

## Práctico 3: Primera ley para sistemas abiertos

### Parte 1: procesos en régimen permanente

#### Ejercicio 1.

En un sistema de irrigación se utiliza una bomba que toma agua de un río a  $10^\circ\text{C}$  y  $100\text{ kPa}$ , a razón de  $5\text{ kg/s}$ . El agua es vertida en un canal abierto que se encuentra elevado  $20\text{ m}$  por encima del río. Si la temperatura del agua esencialmente no cambia, determine la potencia consumida por la bomba.

#### Ejercicio 2.

El objetivo de una tobera es producir una corriente de fluido de alta velocidad a expensas de un cambio de entalpía. A una tobera aislada (ver panel izquierdo de la Fig. (1)) ingresa vapor sobrecalentado de amoníaco a  $20^\circ\text{C}$  y  $800\text{ kPa}$ , con baja velocidad y a una tasa constante de  $0,01\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ . El amoníaco emerge a  $300\text{ kPa}$  con una velocidad de  $450\frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Determine el estado de salida, especificando la temperatura (o, si corresponde, la calidad), y el área de salida de la tobera.

#### Ejercicio 3.

Un condensador es un tipo especial de intercambiador de calor que tiene como objetivo llevar un flujo de agua desde estado gaseoso a estado líquido. Se desea condensar un flujo de  $1\frac{\text{kg}}{\text{s}}$  de agua a  $10\text{ kPa}$  y  $300^\circ\text{C}$  hasta líquido saturado a la misma presión. El enfriamiento se produce intercambiando calor con agua extraída de un lago a  $20^\circ\text{C}$  (ver panel derecho de la Fig. (1)). Si el agua se devuelve al lago a  $30^\circ\text{C}$ , determine el caudal de agua de enfriamiento.

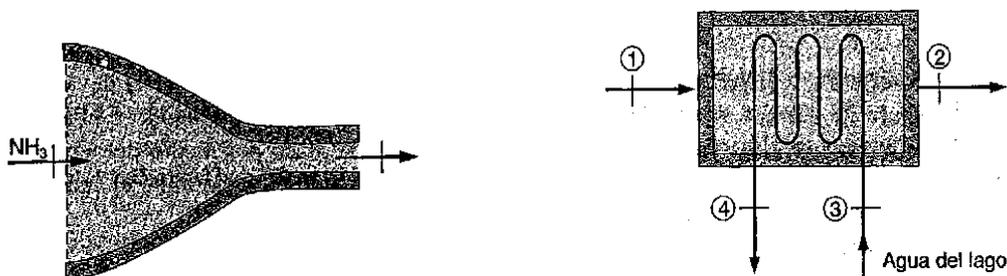


Figura 1: Ejercicios 2 y 3.

**Ejercicio 4.**

Se desea producir un flujo de agua a  $42^\circ\text{C}$  a partir de agua caliente a  $80^\circ\text{C}$  y  $250\text{ kPa}$ , que ingresa a una cámara de mezcla a razón de  $0,5\text{ kg/s}$ , y otro flujo de agua fría a  $20^\circ\text{C}$ . Calcule las características del flujo de agua fría requerido.

**Ejercicio 5.**

Se propone utilizar un suministro geotérmico de agua caliente para alimentar una turbina de vapor, como se muestra en la Fig. (2). El agua a una presión elevada de  $1,5\text{ MPa}$  y  $180^\circ\text{C}$  pasa por una reducción hacia la cámara de un evaporador instantáneo, que forma líquido y vapor a una presión inferior de  $400\text{ kPa}$ . El líquido se desecha mientras que el vapor saturado alimenta a la turbina y emerge a  $10\text{ kPa}$ , con un  $90\%$  de calidad. Si la turbina debe producir  $1\text{ MW}$ , calcule el flujo másico requerido de agua geotérmica caliente, en kilogramos por hora.

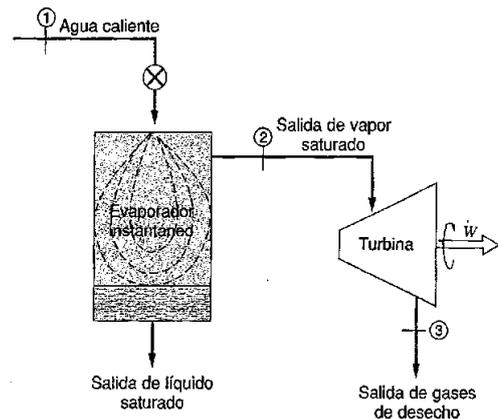


Figura 2: Ej. 5

**Parte 2: procesos de estado y flujo uniforme**

**Ejercicio 6.**

Un recipiente rígido y térmicamente aislado de volumen  $100\text{ L}$  contiene amoníaco bifásico a  $30^\circ\text{C}$ , ocupando la fase líquida el  $10\%$  del volumen total. Se entrega energía al amoníaco por medio de una resistencia eléctrica, y en simultáneo se abre una válvula ubicada en la parte superior del recipiente a efectos de que la presión permanezca constante. Calcule la energía suministrada por la resistencia hasta el instante en que solo queda vapor saturado dentro del recipiente.

**Nota:** la resistencia suele considerarse como parte del sistema, en cuyo caso la energía suministrada al sistema total (amoníaco + resistencia) se modela como trabajo eléctrico.

**Ejercicio 7.** Considere un tanque rígido de volumen  $10\text{ m}^3$ , aislado e inicialmente vacío, que se encuentra conectado mediante una válvula a una línea de suministro que transporta vapor de agua a  $1\text{ MPa}$  y  $300^\circ\text{C}$ . Se abre la válvula e ingresa vapor al recipiente hasta que se alcanza el equilibrio mecánico con la línea, momento en que se cierra la válvula.

- a) Determine la temperatura final del vapor en el recipiente y la masa de agua que ingresó.
- b) Obtenga nuevamente la temperatura final si, en lugar de encontrarse inicialmente vacío, el tanque contenía vapor saturado de agua a  $200\text{ kPa}$ .

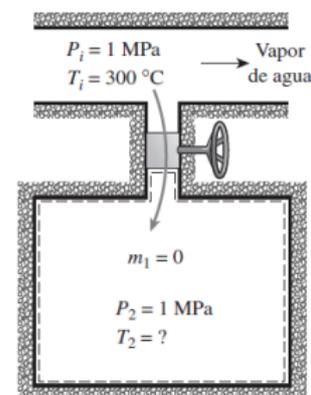


Figura 3: Ej. 7

**Ejercicio 8.**

Un globo de 0,5 m de diámetro contiene aire a 200 kPa y 300 K, se conecta mediante una válvula a una tubería por la que fluye aire a 400 kPa y 400 K. Se abre la válvula y se permite que el aire fluya al globo hasta que la presión en el interior llegue a 300 kPa, punto en el cual se cierra la válvula. La temperatura final dentro del globo es de 350 K. Considerando que la presión es directamente proporcional al diámetro del globo, calcular el trabajo y la transferencia de calor durante el proceso.

**Ejercicio 9.**

La Fig. (4) muestra una máquina de vapor sencilla basada en una turbina. El depósito de la caldera tiene un volumen de 100 L e inicialmente contiene agua saturada 100 kPa, ocupando la fase líquida el 10 % del volumen total. El quemador entrega calor y el regulador de presión solo se abre una vez alcanzados los 700 kPa, instante a partir del cual la presión se mantiene constante. La turbina descarga a la atmósfera vapor saturado a 100 kPa. El quemador se apaga y el regulador se cierra cuando ya no hay más líquido en la caldera.

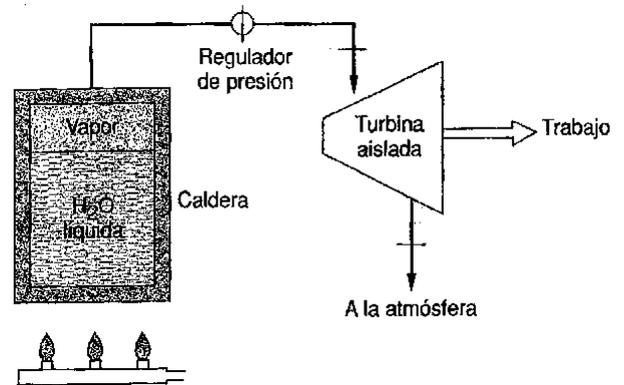


Figura 4: Ej. 9

- (a) Calcule el calor transferido hasta que se abre el regulador y el calor total entregado.
- (b) Halle el trabajo total realizado por la turbina.

**Ejercicio 10.**

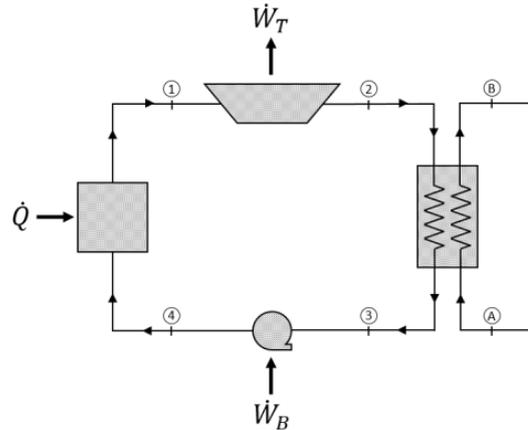
Considere un dispositivo cilindro-pistón sin fricción, aislado e inicialmente vacío, con el pistón en el fondo del recipiente. La masa del pistón es tal que se requiere una presión  $P$  para elevarlo.

- a) El sistema es conectado a través de una válvula a una línea de suministro de aire a temperatura  $T_L$  y presión  $P_L > P$ . Si se observa que el pistón sube lentamente, demuestre que la temperatura en el interior del tanque coincide en todo momento con la temperatura de la línea. ¿Qué ocurre con el estado termodinámico dentro del cilindro a medida que ingresa el aire?
- (b) La igualdad demostrada en la parte anterior es extremadamente excepcional. ¿Qué características del proceso son responsables por ese comportamiento? Muestre que, si alguna de ellas deja de cumplirse, la temperatura interior ya no será, en general, igual a la de la línea.
- c) Suponga que, en lugar de aire, la línea transporta agua a 500 kPa y 200 °C. Si la presión de elevación es 300 kPa y nuevamente se observa que el pistón sube lentamente, determine la temperatura dentro del cilindro (puede hacerlo por dos caminos) y discuta nuevamente qué ocurre con el estado termodinámico del agua a medida que ingresa masa al sistema.

**Parte 3: problemas avanzados**

**Ejercicio 11.**

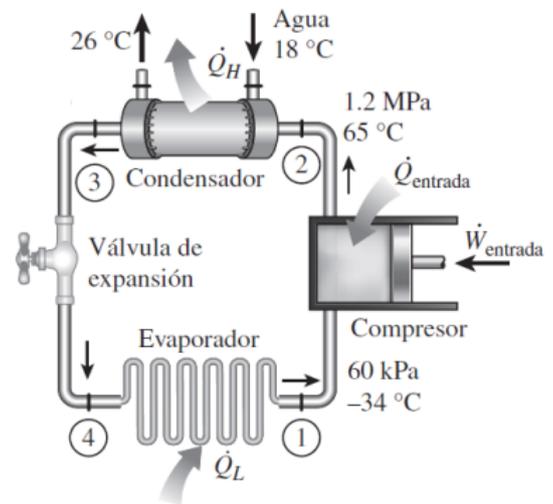
Considere la planta de potencia de la figura, que opera en un ciclo de Rankine que utiliza agua como fluido de trabajo. La bomba establece un flujo másico de 100 kg/s, elevando la presión de 75 kPa a 3 MPa. Luego de recibir calor en la caldera, el vapor ingresa a la turbina a una temperatura de 350 °C y emerge con una calidad del 88,6%. Se sabe que la salida del condensador (estado 3) es líquido saturado, y se puede asumir que la bomba es isotérmica.



- Calcule la potencia que produce la turbina.
- Calcule la tasa a la que se entrega calor en la caldera y la eficiencia térmica del ciclo.
- La condensación se produce intercambiando calor con agua extraída de un río a presión atmosférica y temperatura ambiente, que fluye en el intercambiador a un ritmo de 2 ton/s. Calcule a qué temperatura el agua de enfriamiento es devuelta al río.
- Si el río tiene un flujo másico total de 50 ton/s, estime cuánto se eleva la temperatura del río aguas abajo debido al funcionamiento de la planta.

**Ejercicio 12.**

Un refrigerador comercial que opera con R-134a como fluido de trabajo realiza su etapa de condensación cediendo calor a una corriente de 0,25 kg/s de agua, que incrementa su temperatura de 18 °C a 26 °C. El compresor eleva la presión del refrigerante de 60 kPa a 1,2 MPa, y se sabe que las temperaturas de entrada al condensador y al compresor son 65 °C y -34 °C, respectivamente. Se estima que el compresor absorbe 450 W de calor del ambiente.



- Calcule el flujo másico de refrigerante que circula por el ciclo.
- Determine el estado termodinámico en todos los puntos de operación del ciclo. ¿Cuál es la temperatura mínima a la que puede encontrarse la cámara refrigerada?
- Calcule la potencia consumida por el compresor y la tasa a la que se extrae calor de la cámara refrigerada. ¿Cómo evaluaría la eficiencia del ciclo?
- Represente el proceso seguido por el refrigerante en un diagrama  $P - h$ .

**Ejercicio 13.**

Se denomina *motores de reacción* a aquellos dispositivos que, como consecuencia de la ley de acción y reacción, producen un impulso a partir de la expulsión de un chorro de fluido a gran velocidad. El más antiguo de estos motores es el turboreactor (turbojet), que fuera diseñado en los años 30 con finalidades militares, y que jugara un rol protagónico en la carrera supersónica durante la Guerra Fría. En estos dispositivos la etapa de admisión de aire se realiza mediante un difusor, que reduce la velocidad del aire para cederlo al compresor. Luego de la compresión, el aire se calienta al mezclarse con los gases de la combustión, proceso que modelaremos como un intercambio de calor a presión constante. A continuación el aire se expande en la turbina, cuyo trabajo se emplea exclusivamente para activar el compresor, y finalmente es acelerado y expulsado a través de una tobera.

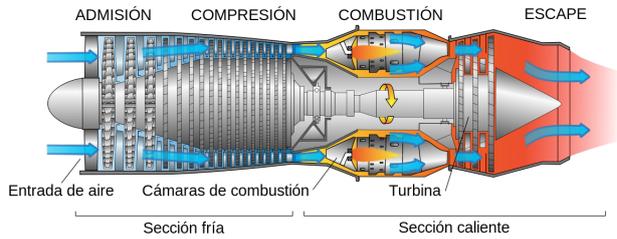


Figura 5: turboreactor

Considere uno de los turboreactores de un avión que viaja a 200 m/s respecto al aire en reposo, a una altura tal que la presión atmosférica es de 26 kPa. El aire ingresa a una temperatura de 220 K a razón de 18 kg/s. Se sabe que la relación de presiones en el compresor es 8, y que la temperatura a la entrada de la turbina es de 700 K. En una primera aproximación se puede asumir que los subprocesos adiabáticos involucrados satisfacen que  $Pv^\gamma = \text{cte}$ , con  $\gamma = C_P/C_v$  (más adelante discutiremos la validez de esta aproximación). Se asume también que, salvo a la entrada y a la salida del sistema, la energía cinética del aire es despreciable.

- a) Calcule la velocidad con la que es expulsado el aire.
- b) La fuerza neta producida por el turboreactor es  $\vec{F} = \dot{m}(\vec{v}_f - \vec{v}_i)$ . Ignorando la contribución al flujo másico debida a los gases de la combustión, indique qué fracción de la energía consumida efectivamente se emplea en propulsar el avión. Recuerde que la potencia asociada a la acción de una fuerza es  $P = \vec{F} \cdot \vec{v}$ .

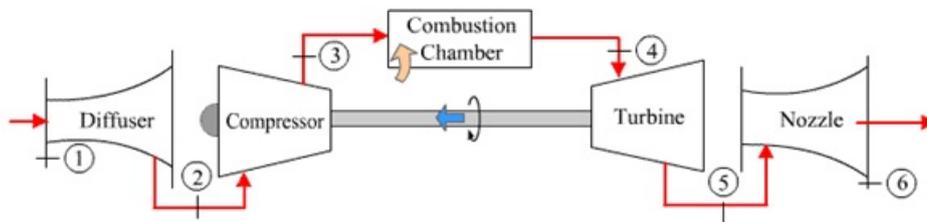


Figura 6: Ejercicio 13

**Ejercicio 14.**

Un tanque rígido contiene  $M$  kg de gas ideal a temperatura  $T$ . Se abre una válvula permitiendo que el gas escape lentamente hasta que la presión en el interior del tanque se reduce a la mitad de su valor inicial.

- a) Si durante el proceso el tanque se encuentra en contacto con una reserva térmica a temperatura  $T$ , demuestre que el sistema absorbe calor de la reserva en un monto

$$Q = \frac{M}{2}RT$$

- b) Si durante el proceso el tanque se encuentra aislado térmicamente del ambiente, estime la temperatura final del gas que permanece en el tanque. El resultado quedará expresado en términos de  $T_1$  y  $\gamma = C_P/C_v$ .

**Nota:** Observe que, a diferencia del caso anterior, el flujo de salida no es uniforme pues su entalpía varía en el tiempo. Para estimar la temperatura final, emplee la aproximación  $h_s = (h_1 + h_2)/2$ .

- c) Considere el vaciado adiabático de la parte anterior. A partir de la primera ley como ecuación de rapidez y de la ecuación de continuidad, demuestre que, para un gas ideal, la masa de gas en el tanque y la temperatura satisfacen la ecuación diferencial

$$\frac{\dot{T}}{T} = (\gamma - 1) \frac{\dot{m}}{m}.$$

Resuelva la ecuación anterior y muestre que cuando la presión se redujo a la mitad, la temperatura real del gas es

$$T_2 = 2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_1$$

- d) Calcule el error cometido al efectuar la aproximación de la parte c) si el tanque contenía inicialmente aire a  $350^\circ\text{C}$

**Ejercicio 15.**

Considere un cilindro rígido, de volumen 250 L, que se encuentra dividido en dos compartimentos A y B mediante un pistón adiabático libre de fricción. El recinto A contiene agua, está térmicamente aislado y se encuentra conectado a una línea de suministro de agua a 1 MPa y  $500^\circ\text{C}$  a través de una válvula que inicialmente se encuentra cerrada. El recinto B contiene aire y está en contacto con una reserva a  $T_R = 100^\circ\text{C}$  a través de una pared diaterma.

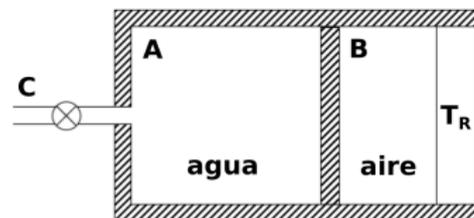


Figura 7: Ejercicio 15

Inicialmente la presión en el cilindro es de 300 kPa, el agua se encuentra en estado de vapor saturado ocupando un volumen de 150 L, y el aire se encuentra en equilibrio térmico con la reserva. Se abre la válvula de forma tal que el agua ingresa muy lentamente al recinto A. El proceso termina cuando la presión del sistema se iguala con la presión de la línea de suministro, momento en el que se cierra la válvula (estado 2).

- a) Calcule el volumen final del aire ( $V_{2B}$ ) y el trabajo realizado por dicha sustancia.
- b) Halle la temperatura final del agua ( $T_{2A}$ ).
- c) Calcule el calor intercambiado por el aire con la reserva térmica, indicando si el aire libera o recibe calor.

**Ejercicio 16.**

La planta industrial de la figura se alimenta de agua extraída de un lago en condiciones atmosféricas por medio de una bomba que eleva la presión a 1 MPa, estableciendo un flujo másico de 10 kg/s. La caldera produce vapor gracias a una entrada de calor de 31,77 MW provenientes de una fuente térmica. Parte del vapor producido se emplea para realizar un proceso a presión constante, que libera 4 MW de calor y no involucra trabajo, mientras que el resto del vapor alimenta una turbina de generación. Los flujos vuelven a unirse en una cámara de mezcla refrigerada, de modo de que la descarga al lago es líquido saturado a presión atmosférica (estado 9). Se sabe que el estado 7 es vapor saturado, y que la descarga de la turbina ocurre a 250 °C.

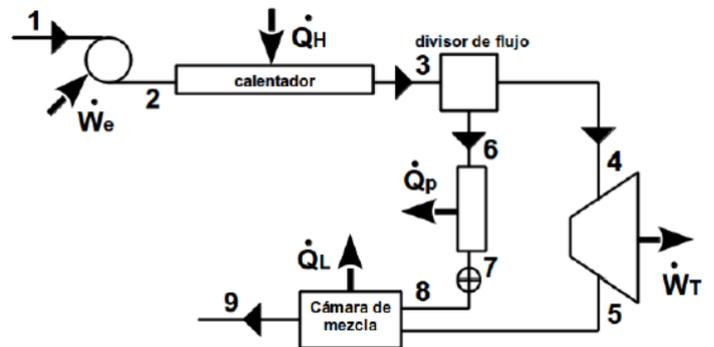


Figura 8: Ejercicio 16

- a) Calcule la potencia requerida por la bomba y la temperatura a la salida de la caldera.  
**Nota:** el trabajo consumido por unidad de masa circulante en una bomba adiabática puede estimarse como  $w_{bomba} = -\nu\Delta P$ , donde  $\nu$  es el volumen específico (que se asume constante). Más adelante justificaremos el origen de esta aproximación.
- b) Calcule la potencia producida por la turbina y el calor que se libera en la cámara de mezcla.
- c) Bosqueje los procesos  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 9$  y  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$  en un diagrama  $P - v$
- d) Determine la temperatura mínima posible de la reserva desde donde el sistema recibe calor, y la temperatura máxima del sumidero de calor asociado a la cámara de mezcla.