

## Física 3B 2019

### Guía 02: Primer Principio

Asorey

26 de Marzo de 2019

#### 22. Tres cilindros

Tres pistones cilindros idénticos contienen 1 mol de un gas ideal monoatómico, biatómico y triatómico respectivamente. Todos los gases se encuentran inicialmente en CNPT. Si al gas contenido en cada pistón se le entregan 13,2 kJ en forma de calor de manera que la presión se mantiene constante, calcule el volumen final de cada recipiente. ¿Qué tipo de gas usaría si tuviera que hacer un elevador utilizando estos pistones? Justifique en el marco de la teoría cinética de los gases los resultados obtenidos.

**R:**  $V_i = 0,0224 \text{ m}^3$ ;  $V_{f,\text{mono}} = 0,0745 \text{ m}^3$ ;  $V_{f,\text{bi}} = 0,0596 \text{ m}^3$ ;  $V_{f,\text{tri}} = 0,055 \text{ m}^3$ ;

#### 23. Diferencias

Tres pistones cilíndricos idénticos de radio  $r = 0,2 \text{ m}$  contienen cada uno 10 mol de un gas ideal monoatómico a  $T = 1000 \text{ K}$  y  $p = 20 \text{ atm}$ . El gas del primer pistón es sometido a una expansión isobárica, el del segundo a una expansión isotérmica y el del tercer cilindro a una expansión adiabática. En todos los casos el volumen final es el doble del volumen inicial. Calcule: a) Los volúmenes iniciales y finales en cada pistón. b) Calcule el trabajo realizado por el gas y la altura inicial y final de cada pistón. c) Cuando corresponda calcule para cada proceso: la cantidad de calor suministrada, las temperaturas iniciales y finales, y la variación en la energía interna del gas.

**R:** a) son iguales para todos,  $V_i = 0,04103 \text{ m}^3$  y  $V_f = 0,08206 \text{ m}^3$ ; b) las alturas son iguales para todos los pistones  $h_i = 0,327 \text{ m}$  y  $h_f = 0,653 \text{ m}$ . Los trabajos serán  $W_1 = 83,15 \text{ kJ}$ ;  $W_2 = 57,6 \text{ kJ}$ ; y  $W_3 = 46,1 \text{ kJ}$ ; c)  $\Delta U_1 = 124,7 \text{ kJ}$  y  $Q_1 = 208,85 \text{ kJ}$ ;  $\Delta U_2 = 0$  y  $Q_2 = 57,6 \text{ kJ}$ ;  $\Delta U_3 = -46,1 \text{ kJ}$  y  $Q_3 = 0$ ;

#### 24. Transformaciones

Un mol de un gas ideal a presión  $P_A$  ocupa un volumen  $V_A$ . Se lo calienta en una transformación isócara entregándole una cantidad de calor  $Q_1$  hasta que el sistema alcanza la presión  $P_B$ . Luego se vuelve a calentarlo, entregándole una cantidad de calor  $Q_2 = Q_1$ , pero mediante una transformación isobárica hasta alcanzar un volumen  $V_C$ .

- En un diagrama  $P-V$ , dibuje las transformaciones que el gas realiza, identificando las curvas isotermas asociadas a cada estado. ¿Es un ciclo? ¿Por qué?
- Obtenga una expresión del cociente entre los calores específicos  $C_p$  y  $C_v$  como función de las temperaturas de los estados.
- A partir del valor del cociente de los calores específicos para un gas ideal monoatómico,  $C_p/C_v = \gamma = 5/3$ , y sabiendo que inicialmente el gas se encontraba en CNPT y que la presión final es el doble de la presión inicial, calcule:

- El volumen inicial  $V_A$  y final  $V_C$

- 2) La presión final  $P_C$
- 3) Las temperaturas  $T_B$  y  $T_C$ .
- 4) La cantidad de calor total suministrada.

