



## 5. THERMODYNAMICS OF CONTROL-VOLUME SYSTEMS

- 5.1. Una botella de 30 litros contiene aire inicialmente a 15 MPa. A partir de un cierto instante se abre la válvula y, tras un proceso rápido, cuando la presión interior llega a 12 MPa se vuelve a cerrar. El proceso de descarga también se va a modelizar como una expansión isentrópica, hasta esa presión de cierre, en un dispositivo cilindro-émbolo encerrando la masa inicial en las condiciones iniciales, y considerando unas veces el sistema cerrado de toda la masa y otras veces el sistema abierto de los 30 litros más próximos al fondo del cilindro. Se pide:
- Balance másico del aire en la botella.
  - Balance energético del aire en la botella, indicando la influencia del estado de referencia.
  - Balance energético del aire encerrado por el émbolo.
  - Balance energético del sistema abierto de volumen de control coincidente con los 30 litros del fondo del cilindro, y comparación con el del apartado anterior.
  - Balance exergético de la botella, indicando la influencia del estado de referencia, y compararlo con las exergías inicial y final
  - Balance exergético del aire encerrado por el émbolo, y compararlo con las exergías inicial y final..
  - Estado termodinámico interior tras el cierre de la botella, al cabo de mucho tiempo, y variación de exergía.
- 5.2. Estimar el calor que habría que comunicarle al aire en un recipiente adiabático de 10 litros, abierto a la atmósfera, para que la masa de aire disminuya a la mitad, y la temperatura final.
- 5.3. Un recipiente de 10 litros en el que se ha hecho el vacío se deja que se llene bruscamente de aire hasta la presión ambiente. Se pide:
- Temperatura máxima que alcanzaría el aire en el interior.
  - Masa que entra hasta el equilibrio mecánico y hasta el térmico.
  - Presión final que se alcanzaría si tras el llenado rápido se cierra el recipiente.
- 5.4. De una línea de aire comprimido a 800 kPa se extrae un gasto tal que por un conducto de 1 cm de diámetro la velocidad media es de 10 m/s. Este flujo se utiliza para hacer girar una turbina de rendimiento adiabático 0,8. Se pide:
- Diagrama  $T-s$  de la evolución del gas.
  - Gasto másico, y trabajo máximo obtenible a partir de las condiciones iniciales.
  - Estado termodinámico del aire a la salida de la turbina.
  - Potencia real obtenida.
- 5.5. Dentro de un recipiente de 100 litros con un orificio que comunica con la atmósfera, existe una rueda de paletas cuyo eje atraviesa el recipiente. A partir de un cierto instante se hace girar el eje a 10000 rpm, midiéndose un par resistente en régimen estacionario de 15 N.m. Suponiendo que la transmisión de calor desde el aire interior a la atmósfera exterior es de la forma  $dQ/dt=K(T_{int}-T_{ext})$ , con  $K=120$  W/K, se pide:
- Masa de aire encerrada en condiciones ambientales, y balance energético del aire interior en el caso general.
  - Temperatura y masa interior en régimen estacionario.

- c) Variación de la temperatura y la masa interior en el caso que fuese  $K=0$ .
- d) Para el caso estacionario, variación de entropía y generación de entropía de todos los sistemas.
- 5.6. Para tratar de evaluar la variación de la energía interna del aire con la presión a  $T=cte$ , se piensa el siguiente experimento: Se dispone un frasco Dewar de 6 litros con aire a alta presión,  $p_{inicial}=1$  MPa ( $p_{atm}=100$  kPa), mantenido isotérmicamente a una temperatura  $T_0=300$  K superior a la ambiente,  $T_{atm} = 290$  K, mediante un dispositivo termoelectrico (capaz de dar o tomar calor) autocontrolado. El frasco comunica con la atmósfera a través de una válvula donde el aire se expande hasta la presión atmosférica y un conducto donde otro dispositivo termoelectrico ajusta la temperatura de salida a  $T_0$ . Para el proceso de descarga, se pide:
- a) Indicar el signo esperado de los intercambios térmicos.
- b) Calcular los intercambios térmicos con el modelo de gas perfecto.
- c) Tomando como referencia la energía interna del aire en condiciones de salida,  $u(T_0, p_{atm})=0$ , calcular la energía interna a alta presión,  $u(T_0, p_{inicial})$ , en función de variables directamente medibles.
- 5.7. Dos depósitos de 50 litros, de paredes aislantes, están comunicados entre sí a través de una válvula que se abre con una sobrepresión de 2 MPa. Inicialmente todo está a 20 °C y las presiones son de 100 kPa y 2,1 MPa. Entonces se empieza a calentar con una resistencia eléctrica el aire del depósito de alta presión hasta que alcanza 50 °C. Se pide:
- a) Masa total de aire y fracciones iniciales.
- b) Presión de alta en función de la masa de aire en ese depósito.
- c) Estado termodinámico final.
- d) Energía comunicada al conjunto y variación de entropía.
- 5.8. En un conducto divergente de  $0,2$  m<sup>2</sup> de sección de entrada por el que circula aire, se han medido las presiones estáticas y totales de entrada y salida, obteniéndose  $p_1=100$  kPa,  $p_{1t}=120$  kPa,  $p_2=105$  kPa y  $p_{2t}=115$  kPa. Sabiendo que la temperatura ambiente es de 15 °C, se pide:
- a) Gasto de aire, velocidad de entrada y temperatura y velocidad de salida.
- b) Rendimiento adiabático de la compresión dinámica.
- c) Generación de entropía.
- d) Demostrar que para velocidades bajas la presión total y la temperatura total se aproximan a las obtenidas con el modelo de fluido incompresible.
- 5.9. Se desea estudiar un circuito de calefacción por convección natural de agua (termosifón), aproximándolo a una única conducción de sección uniforme y 3 cm de diámetro en forma rectangular y vertical, es decir, con dos tramos verticales de 15 m de altura unidos entre sí por dos tramos horizontales de poca longitud. Se supone que los tramos verticales son adiabáticos, que en el tramo de abajo recibe calor de otra corriente de agua, ésta de 1 litro por segundo, que entra a 90 °C y sale a 60 °C, y que en el tramo superior calienta una corriente de aire de 10 kg/s hasta 20 °C. Se supone que la pérdida de presión total en el conducto puede calcularse con la fórmula:

$$\Delta p_t = -\lambda \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho v^2$$

siendo  $\lambda=0,025$ ,  $L$  la longitud,  $D$  el diámetro,  $\rho$  la densidad y  $v$  la velocidad media en la sección. Para el coeficiente de dilatación térmica del agua se toma un valor medio  $\alpha=5 \cdot 10^{-4}$  K<sup>-1</sup>. Se pide:

- a) Calor cedido a la corriente de aire y temperatura de entrada de éste.
- b) Relación entre la energía mecánica degradada por fricción y la velocidad y el calentamiento.

- c) Velocidad media y gasto másico generado.
  - d) Incremento de temperatura en el circuito y comparación con las temperaturas de la fuente y el sumidero térmicos.
  - e) Generación de entropía en cada sistema y en el universo.
- 5.10. Se quiere introducir 150 litros de agua en un depósito hermético de 200 litros, inicialmente lleno de aire a presión atmosférica, desde un gran recipiente 50 m por debajo del anterior, utilizando una bomba que da 60 litros/hora. Se pide:
- a) Variación de la presión del aire con el nivel de agua en el depósito, y valor final.
  - b) Potencia que va consumiendo la bomba, y valores inicial y final.
  - c) Energía total consumida.
  - d) Generación de entropía.
- 5.11. Se trata de estudiar el proceso de carga de un cierto acumulador neumático que consta de un cilindro rígido de 10 litros con un orificio de entrada en el centro de una de sus caras, y un émbolo interior que divide el espacio en dos volúmenes, uno encierra una cantidad de aire fija y el otro es el que tiene el orificio. En el instante inicial el aire encerrado está a 200 kPa y ocupa todo el cilindro. Entonces se conecta el orificio a un gran depósito de aire comprimido a 1,5 MPa. Para el proceso rápido hasta alcanzar el equilibrio mecánico, y suponiendo que la energía degradada es despreciable, se pide:
- a) Esquema de la instalación y masa de aire encerrado.
  - b) Evolución del aire encerrado, estado final y energía almacenada.
  - c) Masa y estado termodinámico del aire que ha entrado.
  - d) Variación de entropía.
  - e) Estado de equilibrio termodinámico último si se deja indefinidamente abierto el orificio.
- 5.12. Se desea analizar la energía requerida para hacer pasar una corriente de agua a presión ambiente desde 10 °C hasta 120 °C. Se pide:
- a) Trabajo mínimo necesario disponiendo libremente de la atmósfera.
  - b) Energía necesaria si se utiliza un calentador eléctrico.
  - c) Energía necesaria si se utiliza un calentador a gas de rendimiento energético 0,8. ¿Por qué son de uso más corriente (p.e. para agua sanitaria) los calentadores a gas que los eléctricos?
  - d) Trabajo mínimo necesario disponiendo de una única máquina de Carnot (temperaturas de funcionamiento fijas).
  - e) Trabajo mínimo necesario disponiendo de dos máquinas de Carnot.
- 5.13. En un conducto de 5 cm de diámetro por el que circulan 15 kg/min de aire hay una válvula de paso semiabierta. Sabiendo que el estado a la entrada es de 15 °C y 250 kPa, y que sale a 100 kPa, se pide:
- a) Velocidad media a la entrada y a la salida.
  - b) Temperatura a la salida.
  - c) Generación de entropía.
  - d) Variación de exergía de la corriente.
- 5.14. Se trata de llenar un depósito de 8 m<sup>3</sup> para que contenga aire a 1 MPa, a partir de la atmósfera. Se pide:
- a) Consumo energético mínimo.

