

## TERMODINÁMICA

Nombre \_\_\_\_\_ Grupo \_\_\_\_\_

### Problema – 1 (5 puntos)

**No está permitido el empleo de calculadoras programables ni la consulta de libros, apuntes o formularios. Los teléfonos móviles y relojes “smartwatch” deberán permanecer apagados y fuera del alcance del alumno.**

Una incineradora de residuos emplea un ciclo de Rankine para generar energía eléctrica. Dicho ciclo es regenerativo, entrando el vapor a la turbina a 450°C y 60 bar. La turbina tiene una extracción para un calentador abierto. A la salida de la turbina el vapor se dirige al condensador, que opera a 10 kPa y del que sale el agua como líquido saturado. El calentador abierto recibe el vapor de extracción a 5 bar, saliendo el agua de alimentación del mismo como líquido saturado.

El rendimiento isentrópico de la turbina es del 80%, definido entre su entrada y su salida, siendo la línea de expansión una recta en el diagrama de Mollier. Las bombas se consideran adiabáticas con rendimiento isentrópico 100%. Se desprecian las pérdidas de presión en intercambiadores y conductos.

El aporte de calor a la caldera se asume procedente de un foco térmico a 1500°C y que el calor cedido en el condensador se dirige al ambiente a 25°C. La potencia neta producida por la central es de 35 MW. Tómese el estado muerto a 25°C y 1 bar.

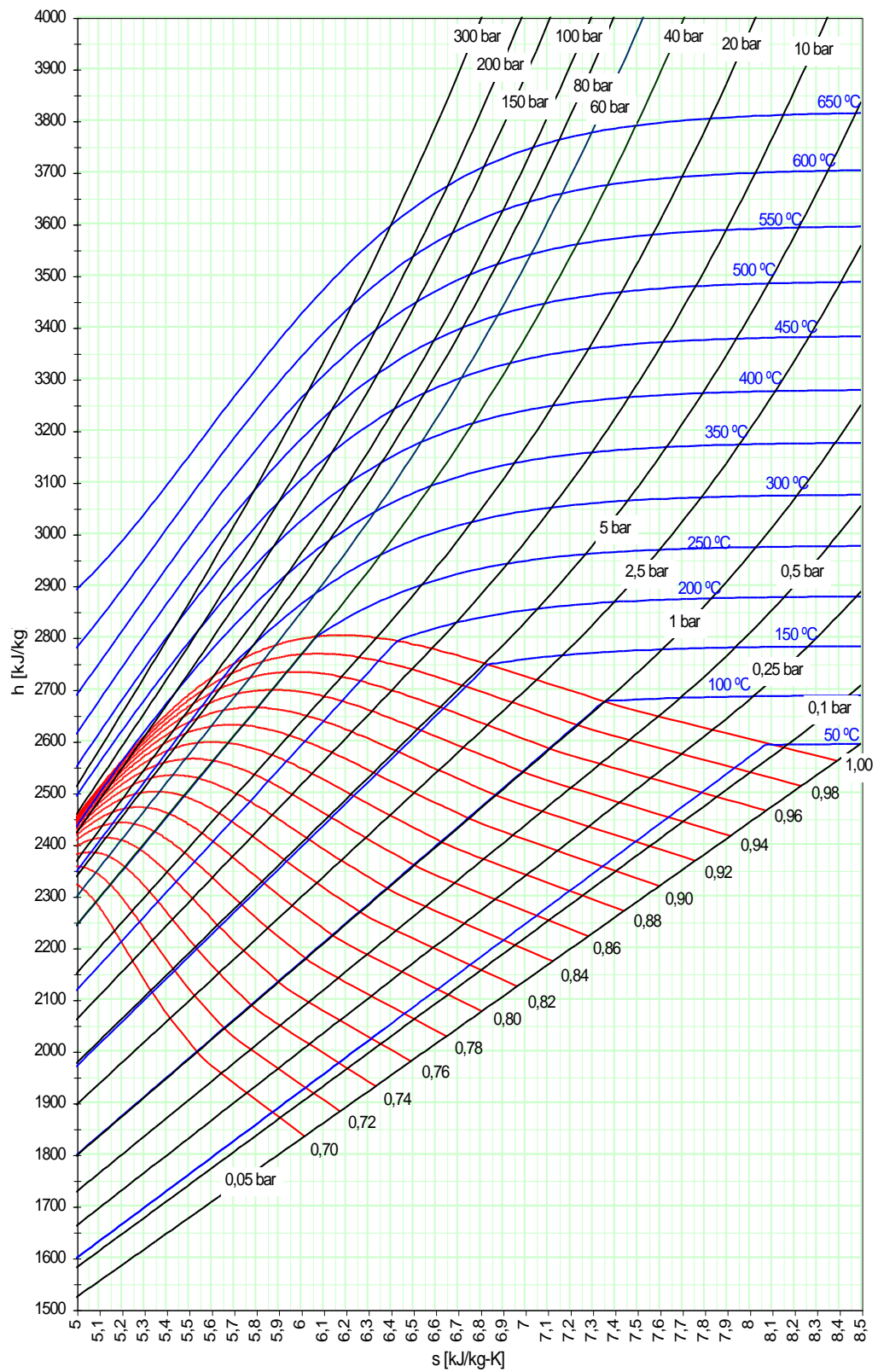
Se pide:

- Esquema de la planta
- Potencia térmica aportada en la caldera
- Máximo trabajo útil que se podría obtener del calor cedido en el condensador, tomando éste en los tubos por los que se condensa el vapor
- Eficiencia exergética de la planta (considerando el calor para la caldera tomado del foco caliente y el cedido en el condensador en el ambiente)

**Tablas del agua saturada (líquido – vapor)**

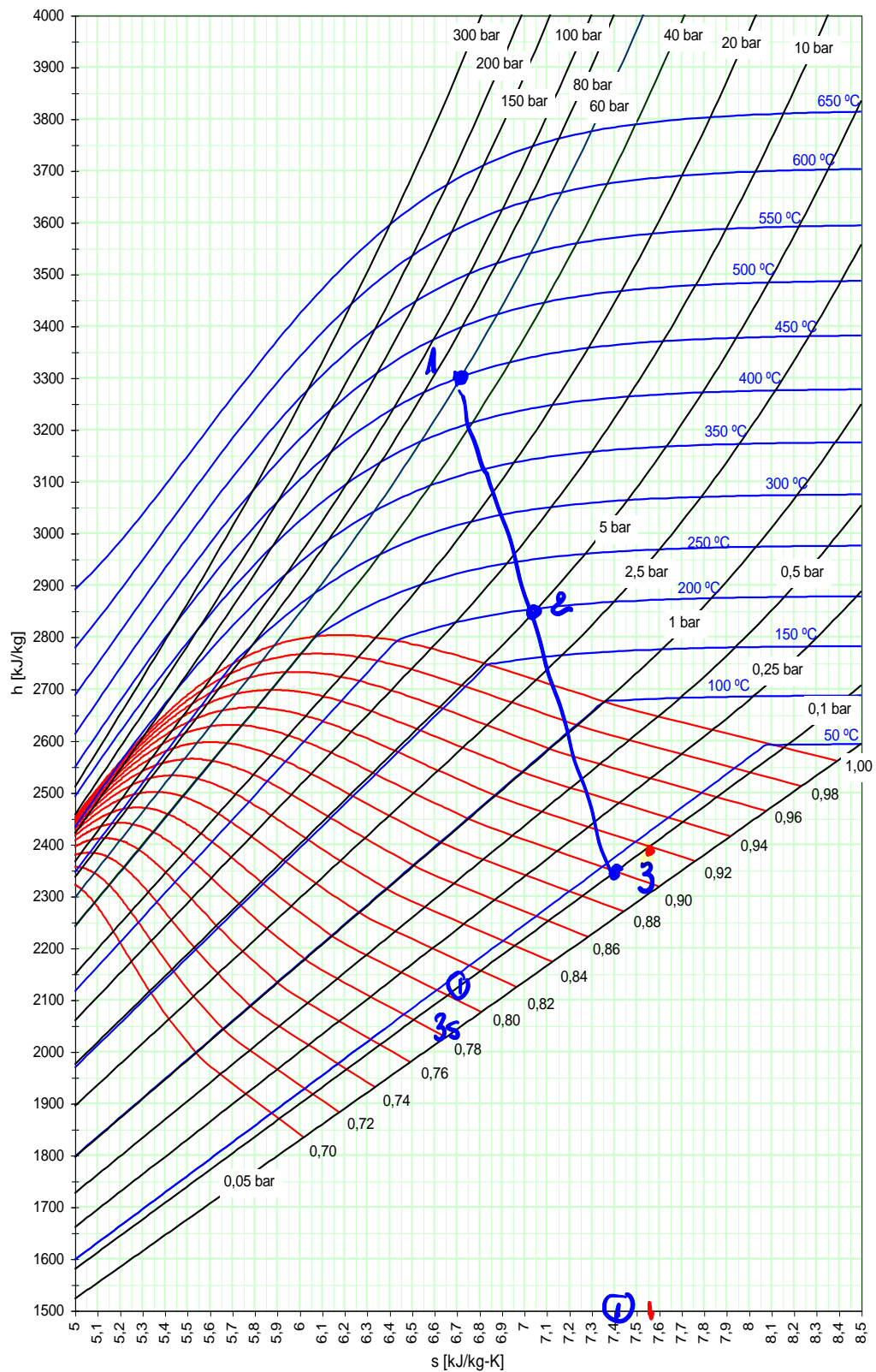
p [bar]	T [°C]	$v_f$ [m <sup>3</sup> /kg]	$v_g$ [m <sup>3</sup> /kg]	$h_f$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_f$ [kJ/kg-K]	$s_g$ [kJ/kg-K]
0,1	45,81	0,00101028	14,67	191,80	2583,9	0,649191	8,14881
0,25	64,96	0,00101985	6,203	271,96	2617,4	0,893187	7,83018
0,5	81,32	0,00102993	3,240	340,54	2645,2	1,09120	7,59304
1	99,61	0,00104316	1,694	417,51	2675,0	1,30276	7,35891
2,5	127,41	0,00106722	0,7187	535,35	2716,5	1,60723	7,05250
5	151,83	0,00109255	0,3748	640,09	2748,1	1,86038	6,82069
10	179,88	0,00112723	0,1944	762,51	2777,1	2,13806	6,58502
15	198,29	0,00115385	0,1317	844,54	2791,0	2,31431	6,44299
20	212,38	0,00117672	0,09959	908,47	2798,3	2,44670	6,33902
25	223,95	0,00119738	0,07995	961,86	2801,9	2,55417	6,25579
30	233,85	0,00121661	0,06667	1008,28	2803,2	2,64543	6,18561
35	242,56	0,00123486	0,05706	1049,71	2802,7	2,72525	6,12436
40	250,35	0,00125241	0,04978	1087,39	2800,8	2,79657	6,06961
45	257,44	0,00126947	0,04406	1122,13	2798,0	2,86128	6,01975
50	263,94	0,00128618	0,03945	1154,50	2794,2	2,92073	5,97370
55	269,96	0,00130266	0,03564	1184,93	2789,7	2,97588	5,93070
60	275,59	0,00131900	0,03245	1213,75	2784,6	3,02747	5,89015

Diagrama de Mollier del agua

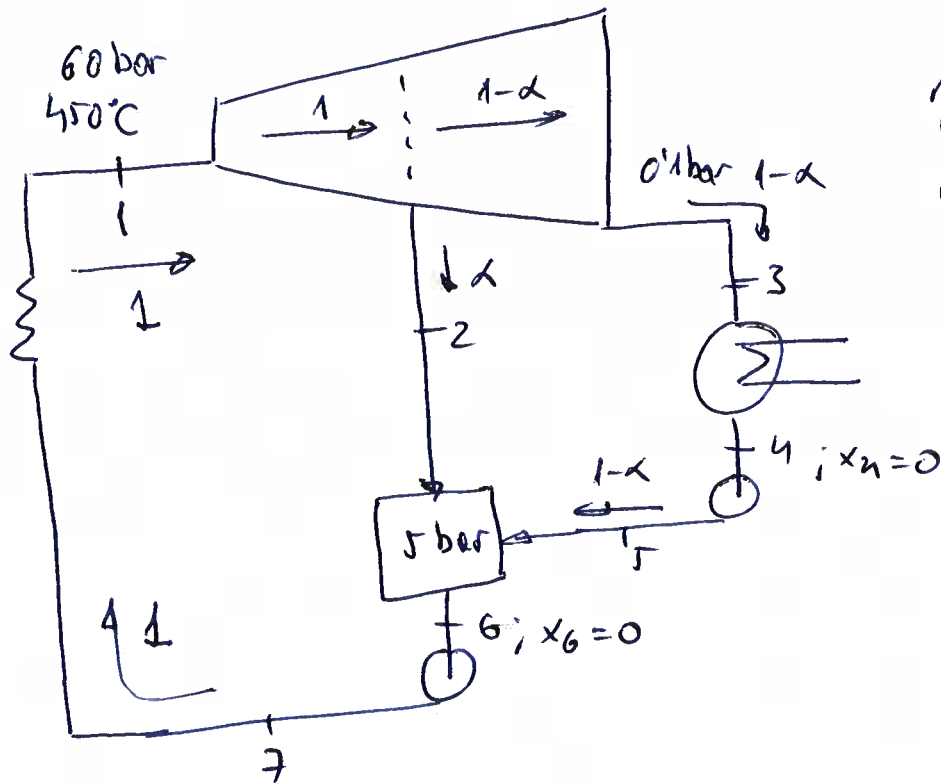


**Nota: Redondear la entalpía a la cincuenta más próxima.**

Diagrama de Mollier del agua



**Nota: Redondear la entalpía a la cincuenta más próxima.**



$$\eta_T = 0.8$$

$$\eta_R = 1$$

$$T_C = 1500^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

$$\dot{W}_{\text{net}} = 35 \text{ MW}$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

$$P_0 = 1 \text{ bar}$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 3300 \text{ kJ/kg} \\ h_{35} = 2100 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} 0.8 = \frac{3300 - h_3}{3300 - 2100} \rightarrow h_3 = 2340 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 = 191.8 \text{ kJ/kg}; v_4 = 0.00101028 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_5 = 191.8 + 0.00101028 (5 - 0.1) 100 = 192.3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = 640.09; v_6 = 0.00109255 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_7 = 640.09 + 0.00109255 (60 - 5) 100 = 646.1 \text{ kJ/kg}$$

Calentador

$$\alpha h_2 + (1-\alpha) h_5 = h_6 \rightarrow \alpha = 0.1685$$

Turbine

$$w_T = h_1 - \alpha h_2 - (1-\alpha) h_3 = 874.07 \text{ kJ/kg}$$

Bomba condensador

$$w_{B\text{con}} = (1-\alpha)(h_5 - h_4) = 0,4116 \text{ kJ/kg}$$

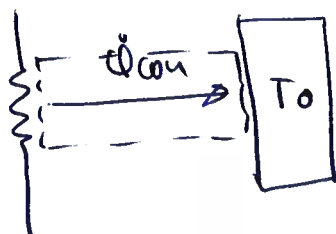
Bomba de alimentación

$$w_{BAC} = h_7 - h_6 = 6,01 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{neto}} = w_i (874,07 - 0,4116 - 6,01) = 35000$$

$$\hookrightarrow w_i = 40,34 \text{ kg/s}$$

$$\underline{\dot{Q}_{\text{cal}}} = w_i (h_1 - h_7) = 107066 \text{ kW} = \underline{\underline{107,07 \text{ MW}}}$$



$$A_{\text{con}} = \dot{Q}_{\text{con}} \left( 1 - \frac{T_o}{\bar{T}_{34}} \right)$$

$\bar{T}_{34} = T_4$  dado que el punto 3 es vapor húmedo  $\rightarrow \bar{T}_{34} = 45,81^\circ\text{C}$

$$\dot{Q}_{\text{con}} = w_i (1-\alpha)(h_3 - h_4) = 72056,45 \text{ kW}$$

$$\underline{\underline{A_{\text{con}}}} = 72,0565 \underbrace{\left( 1 - \frac{298}{318,81} \right)}_{6,53\%} = \underline{\underline{4,7 \text{ MW}}}$$

El calor cedido en el condensador tiene baja exergía.

La eficiencia exergética se puede calcular de varias formas:

$$\underline{\varphi_{\text{planta}}} = \frac{\dot{W}}{\dot{W}_{\text{cawt}}} = \underline{\underline{39,29\%}}$$

$$\eta = \frac{35}{107,07} = 32,69\% \quad \uparrow$$

$$\eta_{\text{cawt}} = 1 - \frac{298}{1773} = 83,19\% \quad \uparrow$$

También:

$$\underline{\varphi_{\text{planta}}} = \frac{\dot{W}_{\text{neto}}}{\dot{W}_{\text{neto}} + \dot{I}_{\text{tot}}} = \frac{35}{35 + 54,06} = \underline{\underline{39,3\%}}$$

$$\dot{S}_{\text{gen}}^{\text{tot}} = \frac{dS_u}{dt} = \frac{-\dot{Q}_{\text{cal}}}{T_c} + \frac{\dot{Q}_{\text{con}}}{T_o} =$$

$$= \frac{-107,07}{1773} + \frac{72,05645}{298} = 0,181411 \frac{\text{MW}}{\text{K}}$$

$$\dot{I}_{\text{tot}} = 298 \times 0,181411 = 54,06 \text{ MW}$$

## TERMODINÁMICA

Nombre \_\_\_\_\_ Grupo \_\_\_\_\_

### Problema – 2 (5 puntos)

**No está permitido el empleo de calculadoras programables ni la consulta de libros, apuntes o formularios. Los teléfonos móviles y relojes “smartwatch” deberán permanecer apagados y fuera del alcance del alumno.**

Un compresor de simple etapa y doble efecto refrigerado por agua ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $C = 4,18 \text{ kJ/kg-K}$ ) aspira un caudal de aire ( $R = 287 \text{ J/kg-K}$ ;  $\gamma = 1,4$ ), en condiciones de la entrada ( $25^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ bar}$ ) de  $3000 \text{ dm}^3/\text{min}$ . El espacio perjudicial es del 1,5% y las pérdidas de presión a la entrada y la salida son de  $5 \text{ kPa}$  y  $15 \text{ kPa}$ , respectivamente. El diámetro del vástago es de  $43 \text{ mm}$ , y la carrera de  $150 \text{ mm}$ . El régimen de giro es de  $680 \text{ rpm}$ , y la presión de salida de  $7,2 \text{ barg}$ . El proceso de compresión se asume internamente reversible, con un exponente politrópico de  $1,25$ . El rendimiento mecánico es del  $82\%$ . El agua de refrigeración entra al compresor a  $45^\circ\text{C}$  y sale a  $60^\circ\text{C}$ .

Se pide:

- Diámetro del pistón
- Potencia de accionamiento

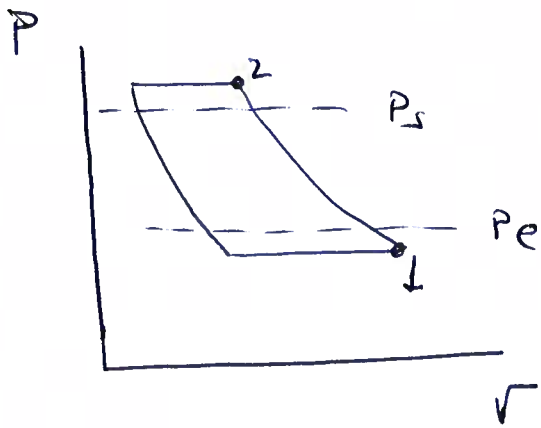
Se quiere aprovechar el calor retirado por el agua de refrigeración como fuente para una bomba de calor. Dicha bomba ha de suministrar calor a un foco a  $100^\circ\text{C}$ .

Se pide:

- Mínimo trabajo consumido por dicha bomba de calor

Formulario:

COMPRESORES	
$\eta_{vi} = 1 - \alpha \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} - 1 \right]$	
$w_i^{ad} = C_p \cdot T_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$	$w_i^{ref} = R \cdot T_1 \cdot \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$



- double effects
- simple etape
- aque }  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$   
 $c = 4,18 \text{ kJ/kg-K}$
- airo }  $R = 0,287 \text{ kJ/kg-K}$   
 $\gamma = 1,4$

$$e \begin{cases} 25^\circ\text{C} \\ 1 \text{ bar} \\ \dot{V}_e = 3000 \text{ m}^3/\text{min} \end{cases}$$

$$\alpha = 0,015$$

$$\Delta P_e = 0,05 \text{ bar}$$

$$\Delta P_s = 0,15 \text{ bar}$$

$$D_v = 43 \text{ mm}$$

$$L = 150 \text{ mm}$$

$$N = 680 \text{ rpm}$$

$$n = 1,25$$

$$P_s = 7,2 + 1 = 8,2 \text{ bara}$$

$$l_m = 0,82$$

$$T_{ew} = 45^\circ\text{C}; T_{sw} = 60^\circ\text{C}$$

$$l_{vi} = 1 - \alpha \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/n} - 1 \right] = 0,9296$$

$$P_2 = P_s + \Delta P_s = 8,35 \text{ bar}$$

$$P_1 = P_e - \Delta P_e = 0,95 \text{ bar}$$

$$0,9296 = \frac{\frac{3000}{60} \times \frac{100}{0,287 \times 298}}{\frac{95}{0,287 \times 298} \times V_T \times \frac{680}{60}}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow V_T &= 4995,4 \text{ cm}^3 = \frac{\pi D^2}{4} L + \\ &+ \left( \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi D_j^2}{4} \right) L = \end{aligned}$$



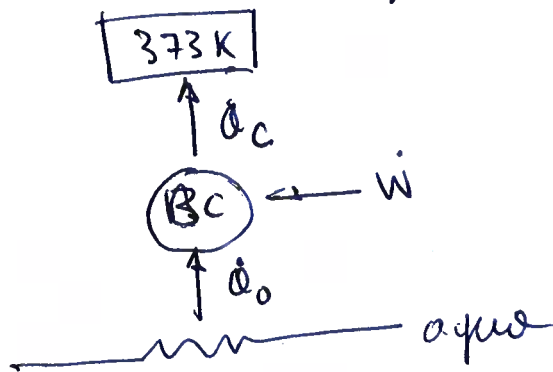
$$= \frac{\pi D^2}{4} L \left( 1 + 1 - \left( \frac{D_v}{D} \right)^2 \right) \rightarrow \underline{\underline{D = 148.75 \text{ mm}}}$$

$$\dot{W}_a = \frac{\dot{W}_i}{\eta_m}$$

$$\dot{W}_i = \dot{m} R T_1 \left( \frac{n}{n-1} \right) \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] =$$

$$= 5.85 \times 10^{-2} \text{ kg/s} \times 232.85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 13.62 \text{ kW}$$

$$\underline{\underline{\dot{W}_a = \frac{13.62}{0.82} = 16.6 \text{ kW}}}$$



$$\dot{m} h_e + \dot{W}_a = \dot{m} h_s + \dot{Q}_0$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} c_p (T_e - T_s) + \dot{W}_a$$

$T_s = T_e$  (proceso isentálpico en la  
volumen)

$$T_s + 273 = 298 \left( \frac{8.35}{0.95} \right)^{\frac{1.25-1}{1.25}} \Rightarrow T_s = 187.27^\circ \text{C}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_0 &= 5.85 \times 10^{-2} \times 1.005 (25 - 187.27) + 16.6 = \\ &= 7.06 \text{ kW} \end{aligned}$$

Para que la potencia de accionamiento de ese bombe sea mínima el COP debe ser el de Carnot:

$$COP_{m\acute{o}x} = \frac{873}{373 - 325,44} = 7,8431$$

$$\bar{T}_w = \frac{60 - 45}{L \left( \frac{60 + 273}{45 + 273} \right)} = 325,44 \text{ K}$$

$$7,8431 = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_0}{\dot{W}} = 1 + \frac{7,06}{\dot{W}}$$

$$\underline{\underline{\dot{W} = 1,03 \text{ KW}}}$$