**R:** b)  $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{T_B - T_A}{T_C - T_B}$ ; c1)  $V_A = V_B = 0,0224 \text{ m}^3$ ,  $V_C = 0,0291 \text{ m}^3$ ; c2)  $P_C = P_B = 202650 \text{ Pa}$ ; c3)  $T_A = 273 \text{ K}$ ,  $T_B = 546 \text{ K}$ ,  $T_C = 709,8 \text{ K}$ ; c4)  $Q_1 = Q_2 = 3404,5 \text{ J}$ .

## 25. Caldera

En el recipiente de presión de una caldera hay una temperatura de  $230^\circ\text{C}$  y una presión constante de 30 bar. En cada ciclo de trabajo el vapor desplaza un pistón con una superficie de  $0,2 \text{ m}^2$  una distancia de 0,4 m. a) ¿Cuánto vale el trabajo entregado en cada ciclo? b) ¿Cuál es la potencia entregada por la máquina de vapor cuando se desarrollan 600 ciclos de trabajo por minuto?

**R:** a)  $W = 240 \text{ kJ}$ ; b) La potencia erogada es  $P = 2,4 \text{ MW}$ .

## 26. Un ciclo para no perder la costumbre

Una máquina térmica utiliza como fluido un gas ideal monoatómico, y funciona con dos fuentes a temperaturas  $T_A = 297 \text{ K}$  y  $T_B = 990 \text{ K}$ . El ciclo consiste en un calentamiento isocórico, seguido por una expansión isotérmica, para terminar con una compresión isobárica. El volumen inicial es  $V_A = 0,1 \text{ m}^3$  a una presión de  $P_A = 101325 \text{ Pa}$ .

- a) Dibuje el ciclo en un diagrama P-V.
- b) Completar el cuadro de estados
- c) Completar el cuadro de transformaciones
- d) Hallar el rendimiento  $\eta$  del ciclo, y compararlo con el rendimiento del ciclo de Carnot funcionando entre esas mismas temperaturas.
- e) Si el motor opera a un régimen de 3000 ciclos por segundo, calcule la potencia del motor y la cantidad de calor entregada por segundo a la fuente fría.

**R:** b)  $P_A = 101325 \text{ Pa}$ ,  $V_A = 0,1 \text{ m}^3$ ,  $n_A = 4,1035 \text{ mol}$ ,  $T_A = 297 \text{ K}$ ;  $P_B = 337750 \text{ Pa}$ ,  $V_B = 0,1 \text{ m}^3$ ,  $n_B = 4,1035 \text{ mol}$ ,  $T_B = 990 \text{ K}$ ;  $P_C = 101325 \text{ Pa}$ ,  $V_C = 0,33 \text{ m}^3$ ,  $n_C = 4,1035 \text{ mol}$ ,  $T_C = 990 \text{ K}$ ; c)  $Q_1 = 35463,8 \text{ J}$ ,  $\Delta U_1 = 35463,8 \text{ J}$ ,  $W_1 = 0$ ;  $Q_2 = 40664,2 \text{ J}$ ,  $\Delta U_2 = 0 \text{ J}$ ,  $W_2 = 40664,2 \text{ J}$ ;  $Q_3 = -59106,3 \text{ J}$ ,  $\Delta U_3 = -35463,8 \text{ J}$ ,  $W_3 = -23642,5 \text{ J}$ ; d)  $\eta = 17021,7/76127,9 = 0,2236 = 22,36\%$ ;  $\eta_{\text{Carnot}} = 0,7 = 70\%$ ; e) Potencia  $P = 51,06 \text{ MW}$ ,  $Q_{\text{fría}} = Q_3 = -177,32 \text{ MJ}$  cada segundo.

## 27. El cuadrado

Una máquina térmica está equipada con  $n = 1000$  moles de un gas ideal di-atómico, inicialmente en CNPT, que opera con el siguiente ciclo: 1) calentamiento isocórico hasta quintuplicar la temperatura inicial; 2) expansión isobárica hasta quintuplicar el volumen inicial; 3) enfriamiento isocórico; 4) compresión isobárica.

- a) Complete el cuadro de estados, encontrando los valores de  $P$ ,  $V$ ,  $T$  y  $n$  para cada uno de los estados A, B, C y D.
- b) En el diagrama  $P-V$  ubique los estados y dibuje las transformaciones experimentadas por el gas.
- c) Complete el cuadro de transformaciones, encontrando los cambios de energía interna, calor y trabajo en cada transformación.
- d) Calcule el rendimiento de la máquina y compárelo con el rendimiento del ciclo de Carnot equivalente (aquel que funciona con las mismas fuentes térmicas).

**R:** a)  $P_A = 101325 \text{ Pa}$ ,  $V_A = 22,4 \text{ m}^3$ ,  $n_A = 1000 \text{ mol}$ ,  $T_A = 273 \text{ K}$ ;  $P_B = 506634,4 \text{ Pa}$ ,  $V_B = 22,4 \text{ m}^3$ ,  $n_B = 1000 \text{ mol}$ ,  $T_B = 1365 \text{ K}$ ;  $P_C = 506634,4 \text{ Pa}$ ,  $V_C = 112 \text{ m}^3$ ,  $n_C = 1000 \text{ mol}$ ,  $T_C = 6825 \text{ K}$ ;  $P_D = 101325 \text{ Pa}$ ,  $V_D = 112 \text{ m}^3$ ,  $n_D = 1000 \text{ mol}$ ,  $T_D = 1365 \text{ K}$ ; c)  $Q_1 = 22,7 \text{ MJ}$ ,  $\Delta U_1 = 22,7 \text{ MJ}$ ,  $W_1 = 0$ ;  $Q_2 = 158,9 \text{ MJ}$ ,  $\Delta U_2 = 113,5 \text{ MJ}$ ,  $W_2 = 45,4 \text{ MJ}$ ;  $Q_3 = -113,5 \text{ MJ}$ ,  $\Delta U_3 = -113,5 \text{ MJ}$ ,  $W_3 = 0$ ;  $Q_4 = -31,8 \text{ MJ}$ ,  $\Delta U_4 = -22,7 \text{ MJ}$ ,  $W_4 = -9,1 \text{ MJ}$ ; d)  $\eta = 36,3/181,6 = 0,2 = 20\%$ ;  $\eta_{\text{Carnot}} = 0,96 = 96\%$ ;

## 28. Carnot

Una máquina térmica funciona con  $n = 0,2 \text{ mol}$  de un gas ideal biatómico siguiendo un ciclo de Carnot entre las temperaturas  $T_{\text{caliente}} = 500 \text{ K}$  y  $T_{\text{fría}} = 300 \text{ K}$ . La presión del estado inicial es  $P_A = 10^6 \text{ Pa}$  y luego de la primera expansión isotérmica el volumen se duplica, es decir,  $V_B = 2V_A$ .

- Complete el cuadro de estados, encontrando los valores de  $P$ ,  $V$ ,  $T$  y  $n$  para cada uno de los estados  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$ .
- En el diagrama  $P - V$  ubique los estados y dibuje, en escala, las transformaciones experimentadas por el gas.
- Complete el cuadro de transformaciones, encontrando los cambios de energía interna, calor y trabajo en cada transformación.
- Calcule la eficiencia de la máquina a partir de la definición  $\eta = W_{\text{neto}}/Q_{>0}$  y compárelo con el obtenido utilizando la fórmula del rendimiento de la máquina de Carnot.