- b) Suponiendo que se llena con un compresor volumétrico de rendimiento adiabático 0,75 que da un gasto de 1 kg/min a 1200 rpm, determinar la cilindrada total.
- c) En este caso, calcular la variación de la presión del depósito con el tiempo y la masa final.
- d) Potencia máxima y energía demandadas por el compresor.
- e) Variación de entropía.
- 5.15. Se dispone de un compresor volumétrico de dos cilindros y 1 litro de cilindrada total que funciona a 1500 rpm. Sabiendo que la presión de descarga es de 400 kPa, se pide:
- a) Gasto de aire.
- b) Temperatura a la salida.
- c) Consumo energético.
- d) Exergía de la corriente.
- 5.16. Se quiere alimentar con 0,1 kg/s una línea de distribución de aire comprimido a 2 MPa, utilizando dos compresores de rendimiento adiabático 0,85 y una refrigeración intermedia hasta 50 °C. Se pide:
- a) Consumo energético mínimo.
- b) Presión intermedia óptima.
- c) Potencia consumida por cada compresor.
- d) Calor evacuado.
- e) Influencia que tendría en las presiones de funcionamiento óptimo una pérdida de presión total del 5% en el cambiador de calor.
- 5.17. Un frigorífico doméstico de 50x60x150 cm<sup>3</sup> de capacidad tiene un motor de 100 W y está inicialmente parado y con la puerta (de 50x150 cm<sup>2</sup>) abierta, en una atmósfera a 30 °C y 92 kPa. A partir de un cierto instante se cierra la puerta y se pone en marcha el motor hasta que se alcanza una temperatura media de 5 °C. Se pide:
- A) Suponiendo que el cierre fuese estanco:
- a) Masa de aire encerrada y presión final.
- b) Calcular la fuerza suplementaria que sería necesario hacer para abrir la puerta al final.
- c) Calcular el calor neto que hay que extraer del aire hasta alcanzarse el estado final.
- d) Calcular el tiempo que tardaría en alcanzarse el estado final, suponiendo que la eficiencia energética de la máquina refrigerante es 1 y que sólo se enfría el aire interior.
- e) Enumerar las razones principales por las que el resultado anterior no concuerda con la realidad.
- B) Sabiendo que el cierre no es estanco sino isobárico:
- a) Calcular la relación entre la masa de aire inicial y final.
- b) Calcular el calor neto que hay que extraer del aire hasta alcanzarse el estado final.
- c) Calcular el calor que va entrando por las paredes, suponiendo que su espesor es de 5 cm, su conductividad térmica 0,05 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, y los coeficientes de convección interior y exterior iguales a 5 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>.
- 5.18. Se quiere analizar el coste de comprimir aire de 100 kPa a 1 MPa en régimen estacionario. Se pide:
- a) Temperatura de salida que supondría un consumo mínimo.
- b) Consumo mínimo.
- c) Consumo mínimo para pasar una masa de control (régimen no estacionario) desde 100 kPa a 1 MPa, explicando la diferencia con el caso anterior.
- d) Volviendo al caso estacionario, consumo mínimo utilizando un compresor adiabático.

- e) Consumo utilizando un compresor de rendimiento adiabático 0,75.
- f) Consumo mínimo utilizando dos compresores adiabáticos con refrigeración intermedia, determinando la presión intermedia óptima.
- g) Consumo mínimo utilizando dos compresores adiabáticos con refrigeración intermedia hasta 5 °C por encima de la temperatura ambiente, determinando la presión intermedia óptima.
- h) Consumo mínimo utilizando dos compresores adiabáticos de rendimiento 0,75, con refrigeración intermedia hasta 5 °C por encima de la temperatura ambiente, determinando la presión intermedia óptima.
- i) Consumo mínimo utilizando dos compresores adiabáticos de rendimiento 0,75, con refrigeración intermedia hasta 5 °C por encima de la temperatura ambiente, determinando las presiones intermedias óptimas sabiendo que en el cambiador de calor la presión cae 20 kPa.
- j) Consumo mínimo en el caso límite de infinitos compresores adiabáticos de rendimiento 0,75 con refrigeración intermedia hasta la temperatura atmosférica.

5.19. Se quiere obtener trabajo a partir del aire contenido en un depósito de 1000 m<sup>3</sup>, inicialmente a 1 MPa. Se pide:

- a) Trabajo máximo obtenible.
- b) Variación de entropía del aire y de la atmósfera en el caso anterior.
- c) Trabajo máximo obtenible con una turbina adiabática que se adapte al salto de presión adecuado.
- d) Variación de entropía del aire y de la atmósfera en el caso anterior.
- e) Trabajo máximo obtenible con una turbina que trabaja entre 400 kPa y 100 kPa (es decir, habrá que poner una válvula a la entrada para que la presión del depósito caiga a 400 kPa).
- f) Variación de entropía del aire y de la atmósfera en el caso anterior.

