



Universidad Simón Bolívar  
 Departamento de Termodinámica y  
 Fenómenos de Transferencia  
 Termodinámica II (TF-2123)  
 Profesores: Figueira, Derjani-Bayeh, Stammitti

Nombre: \_\_\_\_\_

Carné: \_\_\_\_\_

Parcial 1 (25 %), Ene-Mar 2007

### Problema 1 (13 pts)

Una planta de potencia opera en un ciclo Rankine de Vapor. El vapor que sale de la caldera entra a la turbina de alta presión a 15 MPa y se expande hasta 4 MPa. De esta corriente se separa una fracción  $y$ , que es enviada a un regenerador cerrado. El vapor restante es recalentado a 600 °C e ingresado a la turbina de baja presión. La fracción de vapor desviada al regenerador se condensa y es retornada al condensador, el cual opera a 50 kPa. Debido a un accidente en la planta, se dañó la protección térmica de la turbina de alta presión, lo que ocasiona una pérdida de calor estimada en 553,2 kW, siendo ahora la temperatura de salida de esta turbina es de 400 °C. La bomba también fue dañada y debió reemplazarse por una con 90 % de eficiencia isentrópica. En el recalentador ahora se registra un consumo de 3025,467 kW de calor. Para retirar el calor del condensador se utiliza agua proveniente de un río (5°C; 100kPa), pero por restricciones ambientales no se permite que tenga un incremento de temperatura mayor a 20°C para poder retornarla al ambiente.

- Dibuje el diagrama del ciclo y el diagrama  $T-s$  (incluya los equipos que considere necesarios) (2 pts)

Calcule:

- Eficiencia isentrópica de la turbina de alta presión (2 pts)
- La fracción  $y$  desviada al regenerador (2 pt)
- La tasa de producción de vapor a la salida de la caldera (2 pt)
- Potencia neta del ciclo (2 pt)
- Eficiencia de segunda ley del ciclo (2 pt)
- Flujo másico de agua de enfriamiento para el condensador (1 pt)

### Problema 2 (12 pts)

Se tiene un motor de cuatro tiempos de 6 cilindros en línea con un calibre de 91 mm y una carrera de 102 mm, al que se alimenta una mezcla de aire - combustible a 25 °C, opera entre las presiones de 100 kPa y 6 MPa y tiene una temperatura máxima admisible de 2000 K. Dicho motor se puede modelar mediante un ciclo dual con una relación de corte de admisión de 1,5.

- Dibuje el diagrama  $P-v$  (1 pt)

Calcule, usando las suposiciones de aire frío estándar:

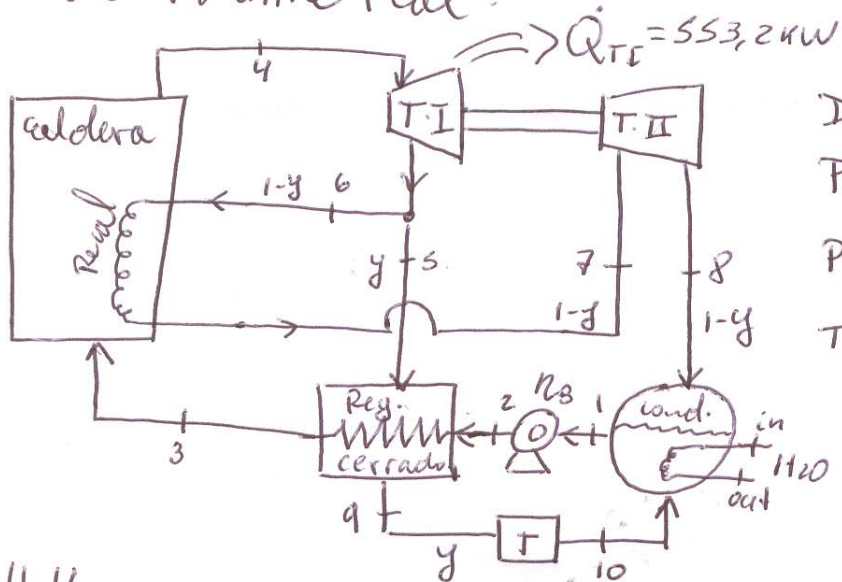
- Relación de compresión y relación de presión (La relación de presión,  $r_p$ , es la razón entre las presiones después y antes de la combustión) (2pts)
- Eficiencia térmica y de segunda ley del ciclo (3pts)
- Masa contenida en cada cilindro (2 pts)
- Potencia del motor, en hp, si este gira a 3500 rpm (1 pt)
- La presión media efectiva (1 pt)
- El trabajo reversible que se podría extraer durante el proceso de combustión (2 pts)

**NOTA:** Recuerde indicar todas sus suposiciones aplicables en cada equipo y proceso.

# Ciclo Rankine Real:

CLAVE

Aurelio Stammitti S.  
31/01/2007



Datos Corrientes:

$$P_4 = 15 \text{ MPa};$$

$$P_5 = 4 \text{ MPa}; T_5 = 400^\circ\text{C}$$

$$T_7 = 600^\circ\text{C}$$

$$P_8 = P_1 = 50 \text{ kPa}$$

Agua enfriamiento

$$T_{in} = 5^\circ\text{C}$$

$$T_{out} = 25^\circ\text{C}$$

Datos Equipos:

$$\text{Bomba } \eta_{isent, B} = 90\%$$

T.II: Ideal.

