



### 3. EXERGY

- 3.1. Con un agitador se ha elevado rápidamente la presión de 15 gramos de aire encerrados en un recipiente rígido, desde 300 kPa y 30 °C hasta 360 kPa. Suponiendo que la atmósfera está a 90 kPa y 30 °C, se pide:
- Trabajo realizado.
  - Trabajo mínimo que se hubiera requerido.
  - Irreversibilidad del proceso.
  - Suponiendo que luego se deja atemperar, variación de energía, entropía, irreversibilidad y generación de entropía.
- 3.2. Calcular el trabajo máximo obtenible de un cuerpo (incompresible) de masa  $m$  y capacidad térmica  $c$ , a temperatura  $T_1$ , en presencia de una atmósfera a  $T_0$ . Calcular el rendimiento energético y hacer aplicación para  $T_0=300$  K y  $T_1=3000$  K.
- 3.3. Calcular el trabajo máximo obtenible de dos cuerpos (incompresibles) de masas y capacidad térmicas dadas, inicialmente a temperatura  $T_1$  y  $T_2$ , según estén en presencia o en ausencia de atmósfera circundante, determinando también la temperatura final y el rendimiento.
- 3.4. Calcular el consumo energético mínimo para llenar un depósito de aire comprimido de 8 m<sup>3</sup> hasta 1 MPa.
- 3.5. Calcular el coste energético mínimo de funcionamiento de un compresor volumétrico de dos cilindros de 1 litro de cilindrada total, que funciona a 1500 rpm y comprime hasta 400 kPa.
- 3.6. Un cilindro cerrado por ambos extremos contiene un pistón a cada lado del cual hay un mol de aire, inicialmente ocupando 1 litro y 10 litros respectivamente. Se pide:
- Presiones iniciales; ¿y las energías iniciales?
  - Presiones finales cuando se deja libre el émbolo. Generación de entropía. ¿Influye la atmósfera exterior?
  - Suponiendo que se conecta el émbolo a un depósito mecánico reversible (p.e. a un sistema de pesas a través de las poleas, cuerdas y orificios adecuados), calcular el trabajo máximo obtenible y las presiones finales.
  - Establecer el balance energético en el caso anterior, explicando cómo es posible producir trabajo a partir de una sola fuente térmica. Generación de entropía.
  - Suponiendo que se conecta el émbolo a un depósito mecánico reversible, pero que no existe atmósfera exterior, calcular el trabajo máximo obtenible y las presiones y temperaturas finales.
- 3.7. Se trata de calentar un local a 21 °C a partir de una fuente a 1000 °C estando el ambiente a 0 °C. Se pide:
- Definir un coeficiente de mérito.
  - Calcular su valor máximo, haciendo uso adecuado de las fuentes con las máquinas térmicas pertinentes.
  - Comentar la practicabilidad de la solución anterior.

