarias.
  - Cantidad de agua recibida del local.
- 8.11. Se desea pasar una corriente de aire de 1,3 kg/s desde unas condiciones atmosféricas de 5 °C, 90 kPa y 20% de humedad relativa hasta 30 °C y 90% de humedad. Se pide:
- Estimar el coste energético mínimo (camino perfecto).
  - Suponiendo que se usase un calentador eléctrico, calcular la potencia necesaria.
  - Suponiendo que se usase una bomba de calor de Carnot, calcular la potencia necesaria.
  - Suponiendo que se usase una bomba de calor con R-12 como fluido de trabajo, con un rendimiento adiabático del compresor de 0,8 y 5 °C de salto térmico en los cambiadores, calcular la potencia necesaria.
- 8.12. Por la parte superior de una torre de refrigeración entran 50 m<sup>3</sup>/h de agua a 45 °C y se desea obtener una disminución de temperatura de 15 °C. El aire que entra por la parte inferior está a 25 °C y 50% de humedad, y se desea que salga por la parte superior saturado a 44 °C. Se pide:
- Gasto de aire requerido.
  - Gasto de agua perdido.
  - Densidad del aire a la entrada y a la salida.
  - Diámetro de la torre para que la velocidad media del aire sea de 5 m/s.
- 8.13. Se desea enfriar 300 kg de agua por minuto desde 50 °C a 25 °C en una torre de refrigeración. Para ello se hacen circular por ella 730 m<sup>3</sup>/min de aire atmosférico a contracorriente. La atmósfera está a una presión de 94 kPa y las temperaturas de bulbo seco y húmedo son 25 °C y 15 °C, respectivamente. En el proceso de mezcla se pierde el 3,7% de agua por evaporación. Se pide:
- Humedad relativa y absoluta y temperatura de rocío de la atmósfera.
  - Densidad del aire a la entrada.
  - Humedad absoluta y temperatura del aire a la salida.

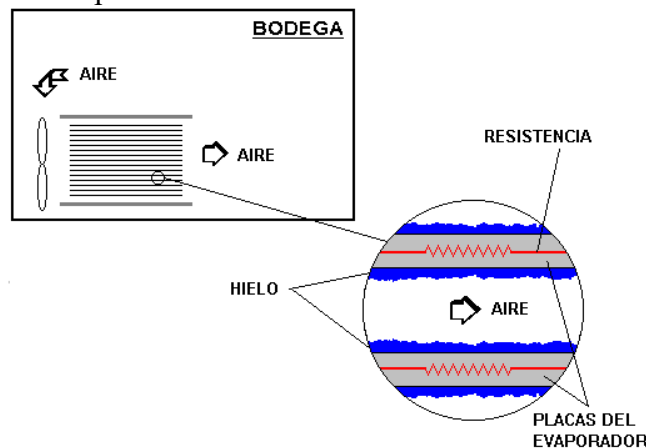
- 8.14. Para el acondicionamiento de un local en verano se toma una corriente de 0,1 kg/s de aire atmosférico a 32 °C, 100 kPa y 50% de humedad y se enfría (parte del agua condensa y se elimina) con un refrigerador que utiliza R-12 y funciona con presiones máxima y mínima de 0,9 MPa y 0,4 MPa; el rendimiento adiabático del compresor es de 0,8. Esta corriente de aire frío y saturado se mezcla adiabáticamente con otra corriente de aire atmosférico sin tratar, saliendo todo a 24 °C y 70% de humedad. Se pide:
- Esquema de la instalación y diagramas termodinámicos ( $h-w$  y  $T-s$ ) de los procesos.
  - Temperatura de rocío y de saturación adiabática de la atmósfera.
  - Humedades absolutas de las tres corrientes implicadas.
  - Temperatura a la que hay que enfriar la corriente mencionada, y calor a evacuar.
  - Gasto de aire a la salida de la cámara de mezcla.
  - Temperaturas del R-12 en el refrigerador.
  - Gasto circulante de R-12.
  - Potencia necesaria para el refrigerador.
- 8.15. En un depósito de 30 m<sup>3</sup> hay inicialmente 1 m<sup>3</sup> de agua líquida en equilibrio con aire a 15 °C y 100 kPa. Se introducen 100 kg de agua en estado bifásico a 700 kPa y 50% de fracción másica de vapor y se alcanza un nuevo estado de equilibrio definido por  $p_F$  y  $T_F$ . Se pide:
- Expresión de la cantidad de sustancia de agua en función del volumen de líquido en equilibrio (suma de la cantidad de sustancia de agua líquida y vapor de agua).
  - Cantidades de sustancia de agua y aire iniciales.
  - Cantidades de sustancia de agua y aire finales.
  - Plantear las ecuaciones de conservación de masa y energía para el depósito.
  - Volumen final de líquido si  $T_F = T_{inicial}$ .
  - Variación de la presión interior en el caso anterior.
  - Calor que debe salir del depósito en el caso citado.
  - Temperatura final si el proceso fuese adiabático.
  - Variación de la presión interior en el caso anterior.
- 8.16. A una corriente de 1 kg/s de aire a 100 kPa, 20 °C y 90% de humedad se le añade un pequeño flujo de vapor de 0,01 kg/s a 100 kPa y una temperatura  $T$ . Se pide:
- Calcular las condiciones de salida para  $T=100$  °C y 500 °C.
  - Determinar para qué valor de  $T$  la salida está saturada.
  - Determinar para qué valor de  $T$  no varía la humedad relativa.
  - Esquema de las evoluciones en el diagrama de Mollier del aire húmedo
- 8.17. A una corriente de 1 kg/s de aire a 100 kPa, 30 °C y 85% de humedad se le añade un pequeño flujo de agua de 0,001 kg/s a 100 kPa a temperatura  $T$ . Se pide:
- Calcular las condiciones de salida para  $T=10$  °C y 90 °C.
  - Determinar para qué valor de  $T$  la salida está saturada.
  - Determinar para qué valor de  $T$  no varía la humedad relativa.
  - Esquema de las evoluciones en el diagrama de Mollier del aire húmedo.
- 8.18. En un recipiente rígido de 1 m<sup>3</sup> hay aire a 20 °C, 92 kPa y 50% de humedad. Se pide:
- Masa de aire y de H<sub>2</sub>O iniciales.
  - Masa de agua líquida que hay que añadir para saturar el aire a esa temperatura, y presión que se alcanzaría.

