

## Práctico 6: Balance de entropía en sistemas abiertos

### Parte 1: procesos en régimen permanente

#### Ejercicio 1.

Agua bifásica ingresa a un condensador a 15 kPa con una calidad del 90 %, emergiendo en estado de líquido saturado. El condensador libera calor a una fuente que se encuentra a 17 °C. Calcule el calor liberado y la entropía generada, ambos por kg de agua circulante.

#### Ejercicio 2.

El intercambiador de calor a contracorriente mostrado en el panel izquierdo de la Fig. (1) es empleado para enfriar un flujo de  $0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  de aire a 540 K y 400 kPa hasta una temperatura de 360 K. El enfriamiento se produce cediendo calor a un suministro de  $0,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  de agua a 20 °C y 200 kPa.

- Calcule la temperatura de salida del agua.
- Obtenga la tasa de generación de entropía asociada a este proceso.

#### Ejercicio 3.

Se requiere producir un flujo de  $5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  de amoníaco a 500 kPa y 20 °C a partir de dos suministros, uno de líquido saturado a 20 °C, y otro de vapor a 500 kPa y 140 °C.

- Calcule los flujos másicos requeridos de cada suministro que deben ingresar a la cámara de mezcla para producir la salida deseada.
- Halle la tasa de generación de entropía debido a este proceso.
- Indique qué fracción de la entropía generada se produce en las válvulas de entrada y cuánto debido al proceso de mezcla. ¿Por qué son necesarias las válvulas?

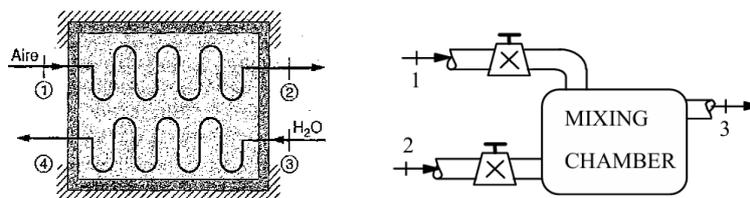


Figura 1: Ejercicios 2 y 3

**Ejercicio 4.**

Un turbocargador tiene por función incrementar rápidamente la presión del aire a la entrada de un motor de automóvil. Para ello, emplea los gases de escape del motor para accionar una turbina que, a través de un eje coaxial, alimenta el compresor que toma aire del exterior. Para cierta carga del motor, las condiciones de operación son las mostradas en la Fig. (2). Se sabe que la turbina y el compresor tienen eficiencias isentrópicas del 85 % y 80 %, respectivamente. Calcule:

- (a) la temperatura de salida de la turbina y la potencia que produce;
- (b) la presión y la temperatura a la salida del compresor;
- (c) la tasa de producción de entropía en los dispositivos anteriores. ¿Qué información adicional se requeriría para poder evaluar la generación de entropía en el motor? ¿Identifica algún otro proceso irreversible que no se esté cuantificando en el análisis anterior?

**Nota:** asuma que los calores específicos de los gases de desecho no difieren mucho de los del aire puro.

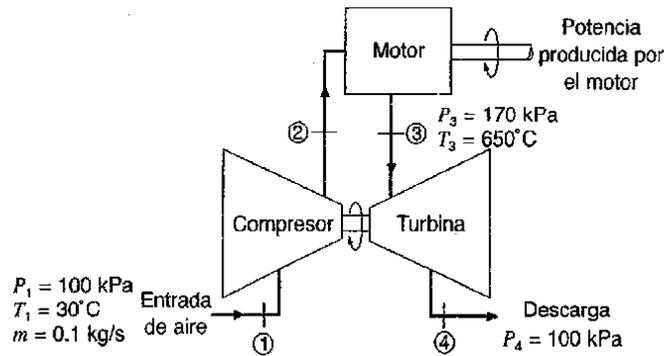


Figura 2: Ejercicio 4.

**Ejercicio 5.**

Una planta de generación que opera en régimen permanente intercambia calor a tasas  $\dot{Q}_H^{planta}$  y  $\dot{Q}_L^{planta}$  con sendas fuentes térmicas a temperaturas  $T_H$  y  $T_L < T_H$  (los signos de las tasas anteriores son los atribuidos desde la perspectiva de la planta).