- 3.8. En la boca de un cilindro vertical cerrado por abajo, de 10 cm de diámetro y 30 cm de altura hay una especie de émbolo de 2 kg, sujeto al cilindro con un anclaje que resiste 1000 N antes de su rotura. Inicialmente había aire encerrado a presión ambiente, y entonces se conecta a un compresor volumétrico que introduce de prisa emboladas de 100 cm<sup>3</sup> de aire ambiente. Se pide:
- Masa de aire inicial y la introducida en cada embolada.
  - Número de emboladas hasta la rotura del anclaje y aceleración inicial del émbolo.
  - Trabajo máximo obtenible de la configuración en la rotura.
  - Estimar el trabajo que ha sido necesario aplicar.
- 3.9. Se dispone de dos vasos conteniendo un litro de agua cada uno en presencia de una atmósfera a 20 °C. Se desea elevar la temperatura de una de las masas de agua hasta la de ebullición. Se pide:
- Estimar la presión ambiente en el laboratorio sabiendo que está a unos 670 m de altitud sobre el nivel del mar.
  - Determinar la temperatura de ebullición y la energía que es preciso comunicar al agua para llegar a ella.
  - Si se realizase el calentamiento directamente con una resistencia eléctrica de 120 W, estimar el tiempo que se tardaría, y definir y calcular el rendimiento energético en este caso.
  - Determinar el trabajo mínimo necesario.
  - Estimar el flujo máximo de pérdida de calor al ambiente suponiendo que el coeficiente global de transmisión de calor desde el agua caliente al ambiente es de 10 W/(m<sup>2</sup>·K) y un área típica del vaso.
  - Suponiendo que se fuera a utilizar una bomba de calor funcionando entre la temperatura ambiente y la de ebullición, calcular el trabajo mínimo necesario y el rendimiento energético.
  - Calcular la potencia que consumiría la bomba si tardase en calentar el mismo tiempo que la resistencia eléctrica.
  - Razonar la validez práctica del resultado anterior.
  - Razonar cuantitativamente la posibilidad de que la bomba de calor anterior hubiera tomado el calor del agua fría, estimando el estado final de ésta.
- 3.10. Considérese un recipiente rígido de 1 m<sup>3</sup> abierto a la atmósfera, y dentro de él un volumen imaginario inicialmente muy pequeño, encerrando una cierta cantidad de aire. Considérese el proceso de expansión del volumen imaginario de masa fija hasta ocupar completamente el recipiente rígido. Se desea realizar el proceso antedicho con el mínimo de gasto energético. Se pide:
- ¿Conviene realizar el proceso rápida o lentamente?
  - Plantear el incremento de entropía del universo entre los estados inicial y final y calcular el trabajo mínimo necesario.
  - Determinar el incremento de exergía de la masa de control y hacer aplicación numérica para el cálculo del trabajo necesario para hacer el vacío en el recipiente.
  - ¿Qué presión tendría que tener el recipiente para que el trabajo mínimo necesario para llenarlo de aire (a esa presión) fuese igual que el necesario para hacer el vacío?
- 3.11. Considérese un dispositivo cilindro-émbolo encerrando un gas inicialmente en las condiciones  $(p_1, T_1, V_1)$ , estado 1, y una expansión isentrópica hasta un estado 2 definido por  $V_2$ . Considérese también el estado 3 de equilibrio del gas con una atmósfera en condiciones  $(p_0, T_0)$ . Se pide:
- Balance energético del gas encerrado en el proceso 1→2. Compararlo con los balances energéticos 0→1 y 0→2.

- b) Balance exergético del gas encerrado en el proceso 1→2. Compararlo con los balances exergéticos 0→1 y 0→2.
- c) Hacer aplicación para el aire con  $p_1=15$  MPa,  $T_1=288$  K,  $V_1=0,030$  m<sup>3</sup>,  $V_2=0,035$  m<sup>3</sup>,  $p_0=0,1$  MPa,  $T_0=288$  K, comparando los resultados energéticos con los exergéticos.

3.12. Se llena un termo de 1 litro completamente con una bebida caliente (supóngase agua a 95 °C) y se cierra. Se pide:

- a) Calcular el calor que se obtendría en el atemperamiento, y el trabajo termomecánico máximo obtenible del contenido, en presencia del ambiente.
- b) Estimar con la energía anterior la altura a la que podría ser elevada una persona. ¿Es realizable este resultado aunque fuese sólo al 50%?
- c) Determinar el valor del coeficiente de compresibilidad del agua sabiendo que la velocidad del sonido en el agua es  $c=1500$  m/s y que  $c^2=dp/d\rho|_s$ .
- d) ¿Cómo variará la presión interior al atemperarse y tener en cuenta las dilataciones?
- e) Suponiendo que el coeficiente de dilatación del agua puede aproximarse por  $\alpha=\alpha_0(T-T_0)$  con  $\alpha_0=8\cdot 10^{-6}$  K<sup>-2</sup> y  $T_0=273$  K, determinar una aproximación polinómica para la densidad en función de la temperatura y calcular su valor a 95 °C.

3.13. Calcular el trabajo máximo obtenible y el rendimiento energético de dos fuentes térmicas, haciendo aplicación numérica para  $T_1=2000$  K y  $T_2=300$  K.

3.14. En la sección de motor de un periódico se dice que una empresa francesa está desarrollando un coche que funciona con aire comprimido, mencionándose los detalles siguientes: marca MDI, masa 700 kg, motor de dos cilindros, depósito de 0,3 m<sup>3</sup> de aire comprimido, autonomía 300 km a 110 km/h, consumo 1 Pta/km, y va provisto de un compresor de aire que en las estaciones de servicio (o en el aparcamiento de casa) se enchufaría a la red eléctrica y cargaría el depósito hasta 30 MPa. Se pide

- a) Trabajo que puede proporcionar el aire comprimido, indicando las hipótesis en que se basa.
- b) Con el tiempo de la autonomía y el resultado anterior, calcular la potencia media suministrable por el aire comprimido.
- c) Estimar la potencia real que necesita un coche típico para la propulsión, suponiendo que basta con tener en cuenta la fuerza aerodinámica a esas velocidades,  $F$ , y que ésta viene dada por:

$$F = A c_D \frac{1}{2} \rho v^2$$

siendo  $A=2$  m<sup>2</sup> el área frontal,  $c_D=0,3$  el coeficiente de resistencia, y  $v$  la velocidad (110 km/h).