- c) Estado termodinámico que se alcanzaría al añadir  $200 \text{ cm}^3$  más de agua líquida.  
d) Calor que sería necesaria comunicar al sistema para evaporar toda el agua.
- 8.19. En un recipiente rígido de 5 litros hay inicialmente 4 litros de agua y 1 litro de aire en equilibrio a presión y temperatura ambiente. Se pide:
- Composición de la fase gaseosa.
  - Temperatura interior que se alcanzaría al calentar hasta una presión de 200 kPa.
  - Suponiendo que una válvula de escape mantiene esa presión aunque se prosiga el calentamiento, indicar cómo variaría la composición en la fase gaseosa, calculándola para algunos valores de la temperatura alcanzada.
- 8.20. En un recipiente cerrado y rígido de 10 litros hay inicialmente 1 litro de agua y el resto de aire ambiente a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 94 kPa y 60% de humedad relativa. Se calienta el conjunto hasta  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se pide:
- Masa y cantidad de sustancia iniciales de cada especie.
  - Presión y cantidad de sustancia finales de cada especie.
  - Balance energético del contenido.
- 8.21. Determinar el calor a extraer de una corriente de aire húmedo de  $0,5 \text{ kg/s}$  a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , 95 kPa y 90% de humedad, para que salga a  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- 8.22. Una secadora de ropa extrae 1 kg de agua por hora de funcionamiento, tomando aire atmosférico a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 90 kPa y 40% de humedad y soltándolo saturado a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se pide:
- Gasto de aire necesario..
  - Potencia eléctrica necesaria.
  - Ahorro que supondría el usar un cambiador de calor para calentar el aire de aporte con el de salida.
  - Suponiendo que el proceso se pudiera aproximarse por una serie de calentamientos de una corriente de aire húmedo hasta  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , seguido de enfriamientos por saturación adiabática, calcular el número de etapas requerido.
- 8.23. Se desea incrementar del 40% al 60% la humedad relativa de una corriente de  $10 \text{ m}^3$  por minuto de aire atmosférico que está a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y 90 kPa. Para ello se va a calentar previamente un flujo  $\dot{m}_1$  de agua desde los  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  mediante la adición de un flujo  $\dot{m}_2$  de vapor saturado a 250 kPa. Después se inyecta pulverizada el agua caliente en la corriente de aire y mediante un cambiador de calor se consigue que la salida esté a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se pide:
- Hacer un esquema de la instalación y de los diferentes procesos en los diagramas termodinámicos más adecuados.
  - Calcular las humedades absolutas a la entrada y a la salida.
  - Calcular el valor de  $\dot{m}_2/\dot{m}_1$  necesario para alcanzar los  $95 \text{ }^\circ\text{C}$
  - Calcular  $\dot{m}_1$  y  $\dot{m}_2$  necesarios para conseguir la humedad de salida.
  - Calcular el intercambio en el cambiador de calor para conseguir que salga a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- 8.24. Se trata del dimensionamiento de un sistema de desescarchado por resistencia eléctrica del evaporador de la bodega de de un buque frigorífico. Se conocen los siguientes datos:
- área externa de las paredes del evaporador,  $32 \text{ m}^2$
  - temperatura de las paredes del evaporador,  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$
  - área de la sección de paso del aire,  $2 \text{ m}^2$
  - velocidad media del aire  $1 \text{ m/s}$

- entrada del aire a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 85% de humedad
- salida del aire a  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 90% de humedad
- espesor del hielo antes del desescarchado, 0,5 mm
- tiempo máximo de desescarchado, 15 minutos

El problema es el siguiente (ver figura). La cámara frigorífica (i.e. el aire interior) está refrigerada por el evaporador (presumiblemente de una máquina de R-12) sobre el que se hace recircular el aire mediante un ventilador. El aire, al ser enfriado en las paredes del evaporador por debajo de su temperatura de rocío (de escarcha, por ser la temperatura bajo cero) deposita agua en forma de hielo sobre la pared fría del evaporador. El desescarchado es necesario para que no disminuya el paso de aire y empeore la transmisión de calor, y conviene hacerlo regularmente, parando la máquina refrigerante y conectando una resistencia eléctrica embebida en la chapa del evaporador para el desescarchado, antes de que se acumule mucho hielo. Se pide:

- Presiones de vapor del hielo a las temperaturas de entrada y salida.
- Humedades absolutas a la entrada y a la salida del aire.
- Gasto másico de hielo depositado.
- Tiempo en que se alcanza el espesor de hielo de diseño (i.e. tiempo entre desescarchados).
- Potencia eléctrica necesaria para las resistencias.



8.25. Para deshumidificar una corriente de  $0,5\text{ kg/s}$  de aire ambiente que está a  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $90\text{ kPa}$  y 80% de humedad relativa hasta conseguir que sólo contenga 10 gramos de vapor por kg de aire se va a usar una máquina refrigeradora de R-12 con saltos mínimos en los cambiadores de calor de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se pide:

- Hacer un esquema del proceso que seguirá el aire en el diagrama psicrométrico  $h-w$ .
- Determinar las temperaturas y presiones de funcionamiento de la máquina refrigeradora.
- Calcular el gasto de agua condensada y el gasto de R-12 necesario.
- Calcular el coste enérgico.

8.26. A una corriente de aire en condiciones ambientales de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $90\text{ kPa}$  y 80% de humedad relativa (estado A), se le añade un flujo de vapor de agua a  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  y esa misma presión (estado B), saliendo la mezcla también a esa presión (estado C). Sea  $\mu$  la relación de gastos másicos de las corrientes de vapor y aire. Se pide:

- Determinar las densidades en los estados A y B.
- Supóngase que el estado C consiste sólo en aire húmedo saturado y determínese la humedad absoluta y la temperatura correspondiente en función de  $\mu$  (con aplicación numérica para  $\mu=10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$ ).
- Establecer el balance energético y calcular el intercambio térmico que sería necesario para que se cumpliera la hipótesis anterior (calor a aportar por unidad de gasto másico de aire seco).
- Sabiendo que el proceso real es rápido, indicar cómo se determinaría realmente el estado C.

- 8.27. Se propone el siguiente modelo para analizar un accidente en una sala de máquinas. Un recinto estanco de  $100 \text{ m}^3$  con aire a  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $99 \text{ kPa}$  y  $80\%$  de humedad recibe la descarga súbita de un depósito de  $2 \text{ m}^3$  de vapor a  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ MPa}$ . Se pide:
- Cantidad de vapor de agua, temperatura de rocío y temperatura de saturación adiabática iniciales del recinto.
  - Estimar el estado termodinámico en el depósito de vapor tras la descarga y la masa de agua que escapa.
  - Enumerar las variables independientes que se van a usar para determinar el estado termodinámico final del recinto y las ecuaciones de ligadura a que van a estar sujetas.
  - Resolver el apartado anterior y comentar la posible fatalidad del accidente teniendo en cuenta que en tales situaciones se estima en 2 minutos el tiempo necesario de evacuación, y resulta mortal respirar durante ese tiempo (dos o tres bocanadas) una atmósfera saturada a más de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- 8.28. Se mezcla una corriente de aire húmedo, que circula a  $1 \text{ m/s}$  por un conducto de  $20 \times 60 \text{ cm}^2$  de sección a  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $90\%$  de humedad y una sobrepresión equivalente a  $20 \text{ cm}$  de columna de agua, con otra corriente que circula a  $3 \text{ m/s}$  por un conducto de  $30 \text{ cm}$  de diámetro a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , la misma humedad relativa, y una sobrepresión equivalente a  $30 \text{ cm}$  de columna de agua, saliendo la mezcla por un conducto de  $20 \times 60 \text{ cm}^2$  con una sobrepresión equivalente a  $10 \text{ cm}$  de columna de agua. Sabiendo que la instalación se encuentra en un local donde la altitud sobre el nivel del mar es de  $1000 \text{ m}$ , se pide:
- Presión ambiente.
  - Gasto másico, humedad absoluta, temperatura de rocío y temperatura húmeda de dichas corrientes.
  - Condiciones a la salida.
- 8.29. Sobre un lecho de agua se introduce una corriente de aire ambiente a  $1 \text{ m/s}$ ,  $0,01 \text{ m}^2$  de sección,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $94 \text{ kPa}$  y  $50\%$  de humedad. Se pide:
- Humedad absoluta a la entrada y a la salida suponiendo saturación adiabática.
  - Gasto másico de aire y de agua evaporada en el caso anterior.
  - Humedad absoluta a la entrada y a la salida suponiendo saturación isoterma.
  - Gasto másico de aire y de agua evaporada en el caso anterior.
  - Soponiendo que sólo el  $20\%$  de la corriente que sale del humidificador adiabático pasa por el humidificador isoterma y que el otro  $80\%$  se destina a refrigerar esta última corriente de salida, determinar el gasto condensado.
- 8.30. A una corriente de aire en condiciones ambientales de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $90 \text{ kPa}$  y  $50\%$  de humedad relativa (estado A), se le añade un flujo de vapor de agua saturado a esa misma presión (estado B), saliendo la mezcla también a esa presión (estado C). Sea  $\mu$  la relación de gastos másicos de las corrientes de vapor y aire. Se pide:
- Determinar las densidades en los estados A y B.
  - Supóngase que el estado C consiste sólo en aire húmedo saturado y determínese la humedad absoluta y la temperatura correspondiente en función de  $\mu$  (con aplicación numérica para  $\mu=10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$ ).
  - Establecer el balance energético y calcular el intercambio térmico que sería necesario para que se cumpliera la hipótesis anterior (calor a aportar por unidad de gasto másico de aire seco).
  - Sabiendo que el proceso real es rápido, indicar cómo se determinaría realmente el estado C.

- 8.31. Un modelo muy simplificado de la formación del vaho en la respiración animal puede ser el siguiente. En una primera etapa se realiza la mezcla del chorro de aire espirado, que se supondrá a 35 °C y 70% de humedad relativa, con un flujo másico igual de aire ambiente, que se supondrá a 90 kPa, 0 °C y 50% de humedad relativa, hasta alcanzar el equilibrio termodinámico (estado A). En una segunda etapa se realiza la mezcla del chorro en estado A con una masa 10 veces mayor de aire ambiente, alcanzándose el equilibrio termodinámico (estado B), acabando por diluirse completamente con el aire ambiente. Se pide:
- Determinar las densidades del aire ambiente y del espirado.
  - Determinar el estado A.
  - Determinar el estado B.
  - Determinar la relación de la masa de agua líquida a la de vapor en el estado A.
- 8.32. En un cierto lugar a 500 m de altura sobre el nivel del mar se ha usado un termohigrómetro de carraca para medir la temperatura seca y la húmeda, resultando ser de 30 °C y 20 °C, respectivamente, con una precisión estimada de  $\pm 1$  °C. Se pide:
- Humedad relativa del aire.
  - Incertidumbre en el cálculo anterior.
  - Trabajo mínimo necesario para obtener agua pura a partir del aire húmedo.
  - Gradiente isentrópico de temperatura vertical (es decir, variación de temperatura de una masa de aire que ascendiera rápidamente una distancia unitaria).
- 8.33. Determinar las condiciones a la salida de una cámara adiabática donde se mezclan dos corrientes de aire húmedo, una de 0,01 kg/s que entra saturada a 5 °C y la otra de 0,02 kg/s que entra a 40 °C y 70% de humedad.
- 8.34. En algunas aplicaciones puede convenir humedecer el gas natural (considérese metano puro) para evitar cargas electrostáticas. Se pide:
- Cantidad de agua máxima que admitiría el gas natural en condiciones ambientes.
  - En una cámara adiabática se le añade al gas natural seco la mitad del agua anterior, entrando ambas corrientes en condiciones ambientes. Determinar las condiciones de salida.
- 8.35. Se trata del estudio de las exergías involucradas en un separador de una mezcla binaria. Se pide:
- Exergía de una corriente binaria de gases ideales.
  - Exergía mínima para separar un componente puro (aplicación al oxígeno del aire).
  - Exergía mínima para obtener una cierta composición (aplicación al enriquecimiento de uranio desde el 0,72% al 3%).
  - Exergía para obtener un componente puro si es condensable (aplicación a la obtención de agua a partir del aire húmedo).
  - Exergía de una corriente de aire húmedo respecto a un ambiente de referencia a  $T_0$ ,  $p_0$  y  $\phi_0$ .
- 8.36. A un deshumidificador entran 300 m<sup>3</sup> por minuto de aire ambiente húmedo a 93 kPa, 40 °C y 90% de humedad, enfriándose hasta 15 °C. Se pide:
- El gasto másico a la entrada, la temperatura de rocío y la de bulbo húmedo.
  - Las condiciones de salida y la potencia de refrigeración necesaria.
  - Trabajo mínimo necesario para la refrigeración disponiendo de una sola máquina.
  - Variación de exergía entre la entrada y la salida.

- 8.37. La salida de gases del motor de un submarino es por un conducto horizontal de 20 cm de diámetro, con 1,5 kg/s de gases de escape (supóngase aire con un 15% de vapor de agua en volumen) a 450 °C y 200 kPa. A esta corriente se le añade en régimen estacionario un flujo de agua de 0,5 kg/s a 15 °C. Suponiendo despreciables las pérdidas de calor y las variaciones de presión, se pide:
- Densidad y velocidad media de los gases antes del mezclador.
  - Balances másicos y energético, y entalpías unitarias de entrada.
  - ¿Tiene sentido hablar de humedad absoluta y relativa del aire en esas condiciones de entrada? Calcular la temperatura de rocío.
  - Determinar el estado a la salida.
- 8.38. En un frasco de vidrio de 10 litros se introduce aire ambiente (con una bomba de bicicleta, a través del tapón) hasta que en un manómetro en U conectado al tapón, una vez atemperado todo, se alcanza 1 m de columna de agua de desnivel, todo ello en un ambiente a 22 °C, 93 kPa y 70% de humedad. Después, se pone rápidamente en comunicación el interior con el exterior (a través de una llave de paso). Se pide:
- Esquema de la instalación y de la evolución esperada de la presión, temperatura y humedad interiores durante el llenado, el escape y la continuación.
  - Determinar la cantidad de vapor y la humedad relativa justo antes de la despresurización (estado 1).
  - Determinar la humedad relativa inmediatamente después de la despresurización (estado 2).
- 8.39. Se trata del análisis energético de un secadero de malta (cebada germinada a remojo, donde el almidón se ha transformado en azúcar, que, una vez secada en caliente, i.e. tostada, se usa en la fabricación de cerveza y whisky). Aunque realmente suele hacerse el secado en tandas con bandejas perforadas, supóngase aquí que se hace en continuo soplando aire a 70 °C a contracorriente en un secadero en el que entran 150 toneladas/día de producto (malta) a 17 °C y con 45% de agua en peso, saliendo prácticamente a 70 °C y con 4% de agua. El aire a 70 °C se obtiene calentando aire desde las condiciones ambiente: 15 °C, 93 kPa y 60 % de humedad. Se pide:
- Estimar la potencia térmica que requiere la evaporación del agua del producto, y compararla con la requerida para calentar el producto seco suponiendo que su capacidad térmica es de 2000 J/(kg·K).
  - Establecer el balance másico de H<sub>2</sub>O y el balance energético del secadero despreciando el posible aporte de agua en el precalentamiento del aire.
  - Estimar la humedad absoluta de salida del aire del secadero, suponiendo que sale saturado, y calcular el gasto de aire.
  - Calcular el consumo energético de combustible de 40 MJ/kg de poder calorífico, usando un quemador para calentar el aire.
- 8.40. Se trata de analizar la mezcla binaria de N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O como modelo para el estudio del aire húmedo. Se pide:
- Construir el diagrama  $T-x$  a presión ambiente de las mezclas bifásicas (líquido-vapor) de N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, suponiéndolas ideales y sin más cambios de fase.
  - Determinar la composición de las fases saturadas a 288 K.
  - Indicar la utilidad del modelo.

- 8.41. A una corriente de 0,1 kg/s de aire atmosférico en condiciones 25 °C, 93 kPa y 50% de humedad relativa se le añade un flujo de vapor saturado a 93 kPa de 0,002 kg/s. Se pide:
- Temperaturas de rocío y de bulbo húmedo de la atmósfera.
  - Condiciones tras el mezclado.
- 8.42. Calcular la capacidad térmica isobárica de una corriente de aire húmedo saturada.
- 8.43. ¿A qué temperatura sale en el equilibrio adiabático una mezcla de aire ambiente a 30 °C y 60%HR, y agua fría, en función de la temperatura y el caudal de ésta?
- 8.44. En un recipiente cerrado y rígido se tiene inicialmente un mol de hidrógeno, medio mol de oxígeno y 1,88 moles de nitrógeno, a presión y temperatura ambiente. Se produce una chispa en su interior y tiene lugar la combustión, que se supone completa, quedando finalmente un mol de agua y 1,88 moles de nitrógeno a temperatura ambiente. Se pide determinar las fracciones másica y molar de hidrógeno en la mezcla inicial, el volumen del recipiente, y la presión final.
- 8.45. Una torre de enfriamiento evaporativo (torre de refrigeración) debe evacuar  $\dot{Q}=100$  kW de una corriente de 4 kg/s de agua que entra a 30 °C, estando la atmósfera a 20 °C y HR=70%. Suponiendo que el aire sale saturado a 27 °C, se pide:
- Esquema de la torre y expresión de los balances másicos y energético.
  - Humedad absoluta, temperatura de rocío y temperatura de saturación adiabática a la entrada y a la salida.
  - Gasto de agua evaporada.
  - Gasto de aire necesario.
- 8.46. A una corriente de 0,1 m<sup>3</sup>/s de aire ambiente a 20 °C, 90 kPa y 50% HR se le añade un chorro de un litro por segundo de vapor de agua saturado a presión ambiente. Se pide:
- Temperatura de bulbo húmedo de entrada.
  - Temperatura y humedad de salida.
  - Temperatura y humedad de salida si el el flujo de vapor fuese el doble.
- 8.47. Se tiene un tubo de ensayo de 1 cm de diámetro y 15 cm de altura, totalmente sumergido en un baño de agua ambiente abierto a la atmósfera. El tubo está sujeto verticalmente, boca abajo, a distancia despreciable del nivel del agua, y el nivel de agua en su interior está justamente en la mitad. Se pide:
- Cantidad de sustancia y presión del aire atrapado, y su humedad absoluta y relativa.
  - Plantear las ecuaciones de la evolución del gas atrapado al ir calentando el agua, indicando las variables independientes, las incógnitas y los datos.
  - Estado que alcanzaría el aire si el baño se pone a 70 °C.
- 8.48. Para una aplicación de pilas de combustible se necesita un flujo de 3 kg/h de aire húmedo a 80 °C y 50% de humedad relativa. El ambiente está a 20 °C, 94 kPa, y la humedad relativa es del 50%. Se pide:
- Temperaturas de rocío y de bulbo húmedo a la entrada, y humedades absolutas correspondientes.
  - Cantidades de aire y de agua que se necesita tomase del ambiente, si la salida también se quiere a 94 kPa.

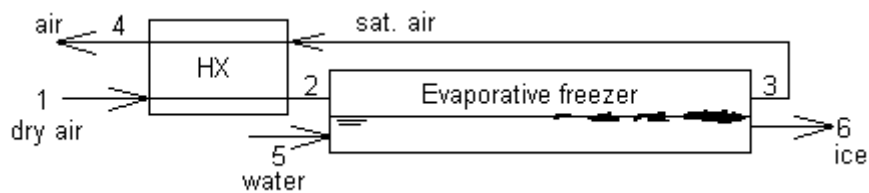
- c) Cantidades de aire y de agua que se necesita tomase del ambiente, si la salida se quiere a 300 kPa.
- d) Humedad relativa tras una compresión adiabática del aire ambiente hasta 300 kPa, antes de humidificar.

8.49. Una corriente de 0,1 kg/s de aire ambiente a 25 °C, 93 kPa y 50% HR se mezcla adiabáticamente con otra de 0,001 kg/s de vapor saturado a esa presión. Se pide:

- a) Esquema de la instalación y del proceso esperado en el diagrama  $h-w$  de Mollier.
- b) Densidad, temperatura de rocío y temperatura de saturación adiabática del aire ambiente.
- c) Densidad del vapor saturado.
- d) Temperatura de salida.
- e) Estado higrométrico a la salida.

8.50. La figura representa una hipotética instalación para producir hielo. Por 1 entra una corriente de 0,1 m<sup>3</sup>/s de aire seco a 20 °C que se enfría en el cambiador HX hasta 0 °C, entrando por 2 a una cámara de congelación evaporativa de la que sale saturado a 0 °C por 3, enfriando luego el aire de entrada en el cambiador HX. Por 5 entra agua a 15 °C, y por 6 sale hielo a 0 °C. Suponiendo que la transmisión de calor al exterior es despreciable, se pide:

- a) Esquema de la evolución del aire en el diagrama de Mollier  $h-w$ .
- b) Balances másicos y energético de la cámara de congelación.
- c) Cantidad de hielo que podría producirse.
- d) Estudiar el efecto de la presión ambiente.