- (a) Obtenga una expresión para la tasa global de generación de entropía. Hágalo por dos caminos:
  - (i) sumando las tasas de cambio de entropía del ciclo y de las fuentes;
  - (ii) sumando las correspondientes tasas de generación de entropía. Indique los signos del resultado y de cada término de la expresión obtenida.
- (b) Exprese la eficiencia de la planta en términos de las temperaturas de las fuentes, el calor de entrada y la tasa de generación de entropía. Verifique que cuando la generación de entropía es nula, el ciclo opera con la eficiencia de Carnot.

- (c) Calcule la máxima potencia que podría producirse operando entre esas fuentes y extrayendo el mismo calor. Expresé el resultado de dos formas:
- (i) en términos de del calor extraído y de las temperaturas de las fuentes;
  - (ii) en términos del trabajo real producido y de la tasa de generación de entropía. ¿Cuánto vale el trabajo perdido debido a las irreversibilidades del ciclo?

**Ejercicio 6.**

Considere el refrigerador comercial de la Fig. (3), el cual opera con R-134a como fluido de trabajo. El flujo másico de agua es 0,25 kg/s, y el compresor absorbe 45 W de calor del ambiente. Asuma que la cámara refrigerada se encuentra a la mínima temperatura compatible con los datos del problema.

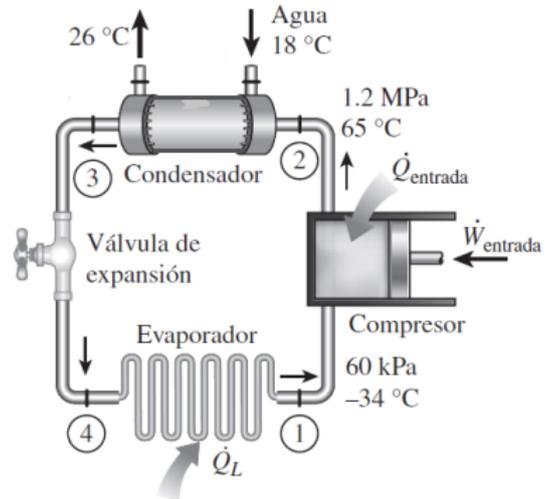


Figura 3: Ejercicio 6

- (a) Calcule la tasa de cambio de entropía del ciclo, la cámara refrigerada, y el ambiente compuesto por el agua de enfriamiento y el aire circundante (asuma que no existen irreversibilidades en esa región).
- (b) Calcule la entropía generada global e indique cómo se relaciona con los resultados anteriores.
- (c) ¿Qué fracción de la entropía generada total se produce en el compresor? (incluya la irreversibilidad por transferencia de calor).

**Nota:** Utilice las tablas del libro de Cengel y Bowles disponibles en la página del curso.

**Ejercicio 7.**

Una planta industrial que opera en régimen permanente utiliza calor de una fuente térmica que disminuye su entropía a razón de 200 kW/K. La planta posee un sistema de enfriamiento que emplea agua procedente de un lago cercano, la cual es devuelta al mismo lago a una temperatura mayor. Se sabe que **la tasa de generación** de entropía en la planta es 110 kW/K, y se estima que otras pérdidas de calor al ambiente incrementan la entropía del aire circundante a razón de 60 kW/K.

- (a) ¿Cuál sería la mínima tasa de cambio de entropía en el lago si este no intercambiara calor con el ambiente?
- (b) Bajo las hipótesis de la parte anterior, explique por qué la entropía del lago debería incrementarse a una tasa mayor que el valor mínimo hallado.
- (c) Si la tasa de generación de entropía en el lago es de  $50 \frac{kW}{K}$  y su entropía se mantiene constante debido al intercambio de calor con el ambiente, calcule la nueva tasa de incremento de entropía del aire en los alrededores del sistema.

**Nota:** Si en la parte (a) obtuvo el resultado  $dS^{lago}/dt \geq 30 \text{ kW/K}$ , **debe repasar concienzudamente el teórico**. Si obtuvo el resultado  $dS^{lago}/dt \geq 140 \text{ kW/K}$  está bien encaminado, pero su análisis es incompleto.