**R:** a)  $P_A = 10^6 \text{ Pa}$ ,  $V_A = 8,31 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ,  $n_A = 0,2 \text{ mol}$ ,  $T_A = 500 \text{ K}$ ;  $P_B = 5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_B = 16,63 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ,  $n_B = 0,2 \text{ mol}$ ,  $T_B = 500 \text{ K}$ ;  $P_C = 83656,4 \text{ Pa}$ ,  $V_C = 59,63 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ,  $n_C = 0,2 \text{ mol}$ ,  $T_C = 300 \text{ K}$ ;  $P_D = 167312,9 \text{ Pa}$ ,  $V_D = 29,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ,  $n_D = 0,2 \text{ mol}$ ,  $T_D = 300 \text{ K}$ ; c)  $Q_1 = 576,3 \text{ J}$ ,  $\Delta U_1 = 0$ ,  $W_1 = 576,3 \text{ J}$ ;  $Q_2 = 0$ ,  $\Delta U_2 = -831,4 \text{ J}$ ,  $W_2 = 831,4 \text{ J}$ ;  $Q_3 = -345,8 \text{ J}$ ,  $\Delta U_3 = 0$ ,  $W_3 = -345,8 \text{ J}$ ;  $Q_4 = 0$ ,  $\Delta U_4 = 831,4 \text{ J}$ ,  $W_4 = -831,4 \text{ J}$ ; d)  $\eta = 230,5/576,3 = 0,4 = 40\%$ ;  $\eta_{\text{Carnot}} = 0,4 = 40\%$ .

## 29. Carnot, con números

Una máquina térmica opera siguiendo un ciclo de Carnot erogando una potencia de  $3 \text{ MW}$  con un rendimiento del  $75\%$ . Contiene  $100 \text{ moles}$  de un gas ideal triatómico, y está instalada cerca de un río a temperatura  $T_C = 280 \text{ K}$ . La puesta en marcha se realiza calentando al gas desde CNPT en forma isocórica hasta alcanzar la temperatura de trabajo.

- Dibuje el ciclo en un diagrama  $P-V$ .
- Complete el cuadro de estados y el cuadro de transformaciones.

**R:**  $P_A = 415700 \text{ Pa}$ ,  $V_A = 2,24 \text{ m}^3$ ,  $n_A = 100 \text{ mol}$ ,  $T_A = 1120 \text{ K}$ ;  $P_B = 5665 \text{ Pa}$ ,  $V_B = 164,38 \text{ m}^3$ ,  $n_B = 100 \text{ mol}$ ,  $T_B = 1120 \text{ K}$ ;  $P_C = 22,1 \text{ Pa}$ ,  $V_C = 10520,32 \text{ m}^3$ ,  $n_C = 100 \text{ mol}$ ,  $T_C = 280 \text{ K}$ ;  $P_D = 1623,83 \text{ Pa}$ ,  $V_D = 143,36 \text{ m}^3$ ,  $n_D = 100 \text{ mol}$ ,  $T_D = 280 \text{ K}$ ;  $Q_1 = 4 \text{ MJ}$ ,  $\Delta U_1 = 0$ ,  $W_1 = 4 \text{ MJ}$ ;  $Q_2 = 0$ ,  $\Delta U_2 = -1,746 \text{ MJ}$ ,  $W_2 = 1,746 \text{ MJ}$ ;  $Q_3 = -1 \text{ MJ}$ ,  $\Delta U_3 = 0$ ,  $W_3 = -1 \text{ MJ}$ ;  $Q_4 = 0$ ,  $\Delta U_4 = +1,746 \text{ MJ}$ ,  $W_4 = -1,746 \text{ MJ}$ ;  $\eta = 3/4 = 0,75 = 75\%$ ;  $\eta_{\text{Carnot}} = 0,75 = 75\%$ .