- d) Estimar la potencia correspondiente a un gasto de gasolina de 5 litros cada 100 km, sabiendo que la densidad es de 750 kg/m<sup>3</sup> y el poder calorífico 48 MJ/kg, y comparar todas las potencias obtenidas.
- e) Estimar el coste monetario medio por kilómetro de recargar el depósito de aire comprimido, suponiendo un coste medio de la electricidad de 20 Pta/kWh.

3.15. En un tubo de ensayos de 2 cm de diámetro y 20 cm de altura se echa 1 gramo de hielo seco (nieve carbónica compactada con densidad es de 1600 kg/m<sup>3</sup>) y se tapa firmemente con un tapón de 10 gramos. Se pide:

- a) Determinar la presión que se alcanzaría si resistiese todo hasta el atemperamiento.
- b) Determinar el trabajo máximo (termomecánico) obtenible del gas en ese estado.
- c) Determinar la velocidad máxima que podría alcanzar el tapón si se desprendiese en ese momento.

- 3.16. Se trata de dimensionar el sistema de energía de un mini-submarino para que pueda operar durante 2 horas con un consumo medio de 300 W. El sistema que se propone consta de un depósito de nitrógeno cargado a 15 MPa, que empuja (mediante un fuelle) un circuito de aceite que hace funcionar un motor hidráulico que mueve una hélice y un generador eléctrico. Suponiendo que las pérdidas totales de energía sean del 50%, se pide:
- Tamaño del depósito de gas.
  - Determinar la potencia máxima suministrable por el gas para tiempos cortos, e.g. 5 minutos.
  - Indicar la influencia del tipo de gas (nitrógeno).
- 3.17. Con un pequeño calentador de 1 kW sumergido en un cazo con agua ésta pasa de 80 °C a 85 °C en un minuto, momento en el que se desconecta el calentador y el agua vuelve a 80 °C en un minuto, estando el ambiente a 20 °C. Se pide:
- Balance energético del agua, indicando las hipótesis asumidas.
  - Masa de agua.
  - Energía eléctrica mínima que hubiese sido necesario aportar para el calentamiento antedicho (límite termodinámico en ese ambiente).
  - Irreversibilidad en ambos procesos (i.e. trabajo perdido, potencialmente).
- 3.18. En una publicación se dice que inyectando 0,1 m<sup>3</sup>/s de agua ambiente a 5 km de profundidad, por una tubería de 0,6 m de diámetro, se podría luego sacar (por pozos similares) a unos 200 °C y en estado líquido, para generar con ella vapor y con éste 25 MW de electricidad, un 20% de la cual sería necesaria para todo el bombeo. Se pide:
- Determinar la presión mínima a la que ha de salir el agua (para que salga líquida).
  - Determinar el flujo de calor neto que recibe el agua y la velocidad media del agua, indicando la influencia de la presión y la temperatura.
  - Determinar el rendimiento energético de un motor térmico que operase entre 200 °C y 15 °C, y la potencia eléctrica producible.
  - Suponiendo para simplificar que se trata de obtener el máximo trabajo de 0,1 m<sup>3</sup> de agua a 200 °C en un ambiente a 15 °C, cuánto sería éste.
  - Comparar la potencia eléctrica neta anunciada, con los resultados de c) y d).
- 3.19. Considérese una planta de potencia nuclear de 950 MW en la que el núcleo del reactor se mantiene a 320 °C. Se pide:
- Valores mínimos de la potencia térmica que debe generar el núcleo del reactor, y de la potencia térmica que es preciso evacuar.
  - Considerar que con el calor del núcleo se calienta una corriente de agua a presión desde la temperatura ambiente hasta 5 °C por debajo de la del núcleo, y calcular el gasto másico necesario. Indicar la precisión esperada del modelo usado.
  - Trabajo máximo obtenible de la corriente de agua a la salida del núcleo.
  - Caudal de agua de refrigeración necesario para que éste no aumente más de 8 °C su temperatura.
- 3.20. Para la calefacción de un cierto edificio, se ha calculado que se necesita 1 MW de potencia térmica. La instalación va a ser de radiadores de agua caliente, y se quieren comparar diferentes alternativas para calentar el agua desde 15 °C hasta 95 °C. Se pide:
- Determinar el flujo de agua a calentar, e indicar por qué no conviene calentarla eléctricamente.