5.20. Se desea comprimir en régimen estacionario 0,1 kg/s de etano desde 1 MPa y 300 K hasta 4 MPa, en presencia de una atmósfera a 100 kPa y 300 K. Se pide:

- a) Sabiendo que la sección de entrada es de 10 cm<sup>2</sup>, calcular la densidad, velocidad y temperatura total a la entrada.
- b) Establecer la expresión que da el trabajo mínimo necesario en función de la temperatura de salida, determinando ésta para minimizar aquél.
- c) Calcular la potencia mecánica mínima necesaria.
- d) Calcular el trabajo necesario y la temperatura de salida si se utiliza un compresor de rendimiento adiabático 0,8.
- e) Indicar cómo se calcularía el trabajo necesario utilizando dos compresores de rendimiento adiabático 0,8 con refrigeración intermedia.

5.21. Un secador eléctrico toma aire ambiente a 20 °C y 92 kPa y produce un chorro de aire caliente a 80 °C, 10 m/s y 16 cm<sup>2</sup> de sección. Se pide:

- a) Gasto de aire y consumo eléctrico.
- b) Consumo eléctrico mínimo que sería necesario disponiendo libremente de la atmósfera y los dispositivos apropiados de conversión energética, describiendo los procesos necesarios.
- c) Rendimiento exergético.

5.22. Calcular la exergía de un manantial geotérmico capaz de producir 1 kg/s de agua a 90 °C.

- 5.23. Los datos de un compresor doméstico de los usados para aplicar pintura son: 1 kW de consumo eléctrico, mono-cilindro de 40 mm de diámetro y 40 mm de carrera, a 3000 rpm, saliendo el aire a una presión manométrica de 800 kPa. Se pide:
- Gasto másico de aire comprimido.
  - Temperatura de salida del aire suponiendo compresión isentrópica.
  - Potencia que consumiría la compresión isentrópica.
  - Mínimo termodinámico de la potencia necesaria, y eficiencia exergetica.
- 5.24. Se trata de estudiar el trabajo obtenible a partir de un depósito de  $8 \text{ m}^3$  de aire comprimido a 10 MPa, en presencia de la atmósfera. Se pide:
- Trabajo máximo obtenible en el límite termodinámico.
  - Trabajo que se obtendría haciendo pasar el aire por una turbina con un gasto másico muy pequeño, esquematizando en el diagrama  $T-s$  la evolución del estado del aire remanente.
  - Trabajo que se obtendría haciendo pasar el aire por una turbina con un gasto másico muy grande, esquematizando en el diagrama  $T-s$  la evolución del estado del aire remanente.
- 5.25. Se desea estudiar el trabajo máximo obtenible de un chorro de gases de escape de gasto másico  $m$  y temperatura de salida  $T_0$ , respecto a una atmósfera a  $T_{\text{amb}}$ , sin tener en cuenta efectos cinéticos ni químicos. Se pide:
- Trabajo máximo obtenible por unidad de gasto másico.
  - Rendimiento energético máximo.
  - Temperatura equivalente de una fuente infinita que tuviese el mismo rendimiento energético máximo.
  - Aplicación numérica para  $T_0=3000 \text{ K}$  y  $T_{\text{amb}}=300 \text{ K}$ .
- 5.26. Determinar la temperatura máxima que se alcanzaría en el interior de una botella de 10 litros de etano, inicialmente a 90 kPa y  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ , al ponerla en comunicación con un gran depósito de etano a 2 MPa.
- 5.27. Se trata de subir a superficie un bloque de mármol de unos  $0,5 \text{ m}^3$ , desde un fondo de mar a 100 m de profundidad, mediante un bidón neumático que básicamente consta de un depósito rígido de  $1 \text{ m}^3$  de capacidad y un conducto de 1 cm de diámetro y más de 100 m, con un peso total en seco (incluyendo cables) de 100 kg. El proceso es el siguiente. Primero se deja hundir el bidón hasta el fondo llenándose de agua. Después se sujeta la carga al bidón. Luego se conecta un compresor volumétrico que aspira 1 l/s de aire atmosférico y lo introduce en el conducto empujando el agua, que sale por una válvula en la parte inferior del bidón. Se pide:
- Esquema de la instalación.
  - Volumen y masa de aire que es preciso introducir para conseguir la flotabilidad del conjunto.
  - Presión máxima que ha de dar el compresor, y tiempo de funcionamiento necesario.
  - Potencia máxima y energía consumida por el compresor.
- 5.28. Se propone el siguiente modelo para analizar un accidente en una sala de máquinas. Un recinto cerrado de  $100 \text{ m}^3$ , conteniendo aire a  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  y 100 kPa, recibe la descarga súbita de un depósito interior de  $2 \text{ m}^3$  de aire a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  y 1 MPa. Se pide:
- Masa de aire inicial en el recinto y en el depósito.
  - Estado termodinámico en el recinto tras la descarga por rotura (mezclado total de ambos contenidos).
  - Estado termodinámico en el recinto tras la descarga por válvula (no entra aire al depósito).