## 30. Máquina de Carnot directa y reversa

Suponga una máquina térmica que funciona mediante un ciclo de Carnot entre dos fuentes a temperaturas  $T_A = 700 \text{ K}$  y  $T_C = 300 \text{ K}$  y utiliza como fluido un gas ideal diatómico. Al iniciar el ciclo, el gas se encuentra a la temperatura  $T_A$ , una presión de  $10 \text{ hPa}$  y ocupa un volumen de  $0,007 \text{ m}^3$ . Al finalizar el primer tramo del ciclo la presión del gas desciende a  $P_B = 8 \text{ hPa}$ .

- Dibuje el ciclo en un diagrama P-V.
- Complete el cuadro de estados y el cuadro de transformaciones
- Halle el rendimiento total el ciclo, y compruebe si coincide con el valor esperado para un ciclo de Carnot.
- ¿Dependerá el rendimiento de la atomicidad del gas? ¿y la cantidad total de trabajo obtenida?
- Calcule la potencia entregada por la máquina sabiendo que la misma puede funcionar a 210 ciclos por segundo.
- Invierta el ciclo y calcule el trabajo que es necesario entregar a la máquina térmica para hacerla funcionar en el sentido inverso.

**R:** b)  $P_A = 1000 \text{ Pa}$ ,  $V_A = 0,007 \text{ m}^3$ ,  $n_A = 0,001203 \text{ mol}$ ,  $T_A = 700 \text{ K}$ ;  $P_B = 800 \text{ Pa}$ ,  $V_B = 0,00875 \text{ m}^3$ ,  $n_B = 0,001203 \text{ mol}$ ,  $T_B = 700 \text{ K}$ ;  $P_C = 41,23 \text{ Pa}$ ,  $V_C = 0,0728 \text{ m}^3$ ,  $n_C = 0,001203 \text{ mol}$ ,  $T_C = 300 \text{ K}$ ;  $P_D = 51,53 \text{ Pa}$ ,  $V_D = 0,0582 \text{ m}^3$ ,  $n_D = 0,001203 \text{ mol}$ ,  $T_D = 300 \text{ K}$ ;  $Q_1 = 1,56 \text{ J}$ ,  $\Delta U_1 = 0$ ,  $W_1 = 1,56 \text{ J}$ ;  $Q_2 = 0$ ,  $\Delta U_2 = -10 \text{ J}$ ,  $W_2 = 10 \text{ J}$ ;  $Q_3 = -0,67 \text{ J}$ ,  $\Delta U_3 = 0$ ,  $W_3 = -0,67 \text{ J}$ ;  $Q_4 = 0$ ,  $\Delta U_4 = 10 \text{ J}$ ,  $W_4 = -10 \text{ J}$ ; c)  $\eta = 3/4 = 0,75 = 75,1 \%$ ;  $\eta_{\text{Carnot}} = 0,75 = 75,1 \%$ . d) trabajo individual. e) Potencia =  $187,4 \text{ W}$ . f) Dado que la máquina de Carnot es reversible: funcionamiento directo,  $W_{\text{neto}} = 0,89 \text{ J}$ ; funcionamiento inverso,  $W_{\text{neto}} = -0,89 \text{ J}$ .

### 31. Auto 1: rendimiento

Para alcanzar una velocidad máxima de  $150 \text{ km/h}$  se requiere toda la potencia de un motor de automóvil de  $100 \text{ kW}$ . ¿Cuánta nafta se requiere para recorrer  $100 \text{ km}$  cuando el motor tiene un eficiencia de  $25 \%$ ? Discutir el balance energético total. Equivalente energético de la nafta:  $12 \text{ kWh/kg}$ .

**R:** Se consumen  $22,22 \text{ kg}$  de nafta.

### 32. Energía del mar

Se quiere usar la diferencia de temperatura entre la superficie del agua de mar de  $25^\circ \text{C}$  y de las capas profundas de  $4^\circ \text{C}$  para producir energía eléctrica.

- ¿Cuál es la eficiencia termodinámica máxima que esperaría encontrar con este método de producción de energía?
- ¿Cuántos  $\text{m}^3$  de agua por segundo se necesitaría para erogar una potencia de  $1 \text{ GW}$  de trabajo neto (eléctrico)?