*Parte 2: problemas en régimen transitorio***Ejercicio 8.**

Considere un recipiente cilíndrico vertical, inicialmente vacío, cerrado en su cara superior por un pistón móvil que requiere una presión de 600 kPa para ser elevado. El cilindro es conectado a una línea de suministro de agua a 800 kPa y 400 °C a través de una válvula. Se abre la válvula lentamente y se observa que el pistón sube de forma cuasiestática. Suponga que durante el proceso el sistema permanece en equilibrio térmico con una reserva a 200 °C. Cuando el volumen del cilindro es de 17,6 m<sup>3</sup>, se cierra la válvula.

- (a) Calcule el calor intercambiado con la reserva.
- (b) Calcule las variaciones de entropía del cilindro (válvula incluida), la línea de suministro y la reserva térmica. A partir de los resultados anteriores, obtenga la entropía generada total.
- (c) (i) Identifique todas las irreversibilidades que ocurren en el proceso.  
(ii) ¿Cuál es el volumen de control minimal que incluye todas las irreversibilidades?  
(iii) Aplicando el segundo principio al VC anterior, halle la entropía generada en su interior. ¿Cómo se vincula ese resultado con los obtenidos en la parte (b)?

**Nota:** recuerde que las líneas de suministro se consideran internamente reversibles.

**Ejercicio 9.**

Un tanque rígido de paredes diatermas contiene  $M$  kg de aire a temperatura ambiente  $T_0$  y a una presión inicial igual al doble de la presión atmosférica,  $P = 2P_0$ . Se abre una válvula muy lentamente hasta que la presión en el interior del tanque iguala a la presión atmosférica, instante en el que se cierra la válvula.

- (a) Calcule el calor intercambiado con el ambiente durante el proceso.
- (b) Aplicando el segundo principio, calcule la entropía producida dentro del volumen de control que abarca exclusivamente al tanque y la válvula, indicando dónde se genera.
- (c) ¿Se produce entropía fuera del VC considerado? Justifique.

**Ejercicio 10.**

Considere un tanque metálico térmicamente aislado, de volumen 3 m<sup>3</sup>, conteniendo agua a  $T_1 = 300$  °C y  $P_1 = 1$  MPa. Se abre una válvula de forma que vapor de agua abandona el tanque lentamente hasta que la presión alcanza los 200 kPa, instante en el que se cierra la válvula.

- (a) Suponiendo que el proceso tiene lugar sin transferencia de calor entre el tanque y el agua:

- (i) a partir de la segunda ley como ecuación de rapidez, demuestre que el proceso que sufre el agua en el tanque es isentrópico.
- (ii) determine la masa de agua que sale del tanque.
- (b) Considere ahora que durante el proceso existe una transferencia de calor reversible entre el tanque y el agua. La masa del tanque es  $M = 635 \text{ kg}$  y su calor específico es  $c = 0,45 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ .

- (i) A partir de la segunda ley como ecuación de rapidez, muestre que las propiedades del agua en el tanque satisfacen la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{ds}{dT} = -\frac{Mc\nu}{VT}$$

- (ii) La ecuación anterior es exacta pero su integración solo puede efectuarse numéricamente conociendo los valores de  $\nu(s, T)$ . Para encontrar una solución aproximada, utilice la hipótesis de estado uniforme y, estimando la entropía de salida como el promedio entre las entropías inicial y final, obtenga una ecuación que vincule la temperatura, la entropía y el volumen específico del estado final.
- (iii) Con ayuda de las tablas, estime la temperatura final y la masa de agua que abandonó el tanque.

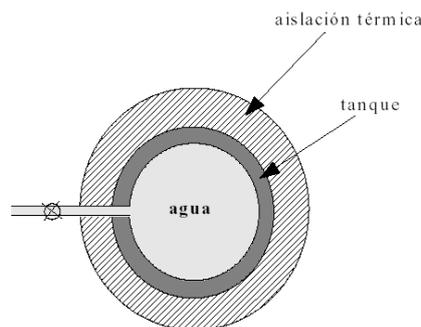


Figura 4: Ejercicio 10

### Parte 3: problemas avanzados

#### Ejercicio 11.

Un dispositivo adiabático que opera en régimen permanente consume una potencia  $P < 0$  para extraer cierto flujo másico de agua de un lago en el estado  $(h_1, s_1)$  y, luego de realizar cierto proceso, devolverla al lago en el estado  $(h_2, s_2)$ . Suponga que durante el tiempo de operación del dispositivo las propiedades termodinámicas del agua del lago se mantienen invariantes debido al intercambio de calor entre el lago y el ambiente a temperatura  $T_0$ .