- d) Exergía del depósito respecto al ambiente de la cámara de máquinas.
- 5.29. Se dispone de dos depósitos, uno de  $0,2 \text{ m}^3$  y otro de  $0,1 \text{ m}^3$ , ambos conteniendo aire, el mayor a  $1 \text{ MPa}$  y el otro a  $0,1 \text{ MPa}$ , en un ambiente a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . En un instante dado se ponen en comunicación a través de una válvula hasta que, tras un pequeño tiempo, se igualan las presiones, cerrándose entonces la válvula. Se pide:
- Masa de aire encerrada y trabajo máximo obtenible.
  - Estado termodinámico en el momento del cierre y trabajo máximo obtenible.
  - Estado termodinámico al cabo de mucho tiempo, calor transferido y trabajo máximo obtenible.
- 5.30. Determinar la temperatura máxima que se alcanzaría en el interior de una botella de 20 litros de dióxido de carbono, inicialmente a  $90 \text{ kPa}$  y  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , al ponerla en comunicación con un gran depósito de  $\text{CO}_2$  a  $10 \text{ MPa}$ .
- 5.31. Determinar la potencia máxima obtenible de una corriente de  $2 \text{ kg/s}$  a  $0,6 \text{ MPa}$ , según sea de agua o de aire y esté a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  o a  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  (cuatro casos).
- 5.32. Un sistema cilindro-émbolo horizontal de  $25 \text{ cm}$  de diámetro está delimitado por una parte por una pared con un orificio que comunica a través de una válvula (inicialmente cerrada) con un depósito de 20 litros lleno de R-12 a  $0,3 \text{ MPa}$ , y por la otra por el émbolo (inicialmente apoyando sobre la pared), al otro lado del cual está la atmósfera y un vástago que se va a utilizar para empujar con una fuerza de  $1000 \text{ N}$  contra una cierta carga. De ensayos previos se ha deducido que la fricción del émbolo puede suponerse constante y de valor  $100 \text{ N}$ . Sabiendo que todo está inicialmente atemperado, que la atmósfera está a  $300 \text{ K}$  y  $90 \text{ kPa}$ , se pide:
- Hacer un esquema de la instalación y elegir los sistemas termodinámicos apropiados, indicando si son de masa de control o de volumen de control, las ecuaciones a aplicar y las simplificaciones adecuadas.
  - Calcular el desplazamiento del émbolo en el movimiento rápido tras la apertura de la válvula.
  - Calcular el desplazamiento final del émbolo al cabo de mucho tiempo.
  - Definir y calcular el rendimiento exergético de los procesos descritos.
- 5.33. Se tiene un recipiente de  $0,5 \text{ m}^3$  inicialmente a presión y temperatura ambiente y dotado de una válvula que impide que la presión interior sobrepase el límite de  $120 \text{ kPa}$ . A partir de un cierto instante se comunica  $1 \text{ kW}$  al aire a través de una resistencia eléctrica. Suponiendo que el proceso es suficientemente rápido para poder desprestigiar las pérdidas energéticas por las paredes, pero aún así es aceptable la hipótesis de temperatura homogénea, se pide:
- Masa inicial y temperatura a la que se abre la válvula.
  - Exergía del gas en el instante de apertura de la válvula y comparación con la exergía aportada.
  - Expresión explícita del gasto másico que saldría inicialmente, y evaluación numérica.
  - Representación de las evoluciones temporales de temperatura, presión y masa encerradas.
- 5.34. Desde un depósito de 10 litros aislado térmicamente y conteniendo n-butano inicialmente a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1,5 \text{ MPa}$ , se va a extraer por un conducto de  $1 \text{ cm}$  de diámetro un flujo de  $2 \text{ m/s}$  de velocidad media, pasando luego por una válvula de la que sale a presión ambiente. Se pide:
- Esquema de la instalación y densidad inicial en el depósito, gasto másico inicial y condiciones iniciales de salida.
  - Estimación en primera aproximación el tiempo que tardaría en vaciarse el depósito.
  - Diagrama  $T$ - $s$  de los procesos.

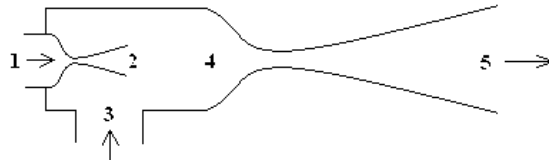
- d) Ecuación diferencial que permitiría hacer una estimación más precisa del proceso de descarga, suponiendo que el gasto másico varía proporcionalmente con la sobrepresión del depósito.
- 5.35. Se dispone de una batería de botellas de 50 litros de aire comprimido a 3 MPa. Se desea suministrar 10 dosis de 1,2 kg de aire comprimido a un ambiente a 0,2 MPa y 15 °C. La dosis es rápida, pero entre una y otra se espera mucho tiempo. Se pide:
- Masa de aire comprimido inicialmente encerrado en cada botella.
  - Número de botellas mínimo necesario para satisfacer el gasto másico.
  - Tabla de masas, presiones, temperaturas en cada estado particular del proceso.
  - Número de botellas mínimo realmente necesario teniendo en cuenta las presiones de funcionamiento.
- 5.36. Se conecta una botella con aire inicialmente en condiciones atmosféricas a un gran depósito de aire comprimido a 10 MPa, desconectándose y cerrándose tras un breve periodo de tiempo. Se pide:
- Exergía específica inicial del aire de la botella y del aire del depósito, indicando el efecto de la corrección por compresibilidad.
  - Esquematizar la evolución temporal de la masa, temperatura y presión en la botella.
  - Plantear el balance energético de la botella eligiendo como estado de referencia el atmosférico, comprobando que no influye.
  - Presión máxima alcanzable dentro de la botella una vez atemperada.
  - Presión manométrica a la que habría que desconectar la botella si se quiere que al final quede a 5 MPa.
- 5.37. En una tubería de  $1 \text{ cm}^2$  de sección hay una válvula por la que entra argón a 10 MPa, 210 K y 10 m/s, saliendo a 5 MPa. Calcular el gasto másico, y la temperatura y velocidad de salida.
- 5.38. A una tobera entra vapor a 460 °C, 1 MPa y 100 m/s, saliendo en condiciones sónicas (i.e. a la velocidad local del sonido). Se pide:
- Deducir la dependencia explícita de la velocidad del sonido con las variables de estado a partir de  $c \equiv \sqrt{\partial p / \partial \rho}_s$ .
  - Calcular el valor de  $c_p$  a la entrada a partir del diagrama de Mollier.
  - Calcular la temperatura de salida.
  - Calcular la presión de salida y la presión total o de remanso.
  - Calcular la relación de áreas.
- 5.39. Un cilindro vertical de 5 cm de diámetro contiene aire limitado por arriba por un émbolo de 10 kg (supóngase sin fugas ni fricción), y por abajo por una base con un orificio que puede comunicar con un depósito de aire comprimido a 0,8 MPa, estando el ambiente a 20 °C y 93 kPa. Inicialmente el émbolo está a 20 cm de la base. En un cierto instante, se ponen en comunicación cilindro y depósito durante 1 s, observándose que al cabo de mucho tiempo el émbolo ha quedado a 35 cm de la base. Se pide:
- Hacer un esquema de los estados inicial y final: Calcular la masa de aire inicial y la que ha entrado. Determinar la evolución del gas si en el proceso pudiese considerarse que el émbolo apenas se acelera, calculando el intercambio térmico con el exterior.
  - Un modelo para el estudio del movimiento sería suponer que el aire entra tan deprisa que el émbolo no se ha movido apreciablemente durante la entrada. Calcular las condiciones termodinámicas inmediatamente después de la entrada de toda la masa.

- c) Calcular la altura máxima a la que podría subir el émbolo.
- d) Estimar el periodo del émbolo para discernir si durante el llenado se ha movido apreciablemente.
- 5.40. Para el estudio de un sistema de arranque de un motor diésel marino, a partir de un depósito de aire a 3 MPa, se pide:
- a) Calcular la temperatura máxima que se alcanzaría al poner en comunicación el depósito con el cilindro, suponiendo que el volumen inicial cilindro-émbolo no varía y es de 0,1 m<sup>3</sup> de aire en condiciones atmosféricas.
- b) Calcular el trabajo necesario para acelerar el émbolo, suponiendo que todo el sistema móvil es equivalente a un émbolo libre de 3 toneladas que debe acelerarse en 0,5 s hasta 3 m/s (los efectos gravitatorios no cuentan). Estimar el desplazamiento del émbolo.
- c) Calcular el trabajo máximo obtenible del chorro de aire a 3 MPa, y el gasto másico mínimo para la potencia de aceleración antes calculada.
- d) Calcular la variación de temperatura interior en un depósito de 1 m<sup>3</sup> de aire a 3 MPa al salir 0,2 kg/s de aire durante 10 s.
- 5.41. Por un conducto circula vapor de agua a 150 kPa y 200 °C, con una presión dinámica de 50 kPa. Se pide:
- a) Determinar el estado termodinámico y la densidad.
- b) Determinar expresiones explícitas para la velocidad de la corriente con el modelo de fluido incompresible y con el modelo de gas perfecto.
- c) Calcular la velocidad de la corriente con ambos modelos.
- d) Calcular la velocidad del sonido en el vapor en esas condiciones.
- e) Indicar cómo se podría medir la presión dinámica de la corriente.
- 5.42. En un esquema de una cámara de mezcla adiabática estacionaria de dos corrientes de aire, 1 y 2, se encuentran los datos siguientes:  $\dot{m}_1=10$  kg/s,  $p_1=0,1$  MPa,  $T_1=20$  °C,  $\dot{m}_2=2$  kg/s,  $p_2=20$  MPa,  $T_2=100$  °C, con salida a  $p_3=0,2$  MPa. Suponiendo que las energías cinéticas no sean muy grandes, se pide:
- a) Plantear y resolver los balances másico y energético de la cámara.
- b) Plantear el balance exergético de la cámara.
- c) ¿Es posible esa presión de salida? ¿Cuál sería la máxima?.
- 5.43. En un esquema de una cámara de mezcla adiabática estacionaria de dos corrientes de aire, 1 y 2, se encuentran los datos siguientes:  $\dot{m}_1=3$  kg/s,  $p_1=0,1$  MPa,  $T_1=15$  °C,  $\dot{m}_2=1$  kg/s,  $p_2=1$  MPa,  $T_2=100$  °C, con salida a  $p_3=0,2$  MPa. Suponiendo que las energías cinéticas no sean muy grandes, se pide:
- a) Plantear y resolver los balances másico y energético de la cámara.
- b) Plantear el balance exergético de la cámara.
- c) ¿Es posible esa presión de salida? ¿Cuál sería la máxima?.
- 5.44. Se han extraído los siguientes datos de una nota de prensa. Se piensa construir el año próximo en Australia una central eléctrica de energía térmica solar, que constaría de una torre hueca de 1000 m de altura y 130 m de diámetro, en el centro de una techumbre circular transparente de 4 km de diámetro que calentaría el aire inferior, el cual saldría por esa chimenea a 15 m/s y 60 °C, después de atravesar 32 turbinas eólicas en su base que generarían 200 MW de electricidad. Se pide:
- a) Hacer un esquema de la instalación y plantear los balances másico, energético y exergético.

- b) Determinar el flujo másico de aire en la chimenea, su exergía específica, y la potencia máxima extraíble, comentando su comparación con la potencia producida.
  - c) Estimar el aporte de energía solar en la planta. Para ello, se puede partir del valor de la constante solar, que es de  $1370 \text{ W/m}^2$  de irradiación normal extraterrestre, y aplicar una disminución del 40% debido al filtro atmosférico y la reflexión solar, el factor de oblicuidad por latitud terrestre (supóngase  $33^\circ \text{S}$ ), y el factor temporal que resulta de un modelo de irradiación solar senoidal, con máximo a mediodía (a las 12 h) y valor nulo a las 6 h (amanecer) y a las 18 h (atardecer).
  - d) Estimar la potencia mecánica que podría generarse en las turbinas mediante la siguiente aproximación. En primer lugar, estimar el ‘tiro’ de la chimenea como la diferencia de presiones debida a una columna de aire caliente quieto, respecto al aire ambiente frío. Después, despreciar las pérdidas de presión por fricción y aplicar la ecuación de Bernoulli generalizada para obtener el trabajo específico.
- 5.45. Una pequeña turbina de 1 kW y de rendimiento isentrópico 0.6, es movida por un flujo de aire proveniente de un depósito a 30 MPa y  $20^\circ \text{C}$ , descargando a presión ambiente. Se pide:
- a) Hacer un esquema de la instalación y del proceso en el diagrama  $T-s$ .
  - b) Determinar la temperatura de salida y el gasto de aire.
  - c) Estimar la autonomía que podría dar un depósito de  $1 \text{ m}^3$ , indicando las hipótesis.
  - d) Hacer un esquema de la instalación y del proceso en el diagrama  $T-s$ , suponiendo que se van a usar dos turbinas con recalentador intermedio óptimo hasta  $10^\circ \text{C}$  de diferencia con el ambiente.
  - e) Determinar la presión intermedia óptima.
- 5.46. Se tienen dos depósitos térmicamente aislados, uno de  $1 \text{ m}^3$  y el otro de  $0,1 \text{ m}^3$ , conteniendo aire inicialmente a presión y temperatura ambiente, comunicados entre sí a través de una válvula que está cerrada si la diferencia de presión desde el depósito mayor al menor es menor que  $0,1 \text{ MPa}$ , y abierta si es mayor. En un cierto instante se conecta una resistencia eléctrica en el interior del depósito mayor, que disipa constantemente 1 kW. Se pide:
- a) Diagrama de la evolución temporal esperada de la presión, temperatura y densidad en cada depósito.
  - b) Tiempo que tardaría en abrirse la válvula.
  - c) Calcular las pendientes de las evoluciones anteriores, instantes antes de abrirse la válvula.
  - d) Gasto másico de aire que empezaría a salir.
  - e) Calcular las pendientes de las evoluciones anteriores, instantes después de abrirse la válvula.
- 5.47. A un cierto dispositivo entra aire a  $20^\circ \text{C}$  y 200 kPa, estando el ambiente a  $20^\circ \text{C}$  y 100 kPa. Se pide:
- a) Se desea saber si es posible que, sin necesidad de otras fuentes de energía, se puede conseguir que salgan dos flujos de aire a 100 kPa, uno de fracción másica  $\lambda$ , a  $100^\circ \text{C}$  y otro  $(1-\lambda)$  a  $0^\circ \text{C}$ . Hacer un esquema y justificar mediante las ecuaciones apropiadas si es o no posible ese proceso termodinámico para algún valor de  $\lambda$ .
  - b) Temperatura de salida si el proceso fuese una simple expansión isentrópica.
  - c) Temperatura de salida mínima (límite termodinámico).
  - d) Temperatura de salida máxima (límite termodinámico).
  - e) Trabajo específico máximo obtenible.
  - f) Hacer un esquema de la exergía de la corriente de salida en función de la temperatura de salida.
- 5.48. Considérese el eyector de gas esquematizado en la figura, que básicamente consiste en una carcasa sin partes móviles a la que entra por 1 el fluido motriz (aire a 300 kPa,  $20^\circ \text{C}$  y baja

velocidad), entra por 3 el fluido a comprimir (aire a 100 kPa, 20 °C y baja velocidad), y sale por 5 la mezcla a 200 kPa y una velocidad significativa, pero mucho menor que las velocidades que se desarrollan en el interior (2 y 4), que suelen ser supersónicas. Se pide:

- Plantear los balances másico, energético y exergético del eyector en su conjunto.
- Calcular la fracción másica de aire motriz necesaria para realizar el proceso, suponiendo que no hay generación de entropía en el interior.
- En realidad, aunque el eyector se construye para que los procesos de 1 a 2 y de 4 a 5 sean prácticamente isentrópicos, el proceso de mezclado de 2 y 3 hasta 4 es básicamente disipativo. Hacer un esquema de dichos procesos en un diagrama  $T-s$ .



- A un sistema adiabático estacionario, con un aparato interior que puede transmitir trabajo a través de un eje al exterior, entran dos corrientes de aire, una de 1 kg/s a 1 MPa y 75 °C, y la otra de 0,2 kg/s a 0,2 MPa y 1000 °C. Hay un único conducto de salida descargando a la atmósfera a 0,1 MPa. Las energías cinéticas en las entradas y salida son despreciables. Se pide:

  - Plantear los balances másico, energético y exergético del sistema.
  - Máxima potencia extraíble de cada corriente de entrada.
  - Máxima potencia que dicha máquina podría producir.
  - Temperatura de salida en el caso anterior.
  - Temperatura de salida si no se produjese trabajo.
  - Generación de entropía en el caso anterior.
- Entra 1 kg/s de vapor en una turbina a 4,5 MPa y 400 °C. Sabiendo que sale saturado, se pide:

  - Presión de salida, y densidades de entrada y salida, con ayuda del diagrama de Mollier.
  - Trabajo específico y potencia producida.
  - Cálculo de la densidad, entalpía y entropía específicas en el estado inicial, con el modelo de sustancias perfectas.
  - Cálculo del estado final con el modelo de sustancias perfectas.
  - Calcular la capacidad térmica específica del vapor en el estado inicial con ayuda del diagrama de Mollier.
- Se quiere comprimir 0,1 kg/s de CO<sub>2</sub> desde las condiciones ambiente de 15 °C y 95 kPa, hasta 900 kPa. Se pide:

  - Temperatura de salida que supondría un consumo mínimo.
  - Consumo mínimo (límite termodinámico).
  - Consumo mínimo usando un compresor adiabático.
  - Indicar en un diagrama  $p-v$  el área que correspondería al trabajo unitario necesario (i.e.  $\int p dv$  o  $\int v dp$ ).
- Calcular el coste energético para comprimir 1 kg/s de metano desde 1 MPa y 0 °C hasta 6 MPa con los modelos siguientes:

  - Modelo de gas perfecto y compresor adiabático ideal.
  - Modelo de estados correspondientes y compresor adiabático ideal.
  - Límite termodinámico de trabajo mínimo.

d) Indicar las ventajas e inconvenientes de hacer la compresión escalonada.

5.53. Se tienen dos depósitos térmicamente aislados, uno de  $2 \text{ m}^3$  y el otro de  $1 \text{ m}^3$ , conteniendo aire inicialmente a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $100 \text{ kPa}$ , comunicados entre sí a través de una válvula que permanece cerrada si la diferencia de presión desde el depósito mayor al menor es menor que  $10 \text{ kPa}$ , y mantiene esta diferencia si no es así. En un cierto instante se conecta una resistencia eléctrica en el interior del depósito mayor, que disipa constantemente  $500 \text{ W}$ . Se va a considerar una única temperatura media representativa en cada depósito. Se pide:

- a) Hacer un diagrama esquemático de la evolución temporal esperada de la presión, temperatura y densidad en cada depósito.
- b) Calcular el tiempo que tardaría en abrirse la válvula, y las pendientes de las evoluciones anteriores, instantes antes de abrirse la válvula.
- c) Calcular la producción de entropía por unidad de tiempo y su valor global hasta que se abre la válvula.
- d) Calcular las pendientes de las evoluciones anteriores, instantes después de abrirse la válvula.
- e) Calcular el gasto másico de aire que empezaría a salir.