**R:** a)  $\eta = 0,07 = 7 \%$ ; b) se requieren  $162,51 \text{ m}^3/\text{s}$  (caudal del Río Limay =  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

### 33. Horno solar

Un diseño de horno solar permite calentar agua hasta  $90^\circ \text{C}$ . Una persona propone usar esta agua caliente para hacer funcionar una máquina térmica. a) ¿Qué eficiencia se podría alcanzar para esa máquina si la temperatura ambiente es de  $20^\circ \text{C}$ ? b) Si la constante solar es de  $1400 \text{ W m}^{-2}$  y la absorción atmosférica en nuestras latitudes es del  $50 \%$ , ¿cuál es el área que debe tener el colector solar para calentar  $1 \text{ kg}$  de agua desde temperatura ambiente hasta la temperatura máxima en  $1 \text{ minuto}$ ?

**R:** a)  $\eta = 0,193 = 19,3 \%$ ; b) Debe tener un área de  $7 \text{ m}^2$ .

### 34. Máquina térmica

Una máquina térmica tiene una eficiencia del  $30 \%$  y eroga  $3 \text{ GW}$  de potencia mecánica.

- En un segundo, ¿qué cantidad de calor recibe de la fuente caliente? ¿Qué cantidad de calor entrega al medio ambiente?

- b) Este calor debe ser entregado a un río cuya temperatura no debe subir más de  $2^{\circ}\text{C}$ .  
¿Qué caudal mínimo (en  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) debe tener ese río?

**R:** a)  $Q_{\text{Abs}} = 10 \text{ GJ}$ ;  $Q_{\text{Ent}} = 7 \text{ GJ}$ ; b) se requieren  $836,12 \text{ m}^3/\text{s}$  (caudal del Río Negro =  $1014 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

### 35. Trigo

El valor nutritivo del trigo que se produce en un metro cuadrado de tierra fértil es de  $2 \text{ kWh}$ . Si en esa región agrícola la irradiancia solar durante el verano es  $\sim 700 \text{ W m}^{-2}$  durante unas 7 horas diarias en promedio y que el trigo demora cinco meses en madurar. ¿Cual es el rendimiento energético del trigo?

**R:** a)  $\eta = 2/735 = 0,00272 = 0,272\%$ ;

### 36. Auto 2: ciclo Otto

El ciclo Otto opera en los motores de autos que funcionan con nafta (gasolina) como combustible. Es usual hablar del ciclo de cuatro etapas (Admisión, Compresión, Explosión y Escape), aunque en realidad son seis las etapas que experimenta la mezcla de combustible y aire: 1) expansión de la mezcla a presión constante (admisión,  $n$  aumenta); 2) compresión adiabática (compresión); 3) calentamiento isócoro (combustión); 4) expansión adiabática (explosión+expansión); 5) enfriamiento isócoro; 6) compresión isóbara (escape,  $n$  disminuye). Descartando las etapas 1 y 6, donde hay cambio en la cantidad de gas, suponiendo que durante las etapas 2, 3, 4 y 5 la cantidad de mezcla es  $n = 0,02 \text{ mol}$  (valor aproximado para un motor de  $2000 \text{ cm}^3$ ), y utilizando los valores del diagrama PV visto en clase (página 17/30 Clase U02C06), realice los siguientes ejercicios:

- Complete el cuadro de estados A, B, C y D.
- Complete el cuadro de las transformaciones 2, 3, 4 y 5.
- El rendimiento termodinámico del motor. Compárelo con el rendimiento de un ciclo de Carnot equivalente y con el dato de la eficiencia de un motor a combustión interna del problema 31.
- Si el motor funciona en régimen a 3600 RPM, calcule la cantidad de calor producida por el consumo de combustible, el trabajo neto liberado y la cantidad de calor liberada en la atmósfera cada hora de funcionamiento.

**R:** b)  $P_A = 101325 \text{ Pa}$ ,  $V_A = 0,00048 \text{ m}^3$ ,  $n_A = 0,02 \text{ mol}$ ,  $T_A = 293 \text{ K}$ ;  $P_B = 1874512,5 \text{ Pa}$ ,  $V_B = 0,00006 \text{ m}^3$ ,  $n_B = 0,02 \text{ mol}$ ,  $T_B = 676 \text{ K}$ ;  $P_C = 5015587,5 \text{ Pa}$ ,  $V_C = 0,00006 \text{ m}^3$ ,  $n_C = 0,02 \text{ mol}$ ,  $T_C = 1810 \text{ K}$ ;  $P_D = 253312,5 \text{ Pa}$ ,  $V_D = 0,00048 \text{ m}^3$ ,  $n_D = 0,02 \text{ mol}$ ,  $T_D = 731 \text{ K}$ ;  $Q_2 = 0$ ,  $\Delta U_2 = 159,6 \text{ J}$ ,  $W_2 = -159,6 \text{ J}$ ;  $Q_3 = 471,2 \text{ J}$ ,  $\Delta U_3 = 471,2 \text{ J}$ ,  $W_3 = 0$ ;  $Q_4 = 0$ ,  $\Delta U_4 = -448,4 \text{ J}$ ,  $W_4 = 448,4 \text{ J}$ ;  $Q_5 = -182,4 \text{ J}$ ,  $\Delta U_5 = -182,4 \text{ J}$ ,  $W_5 = 0$ ; c)  $\eta = 288,8/471,2 = 0,613 = 61,3\%$ ;  $\eta_{\text{Carnot}} = 0,838 = 83,3\%$ . d) En una hora de funcionamiento:  $Q_{\text{abs}} = 50,9 \text{ MJ}$ ;  $W_{\text{neto}} = 31,2 \text{ MJ}$ ;  $Q_{\text{ent}} = 19,7 \text{ MJ}$ .

### 37. Ciclo combinado en el océano

Tres máquinas térmicas idénticas que funcionan con un ciclo de Carnot se conectan en una configuración de ciclo combinado, de forma tal que el calor no aprovechado por una de las máquinas es utilizado por la siguiente máquina del complejo. El rendimiento de cada etapa debe ser  $\eta_i = 0,6$ . La fuente fría de la última de las máquinas es el océano Atlántico, cuya temperatura es  $T_f = 276 \text{ K}$ . Si la última etapa del ciclo eroga  $1 \text{ GW}$  de potencia, haga un esquema de la situación planteada y responda lo siguiente:

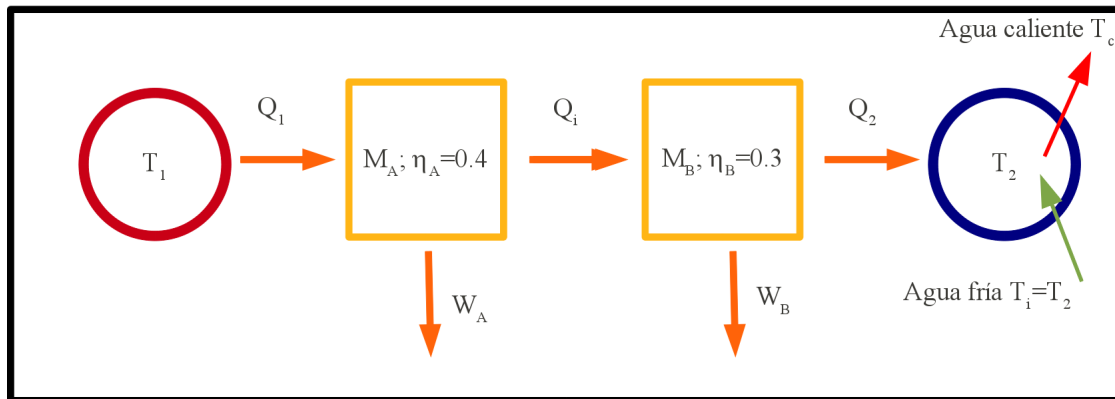
- La cantidad total de calor entregada al océano en una hora de funcionamiento.

- b) La cantidad de calor que cada hora suministra la fuente caliente en la primera etapa.
- c) El trabajo neto entregado por cada etapa del ciclo y el trabajo neto total, por hora.
- d) Las dos temperaturas de trabajo de cada una de las máquinas.
- e) El rendimiento global, y la potencia útil total erogada por el complejo.

**R:** a)  $Q_{\text{ent},3} = 2,4 \text{ TJ}$  por hora; b)  $Q_{\text{abs},1} = 37,5 \text{ TJ}$  por hora; c)  $W_1 = 22,5 \text{ TJ}$ ,  $W_2 = 9 \text{ TJ}$ ,  $W_3 = 3,6 \text{ TJ}$ ;  $W_{\text{tot}} = 35,1 \text{ TJ}$ ; Notar que  $Q_{\text{ent},3} + W_{\text{tot}} = (2,4 + 35,1) \text{ TJ} = 37,5 \text{ TJ} = Q_{\text{abs},1}$ , como consecuencia del primer principio (conservación de la energía); d)  $T_{c,1} = 4312,5 \text{ K}$ ,  $T_{f,1} = 1725 \text{ K}$ ;  $T_{c,2} = 1725 \text{ K}$ ,  $T_{f,2} = 690 \text{ K}$ ;  $T_{c,3} = 690 \text{ K}$ ,  $T_{f,3} = 276 \text{ K}$ ; e)  $\eta = 35,1/37,5 = 0,936 = 93,6 \%$ , notar que  $\eta_{\text{Carnot, global}} = 1 - 276/4312,5 = 0,936 = 93,6 \%$ ; Potencia  $P = 9,75 \text{ GW}$ .

### 38. Máquinas en cascada

Una instalación de ciclo combinado dispone de dos máquinas térmicas  $M_A$  y  $M_B$  conectadas en cascada, es decir, el calor  $Q_i$  que sale de la máquina  $A$  es usado para generar un trabajo adicional en la máquina  $B$ . La fuente caliente principal es una caldera de vapor operando a una temperatura  $T_1 = 1000 \text{ K}$ , que entrega  $Q_1 = 500 \text{ MJ}$  de calor cada segundo. El calor residual  $Q_2$  que sale de la máquina  $B$  se utiliza para calefaccionar las oficinas de la planta, calentando agua a temperatura ambiente  $T_i = T_2 = 293 \text{ K}$  hasta  $T_c = 353 \text{ K}$ .



- a) Calcule la cantidad de calor  $Q_i$  que pasa de la máquina  $A$  a la  $B$  cada segundo.
- b) Calcule el trabajo total producido:  $W = W_A + W_B$  por segundo.
- c) Calcule la cantidad de calor  $Q_2$  que pasa de la máquina  $B$  a la calefacción.
- d) Calcule el rendimiento total de la instalación de ciclo combinado, y diga cual es la ventaja de estas instalaciones.
- e) Compare el rendimiento anterior con el rendimiento de una máquina de Carnot operando entre esas temperaturas.
- f) Calcule cuantos litros de agua por segundo será posible calentar desde  $T_2$  hasta  $T_c$ .

**R:** a)  $Q_1 = 500 \text{ MJ}$ ;  $Q_2 = 300 \text{ MJ}$ . b)  $W_{\text{tot}} = 290 \text{ MJ}$ ; c)  $Q_2 = 210 \text{ MJ}$ ; d)  $\eta = 58 \%$ ; e)  $\eta_C = 70,7 \%$ ; f)  $836 \text{ L/s}$