8.51. En una torre de enfriamiento evaporativo, se desea evacuar 1 MW de una corriente de agua que entra a 45 °C y debe salir a 30 °C, con aire atmosférico a 20 °C y 30% de humedad relativa. Suponiendo que la presión es de 90 kPa, y que el aire a la salida va a estar a 25 °C y 80%HR, se pide:

- a) Esquema de la instalación y evolución del aire en el diagrama de Mollier  $h-w$ .
- b) Balances másicos y energético de la torre de enfriamiento. Caudal de agua.
- c) Estimar el gasto de agua por evaporación, suponiendo que todo el calor se invierte en evaporar la evaporación.
- d) Humedad absoluta y entalpía unitaria del aire, a la entrada y a la salida.
- e) Estimar el gasto de aire que hubiera sido necesario en un cambiador sin contacto aire/agua con las mismas temperaturas, y su valor en el caso de la torre.
- f) Gasto medio de agua que sería necesario purgar, suponiendo que el agua de aporte tiene un concentración de sólidos disueltos de 0,5 g/kg y no se desea que sobrepase 10 g/kg.

8.52. Se ha llenado lentamente una botella de plástico (PET) de 1,5 L y 0,2 mm de espesor con aire a 105 kPa, a partir de aire ambiente a 25 °C, 95 kPa y 65% de humedad relativa. Tras una maniobra de una llave de paso, la presión interior baja rápidamente hasta 100 kPa. Se pide:

- a) Determinar la humedad absoluta y relativa del aire encerrado inicialmente.
- b) Determinar la temperatura interior y la humedad relativa en el interior tras el escape.

- c) Determinar si con una descarga rápida hasta la presión ambiente se llegaría a empañar la botella.
- d) Determinar la presión de llenado a la que empezaría a empañarse la botella en el llenado lento.
- 8.53. Para el acondicionamiento ambiental de un local, se toma aire de la atmósfera, que está a 35 °C y 30%HR, y se produce aire a 15 °C y 70%HR mediante el enfriamiento de una fracción del aire aspirado (condensando parte del agua) y el mezclado posterior con la otra fracción. Se pide:
- Determinar la temperatura de rocío, la entalpía y la humedad absoluta del aire de entrada.
  - Determinar la temperatura de rocío, la entalpía y la humedad absoluta del aire de salida.
  - Plantear las ecuaciones del mezclado de ambas fracciones, indicando las incógnitas.
  - Resolver el problema anterior.
  - Determinar la fracción másica condensada.
  - Representación del proceso en el diagrama  $h-w$ .
- 8.54. Para el acondicionamiento ambiental de un local, se toma 10 L/s de aire de la atmósfera, que está a 33 °C y 35%HR, se enfría un 70% del caudal hasta 7 °C con una máquina refrigerante, y se mezcla con el resto. Se pide:
- Hacer un esquema de componentes y de los procesos del aire y del refrigerante.
  - Determinar la humedad absoluta y la entalpía del aire antes y después de pasar por el refrigerador.
  - Determinar el calor a evacuar en el refrigerador.
  - Determinar las condiciones de salida tras el mezclado.
- 8.55. A una torre de enfriamiento evaporativo entra agua a 40 °C y aire ambiente a 34 °C, 40% HR y 90 kPa. Se pide:
- Temperatura de rocío del aire ambiente.
  - Temperatura mínima a la que podría salir el agua (límite teórico).
  - Suponiendo que entren 5 kg/s de agua y salgan a 35 °C, determinar la capacidad de enfriamiento y el orden de magnitud de la fracción másica vaporizada.
  - En el caso anterior, caudal de aire mínimo necesario y condiciones de éste a la salida.
- 8.56. En un recipiente rígido y adiabático de 0,1 m<sup>3</sup> hay inicialmente 10 kg de agua en equilibrio con una mezcla de vapor y aire a 120 °C y 400 kPa. A partir de un cierto instante se abre una válvula en el fondo del recipiente y se eliminan rápidamente 5 kg de agua. Se pide:
- Cantidades de sustancias iniciales.
  - Determinar el estado final si, antes del escape, se hubiera dejado atemperar el recipiente hasta 20 °C.
  - Si el proceso es el del escape rápido, determinar el estado inmediatamente después del escape, suponiendo que no hay condensación.
  - Evaluar si hay condensación, y su cuantía
- 8.57. Para una estimación del agua contenida en toda la atmósfera, se va a suponer que se trata de una capa de aire saturado, con unos perfiles verticales de temperatura  $T(z)$  y de presión  $p(z)$  conocidos. Se pide:
- Expresión genérica de la cantidad de agua por unidad de volumen, en función de  $T(z)$  y  $p(z)$ .

- b) Para  $z=0$  y  $z=6$  km, calcular la densidad del aire y la proporción de agua, usando las fórmulas de la atmósfera estándar:  $T(z)=T_0(1-T'z/T_0)$  y  $p(z)=p_0(1-T'z/T_0)^{g/(RT)}$ , con  $T_0=15$  °C,  $T'=6.5$  °C/km,  $p_0=101$  kPa,  $g=9,8$  m/s<sup>2</sup> y  $R=287$  J/(kg·K).
- c) Aproximar la cantidad de agua por una exponencial ajustada en los valores anteriores, y determinar la cantidad total de agua en la atmósfera.
- 8.58. Se va a usar una torre húmeda para enfriar 4 kg/s de agua a 40 °C hasta 30 °C, usando aire ambiente a 93 kPa, 25 °C y 50% HR, rellenando el circuito cada vez que se hayan perdido 50 litros de agua. Como el agua de aporte lleva 400 ppm en peso de sólidos disueltos, y en el circuito no se quiere sobrepasar una concentración máxima de 5000 ppm, cada cierto tiempo se purga totalmente los 150 litros del circuito. Se pide:
- Estimar el flujo de agua evaporado.
  - Estimar el flujo de aire necesario.
  - Estimar el flujo de purga necesario si, en lugar de proceder por lotes como indica el enunciado, se realizasen todos los procesos en continuo.
  - Estimar cada cuanto tiempo habría que reponer, y cada cuanto tiempo habría que purgar.
- 8.59. Un equipo de aire acondicionado toma 0,25 m<sup>3</sup>/s de aire ambiente a 40 °C, 95 kPa y 70% de humedad relativa, lo enfría, condensa y recalienta, y lo suministra a 20 °C y 50% HR. Se pide:
- Esquema del proceso en el diagrama  $h-w$ .
  - Temperatura mínima que alcanza el aire en el proceso.
  - Potencia de refrigeración necesaria.
  - Potencia de recalentamiento.
- 8.60. En un equipo de aire acondicionado se toma 0,25 kg/s de aire de un local a 25 °C, 90 kPa y 60% de humedad relativa, se enfría y condensa hasta 5 °C, y se mezcla con 0,15 kg/s de aire exterior a 35 °C y 30% HR. Se pide:
- Esquema de los procesos en el diagrama  $h-w$ .
  - Condiciones a la salida del equipo.
  - Potencia de refrigeración necesaria.
  - ¿Qué se deduce de los balances másicos y energético del local?
- 8.61. En un recipiente a presión constante hay 2 mol de CO<sub>2</sub> en equilibrio con 1 mol de H<sub>2</sub>O a 25 °C y 100 kPa. Se pide:
- Cantidad de agua condensada.
  - Incremento de temperatura necesario para que se evapore toda.
  - Calor que ha de recibir el fluido encerrado.
- 8.62. En un cambiador de calor se calienta 0,1 kg/s de aire ambiente, que está a 15 °C, 90 kPa y 50% de humedad, hasta 45 °C, y luego se usa para secar un producto. Suponiendo que el proceso de secado del material se corresponde con el de humidificación adiabática del aire hasta saturación, se pide:
- Esquema de los procesos en el diagrama  $h-w$ .
  - Calor que recibe el aire en el cambiador, y humedad relativa a la salida.
  - Cantidad de agua que absorbe el aire.
  - Temperatura de salida.

- 8.63. Para un acondicionamiento de aire en verano, se quiere pasar 1 kg/s de aire ambiente, que está a 36 °C y 30% HR, hasta 20 °C y 60% HR. Para ello se va a dividir el flujo de aire en dos partes, enfriando una de ellas con una máquina frigorífica y mezclándolas después. Se pide:
- Hacer un esquema de los procesos que sufre el aire, en un diagrama  $h-w$ .
  - Determinar las temperaturas de rocío y de bulbo húmedo del ambiente.
  - Determinar la humedad absoluta y la entalpía del aire antes y después de acondicionarlo.
  - Calcular la temperatura a la que hay que enfriar el aire en el refrigerador y el gasto másico de aire que ha de pasar por él.
  - Determinar el calor a evacuar en el refrigerador.
- 8.64. En un avión que vuela a 10 km de altitud en aire a -50 °C, 26 kPa y 50% de humedad relativa, se quiere mantener el aire en cabina a 20 °C, 75 kPa y 30% de HR. Para ello se piensa tomar aire exterior usando un compresor de rendimiento adiabático 0,85. Suponiendo despreciables los efectos debidos a la velocidad del avión, y a otros intercambios energéticos y másicos (pasajeros, equipos, y transmisión de calor a través de las paredes), se pide:
- Determinar la humedad absoluta y la temperatura de rocío del aire exterior.
  - Determinar la temperatura y la humedad relativa a la salida del compresor.
  - Determinar el aporte de agua que habría que hacer en un humidificador posterior al compresor para llegar a conseguir la humedad absoluta deseada en cabina, y la temperatura de salida del aire humidificado.
  - Determinar la humedad relativa a la salida del humidificador, y el calentamiento o enfriamiento necesario para conseguir la temperatura deseada en cabina.
  - Sabiendo que se trata de un avión de 100 pasajeros, y que por cada pasajero hay que suministrar un mínimo de 5 L/s de aire exterior (medidos a 0 °C y 100 kPa), calcular el consumo horario de agua en el humidificador, y la potencia de calefacción/refrigeración necesaria.
- 8.65. Se quiere pasar 1 m<sup>3</sup>/s de aire ambiente desde 5 °C y 80% de HR hasta 25 °C y 50% de HR, todo ello a 94 kPa. Se pide:
- Gasto másico de aire seco y de agua a la entrada.
  - Gasto másico de agua a añadir/eliminar. Indicar en un diagrama  $h-w$  qué tipo de procesos convendría llevar a cabo para tal fin.
  - Si el agua se aportara pulverizada a temperatura ambiente, determinar a qué temperatura habría que precalentar el aire.
  - Si el agua se aportara como vapor saturado a presión ambiente, temperatura a la que hay que calentar el aire antes de humedecerlo.
  - Si se añadiese solo vapor sobrecalentado y no se calentase el aire, temperatura a la que debería entrar el vapor.
- 8.66. Se quiere enfriar en una torre húmeda una corriente de 2 m<sup>3</sup>/s de agua desde 40 °C hasta 30 °C, estando el aire ambiente a 25 °C, 94 kPa y 50% de HR. Se pide:
- Temperatura de bulbo húmedo a la entrada.
  - Gasto másico de aire necesario.
  - Gasto másico de agua a añadir.
  - Gasto másico de purga para no superar una concentración de sólidos disueltos de 5000 mg/L con agua de aporte de 500 mg/L de sólidos disueltos.

- 8.67. Considérese el proceso de mezcla adiabática de una corriente de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  de aire ambiente a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $90 \text{ kPa}$  y  $50\%$  de HR, y un flujo de agua líquida  $m_w$  a temperatura  $T_w$ . Suponiendo que se alcanza el equilibrio, se pide:
- Temperaturas de rocío a la entrada, y gasto másico de aire seco.
  - Temperaturas de bulbo húmedo y humedad absoluta a la entrada, y humedad absoluta correspondiente al proceso ideal de saturación adiabática en esas condiciones.
  - Calcular el estado tras el proceso de mezcla, para el caso  $m_w=10 \text{ kg/s}$  y  $T_w=5 \text{ }^\circ\text{C}$  (como primera aproximación, puede suponerse que la temperatura de salida es la de entrada del agua).
  - Calcular el estado tras el proceso de mezcla, para el caso  $m_w=10 \text{ kg/s}$  y  $T_w=95 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- 8.68. Considérese el siguiente sistema de secado. Del recinto donde está el producto a secar en un tambor giratorio, se extraen  $10 \text{ L/s}$  de aire a  $100 \text{ kPa}$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $90\%$  de humedad relativa. El aire es aspirado por un compresor de rendimiento isentrópico  $0,75$ , que lo comprime hasta  $160 \text{ kPa}$ , enfriándose luego en un cambiador de calor hasta  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , tras de lo cual se expande en una turbina de rendimiento  $0,85$  hasta la presión ambiente, condensando parte de la humedad, y retornando el flujo de aire a la cámara a contracorriente por el cambiador antedicho. Se pide:
- Gasto másico de vapor extraído con el aire, y consumo energético del compresor.
  - Humedades relativas a la salida del compresor y a la salida del cambiador.
  - Estado termodinámico del aire a la salida de la turbina y cantidad de agua condensada.
  - Estado termo-higrométrico de retorno a la cámara de secado.
- 8.69. Se quiere comprimir  $100 \text{ kg/s}$  de aire ambiente en condiciones de  $94 \text{ kPa}$ ,  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $30\%$  de HR, hasta  $1 \text{ MPa}$  usando compresores de rendimiento adiabático  $0,85$ . Se pide:
- Coste energético usando un compresor, y coste energético mínimo termomecánico.
  - Se piensa añadir agua pulverizada para conseguir el enfriamiento evaporativo del aire a la entrada. Determinar las temperaturas de rocío y de bulbo húmedo a la entrada, y la cantidad de agua necesaria para la humidificación adiabática hasta la saturación.
  - Comparar el coste energético de esta compresión (enfriada a la entrada) con la inicial.
  - Si en lugar del enfriamiento evaporativo a la entrada se usara una compresión escalonada con dos compresores y enfriamiento convectivo intermedio hasta la temperatura ambiente, usar el modelo de gas perfecto para plantear el consumo energético global en función de la presión intermedia y obtener el valor de ésta que lo hace mínimo (y este valor).
- 8.70. En una campana de vacío de  $8 \text{ litros}$  hay inicialmente aire a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $94 \text{ kPa}$  y  $30\%$  de HR. A partir de un cierto instante se hace funcionar una bomba de vacío volumétrica que aspira  $1 \text{ L/s}$ . Suponiendo que el proceso es suficientemente rápido, se pide:
- Calcular la variación con el tiempo de la presión y la temperatura, y sus valores al cabo de  $10 \text{ segundos}$ .
  - Calcular la variación con el tiempo de la humedad relativa, determinando el instante en el que podría verse la condensación.
- 8.71. Considérese un recipiente cilíndrico de aluminio,  $90 \text{ mm}$  de diámetro y  $100 \text{ mm}$  de altura, casi lleno de agua, con un orificio en la parte superior, en el cual ajusta un tubo largo de  $20 \text{ mm}$  de diámetro interior que casi llega al fondo del recipiente, y que por arriba está abierto al aire ambiente, que está a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $94 \text{ kPa}$ , y  $50 \%$  HR. Considérese como estado inicial el de equilibrio termodinámico del agua con el aire atrapado cuando el nivel de agua en el tubo está enrasado con el del depósito a  $85 \text{ mm}$  del fondo. Suponiendo que se pone el aparato sobre una placa calefactora de  $500 \text{ W}$ , y despreciando los volúmenes de las partes sólidas, se pide:

- a) Indicar las condiciones del equilibrio termodinámico en la interfase con el aire encerrado, y calcular las cantidades de aire seco y de vapor de agua atrapados inicialmente.
- b) Determinar la evolución de la temperatura del agua con el tiempo, suponiendo que es prácticamente uniforme (buen mezclado por la convección natural), que no se evapora apreciablemente, y que los 500 W se invierten íntegramente en calentar el agua y el aluminio, cuya masa es de 0,3 kg. ¿Cuánto tardaría en empezar a hervir?
- c) Considerando que en todo momento hay equilibrio termodinámico entre el aire y el agua, determinar la posición del agua en el tubo, y la presión del aire atrapado, en función de la temperatura del agua.
- d) Determinar los valores anteriores correspondientes a  $T=80\text{ °C}$ .
- e) Se quiere estudiar también el efecto del siguiente proceso. Supongamos que inicialmente no hubiera equilibrio termodinámico entre el aire y el agua, sino que, estando enrasados los niveles, el aire estuviese a  $20\text{ °C}$ ,  $94\text{ kPa}$ , y  $50\%$  HR, y el agua a  $15\text{ °C}$ . ¿Cuál sería el estado de equilibrio (antes de encender la placa)?

8.72. Se tiene una campana de vacío de 10 litros conteniendo inicialmente vapor de agua puro a  $2\text{ kPa}$  y  $25\text{ °C}$  (estado 1), en presencia de aire ambiente a  $100\text{ kPa}$ ,  $25\text{ °C}$ , y  $50\%$  de HR (estado 0). Sabiendo que a través de las juntas penetra lentamente aire ambiente al interior, se pide:

- f) Humedad absoluta y relación molar de vapor respecto al aire seco ( $\bar{w} \equiv n_v/n_a$ ) en el aire ambiente, y cantidad de vapor inicialmente en el interior,  $n_{v1}$ .
- g) Considérese un estado genérico en el interior (estado 2) en el que ha entrado una cierta cantidad de aire ambiente, definida por su contenido de aire seco,  $n_a$ . Determinar la relación molar de mezcla,  $\bar{w}(n_a)$ , la relación másica de mezcla,  $w(n_a)$ , y la presión,  $p(n_a)$ , y sus valores para  $n_a=0.1\text{ mol}$
- h) Indicar cómo varía la humedad relativa en el interior.
- i) Estado termodinámico en el equilibrio mecánico final (estado 3).

8.73. Considérese el siguiente sistema de secado. Se toma aire ambiente a  $25\text{ °C}$  y  $40\%$  de HR con una soplante que consume  $200\text{ W}$ , y se calienta con una resistencia eléctrica hasta  $55\text{ °C}$ ; este aire caliente pasa sobre el material húmedo en un túnel de secado de  $0,6\text{ m}$  de ancho y  $0,3\text{ m}$  de alto, de donde sale a  $30\text{ °C}$ . Se quiere extraer  $5\text{ kg/h}$  de agua. Se pide:

- a) Esquema de la instalación, del proceso que sufre el aire (diagrama  $h-w$ ), y humedad relativa a la salida.
- b) Gasto de aire necesario, velocidad media a la entrada de la cámara de secado, y potencia necesaria del calentador.
- c) Se quiere estudiar el cambio del circuito abierto anterior por un circuito cerrado de aire en el que se mantendrían las condiciones termohigrométricas en la cámara de secado (de entrada y salida). Para ello, el aire a la salida de la cámara se pasaría por el vaporizador de una bomba de calor que lo enfriaría y condensaría hasta el punto de rocío del aire ambiente, pasando luego por el calentador, que en lugar de la resistencia eléctrica es parte del condensador de la bomba de calor. Hacer un esquema de la nueva instalación, y del proceso que sufre el aire.
- d) Determinar el punto de rocío del aire ambiente, y el calor a evacuar en el vaporizador.
- e) Potencia necesaria del compresor de la bomba, suponiendo que su eficiencia exergética es un  $60\%$  de la correspondiente a la de Carnot a las temperaturas de cambio de fase en los cambiadores, en los que habrá que dejar un salto mínimo de  $5\text{ °C}$  entre corrientes.

8.74. En la figura se esquematiza un sistema de desalación de agua de mar por humidificación/deshumidificación de aire. La bomba toma  $0,04\text{ kg/s}$  de agua de mar a  $23\text{ °C}$  (punto 1) y consume  $500\text{ W}$ . El aire se hace circular en circuito cerrado con un ventilador que consume

200 W, tomando 0,03 kg/s de aire saturado a 30 °C (punto 5), el cual retorna saturado a 40 °C (punto 6). Sabiendo que el agua recibe  $\dot{Q}_s = 3$  kW en un colector solar, se pide:

- Hacer un esquema en un diagrama psicrométrico de la evolución del aire.
- Humedades absolutas, entalpías, y balance energético del aire en el deshumidificador.
- Temperatura del agua en cada etapa del proceso.
- Gasto de agua dulce producido. Comparar el gasto energético de este proceso, con el de destilación a presión ambiente.
- Concentración de sales a la salida para una entrada con 35 g/kg de sales.

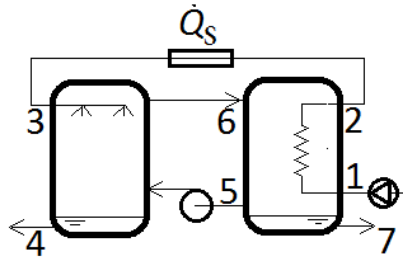


Fig. P-8.74.

8.75. Considérese el proceso de acondicionamiento de aire esquematizado en la figura. Se toma 0,2 kg/s de aire ambiente a 30 °C, 30 % de HR y 100 kPa (estado 1), que pasa a través de un desecador rotatorio (RD) que absorbe humedad isoentálpicamente, saliendo el aire con la mitad de la humedad absoluta de entrada. Esta corriente (2) pasa por un intercambiador de calor rotatorio (HX) de rendimiento 0,5 (i.e. que solo intercambia la mitad del calor que intercambiaría si fuese de área infinita). Posteriormente se hace pasar por un enfriador evaporativo (EC1) de donde sale en el estado 4 con un 90% de HR, y se introduce al local a acondicionar. Del local se extrae la misma cantidad de aire a 25 °C y 60% de HR (estado 5; considérese el aire del local bien mezclado), el cual se hace pasar por otro enfriador evaporativo (EC2) saliendo con un 95% de HR. Tras este enfriador, la corriente pasa por el otro lado del cambiador de calor rotatorio HX y posteriormente se calienta con energía solar (SC) hasta alcanzar 60 °C. Finalmente, esta corriente pasa por el otro lado del desecador rotatorio RD y se devuelve al ambiente. Se pide:

- Hacer un diagrama ( $h-w$ ) de los procesos descritos para el aire húmedo y una tabla con las siguientes columnas: Sección,  $p$ ,  $T$ ,  $\phi$ ,  $w$ ,  $h$ ; rellenando los valores conocidos.
- Determinar los estados termo-higrométricos en cada etapa del aire que se toma del ambiente, hasta entrar al local.
- Determinar los estados termo-higrométricos en cada etapa del aire que se extrae del local.
- Calor evacuado del local, y relación entre este y el recibido en el calentador solar.
- Balance de agua de cada elemento.

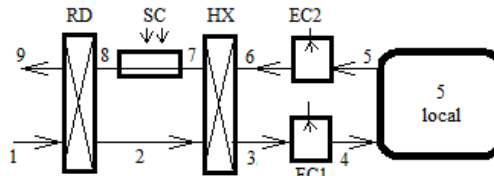


Fig. P-8.75.

8.76. Se quiere estudiar la posibilidad de mantener el aire de un recinto a 26 °C y 50 % HR mediante enfriamiento evaporativo indirecto (EEI), estando el exterior a 35 °C, 35 % HR y 90 kPa. Para ello se tomaría un gasto de aire exterior (estado 1), se le añadiría agua pulverizada hasta la saturación (estado 2), atravesaría un intercambiador de calor HX (estado 3), y se devolvería al exterior, mientras que por el HX se haría circular a contracorriente aire del recinto. Se pide:

- Temperatura de salida del humidificador ( $T_2$ ), y humedad absoluta ( $w_2$ ).

- b) Condiciones de salida del intercambiador ( $T_3$ ,  $\phi_3$ ) en el límite de área infinita.
  - c) Gasto mínimo de aire exterior para evacuar 5 kW del interior, y gasto de agua de aporte.
  - d) Esquema de la instalación y de los procesos en el diagrama psicrométrico.
  - e) Ventajas e inconvenientes que tendría este sistema frente a un sistema de aire acondicionado tradicional (AA), y frente a un enfriamiento evaporativo directo (EED) del aire interior mediante agua pulverizada.
- 8.77. Se quiere humidificar una corriente de 5 kg/s de aire ambiente (94 kPa, 25 °C, 25 % HR) añadiéndole otra corriente de vapor saturado hasta que se alcance un 85 % de HR. El vapor saturado se va a obtener añadiendo previamente en una cámara adiabática una corriente de vapor sobrecalentado a 350 °C y 220 kPa a otra de agua líquida a 15 °C presurizada, en la proporción másica de 85 % de vapor y 15 % de líquido. Se pide:
- a) Entalpía específica de las corrientes de vapor sobrecalentado, agua líquida, y vapor saturado.
  - b) Temperatura y presión del vapor saturado.
  - c) Irreversibilidad en el mezclado de agua y vapor.
  - d) Gasto másico de vapor saturado necesario, suponiendo que la temperatura de salida del aire fuese 25 °C.
  - e) Temperatura de salida del aire y gasto de vapor correctos.
  - f) Irreversibilidad en el humidificador.
- 8.78. En un dispositivo cilindro-embolo se tiene inicialmente 1 L de aire ambiente a 100 kPa, 25 °C y 50% de HR. Se pide hacer un esquema de la variación temporal de la presión, la temperatura, y la humedad relativa, determinando los valores extremos, en los casos siguientes:
- a) Compresión lenta hasta reducir el volumen a la mitad.
  - b) Compresión rápida hasta reducir el volumen a la mitad, y atemperamiento.
  - c) Expansión lenta hasta duplicar el volumen inicial.
  - d) Expansión rápida hasta duplicar el volumen inicial, suponiendo que no hay condensación.
  - e) Estado intermedio en el que se produciría la condensación en equilibrio.
  - f) Balance de entropía entre el estado en que empieza a condensar, y otro genérico posterior.
  - g) Estado tras la expansión rápida hasta duplicar el volumen inicial.
- 8.79. Se mezclan adiabáticamente dos corrientes a 100 kPa, una de agua a  $T_w$  y gasto  $m_w$ , y la otra de  $m_a=1$  kg/s de aire a 30 °C y 60 % de HR. Se pide:
- a) Humedad absoluta, y temperaturas de rocío y de bulbo húmedo a la entrada.
  - b) Relación de gastos másicos,  $m_{wa}=m_w/m_a$ , para que, entrando el agua a 30 °C, salga solo aire saturado.
  - c) Si entrara agua con un caudal mitad del valor anterior, determinar las condiciones de salida para  $T_w=5$  °C y para  $T_w=50$  °C, y representar en un diagrama psicrométrico el proceso que sigue el aire.
  - d) Si entrara agua con un caudal mil veces mayor del valor calculado en b), determinar las condiciones de salida para  $T_w=5$  °C y para  $T_w=50$  °C.