- b) Suponiendo que se va a usar una caldera de gas natural que aprovecha el 90 % del poder calorífico del combustible, determinar la energía del combustible necesario por unidad de tiempo, y el incremento de entropía del agua por unidad de tiempo al pasar por la caldera.
- c) Suponiendo que, en lugar de la caldera, se fuera a usar un motor térmico de gas natural con un rendimiento energético del 40%, determinar la potencia eléctrica que se generaría si se dimensionara el motor para que el calor evacuado fuera igual a la demanda de calefacción del edificio.
- d) Supóngase ahora que el agua se calentara con una bomba de calor de rendimiento 50% del máximo de Carnot, movida por un motor térmico de 40% de rendimiento; calcular la relación de consumos de combustible respecto a la caldera.
- e) Supóngase por último que en la configuración del apartado anterior, se aprovecha también el calor evacuado del motor para calentar el agua, y calcúlese la relación de consumos de combustible respecto a la caldera.
- 3.21. En una publicación se dice que una máquina de refrigeración por absorción, MA, alcanza una eficiencia energética  $\eta = Q_C/Q_H = 40\%$  en la producción de frío a  $T_C = 9\text{ }^\circ\text{C}$  a partir de calor a  $T_H = 55\text{ }^\circ\text{C}$ , en un ambiente a  $T_0 = 28\text{ }^\circ\text{C}$ . Se pide:
- Esquema de bloques de las fuentes térmicas y los flujos de energía intercambiados con la máquina de refrigeración.
  - Balance de energía del conjunto.
  - Balance de entropía del conjunto.
  - Balance de exergía del conjunto.
  - Determinar si los datos son incompatibles.
  - Calcular la eficiencia energética máxima para esas temperaturas.
- 3.22. En un motor diésel de 410 kW y rendimiento energético 0,4, se quiere aprovechar el calor residual, que se supondrá a  $120\text{ }^\circ\text{C}$ , para generar agua caliente a  $97\text{ }^\circ\text{C}$  y agua fría a  $7\text{ }^\circ\text{C}$ , todo ello a partir de agua ambiente a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Se pide:
- Flujo máximo de agua caliente producible, usando cambiadores de calor.
  - Flujo máximo de agua fría producible, usando una máquina de absorción movida por el calor residual, con salto mínimo en los cambiadores de  $5\text{ }^\circ\text{C}$ .
  - Flujo máximo de agua caliente producible si, además de recuperar el calor residual, se usa la potencia mecánica para mover una bomba de calor con salto mínimo en los cambiadores de  $5\text{ }^\circ\text{C}$ .
  - Flujo máximo de agua fría producible si, además de recuperar el calor residual, se usa la potencia mecánica para mover un refrigerador con salto mínimo en los cambiadores de  $5\text{ }^\circ\text{C}$ .
- 3.23. Considérese un cilindro horizontal de 15 cm de diámetro y 75 cm de longitud, cerrado por ambos extremos, con un émbolo cilíndrico de 2 kg de acero, cuyo centro está inicialmente a  $\frac{1}{4}$  de la longitud del cilindro, separando dos masas de aire. La presión y la temperatura iniciales del conjunto son las del ambiente, que está a  $20\text{ }^\circ\text{C}$  y 94 kPa. En una primera etapa se fuerza el desplazamiento del émbolo, lentamente, hasta la posición central del cilindro, y a partir de ahí se suelta. Se pide:
- Estimar el efecto del espesor del émbolo y calcular el trabajo necesario para desplazar el émbolo.
  - Flujos de energía en el proceso anterior, para cada masa de aire.
  - Estado de equilibrio mecánico tras la suelta (antes del atemperamiento).
  - Flujos de energía en el proceso anterior, para cada masa de aire.

e) Calor intercambiado con el ambiente y generación de entropía en el proceso global.

3.24. ¿Qué cuesta más trabajo, comprimir aire ambiente en un sistema cilindro-émbolo hasta doblar la presión adiabáticamente o isotérmicamente? Hacer aplicación numérica para  $1 \text{ m}^3$  de aire a  $100 \text{ kPa}$  y  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .