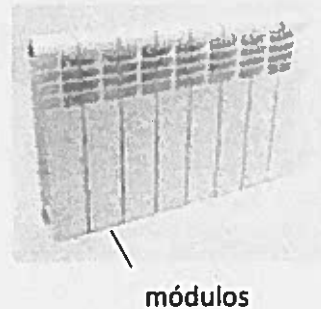


INGENIERÍA TÉRMICA - Enero 2019

Problema 1

Un radiador de agua caliente está formado por módulos de 1 m de altura. El área superficial total de cada módulo es de $0,8 \text{ m}^2$. La superficie exterior del radiador está a 60°C . El aire de la habitación está a 20°C . Calcúlese cuántos módulos serán necesarios instalar para proporcionar una potencia térmica de 2 kW.



Problema 2

En un calentador eléctrico de 50 litros se desea calentar agua desde 15°C hasta 60°C en 2 horas. Calcúlese:

- La potencia mínima del calentador
- La exergía destruida durante el proceso de calentamiento del agua desde la resistencia. Despréciase la capacidad térmica de la resistencia. Supóngase la temperatura de la resistencia constante e igual a 89°C y la temperatura del estado de referencia 15°C .

Problema 3

En un sistema abierto entran 4 kg/s de aire a 18°C y tras un proceso de exponente politrópico $-2,6$, sale a 34°C .

- Dedúzcase gráficamente, sin hacer cálculos numéricos:
 - El intercambio de calor
 - El intercambio de trabajo
 - La variación de entropía
- Calcúlese el valor numérico de las preguntas anteriores.

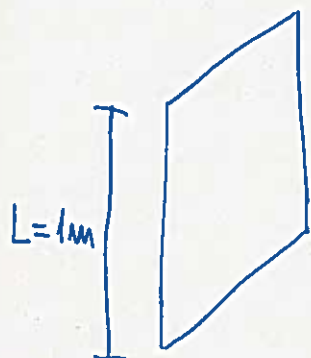
Tiempo: 2,5 horas

Cada ejercicio vale un tercio del valor del examen total.

Las hojas de examen que no estén identificadas con nombre y apellidos, DNI, número de grupo y titulación, no serán corregidas.

PROBLEMA 1

Se considera que cada módulo está compuesto por una superficie que se coloca de forma vertical.



Datos:

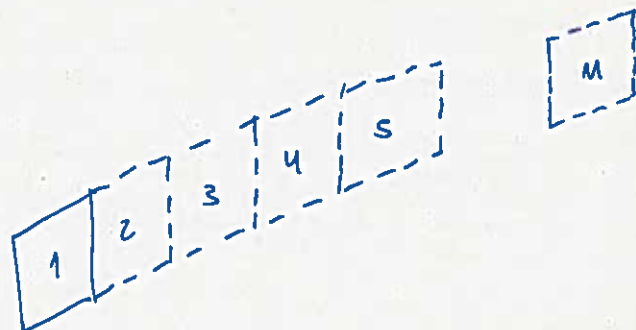
$$L = 1 \text{ m}$$

$$A_m = 0.8 \text{ m}^2$$

$$\theta_p = 60^\circ \text{C}$$

$$\theta_f = 20^\circ \text{C}$$

$$\dot{Q}_T = 2 \text{ kW}$$

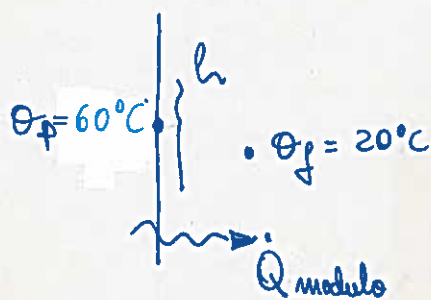


- Régimen permanente
- Sin generación de calor

El objetivo es determinar la cantidad mínima de módulos que son necesarios para que el radiador proporcione una potencia total de 2 kW. Para ello, se calculará cuánto calor disipa un módulo por unidad de tiempo.

Se trata de un problema de transmisión de calor, en el que el calor entre la superficie exterior del radiador y el aire se intercambia por convección natural. Por lo

tanto $\rightarrow$ Convección natural en placa plana vertical



La potencia disipada por cada módulo se determinará empleando la ley de enfriamiento de Newton. Para ello, será necesario calcular primero el coeficiente de convección.

Teniendo en cuenta el caso del que se trata:

$$10^4 < Ra < 10^9 \rightarrow Nu = 0.59 \cdot Ra_L^{1/4}$$

$$10^9 < Ra < 10^{13} \rightarrow Nu = 0.1 \cdot Ra_L^{1/3}$$

$$L_{cc} = 1 \text{ m}$$

$$\theta_{cc} = \frac{\theta_p + \theta_f}{2} = 40^\circ\text{C}$$

Aire a 40°C

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{40^\circ\text{C}} = 1.127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ c_{p40^\circ\text{C}} = 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ k_{40^\circ\text{C}} = 0.02662 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \\ \mu_{40^\circ\text{C}} = 1.918 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \\ \nu_{40^\circ\text{C}} = 1.702 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \\ Pr_{40^\circ\text{C}} = 0.7255 \end{array} \right.$$

$$Gr = \frac{g \cdot \rho \cdot \Delta\theta \cdot L_{cc}^3 \cdot l^2}{\mu^2} = \frac{9.8 \cdot \frac{1}{313} \cdot (60 - 20) \cdot 1^3 \cdot 1.127^2}{(1.918 \cdot 10^{-5})^2} = 4.324 \cdot 10^9$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = 4.324 \cdot 10^9 \cdot 0.7255 = 3.14 \cdot 10^9$$

Por lo tanto, de las dos opciones disponibles para este caso, es la siguiente la que debemos utilizar:

$$10^9 < Ra < 10^{13} \rightarrow Nu = 0.1 Ra_L^{1/3} = 0.1 \cdot (3.14 \cdot 10^9)^{1/3} = 146.39$$

3

A partir del número de Nusselt se calcula el coeficiente de corrección:

$$Nu = \frac{h \cdot L_{cc}}{k} \rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{L_{cc}} = \frac{146'39 \cdot 0'02662}{1} = 3'9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Una vez determinado el valor del coeficiente podemos aplicar la ley de enfriamiento de Newton y calcular la potencia disipada por cada módulo:

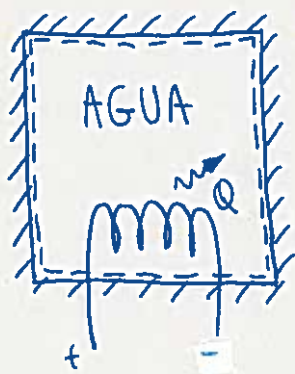
$$\dot{Q}_{\text{módulo}} = h \cdot A_m \cdot \Delta\theta = 3'9 \cdot 0'8 \cdot (60 - 20) = 124'7 \text{ W}$$

El número mínimo de módulos se calcula dividiendo la potencia total a proporcionar, $\dot{Q}_T = 2000 \text{ W}$, por la potencia de cada módulo:

$$n = \frac{\dot{Q}_T}{\dot{Q}_{\text{módulo}}} = \frac{2000}{124'7} = 16'04 \rightarrow \boxed{17 \text{ módulos}}$$

PROBLEMA 2

4



- Sistema cerrado

Datos:

$$V = 50 \text{ litros}$$

$$\theta_1 = 15^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = 60^\circ\text{C}$$

$$t = 2 \text{ horas}$$

$$\theta_R = 89^\circ\text{C}$$

$$\theta_o = 15^\circ\text{C}$$

Se pide:

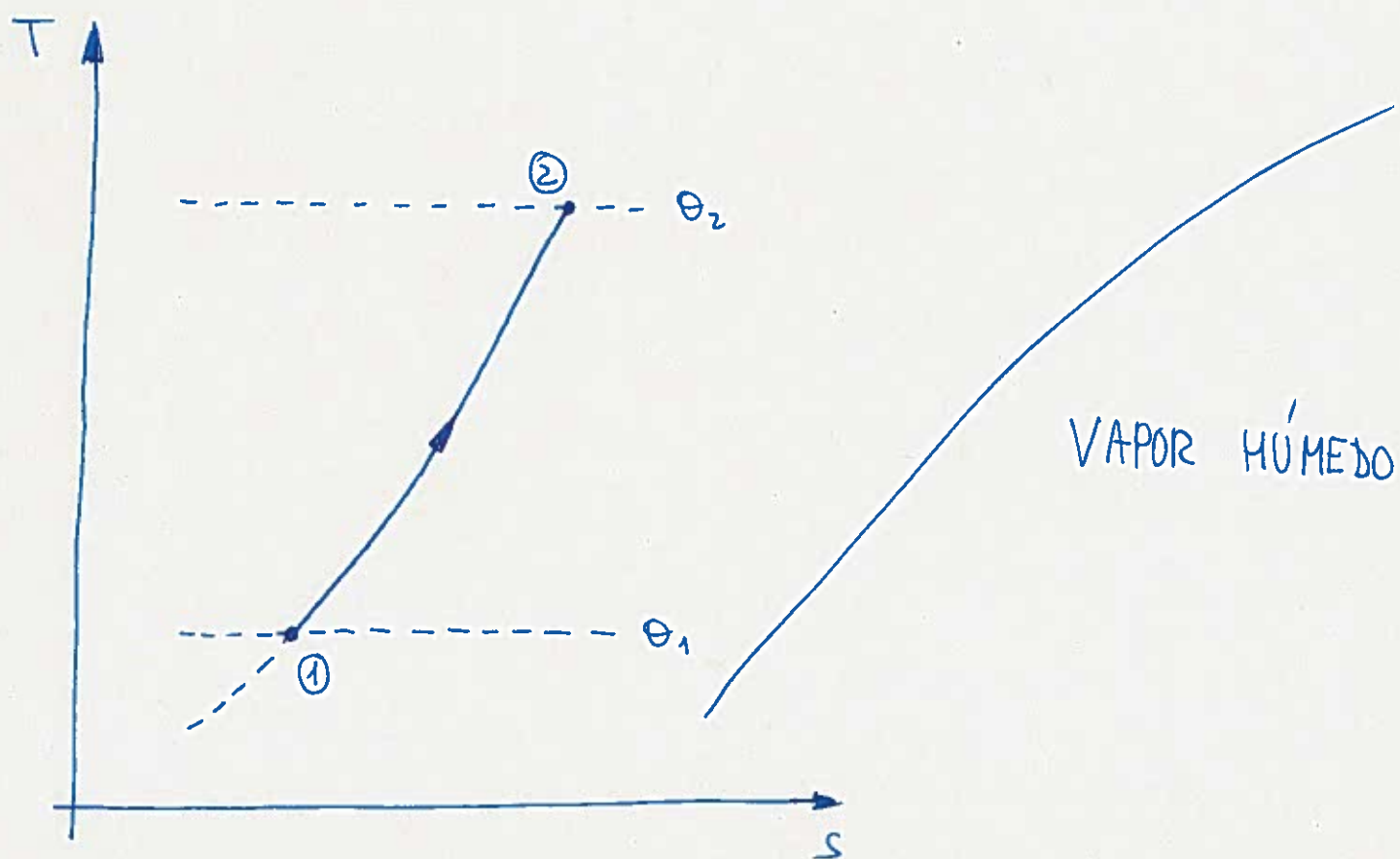
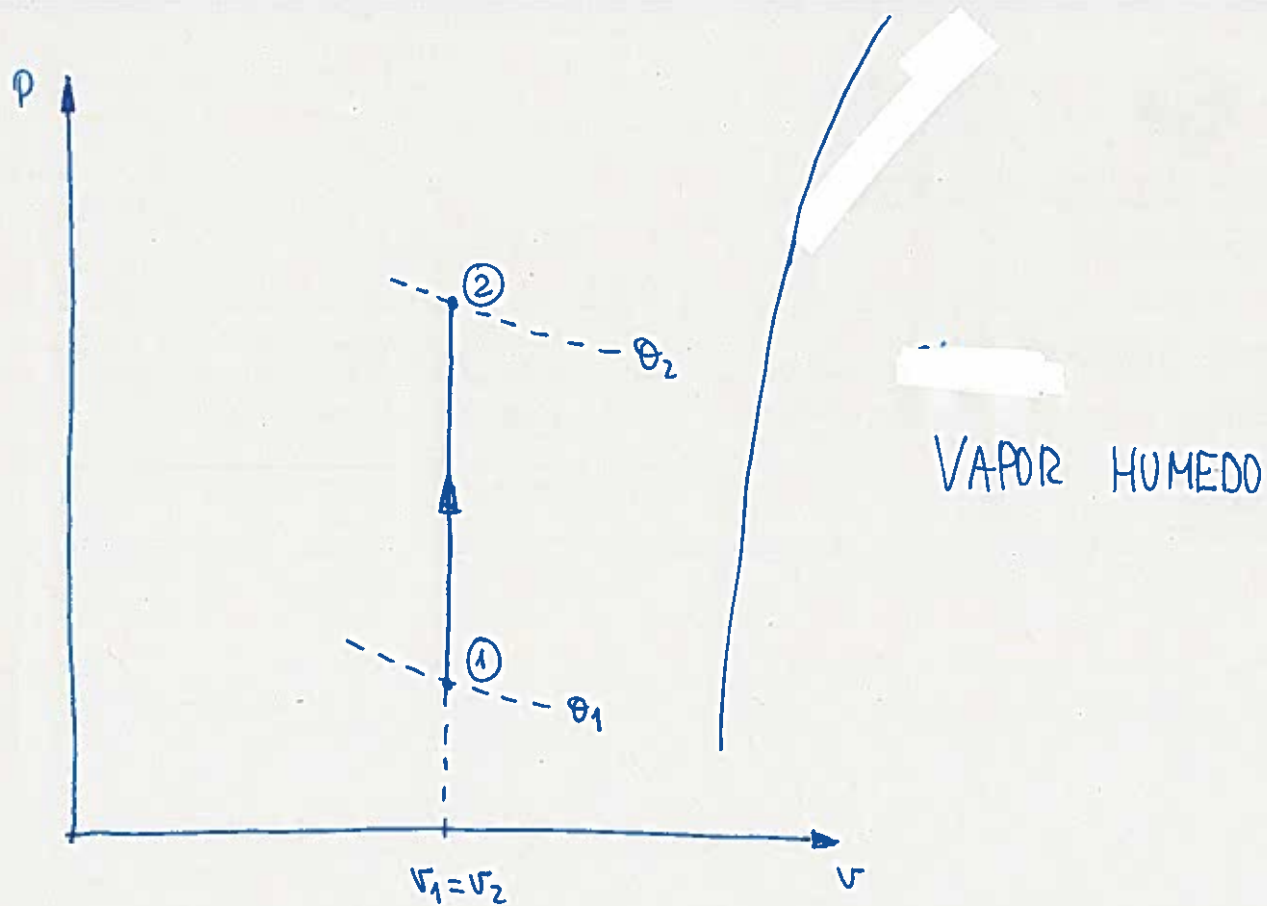
a) La potencia mínima del calentador, $\dot{Q}$?

b) Exergía destruida durante el calentamiento, $\dot{Ex}_{D_{cal}}$?

- Se consideran las paredes del calentador eléctrico rígidas y adiabáticas.
- Si la capacidad calorífica de la resistencia es despreciable, ésta no acumula energía.
- El agua se considera como fluido incompresible.

a) Para calcular la potencia mínima del calentador, es necesario determinar el calor intercambiado durante el proceso desde el estado inicial hasta el final.

El proceso que sufre el agua es a volumen constante, por lo tanto isocoro.



El calor que recibe el agua durante el proceso se calcula aplicando el primer principio:

$$\Delta U_{12} = Q_{12} - W_{12}$$

Por ser un proceso a volumen constante $\rightarrow W_{12} = 0$

$$Q_{12} = \Delta U_{12} = m \cdot c_v (\theta_2 - \theta_1)$$

Considerando el agua líquida como sustancia incompresible (ver el videotutorial "3.1.- Modelo de sustancia incompresible" del canal Youtube)

$$c_v = c_p = c \rightarrow \text{en el caso del agua líquida } c = 4186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$Q_{12} = m \cdot c (\theta_2 - \theta_1)$$

Para el cálculo de la masa de agua, se considera que la densidad del agua permanece constante dentro del rango de temperaturas del problema, y se toma su valor como la del líquido saturado a la temperatura promedio, $\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} = 37.5^\circ\text{C}$.

$$\rho(\theta = 37.5^\circ\text{C}) = \frac{1}{v'(\theta = 37.5^\circ\text{C})} = \frac{1}{1.0069 \cdot 10^{-3}} = 993.15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m = \rho \cdot V = 993.15 \cdot 0.050 = 49.66 \text{ kg}$$

$$Q_{12} = 49'66 \cdot 4'186 \cdot (60 - 15) = 9353'96 \text{ kJ}$$

$$Q_{12} = P \cdot t \rightarrow \boxed{P = \frac{Q_{12}}{t} = \frac{9353'96}{7200} = 1'3 \text{ kW}}$$

b) Para determinar la exergía destruida durante el proceso de calentamiento, se aplica el balance de exergía al sistema cenado:

$$A_2 - A_1 = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q - \left(W - P_0(V_2 - V_1) - Ex_{D_{cal}}\right)$$

$$A_2 - A_1 = (U_2 - U_1) + \cancel{P_0(V_2 - V_1)}^{0 (dv=0)} - T_0(S_2 - S_1)$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12} - \cancel{W_{12}}^0 = 9353'96 \text{ kJ}$$

$$S_2 - S_1 = m \cdot c \ln \frac{T_2}{T_1} = 49'66 \cdot 4'186 \cdot \ln \frac{333}{288} = 30'18 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

$$A_2 - A_1 = (U_2 - U_1) - T_0(S_2 - S_1) = 9353'96 - 288 \cdot 30'18 = 662'59 \text{ kJ}$$

Se pide la exergía destruida en el calentamiento, por lo que se considera en el balance de exergía de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right) \delta Q &= \left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right) \int_1^2 \delta Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right) \cdot \dot{Q}_{12} = \left(1 - \frac{288}{362}\right) \cdot 9353'96 = \\ &= 1912'14 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$(W_{12} - P_0(V_2 - V_1)) = 0$$

$$A_2 - A_1 = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right) \delta Q - Ex_{D_{cal}}$$

$$\boxed{Ex_{D_{cal}} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right) \delta Q - (A_2 - A_1) = 1912'14 - 662'59 = 1249'55 \text{ KJ}}$$

PROBLEMA 3

9

Datos:

$$\dot{m} = 4 \text{ kg/s aire}$$

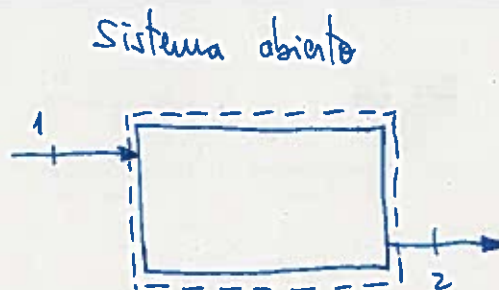
Entrada

$$\Theta_1 = 18^\circ\text{C}$$

Salida

$$\Theta_2 = 34^\circ\text{C}$$

$$n = -2.6$$



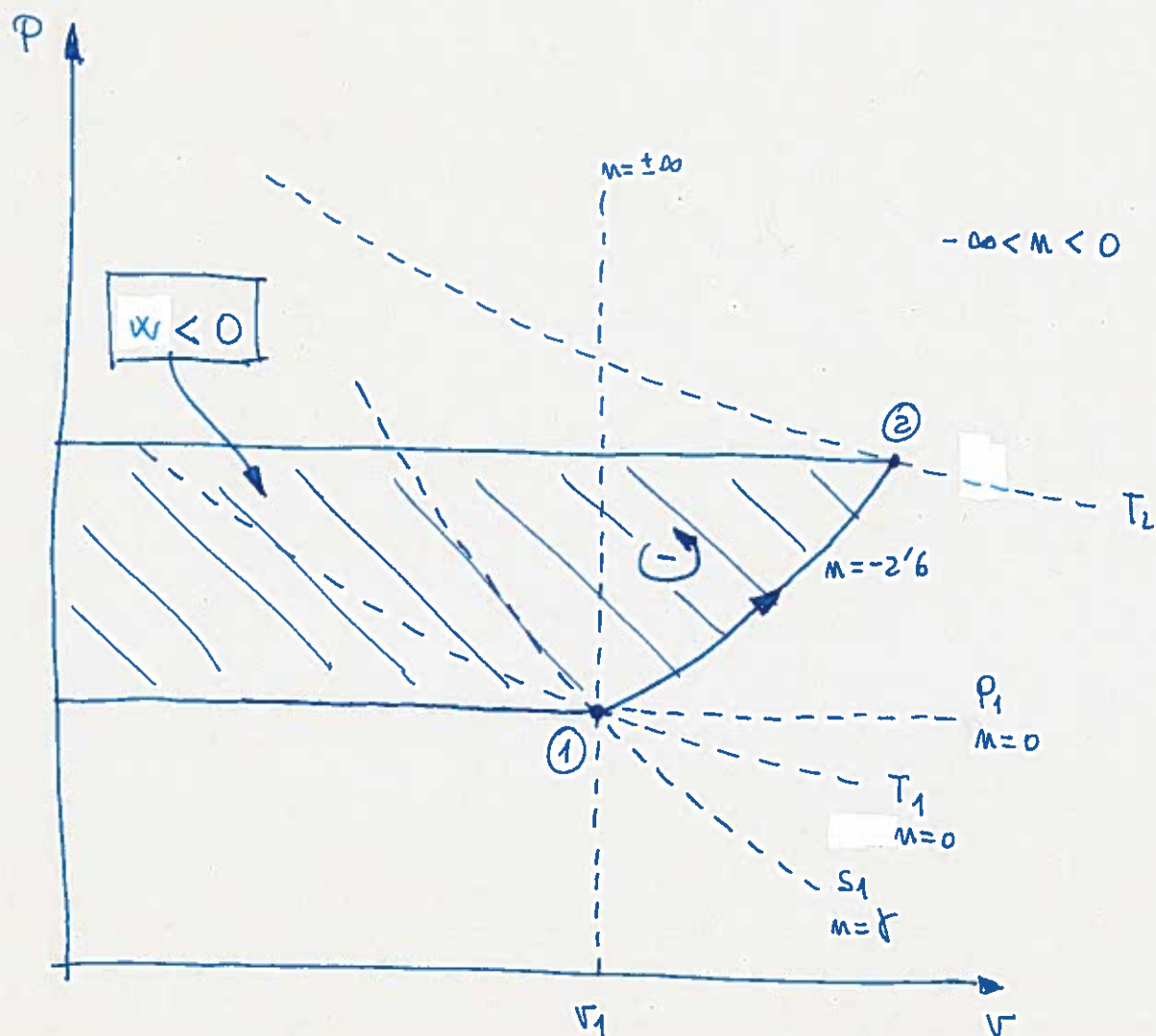
- Se considera el aire como un gas ideal
- Se trata de un proceso politrópico, por lo tanto reversible.
- Se trata de un sistema abierto en régimen permanente

a) Se pide deducir gráficamente (sin cálculos numéricos)

- el calor intercambiado
- el trabajo
- la variación de entropía

Para deducir gráficamente el calor intercambiado y la variación de entropía, el diagrama a emplear es el diagrama T-s.

En cambio, en el caso del trabajo, éste se representa en el diagrama P-v.



b) El intercambio de calor es posible calcularlo mediante el calor específico politrópico o aplicando la ecuación de la energía. Para aplicar la ecuación de la energía es necesario calcular primero el trabajo por unidad de tiempo, que es justamente lo que se pide en el siguiente apartado.

- Calculando el calor específico politrópico:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} \cdot c_m (\theta_2 - \theta_1)$$

$$c_m = \frac{\gamma - m}{1 - m} \cdot c_v = \frac{\gamma - m}{1 - m} \cdot \frac{R'}{\gamma - 1} = \frac{\gamma - m}{1 - m} \cdot \frac{R}{\gamma - 1} = \frac{1.4 - (-2.6)}{1 - (-2.6)} \cdot \frac{8.3145 / 28.97}{1.4 - 1} = 0.797 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\boxed{\dot{Q}_{12} = \dot{m} \cdot c_m (\theta_2 - \theta_1) = 4 \cdot 0.797 \cdot (34 - 18) = 51.02 \text{ kW}}$$

- Aplicando la ecuación de la energía

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} (h_2 - h_1) + \dot{W}_{12}$$

$$\dot{m} (h_2 - h_1) = \dot{m} \cdot c_p (\theta_2 - \theta_1) = 4 \cdot 1.0045 (34 - 18) = 64.32 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \boxed{\dot{W}_{12} = \dot{m} \cdot \left(- \int v dP \right) = \dot{m} \left(\frac{m}{m-1} (P_1 \cdot v_1 - P_2 \cdot v_2) \right) = (\text{Gas ideal}) = \dot{m} \cdot \left(\frac{m}{m-1} R' (T_1 - T_2) \right)} \\ = 4 \cdot \left(\frac{-2.6}{-2.6 - 1} \cdot \frac{8.3145}{28.97} (18 - 34) \right) = \boxed{-13.27 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$\boxed{\dot{Q}_{12} = \dot{m} (h_2 - h_1) + \dot{W}_{12} = 64.32 + (-13.27) = 51.02 \text{ kW}}$$

El trabajo por unidad de tiempo por lo tanto es igual a $\dot{W}_{12} = -13.27 \text{ kW}$

La variación de entropía del aire por unidad de tiempo se calcula teniendo

en cuenta que se trata de un gas ideal:

$$\dot{\Delta S}_{12} = \dot{m} \left(c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R' \ln \frac{v_2}{v_1} \right) = \dot{m} \left(c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R' \ln \frac{p_2}{p_1} \right)$$

Utilizando las relaciones de los gases ideales:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

$$\boxed{\dot{\Delta S}_{12} = \dot{m} \left(c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R' \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right) = 4 \cdot \left(1'0045 \cdot \ln \frac{307}{291} - \frac{8'3145}{28'97} \ln \left(\frac{307}{291} \right)^{\frac{-26}{-26-1}} \right)}$$

$$\boxed{= 0'17 \frac{\text{kW}}{\text{K}}}$$