- a) Halle las tasas de cambio de entropía y de generación de entropía para el dispositivo, el lago, el ambiente y el universo.
- b) ¿Cuál es la máxima temperatura  $T_0$  a la que puede encontrarse el ambiente para que el proceso descrito sea posible?

**Nota:** Expresar todos los resultados en función de  $P, h_1, s_1, h_2, s_2$  y  $T_0$ . Explícite el signo de los resultados intermedios y finales.

**Ejercicio 12.**

La planta de energía bosquejada en la figura produce una potencia neta de 100 MW utilizando agua como fluido de trabajo. El vapor de agua ingresa a la turbina de alta presión a 800 °C y 10 MPa, para posteriormente dirigirse al calentador 500 °C y 2 MPa. El vapor entra a la turbina de baja presión a 700 °C y es entregado al condensador como vapor saturado a 10 kPa. El agua de enfriamiento ingresa al intercambiador de calor a presión atmosférica y a una temperatura 5 °C, emergiendo del mismo a 40 °C. Se sabe que la fuente de calor se mantiene a una temperatura constante de 1200 K, y que la bomba es adiabática e internamente reversible.

- (a) Bosqueje el diagrama P–v del ciclo
- (b) Calcule el flujo másico que circula en el ciclo, el flujo másico de agua de enfriamiento y la eficiencia térmica del ciclo.
- (c) Determine la eficiencia isentrópica de la turbina de alta presión.
- (d) Calcule la tasa global de generación de entropía debido a la operación de este ciclo. Hágalo por dos caminos:
  - i) recordando que las tasas de generación y de variación de entropía del universo son iguales, y calculando esta última por medio de una partición conveniente del universo;
  - ii) aplicando el segundo principio a un único volumen de control que incluya todas las irreversibilidades;
- (e) Calcule qué fracción de la entropía generada total se produce en cada irreversibilidad y verifique que la suma de todas las entropías generadas coincide con el resultado de la parte anterior.
- (f) ¿Qué trabajo adicional podría haberse generado eliminando todas las irreversibilidades? Calcúlelo por dos caminos independientes.
- (g) Bosqueje el diagrama T-s del ciclo.

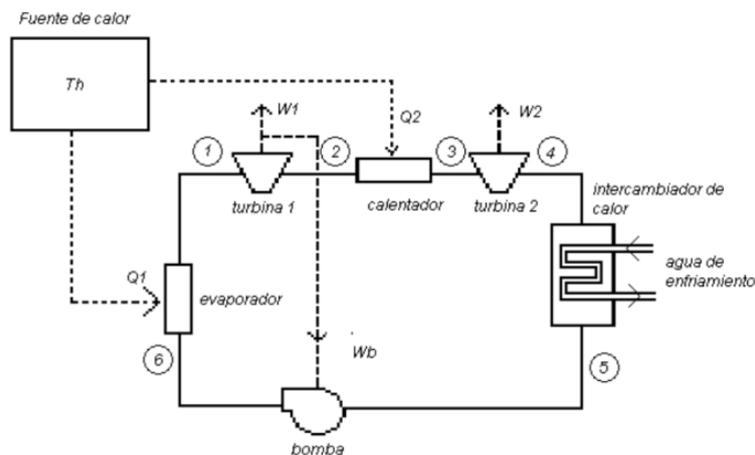


Figura 5: Ejercicio 12

**Ejercicio 13.**

Considere la planta de energía de la figura, que opera en un ciclo combinado de aire - vapor. El compresor toma aire en condiciones atmosféricas, trabaja en una relación de presiones  $r = 15$  y posee una eficiencia isentrópica del 90%. Luego de recibir calor desde una fuente a  $1200^\circ\text{C}$ , el aire ingresa a la turbina  $A$  a  $1000^\circ\text{C}$ , emergiendo de la misma a  $380^\circ\text{C}$ . Para aprovechar la alta disponibilidad a la salida de la turbina, se coloca un intercambiador a través del cual el aire entrega calor a un flujo de agua antes de ser expulsado al ambiente a una temperatura de  $120^\circ\text{C}$ , a razón de  $8\text{ kg/s}$ . El vapor producido ingresa a la turbina  $B$  a  $1200\text{ kPa}$  y  $300^\circ\text{C}$ , y es entregado al condensador con una calidad del 90%. El condensador intercambia calor con el ambiente a  $20^\circ\text{C}$  y su salida es líquido saturado a  $40^\circ\text{C}$ . Puede despreciar la potencia consumida por la bomba.

- (a) Calcule la eficiencia térmica de la planta.
- (b) Calcule la tasa global de generación de entropía, despreciando la irreversibilidad por mezcla en el ambiente. Hágalo por dos caminos:
  - i) realizando una partición adecuada del universo y sumando las correspondientes tasas de cambio de entropía;
  - ii) aplicando el segundo principio a un único volumen de control que incluya todas las irreversibilidades.
- (c) Estime la tasa de generación de entropía en el entorno debido a la mezcla de sustancias en distinto estado termodinámico. Para ello, asuma que el aire expulsado intercambia calor a presión constante con el aire exterior en condiciones atmosféricas, hasta alcanzar el equilibrio térmico. ¿Era razonable despreciar esta entropía generada?

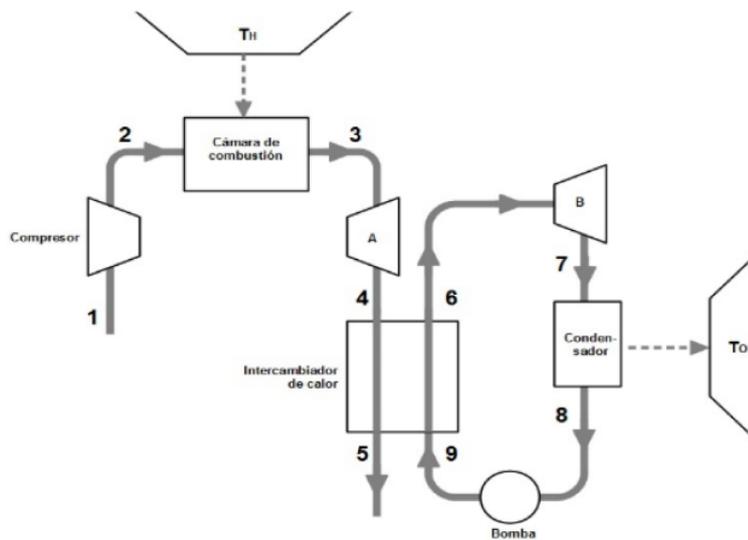


Figura 6: Ejercicio 13

**Ejercicio 14.**

Un depósito rígido esta subdividido en dos recintos ( $A$  y  $B$ ) separados a través de un pistón adiabático que puede moverse libremente sin fricción, como se muestra en la figura. El recinto  $A$  contiene agua, está aislado térmicamente, y se encuentra conectado a una línea de suministro de agua a  $500\text{ kPa}$  y  $200^\circ\text{C}$ . El recinto  $B$  contiene aire y solo intercambia calor con una reserva térmica a temperatura  $T_R = 400^\circ\text{C}$  a través de una pared diaterma. Inicialmente la válvula esta cerrada, el agua está a una presión de  $200\text{ kPa}$  con una calidad del  $60\%$ , y el sistema se encuentra en equilibrio tanto térmico como mecánico, ocupando cada sustancia un volumen de  $0,1\text{ m}^3$ . Se abre la valvula permitiendo que el agua ingrese muy lentamente hasta que la presión en  $A$  iguala a la presión de la línea, momento en que se cierra la válvula.

- Calcule el trabajo realizado por el aire.
- Muestre que el estado final en  $A$  es de mezcla bifásica.
- Identifique todas las irreversibilidades del proceso e indique dónde ocurren.
  - Calcule la entropía generada en cada uno de los volúmenes de control señalados en la figura, y la entropía generada total.
  - Verifique el resultado anterior por un camino alternativo.

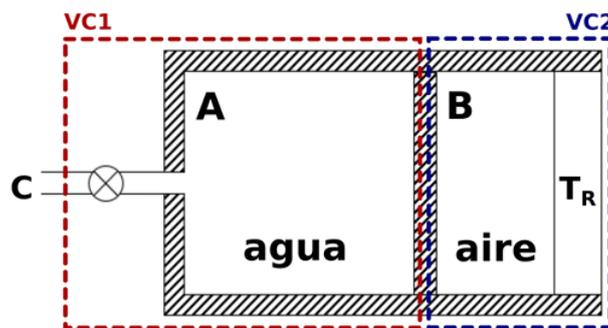


Figura 7: Ejercicio 14