



## 6. THERMODYNAMICS OF PHASE CHANGE

- 6.1. Para suavizar los cambios de temperatura en un campo de cultivo se ha pensado situar en él un acumulador de energía térmica consistente en un depósito rígido de  $20 \text{ m}^3$  lleno con  $800 \text{ kg}$  de R-12. Sabiendo que la temperatura del acumulador puede variar entre  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , determinar los estados del R-12 y el calor acumulado.
- 6.2. El indicador de nivel de un depósito de R-12 de  $10 \text{ cm}$  de diámetro y  $50 \text{ cm}$  de altura, un capilar de vidrio conectado en ambos extremos (inferior y superior), marca una altura de líquido de  $20 \text{ cm}$  en un ambiente a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se pide:
- Masa de R-12 encerrado y su estado inicial.
  - Variación de temperatura que causaría una subida del menisco de  $1 \text{ mm}$ .
- 6.3. En un recipiente cilíndrico vertical, de  $10 \text{ cm}$  de diámetro y  $30 \text{ cm}$  de altura, rígido y aislado térmicamente del exterior, hay inicialmente  $1 \text{ cm}$  de agua líquida en equilibrio con su vapor a  $200 \text{ kPa}$ , pudiendo comunicar a través de una válvula (inicialmente cerrada) con un gran depósito de agua (líquida o vapor), mantenido a  $300 \text{ kPa}$  y temperatura  $T_0$ . A partir de un cierto instante se abre un poco la válvula. Se pide:
- Volumen, temperatura, masa de líquido, masa de vapor y fracción másica inicial.
  - Ecuación integrada del balance energético del recipiente.
  - Sucesión de estados de equilibrio interno en el recipiente, en función de la masa que hay en cada instante,  $m$ , y la temperatura de entrada,  $T_0$ .
- 6.4. En una tubería de  $2 \text{ cm}^2$  de sección hay una válvula de paso semiabierta por la que entra propano a  $3,42 \text{ MPa}$ ,  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $4 \text{ m/s}$ , saliendo a  $1,07 \text{ MPa}$ . Calcular el gasto másico, y la temperatura y velocidad de salida.
- 6.5. En un recipiente cilíndrico vertical de  $0,5 \text{ m}^3$  y paredes aislantes, hay agua líquida en equilibrio con su vapor a  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , existiendo una válvula de escape que impide que la presión aumente. Inicialmente cada fase ocupa la mitad del volumen. A partir de un cierto instante, se conecta a una batería una resistencia eléctrica situada en el interior, y se espera hasta que el nivel inicial del líquido disminuya a la mitad. Se pide:
- Presión, masa y título inicial de vapor.
  - Estado termodinámico final.
  - Energía aportada en el caso de que la válvula esté en la parte superior o en la inferior.
- 6.6. Se trata de aprovechar energéticamente un manantial geotérmico (fuente de agua caliente subterránea) que produce  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  de agua a presión a  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para ello, se piensa generar electricidad con el proceso siguiente: se obliga a una expansión brusca del agua introduciéndola en una cámara a una presión intermedia, y el vapor generado se utiliza para mover la turbina, que tiene un rendimiento adiabático del  $80\%$ , pasando después a un condensador que opera a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  por encima de la temperatura ambiente, siendo bombeada finalmente el agua lejos de la planta. Se pide:
- Potencia mecánica máxima obtenible en el límite termodinámico.

- b) Esquema de la instalación propuesta y del proceso en el diagrama  $T$ - $s$ .
  - c) Ecuación que liga la fracción vaporizada con la presión de la cámara.
  - d) Para tres valores posibles de la presión intermedia (1000 kPa, 100 kPa y 10 kPa) tabular la fracción evaporada, trabajo específico de la turbina, y potencia generada.
- 6.7. Se tiene un cilindro vertical de  $15 \text{ cm}^2$  de sección, sellado por su extremo superior, con un émbolo de 3 kg en el otro extremo que encierra un volumen inicial de 40 cm de alto de vapor de agua a 10 kPa en un baño a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  y 100 kPa. Se pide:
- a) Fuerza necesaria para mantener el émbolo en equilibrio en la posición inicial.
  - b) Densidad del vapor en la posición inicial.
  - c) Determinar el estado termodinámico final si se suelta el émbolo.
  - d) Variación de exergía entre ambos estados, e interpretación en términos de trabajo.
  - e) Repetir los apartados anteriores suponiendo ahora que la parte sellada es la inferior y el émbolo está arriba.
- 6.8. En un cilindro, A, vertical de paredes aislantes hay 1 kg de agua líquida en equilibrio con 1 kg de su vapor, todo ello encerrado por un émbolo superior que mantiene 175 kPa de presión. En otro recipiente, B, también aislado, de  $2,4 \text{ m}^3$  de capacidad, hay agua y vapor con una fracción másica del 50%, todo ello a 200 kPa. Con una bomba de calor de rendimiento 1,5 se bombea calor de A a B hasta que en A sólo queda líquido saturado. Se pide calcular:
- a) Volumen inicial y final de A, y calor extraído de A.
  - b) Masa encerrada y estado final en B.
- 6.9. De una corriente estacionaria de vapor húmedo se extrae un pequeño gasto que se expande hasta la presión ambiente en una válvula, con el fin de calcular la fracción másica de vapor (calidad) de la corriente (suele llamarse calorímetro de Peabody). Se pide:
- a) Relación entre la calidad y las temperaturas y presiones antes y después de la válvula.
  - b) Calidad mínima detectable y condiciones necesarias de la corriente.
- 6.10. A una cámara de mezcla llega una corriente de  $2 \text{ kg/s}$  de agua a 70 kPa y  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , y se quiere que salga como vapor saturado a esa presión, para lo cual se añade un cierto flujo de vapor a  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  y 1,5 MPa. Se pide:
- a) Entalpía y entropía unitarias de salida.
  - b) Entalpía y entropía unitarias del agua de entrada.
  - c) Entalpía y entropía unitarias del vapor de aporte.
  - d) Gasto necesario de vapor.
  - e) Irreversibilidad y generación de entropía.
  - f) Repetir el problema suponiendo que debe salir como líquido saturado y no como vapor.
- 6.11. En un dispositivo cilindro-émbolo se encuentra encerrada adiabáticamente una masa de 10 gramos de agua en equilibrio con su vapor, ocupando en total un volumen inicial de 1 litro, en presencia de una atmósfera a 92 kPa y  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Entonces se hace disminuir lentamente la presión de 200 kPa a 100 kPa aumentando el volumen. Se pide:
- a) Estado termodinámico inicial y final.
  - b) Trabajo realizado.
  - c) Variación de exergía.

- 6.12. Se quiere obtener un gasto de 0,6 kg/h de gas butano disponiendo de una botella de 30 litros conteniendo inicialmente 15 kg de butano. Para ello se va a sumergir la botella en un baño con objeto de mantener la presión interior en un valor constante de 400 kPa. Se pide:
- Temperatura del baño, volumen y masa inicial de gas.
  - Calor intercambiado. y tiempo de funcionamiento.
- 6.13. Una corriente de etileno a 15 °C y 10 MPa sufre una expansión brusca hasta 1 MPa. Utilizando el modelo de estados correspondientes, calcular:
- Factor de compresibilidad y densidad a la entrada.
  - Estado termodinámico a la salida.
- 6.14. Se desea hacer pasar acetileno desde las condiciones de 3,2 MPa y -25 °C hasta 1,3 MPa y 30 °C. Se pide:
- Situación de los estados de entrada y salida en un diagrama  $T-s$  con relación a la curva de saturación, y cálculo de las densidades con el modelo de estados correspondientes.
  - Variación de entalpía y de entropía.
- 6.15. Se desea enfriar una corriente de 0,1 kg/s de propileno a una presión constante de 2,8 MPa desde 74 °C hasta obtener líquido saturado. Se pide:
- Situación de los estados de entrada y salida en un diagrama  $T-s$  con relación a la curva de saturación y cálculo de las densidades con el modelo de estados correspondientes.
  - Temperatura de salida.
  - Variación de entalpía y de entropía, y calor intercambiado.
  - Variación de exergía de la corriente e interpretación en términos de trabajo.
- 6.16. Para mantener una presión de 0,6 MPa en un tanque de propano de 100 m<sup>3</sup> se toma un pequeño flujo de propano del interior, se expande en una válvula hasta la presión atmosférica, se pasa por un cambiador de calor (todo ello dentro del tanque) y finalmente se expulsa al exterior, que está a 30 °C y 100 kPa. Se pide:
- Esquema de la instalación y representación del proceso en un diagrama  $T-s$ .
  - Temperatura dentro del tanque.
  - Fracción másica de vapor después de la válvula.
  - Variación de entalpía del propano desde el tanque al exterior.
  - Relación entre el gasto de propano y la transmitancia térmica del tanque.
- 6.17. Se propone el siguiente proceso para el llenado de botellas de etano. Las botellas, de 50 litros, a presión ambiente (90 kPa) y temperatura ambiente (33 °C) se conectan a una línea de carga, que comunica con un gran depósito a 4,1 MPa y temperatura ambiente, por medio de una válvula que se abre al conectar la botella y se cierra cuando se igualan las presiones tras un proceso rápido. Se pide:
- Masa de etano inicial remanente en cada botella.
  - Estado termodinámico al cerrar la válvula.
  - Masa final de etano en la botella.
  - Estado termodinámico final cuando se atempere la botella.
  - Calor intercambiado.
  - Variación de entropía del etano y del universo en el proceso global.

- 6.18. En un conducto de 4 cm de diámetro existe una válvula que reduce la presión de una corriente de  $10,25 \text{ m}^3/\text{h}$  de etileno de 40 a 1 MPa. La temperatura a la entrada es  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  y las condiciones ambientales son  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $10^5 \text{ Pa}$ . Se pide:
- Densidad y velocidad de la corriente antes de la válvula.
  - Ecuaciones que gobiernan el proceso, e hipótesis a aplicar.
  - Temperatura y velocidad de la corriente después de la válvula.
  - Irreversibilidad del proceso.
- 6.19. En un recipiente cilíndrico de 50 litros y 0,8 m de altura hay 20 kg de metano líquido. El recipiente tiene una capa de aislante de 5 cm de espesor y comunica al exterior a través de un tubo de pequeño diámetro. Se pide:
- Estimar la temperatura del líquido por medio de los estados correspondientes.
  - Estimar la entalpía de vaporización.
  - Suponiendo que la conductividad del aislante es de  $0,02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , calcular el flujo de calor del ambiente.
  - Calcular el flujo de vapor producido por dicho calentamiento.
- 6.20. En una turbina de rendimiento adiabático 0,85 se expande etileno desde  $177 \text{ }^\circ\text{C}$  y 30 MPa hasta 6 MPa. El gasto a la entrada es de  $1 \text{ m}^3$  por minuto, y las condiciones ambiente son  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  y 1 atm. Se pide:
- Representación del proceso en los diagramas  $T-s$  y  $p-h$ .
  - Densidad del etileno a la entrada y gasto másico.
  - Potencia que proporcionará la turbina.
  - Variación de la exergía de la corriente e irreversibilidad del proceso.
  - Potencia máxima que podría haberse obtenido si sólo se hubieran especificado las condiciones de entrada y la presión de salida (pero no el proceso).
- 6.21. Con una botella de 30 litros que contiene inicialmente 8 kg de propano en un ambiente a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , se quiere suministrar gas a 1,4 MPa, para lo cual se instala un calentador en su interior. Suponiendo que el intercambio de calor con el ambiente se puede suponer dado por  $Q=A(T_{amb}-T_{prop})$  con  $A=8 \text{ W/K}$ , y aproximando la presión de vapor en variables reducidas por la expresión  $\ln p_r R = B(1-1/T_r)$  con  $B = 6$ . Se pide:
- Determinar, con la expresión anterior, la presión inicial, la temperatura a la que habrá que calentar la botella y la entalpía de vaporización.
  - Densidades del vapor saturado a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  y a 1,4 MPa.
  - Sabiendo que el calentador es de 1500 W, indicar cómo se calcularía el tiempo que se tarda en alcanzar los 1,4 MPa.
  - Calcular el gasto inicial si al alcanzar los 1,4 MPa se abre la botella.
- 6.22. En un cilindro adiabático de  $10 \text{ cm}^2$  de sección hay 30 gramos de agua, inicialmente a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , sobre la cual se apoya un émbolo de 4 kg, todo ello en presencia de la atmósfera. Se pide:
- Calor que habría que comunicar al agua (e.g. mediante una resistencia eléctrica) para que el émbolo suba 30 cm.
  - Presión, temperatura y densidad finales.
  - Trabajo desarrollado.
- 6.23. En un cilindro vertical de  $150 \text{ cm}^2$  de sección y cuyas paredes son poco conductoras del calor hay 2 gramos de vapor de agua a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  y 200 kPa, encerrado por un émbolo de 2 kg, inicialmente

anclado al cilindro. En un instante dado se libera el émbolo y tiene lugar un proceso rápido hasta alcanzar el equilibrio mecánico, tras la disipación de energía mecánica por fricción del émbolo. Se pide:

- Determinar la altura inicial del émbolo.
- Determinar el nuevo estado de equilibrio mecánico: altura del émbolo, presión, temperatura, densidad y fracción másica finales.
- Establecer el balance energético entre los estados inicial y final y calcular los trabajos desarrollados y la energía mecánica degradada por fricción.

6.24. Se pretende utilizar Freon-12 como propulsante de un pequeño cohete. El dispositivo consiste en un depósito parcialmente lleno de líquido saturado a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , una válvula que deja pasar sólo la fase gaseosa, y una tobera de escape donde el gas se expande hasta  $48\text{ kPa}$  y  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se pide:

- Esquema del proceso en los diagramas  $T-s$ ,  $h-s$ ,  $p-h$ .
- Velocidad de la salida de la tobera.
- Gasto másico necesario para producir un empuje de  $20\text{ N}$  (Empuje=Gasto másico x Velocidad de salida).
- Calor necesario para mantener el depósito a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Presión, temperatura, densidad, entalpía y entropía a la salida de la válvula.

6.25. Se dispone de un depósito de  $25\text{ litros}$  que contiene  $0,15\text{ kg}$  de Freon-12, en un ambiente a  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para llenar una botella de  $10\text{ litros}$ , previamente evacuada de gas, se conecta ésta al depósito a través de una válvula, la cual se abre bruscamente y se vuelve a cerrar cuando deja de pasar freon. Se pide:

- Estado del freon en el depósito.
- Indicar cómo se calcularía el estado del freon en la botella cuando se cierra la válvula.
- Cálculo de la masa contenida en la botella.
- Presión que alcanzará al final, cuando se atempere, la botella.
- Intercambio de calor con el ambiente tras el cierre de la válvula.
- Representación de los estados del freon en los diagramas  $p-h$ ,  $p-v$  y  $T-s$ .
- Variaciones de entropía del freon y del universo.

6.26. Un recipiente cilíndrico rígido de  $3\text{ litros}$  contiene agua y su vapor a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ocupando el líquido la mitad del volumen. En la parte superior hay una válvula con orificio de salida de  $5\text{ mm}$  de diámetro. Las paredes laterales y la base superior están térmicamente aisladas y por la base inferior, con una fuente de  $600\text{ K}$ , se le comunica un flujo de calor constante de  $1\text{ kW}$ . Cuando la presión interior llega a  $200\text{ kPa}$  se abre la válvula y la presión permanece constante. Se pide:

- Temperatura y nivel del líquido cuando se abre la válvula.
- Calor comunicado hasta la apertura de la válvula.
- Gasto másico tras la apertura de la válvula.
- Estado termodinámico a la salida de la válvula.
- Producción de entropía hasta la apertura de la válvula.

6.27. Se mezclan adiabáticamente dos corrientes de vapor de agua, una de  $0,3\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  con calidad de vapor del  $95\%$  y la otra de  $0,2\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ambas a  $140\text{ kPa}$ , saliendo la mezcla a la misma presión. Se pide:

- Con ayuda de un diagrama de Mollier, obtener una expresión analítica, lineal en temperatura, para el  $c_p$  del vapor a presiones bajas, válida entre  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- b) Análogamente, obtener una expresión analítica, lineal en temperatura, para la entalpía de vaporización, válida entre 50 °C y 150 °C.
  - c) Determinar analíticamente la entalpía específica de ambas corrientes con respecto a la del vapor saturado a 100 °C.
  - d) Temperatura de salida de la mezcla y producción de entropía.
- 6.28. En un recipiente cilíndrico vertical, rígido y de paredes muy poco conductoras del calor, hay 100 gramos de agua a 30 °C, ocupando un volumen de 100 litros limitado por la parte superior por un émbolo de 40 kg y 650 cm<sup>2</sup> de sección, que descansa inicialmente sobre unos pequeños resaltes de la pared del cilindro. Sabiendo que las condiciones ambiente son 15 °C y 94 kPa, y que se comunica energía al agua (mediante una resistencia eléctrica) hasta que desaparece la fase líquida, se pide:
- a) Diagrama  $T-s$  del proceso.
  - b) Presión y altura inicial del agua líquida.
  - c) Temperatura final.
  - d) Altura final del émbolo.
  - e) Intercambios energéticos del agua con el exterior.
  - f) Producción de entropía.
  - g) Trabajo mínimo que hubiera sido necesario aportar para pasar de las condiciones iniciales a las finales.
- 6.29. Un depósito vertical de 1,7 m de altura y 0,3 m de diámetro, de paredes rígidas y de baja conductividad térmica, está ocupado por 0,35 kg de H<sub>2</sub>O inicialmente a 100 °C, estando el ambiente a 20 °C y  $0,9 \times 10^5$  Pa. En un cierto instante se introduce por la parte superior del depósito 20 gramos de agua a temperatura ambiente (finamente pulverizada para acelerar el contacto térmico con el fluido interior). Se pide:
- a) Ecuaciones que describen el proceso, especificando el sistema, las hipótesis y simplificaciones.
  - b) Presión, temperatura y calidad finales (planteamiento algebraico y resolución numérica).
  - c) Trabajo máximo obtenible inicialmente y después del proceso.
- 6.30. Una bomba de rendimiento adiabático 0,7 toma agua de un embalse y la bombea por una tubería de 10 cm de diámetro a 10 m/s hasta una caldera de la que sale el agua a 120 °C con poca pérdida de presión. Finalmente, la corriente pasa por una válvula de donde sale a presión ambiente. Se pide:
- a) Gasto másico y potencia necesaria.
  - b) Calor aportado en la caldera y estado termodinámico y velocidad de salida.
- 6.31. Un tubo recto abierto en sus extremos se mantiene vertical e isoterma, existiendo una sustancia en su interior que a esa temperatura está en parte sólida (la inferior) y en parte líquida. Se observa que si la temperatura disminuye, la superficie de separación sólido-líquido asciende. Relacionar las densidades del sólido y el líquido con la variación del nivel por unidad de temperatura y el calor latente de cambio de estado.
- 6.32. Un recipiente cilíndrico vertical, cerrado y rígido, de 1 m de diámetro y 1 m de altura, contiene inicialmente 715 litros de agua líquida en equilibrio a 120 °C con su vapor. Sabiendo que la presión interna no debe pasar de 4 MPa, se pide:
- a) Presión y fracción másica inicial de vapor.
  - b) Temperatura máxima a que puede calentarse el agua.

NOTA: El volumen específico del agua líquida a 120 °C es  $1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ , su coeficiente de expansión es  $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (y crece casi linealmente, siendo  $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  a 250 °C), y su coeficiente de compresibilidad es  $4,5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ .

- 6.33. En un depósito adiabático hay 100 kg de agua inicialmente a 40 °C comunicando con la atmósfera, que está a 15 °C y 90 kPa. En un cierto instante se sumerge en el agua una botella de butano, de hierro, de 15 kg de masa total y 25 litros de capacidad, conteniendo 5 kg de butano a temperatura ambiente. Se pide:
- Presión inicial de la botella.
  - Fracciones volumétrica y másica iniciales de vapor en el interior.
  - Establecer el balance energético del conjunto.
  - Determinar las condiciones finales.
- 6.34. En un depósito cilíndrico adiabático de 10 cm de diámetro y 0,5 m de altura hay inicialmente 5 cm de agua líquida en equilibrio con su vapor, que está a una sobrepresión de 150 kPa. A partir de un cierto instante se abre una válvula en la parte superior y se vuelve a cerrar cuando la sobrepresión es de 50 kPa. Se pide:
- Hacer un esquema de la evolución en los diagramas  $T-s$  y  $p-h$ .
  - Temperatura y fracción másica de vapor inicial.
  - Temperatura, fracción másica de vapor y nivel de líquido final.
  - Masa que sale.
- 6.35. En un cilindro vertical de 5 cm de diámetro hay inicialmente  $10 \text{ cm}^3$  de agua en equilibrio con su vapor, que está limitado por un émbolo macizo de acero de 5 cm de espesor mantenido inicialmente a 50 cm de altura sobre la base, todo ello en un baño a 60 °C y 90 kPa. En un instante dado se deja libre el émbolo. Se pide:
- Calcular la presión inicial por varios procedimientos, comentando la incertidumbre estimada.
  - Condiciones termodinámicas inmediatamente después del equilibrio mecánico.
  - Altura mínima alcanzada por el émbolo antes del atemperamiento
  - Condiciones termodinámicas tras el atemperamiento total con el baño.
- 6.36. Dentro de un cilindro de 0,5 m de alto y  $2 \text{ dm}^2$  de sección, cerrado por ambos extremos, hay un émbolo de acero de 1 cm de espesor que separa 10 moles de  $\text{H}_2\text{O}$  (en la parte inferior) de una masa de aire (en la parte superior) inicialmente a presión y temperatura ambiente (100 kPa y 15 °C). Se pide:
- Cantidad de sustancia de aire encerrado.
  - Diferencia de presión entre el agua y el aire.
  - El conjunto se introduce en un baño térmico y se desea conocer el estado termodinámico en función de la temperatura del baño desde 15 °C hasta 300 °C.
- 6.37. En un dispositivo cilindro-émbolo adiabático hay 10 gramos de agua en equilibrio con su vapor a 50 kPa, ocupando inicialmente un volumen total de 1 litro, en presencia de una atmósfera a 93 kPa y 20 °C. Entonces se disminuye la presión hasta 30 kPa. Se pide:
- Temperatura y fracción másica de vapor iniciales.
  - Temperatura y fracción másica de vapor finales.
  - Variación de volumen y de energía del sistema.
  - Trabajo dado / recibido por el gas / por la atmósfera.

6.38. Se tiene una línea de vapor a 200 °C y 200 kPa y una turbina en la que se puede expandir el vapor hasta 4 kPa con rendimiento isentrópico del 70%, todo ello en presencia de una atmósfera a 15 °C y 100 kPa. Se pide:

- Trabajo máximo termomecánico obtenible de la línea.
- Trabajo obtenido en la turbina.

6.39. Se desea ajustar la curva de presión de vapor del n-butano en la forma  $\ln(p/p_b)=A*(1-T_b/T)$ . Se pide:

- Estimar el valor de A a partir del ajuste con el modelo de estados correspondientes  $\ln(p_R)=K*(1-1/T_R)$  con  $K=6$  y  $T_b=0.6T_{cr}$ .
- Estimar el valor de A a partir de la ecuación de Clapeyron integrada en el entorno del punto de ebullición.

6.40. Se trata de comprobar la coherencia o consistencia de los datos termodinámicos que figuran en las siguientes notas históricas:

Nota 1: En 1644, dos años después de la muerte de Galileo, su discípulo Torricelli fue el primero en medir la presión atmosférica, que en Florencia (49 m sobre el nivel del mar) resultaba equivalente a la de una columna de 760±4 mm de mercurio con vacío por arriba. Tras conocerse esto en París,, en 1647 Pascal instó a un cuñado suyo a medir la altura barométrica al pie de una montaña y a 1000 m de altitud sobre ese terreno, resultando ser de 663 mm y 586 mm de mercurio, respectivamente.

Nota 2: En 1740, Fahrenheit en Holanda perfeccionó tanto el termómetro de capilar de mercurio que descubrió que la temperatura de ebullición de las sustancias variaba con la presión atmosférica y llegó a proponer a la Royal Society de Londres utilizar su termómetro como hipsómetro (es decir, como medidor de altitudes geográficas), midiendo la temperatura de ebullición local del agua.

Se pide:

- Calcular el valor y la incertidumbre de la presión a nivel del mar (en el Sistema Internacional), suponiendo que  $g=9,80\pm 0,01$  m/s<sup>2</sup> y que la densidad del mercurio es de 13560±30 kg/m<sup>3</sup>.
- Calcular la presión del vacío del barómetro a 20 °C y la temperatura de ebullición normal, sabiendo que los coeficientes de la ecuación de Antoine,  $\ln p=A-B/(C+T)$ , para el mercurio son  $A=41,5$ ,  $B=106600$  y  $C=2250$ , con  $p$  en kPa y  $T$  en K.
- Estimar la densidad del aire ambiente a partir de los datos del barómetro, así como la altitud sobre el nivel del mar, al pie de la montaña mencionada.
- Estimar la resolución del hipsómetro de Fahrenheit sabiendo que él garantizaba una resolución de 0,5 °C. ¿Y si se midiese la ebullición del etanol en lugar de la del agua?

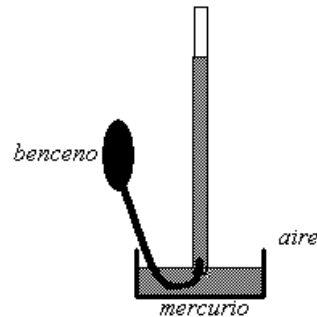
6.41. En un matraz de 250 cm<sup>3</sup> se echa 150 cm<sup>3</sup> de agua ambiente (a 15 °C) y, sin tapar, se lleva a ebullición, tapándose en ese momento y apartándose del foco calorífico. Se pide:

- Aumento de volumen suponiendo un coeficiente medio de dilatación de  $5\cdot 10^{-4}$  K<sup>-1</sup> y despreciando la evaporación.
- Masa de vapor en el instante de cierre y una vez atemperado todo.
- Tiempo que tarda en enfriarse hasta 45 °C, suponiendo que la pérdida de calor es proporcional a la diferencia entre la temperatura interior y la exterior,  $\dot{Q}=UA(T-T_{amb})$ , con un valor  $UA=1$  W/K, considerando que la temperatura interior es uniforme y la masa de vidrio pequeña.
- ¿Qué ocurrirá en el interior si en ese momento se pone el matraz debajo de un chorro de agua ambiente (enfriándose antes el vapor que el líquido por su menor inercia térmica)?



- 6.42. Un cierto flujo de refrigerante (R-134a) de masa molar  $M=0,102$  kg/mol,  $T_{cr}=374$  K,  $p_{cr}=4,07$  MPa,  $c_p=600$  J/(kg·K),  $c_L=1300$  J/(kg·K),  $h_{LV}=215$  kJ/kg y coeficientes de la ecuación de Antoine,  $\ln p=A-B/(C+T)$ ,  $A=14,41$ ,  $B=2094$  y  $C=-33,06$ , con  $p$  en kPa y  $T$  en K, es sometido al siguiente proceso cíclico: un compresor toma vapor saturado a  $0$  °C y lo bombea hasta  $1,5$  MPa, tras de lo cual pasa por un cambiador de calor por el que circula a contracorriente un gran flujo de aire ambiente a  $20$  °C, saliendo el R-134a como líquido saturado; el cual pasa por una válvula de la que sale a  $0$  °C, completándose el ciclo con otro cambiador de calor donde el R-134a se vaporiza completamente. Se pide:
- Esquema de la instalación y diagramas  $T-s$  y  $p-h$  del proceso sufrido por el R-134a.
  - Presión de vapor a  $0$  °C y temperatura de condensación a  $1,5$  MPa.
  - Valores de presión, temperatura, densidad, entalpía y entropía a la entrada de cada elemento.
  - Intercambio energético en cada elemento y en el conjunto.
- 6.43. En un recipiente de 5 litros, de paredes aislantes, hay inicialmente 1 litro de agua en equilibrio con su vapor a  $94$  kPa. A partir de un cierto instante se empieza a extraer vapor con una bomba de vacío. Se pide:
- Esquema de la instalación, estado inicial y esquema general de las fases del agua en los diagramas  $p-T$  y  $T-s$ .
  - Para una presión interior de  $10$  kPa, determinar la temperatura, la masa de vapor interior y la masa de vapor evacuada desde el instante inicial.
  - Determinar la temperatura, la masa de vapor interior y la masa de vapor evacuada desde el instante inicial, en el momento en que empieza a formarse hielo.
- 6.44. Se dispone en el laboratorio de una botella de 2 litros cuya sobrepresión interior no debe pasar de  $2$  MPa y se desea llenarlo con amoníaco puro. Se pide:
- ¿Es posible introducir  $1$  kg de amoníaco? ¿Y  $0,02$  kg? Describir el estado termodinámico final y alguna manera de efectuar el proceso en la práctica.
  - ¿Cuál sería la temperatura máxima que se le podría comunicar sin riesgo de rotura?
  - Representar todos los estados en los diagramas  $T-s$ ,  $p-v$  y  $p-h$ .
  - Variación de energía y de entropía entre los estados antedichos.
- 6.45. En un frasco Dewar de  $250$  cm<sup>3</sup> hay inicialmente  $50$  cm<sup>3</sup> de agua pura en equilibrio con su vapor a  $98$  °C. A partir de un cierto instante se empieza a extraer vapor con una bomba de vacío. Se pide:
- Esquema de la instalación, estado inicial y esquema general de las fases del agua en los diagramas  $p-T$  y  $T-s$ .
  - Determinar la presión, la temperatura, la masa de vapor interior y la masa de vapor evacuada desde el instante inicial, en el momento en que empieza a formarse hielo.
  - Determinar la presión, la temperatura, la masa de vapor interior y la masa de vapor evacuada desde el instante inicial, en el momento en que desaparece al agua líquida.
- 6.46. Se tiene inicialmente un tubo de vidrio de  $1$  cm<sup>2</sup> de sección y  $1$  m de altura lleno de mercurio. Con cuidado, se pone boca abajo sobre una cubeta medio llena de mercurio (experimento de Torricelli) hasta que se alcanza al equilibrio (ver figura), quedando el nivel en la cubeta  $1$  cm por encima del borde del tubo. A partir de entonces, con un cuentagotas apropiado se van introduciendo gotas de benceno en el tubo (una gota de  $9$  mm<sup>3</sup> cada minuto). Se pide
- Determinar el nivel esperado de equilibrio del mercurio en el tubo, y el volumen de vacío que se crea, sabiendo que la presión atmosférica es de  $94$  kPa.

- b) Determinar el nivel esperado de equilibrio tras la inyección de la primera gota de benceno, indicando previamente las incógnitas y ecuaciones a utilizar.
- c) Indicar qué iría sucediendo al cabo del tiempo.



**Fig. 1**

6.47. En una publicación se ha encontrado que los daños que causaría la rotura a 0,2 MPa de un depósito de 10 m<sup>3</sup> con agua en equilibrio con su vapor serían equivalentes a los de la explosión de 5 kg de TNT (trinitrotolueno, CH<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>(NO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>, cuya entalpía de la reacción de descomposición es de 4,2 MJ/kg y su  $T_b=80$  °C, causando el colapso de estructuras ordinarias y la rotura de tímpanos hasta 10 m de distancia, daños superficiales a estructuras hasta 50 m y rotura de cristales hasta 150 m. Se pide:

- a) Calcular la exergía termomecánica si se tratase de un depósito de agua a presión, pero a y temperatura ambiente.
- b) Calcular la exergía si se tratase de un depósito lleno de aire a esa presión y a temperatura ambiente. Compararla con la variación de exergía correspondiente a una expansión isentrópica.
- c) Considérese la expansión súbita y sin degradación de energía mecánica por fricción del depósito lleno de agua líquida en equilibrio con su vapor a esa presión y calcular la variación de exergía.
- d) Considérese la expansión súbita y sin degradación de energía mecánica por fricción del depósito lleno de vapor de agua en equilibrio con agua líquida a esa presión y calcular la variación de exergía.
- e) Representación esquemática de los estados iniciales y finales en el diagrama  $T-s$ .

6.48. En una publicación se han encontrado los siguientes datos relativos a una botella de butano típica: diámetro exterior 0,300±0,001 m; altura total 0,459±0,005 m; capacidad 26,1±0,5 litros; masa en vacío 12,5±0,7 kg; carga de butano 12,5 kg, presión de prueba de resistencia 3 MPa; temperatura máxima permitida 50 °C; sobrepresión de suministro a los aparatos de consumo (28±8) mb (milibares); gasto másico máximo que permite la válvula entre 0,5 kg/h y 1,5 kg/h, medible con un contador de hasta 4 m<sup>3</sup>/h (de los disponibles en el mercado, por si se quiere usar); poder calorífico mínimo del butano comercial 45 MJ/kg. Se pide:

- a) Comprobar la compatibilidad de los datos geométricos y estimar el espesor de la pared con los datos apropiados de un acero (con esto y los datos elásticos se podría estimar la validez del dato estructural).
- b) Con los datos apropiados del n-butano, comprobar que puede haber 12,5 kg en el interior.
- c) Determinar el estado termodinámico interior para los casos previsibles de temperatura mínima de uso (tómese 10 °C), normal (tómese 20 °C), y máxima (tómese 50 °C), comprobando que es compatible con la presión de suministro.
- d) Comprobar la compatibilidad de los datos de caudal de la válvula y el caudalímetro.

- e) Calcular la transmisión de calor necesaria para suministrar el gasto másico máximo (con él y con los datos de transmitancia térmica a través de la pared se calcularía una mejor aproximación de la temperatura interior).
- f) Calcular la potencia calorífica máxima suministrable y el caudal en litros/minuto de agua caliente sanitaria producible en un calentador a gas, tomando un salto de 15 °C a 60 °C.

6.49. (El barquito)

6.50. Denis Papin, discípulo de R. Boyle, desarrolló en 1679 la primera olla a presión, y observó que el tiempo de cocción de alimentos disminuía a más del 50% pese a que el incremento de temperatura conseguido era tan sólo de un 5%. Desde entonces se han incorporado grandes mejoras, sobre todo en la seguridad. Considérese el modelo compuesto por una vasija de acero inoxidable de 1 mm de espesor y 6 litros de capacidad, a la que se le acopla una tapa del mismo material con un orificio de 2 mm de diámetro interior y 15 mm de altura (pitorro). La pérdida de presión en el pitorro se modeliza por  $p_{\text{int}} - p_{\text{ext}} = c_K \frac{1}{2} \rho_{\text{int}} v^2$ , siendo  $v$  la velocidad media de paso del fluido,  $\rho$  su densidad a la entrada, y  $c_K=2$ . El proceso que se considera es el siguiente: se llena la olla con 4 litros de agua (en realidad sería mucha comida y poca agua), se tapa firmemente, se pone sobre un quemador de 3 kW hasta llegar a ebullición (se oye silbar el pitorro), se le pone una válvula (que se modeliza simplemente como un cierre de peso de 50 gramos), y se baja el fuego a 1 kW. Se pide:

- a) Estimar el tiempo que se tardaría en llegar a ebullición, despreciando las pérdidas (i.e. toda la energía pasa al agua, que no se evapora) y la variación de presión. Estimar el gasto másico medio durante este proceso, como cociente entre la masa de aire que saldría y el tiempo que tardaría, así como la sobrepresión interior por la restricción de paso.
- b) Estimar el gasto másico de vapor que se generaría durante la ebullición del agua, en el caso de pitorro libre y fuego máximo, despreciando las pérdidas, y a partir de él la presión interior.
- c) Calcular la presión interior debida al peso de la válvula actuando sobre el área del pitorro, y estimar el gasto másico de vapor que se generaría durante la ebullición del agua, en el caso de pitorro con válvula y fuego lento, despreciando las pérdidas.
- d) ¿Por qué se pone la válvula cuando empieza a pitar la olla? ¿Por qué no se debe abrir la olla inmediatamente después de la cocción? ¿Por qué conviene enfriarla con agua del grifo?

6.51. Con una placa eléctrica y un cazo con una tapa a la que se ha ajustado un pequeño tubo de 5 mm de diámetro interior, se piensa construir un rudimentario generador de vapor. Se requiere que no tarde más de 10 minutos en producir vapor, que éste salga a más de 30 m/s por el tubo (a la atmósfera), y que dure por lo menos una hora. Se pide:

- a) Estimar la densidad y el gasto másico del vapor que sale, y la diferencia de presiones entre dentro y fuera.
- b) Calcular la masa de agua inicial para que dure 1 hora saliendo vapor, y la potencia eléctrica para generar el vapor.
- c) Estimar las dimensiones del cazo y las pérdidas de calor al ambiente por las paredes y la tapa, considerando un coeficiente global de 20 W/(m<sup>2</sup>·K).
- d) Estimar la potencia eléctrica para que empiece a salir vapor antes de 10 minutos.
- e) Comentar los valores finalmente elegidos para la realización práctica.

6.52. En un catálogo de propaganda comercial se anuncia: "Pistola de vapor multifuncional Vaporijet. Con sus 6 accesorios podrás limpiar todas las superficies y rincones. Vapor real a 100 °C. Caldera de aluminio con 175 c.c. 900 W de potencia. Vapor en 2 o 3 min. Tapón de seguridad". Se pide:

- a) Plantear el balance energético del agua desde el estado inicial hasta el de aparición del vapor, comentando el valor real de la temperatura máxima alcanzada.

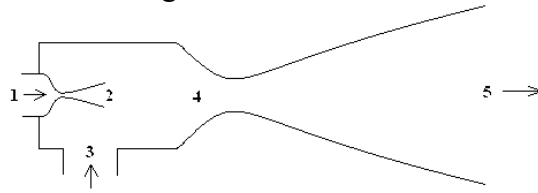
- b) Calcular el tiempo mínimo necesario para conseguir vapor con los datos de potencia y cantidad de agua mencionados.
  - c) Calcular el trabajo mínimo necesario (límite termodinámico en presencia de la atmósfera) para calentar el agua (y la potencia correspondiente al tiempo mínimo).
  - d) Indicar qué dispositivos serían necesarios para lograr el resultado anterior, y compararlo con la previsible solución práctica dada (no se menciona en el anuncio la fuente de energía).
- 6.53. Se desea evaluar la posibilidad de utilizar nitrógeno líquido a presión ambiente como 'combustible' de un coche, que funcionaría con un motor térmico intercambiando calor con el nitrógeno y la atmósfera. Se pide
- a) Temperatura, densidad, energía interna, entalpía y entropía del nitrógeno en los estados termodinámicos de interés.
  - b) Trabajo máximo obtenible por unidad de masa, y su comparación con el de un motor de gasolina de poder calorífico 47 MJ/kg y rendimiento energético del 25%.
  - c) Esquema de bloques de principio de un motor de Carnot que funcionase entre las temperaturas extremas, y su rendimiento.
  - d) Comparar el trabajo máximo obtenible del nitrógeno líquido con el del motor de Carnot.
- 6.54. Se tiene un dispositivo cilindro-émbolo vertical de 25 mm de diámetro y 25 cm de longitud, inicialmente lleno de n-butano, mantenido a presión y temperatura ambiente por un émbolo superior de masa despreciable. En un cierto instante se deja sobre el émbolo una pesa de 7 kg, se espera un tiempo grande, y se retira bruscamente la pesa. Se pide:
- e) Representación en un diagrama  $T-s$  del proceso completo.
  - f) Determinación del estado tras la compresión súbita.
  - g) Determinación del estado atemperado con la pesa.
  - h) Determinación del estado inmediatamente después de retirar la pesa.
- 6.55. El  $\text{CO}_2$  se usa para carbonatar e impulsar la cerveza de barril, la cual se refrigera con una máquina aparte. Considérese una botella de 10 litros de  $\text{CO}_2$  que contiene 5 litros de líquido en equilibrio con su vapor a 20 °C. Se pide:
- a) Hacer un esquema del diagrama  $p-T$  del  $\text{CO}_2$ , indicando el estado interior y los valores de la presión y temperatura en el punto crítico y en el punto triple.
  - b) Hacer un esquema del diagrama  $p-h$  del  $\text{CO}_2$ , indicando el estado interior.
  - c) Masa y presión inicial de  $\text{CO}_2$ .
  - d) Indicar qué ocurre si la botella se pone en un ambiente a 50 °C, y si se pone en un ambiente a 0 °C.
  - e) Volumen de cerveza (considérese agua) que podría enfriarse 20 °C, en un cambiador de calor con el  $\text{CO}_2$ .
  - f) Volumen de cerveza (considérese agua) que podría elevarse 1,5 m de altura, utilizando convenientemente el  $\text{CO}_2$ .
  - g) Cantidad de hielo seco que se podría generar utilizando convenientemente el  $\text{CO}_2$ .
- 6.56. Un depósito de 30 m<sup>3</sup> aislado térmicamente contiene inicialmente amoníaco a 20 °C en estado bifásico al 50% en volumen. A partir de un cierto instante se extrae vapor hasta que la temperatura interior baja a 10 °C. Se pide:
- a) Presión y masa iniciales en el interior, y situación del estado en el diagrama  $T-s$ .
  - b) Estados inicial y final del vapor que se extrae, entalpía, y representación en los diagramas  $T-s$  y  $p-h$ .

- c) Plantear el balance energético del depósito, indicando los datos y las incógnitas.
  - d) Presión y masa finales en el interior
- 6.57. Supóngase que el líquido dentro de un recargador de encendedores de gas es propano puro y está a 20 °C. Se pide:
- a) Presión interior (a la temperatura ambiente, y a 60 °C que podría alcanzar al sol y resguardado).
  - b) Esquema en un diagrama  $T-s$  del proceso de salida, determinando la temperatura a la salida y la fracción másica de vapor.
  - c) Estimar cuánto podría enfriarse un dedal de latón de 10 g, al echar dentro de él 1 cm<sup>3</sup> de propano líquido.
  - d) Indicar procedimientos que permitan determinar si el contenido es propano o butano.
- 6.58. Se trata de producir hielo líquido (una suspensión de cristalitas de hielo en agua, muy utilizada para enfriar pescado) por el procedimiento siguiente. Una corriente de agua en condiciones ambiente (supóngase 100 kPa, 15 °C y agua pura, aunque otras veces se usa agua de mar), sufre una expansión súbita al entrar a una cámara de vacío, adiabática, donde los vapores son aspirados hasta la presión atmosférica por una bomba de vacío (compresor) capaz de mantener en la cámara las tres fases del agua (sólida, líquida y vapor). Por otra parte, de la cámara de expansión se va sacando la mezcla de hielo líquido, en régimen estacionario, supóngase que con 25% en peso de hielo, mediante una bomba (el hielo líquido se bombea casi como si fuese agua). Se pide:
- a) Hacer un esquema de la instalación y el diagrama  $T-s$  de la evolución.
  - b) Calcular el coste energético mínimo unitario para producir una corriente de agua líquida a 0 °C a partir de agua ambiente.
  - c) Calcular el coste energético mínimo unitario para producir un flujo de hielo a 0 °C a partir de agua ambiente.
  - d) Calcular el coste energético mínimo unitario para producir una corriente de hielo líquido a 0 °C con 25% en peso de hielo, a partir de agua ambiente.
  - e) Estados del vapor a la entrada y a la salida de la bomba de vacío.
  - f) Fracción másica de vapor a bombear.
  - g) Calcular el coste energético del proceso descrito, y su rendimiento energético.
- 6.59. Se tiene un depósito rígido de 1 m<sup>3</sup> conteniendo inicialmente vapor de agua a 200 kPa y 150 °C. Se pide:
- a) Estado final que alcanzaría si se dejase atemperar, haciendo un esquema del proceso en un diagrama  $T-s$ , y calculando los intercambios energéticos.
  - b) Trabajo máximo obtenible (límite termomecánico) en el estado inicial y en el final.
  - c) Plantear (incógnitas y ecuaciones) el estado final que se alcanzaría en el interior si se aislase térmicamente y se añadiese al vapor una masa igual de agua líquida a igual temperatura.
- 6.60. Una planta regasificadora de gas natural licuado (LNG) ha de producir 100 kg/s de gas natural a 8 MPa para alimentar el gasoducto de salida, a partir del LNG a presión atmosférica de los tanques de almacenamiento del LNG traído por barco. Se pide:
- a) ¿Se necesita aportar exergía en el proceso descrito, o por el contrario se podría con ello producir trabajo?
  - b) ¿Qué es mejor, primero comprimir y luego atemperar, o al revés? Estimar el coste mínimo de compresión del líquido y el de compresión del gas.
  - c) En la realidad, debido a la inevitable transmisión de calor a través de las paredes del tanque de LNG, existe una auto-regasificación (*boil-off*) de 1 kg/s, que, o bien se ha de quemar para

minimizar el daño ecológico de su emisión, o se ha de volver a licuar (que resulta muy caro), o se comprime para el suministro a 8 MPa (que resulta muy caro), o se quema para acelerar la regasificación del resto (como así se hace en la práctica), o se aprovecha en la forma siguiente: el vapor autogenerado (el *boil-off*) es comprimido sólo hasta una presión intermedia  $p_i$  tal que al mezclarlo con el LNG destinado a la regasificación (comprimido también hasta  $p_i$ ), quede todo en fase líquida, completando luego la compresión hasta los 8 MPa de suministro al gasoducto. Determinar la presión intermedia mínima.

- 6.61. Una planta geotérmica genera 10 MW aprovechando el vapor producido en la expansión brusca a 0,5 MPa de una corriente de agua a 450 K y 1,5 MPa. Sabiendo que la salida de la turbina es a 15 kPa y 90% de fracción másica de vapor, se pide:
- Esquema de la instalación y de los procesos en los diagramas  $T-s$  y  $p-h$ .
  - Trabajo unitario que produce la turbina.
  - Trabajo unitario máximo obtenible de la corriente de agua.
  - Gasto de agua.
- 6.62. Un buque de suministro *offshore* tiene 4 motores que producen 8 MW en total, consumiendo gas natural (supóngase  $\text{CH}_4$ ) a temperatura ambiente y 500 kPa (más un 1 % de gasóleo, que aquí se despreciará, para el encendido del gas). El  $\text{CH}_4$  se toma de un depósito de 220 m<sup>3</sup> de gas natural licuado (LNG) a 1 MPa. Tómese un poder calorífico del gas natural de 50 MJ/kg, y calcúlese:
- Temperatura del LNG en el tanque, y capacidad másica.
  - Consumo de gas natural (másico y volumétrico en condiciones normales), suponiendo un rendimiento energético motor de 0,4, y autonomía con el tanque lleno.
  - Calor que hay que suministrar al gasto de LNG para los motores, y gasto másico de agua para conseguirlo con una entrada a 25 °C y salida a 22 °C.
  - Calor que hay que suministrar al tanque para mantener la presión durante el suministro (en realidad se calienta un pequeño flujo de LNG derivado del tanque), y la temperatura a la que saldría el agua de calefacción si se usa como entrada la salida descrita en el apartado anterior.
- 6.63. Considérese un depósito conteniendo R134a en estado bifásico a una temperatura ambiente de 30 °C, de cuya parte inferior se extrae un pequeño gasto de líquido que sufre una expansión hasta la presión atmosférica en una válvula, recibiendo posteriormente calor hasta vaporizarse completamente. Entonces, con un compresor se comprime hasta la presión adecuada para que, una vez atemperado, quede otra vez líquido a 30 °C y se devuelve al depósito. Se pide:
- Esquema de los procesos en los diagramas  $T-s$  y  $p-h$ .
  - Determinar analíticamente (modelo de sustancia perfecta) las condiciones a la salida de la válvula.
  - Determinar analíticamente los intercambios energéticos en dichos procesos.
- 6.64. Considérese un eyector de vapor ) donde el fluido motriz entra saturado a 200 kPa (estado 1), se acelera en una tobera convergente-divergente que descarga a 10 kPa (estado 2), arrastra vapor saturado a esa presión (estado 3), y la mezcla (estado 4) se decelera en un difusor convergente-divergente hasta salir a presión atmosférica (estado 5). Sabiendo que entran 0,1 kg/s de vapor motriz, y que éste arrastra 0,01 kg/s de vapor aspirado, se pide:
- Estudiar el proceso de 1 a 2, indicando los datos, las hipótesis, las ecuaciones relevantes y calculando la temperatura de salida en 2.
  - Estudiar el proceso de mezcla (2-3→4), indicando los datos, las hipótesis, las ecuaciones relevantes y calculando el estado en 4.

- c) Estudiar el proceso de 4 a 5, indicando los datos, las hipótesis, las ecuaciones relevantes y calculando la temperatura de salida en 5.
- d) Esquema de los procesos en el diagrama de Mollier.



- 6.65. En un recipiente de 0,5 litros de capacidad, se quiere instalar un calentador eléctrico para poder generar un chorro de vapor a 1 MPa. Suponiendo despreciables las pérdidas de calor al exterior, se pide:
- a) Potencia eléctrica mínima para que empiece a salir vapor a 1 MPa en menos de 10 minutos.
  - b) Tiempo máximo que podría estar generando vapor con esa potencia.
  - c) Energía mínima necesaria (límite termodinámico) para pasar el agua ambiente a vapor a 1 MPa, y comparación con la suministrada por la resistencia.
- 6.66. Se desea condensar una corriente de 0,01 kg/s de R134a a 1 MPa, que entra a 60 °C, mediante un flujo de agua a contracorriente que entra a 30 °C al cambiador de calor. Se pide:
- a) Temperatura mínima de salida del R134a.
  - b) Entalpías de entrada y salida del R134a.
  - c) Gasto másico mínimo necesario de agua.
  - d) Hacer un esquema de los perfiles de temperatura de ambas corrientes a lo largo del cambiador.
- 6.67. Se quiere aprovechar la energía de los gases de salida de un proceso de oxi-combustión, un flujo equimolar de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O a 1700 K y 0,2 MPa, para generar vapor saturado a 1 MPa a partir de agua a 30 °C. Se pide:
- a) Plantear el balance energético del recuperador de calor, indicando un valor representativo de la capacidad térmica de la mezcla gaseosa.
  - b) Determinar la temperatura mínima de salida de los gases, sabiendo que en el recuperador de calor debe haber un salto mínimo de 10 K.
  - c) Flujo de vapor generado relativo al de gases.
- 6.68. Se hace pasar dióxido de carbono líquido, proveniente de una botella que está a 17 °C, a través de una válvula de expansión hasta casi la presión del punto triple (para evitar que se forme tapón de hielo seco), y posteriormente se vaporiza totalmente en un cambiador de calor. Se pide, resolver gráfica y analíticamente:
- a) Presión y densidad del líquido a la entrada de la válvula.
  - b) Estado termodinámico a la salida de la válvula.
  - c) Calor necesario por unidad de gasto.
- 6.69. Por un conducto de 3 cm de diámetro circula una corriente de vapor de agua en equilibrio con gotitas en suspensión, a 350 kPa y una velocidad media de 5 m/s. Para determinar la fracción másica de vapor, se deriva una pequeña fracción del flujo, que se hace pasar por una válvula de expansión hasta la presión ambiente de 100 kPa, saliendo el vapor por ella a 105 °C. Se pide:
- a) Temperatura del flujo principal, y densidades de la fase vapor y la fase líquida.
  - b) Representación en un diagrama h-s del proceso de expansión.
  - c) Fracción másica de vapor en el flujo principal.

d) Gasto másico circulante por el conducto principal.