T.I:  $\dot{Q}_{T.I} = 553,2 \text{ kW}$  Perdidos.

Real:  $\dot{Q}_{Real} = 3025,467 \text{ kW}$ .

Hallar  $y$ ;  $\dot{m}$ ;  $\eta_{isent, T.I}$ ;  $\dot{W}_{neto}$ ;  
 $\eta_T$ ,  $\eta_{II}$  ciclo.  $\dot{m}_{H_2O}$

Solución:

Definición de corrientes:  $T_4 = T_7$  suposición de  $T_{max}$  en Caldera

$$P_5 = P_6 = P_7 = P_9 = 4 \text{ MPa}. \quad T_5 = T_6 \text{ Nodo Separación.}$$

Corrientes Definidos:  $k$ :

Corriente 1:  $P_1 = 50 \text{ kPa}$ , Lq sat:

$$T_1 = T_{sat} = 81,33^\circ\text{C}; \quad v_1 = v_f = 0,001030 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; \quad h_1 = h_f = 340,47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; \quad s_1 = s_f = 1,0910 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Corriente 4:  $T_4 = T_7 = 600^\circ\text{C}$ ;  $P_4 = 15 \text{ MPa}$ . V.S.C.

$$v_4 = 0,024911 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; \quad h_4 = 3582,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; \quad s_4 = 6,6775 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Corriente 5, 6:  $P_5 = P_6 = 4 \text{ MPa}$ ;  $T_5 = T_6 = 400^\circ\text{C}$ . V.S.C.

$$v_5 = v_6 = 0,07341 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; \quad h_5 = h_6 = 3213,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; \quad s_5 = s_6 = 6,7689 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Corriente 7:  $P_7 = 4 \text{ MPa}$ ;  $T_7 = 600^\circ\text{C}$ , V.S.C.

$$v_7 = 0,09885 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; \quad h_7 = 3679,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; \quad s_7 = 7,3688 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Corriente 9: Por la Trampa de Vapor: Lig. Sat a  $P_9 = 4 \text{ MPa}$ .

$$T_9 = T_{\text{sat}} = 250,40^\circ\text{C}; v_g = v_f = 0,001252 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; h_g = h_f = 1087,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$s_g = s_f = 2,7963 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Corriente 10: Por la Trampa de Vapor: Isentalpica.

$$P_{10} = P_i = 50 \text{ kPa}; h_{10} = h_g = 1087,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ M.L.V.}$$

Pero en este punto, todavia no conozco la calidad  $x$ .

Balances en Equipos: Empezar por el más facil.

Turbina T. II: Ideal: Isentropica. Defino corriente 8.

Corriente 8:  $P_8 = 50 \text{ kPa}; s_7 = s_8 = 7,3688 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \text{ M.L.V.}$

$$v_f = 0,001030 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad h_f = 340,47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_f = 1,0910 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$v_g = 3,240 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad h_g = 2645,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_g = 7,5939 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$x_8^{\text{calidad}} = \frac{s_g - s_f}{s_g - s_f} \Rightarrow x_8^{\text{cal}} = 0,96538 \quad \text{o} \quad x_8^{\text{cal}} = 96,538\%$$

$$T_8 = 81,33^\circ\text{C}; v_8 = 3,12787 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; h_8 = 2566,086 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Trabajo Turbina T. II:

$$w_{T.II} = h_7 - h_8 \Rightarrow w_{T.II} = 1108,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Referido a la masa que entra a este equipo.

Bomba:  $\eta_{\text{isent},B} = 90\%$  Dato.

Ojo. Unidades

$$\eta_{\text{isent},B} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{v_1 \cdot (P_2 - P_1)}{h_2 - h_1} \Rightarrow h_2 = h_1 + \frac{v_1}{\eta_{\text{isent},B}} \cdot (P_2 - P_1)$$

$$h_2 = 357,5794 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$w_{\text{Bomba}} = h_2 - h_1$$

$$w_{\text{Bomba}} = 17,1094 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Corriente 2: Real  $P_2 = 15 \text{ MPa}$ ;  $h_2 = 357,5799 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ . Liq. Comp.

$T_2 = 82,59^\circ\text{C}$ ;  $v_2 = 0,0010240 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ ;  $s_2 = 1,0952 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

Regenerador Cerrado: Supongo Ideal a falta de otra Información

Corriente 3:  $P_3 = 15 \text{ MPa}$ ;  $T_3 = T_9 = 250,40^\circ\text{C}$ . (suposición).

Liq. comp:  $v_3 = 0,001234 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ ;  $h_3 = 1088,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ;  $s_3 = 2,7709 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

Balance Energía Regenerador: Adiabático Ideal:

$\dot{m} \cdot h_2 + \dot{m} \cdot y \cdot h_5 = \dot{m} \cdot h_3 + \dot{m} \cdot y \cdot h_9 \Rightarrow$

$h_3 - h_2 = y \cdot (h_5 - h_9) \Rightarrow y = \frac{h_3 - h_2}{h_5 - h_9} \quad y = 0,34357$

Recalentador:  $\dot{Q}_{\text{Recal}} = 3025,467 \text{ kW}$  Dato

$\dot{Q}_{\text{Recal}} = \dot{m}(1-y) \cdot (h_7 - h_6) \Rightarrow \dot{m} = 10 \text{ kg vapor}$

Caldera:

$q_{\text{cald}} = h_4 - h_3$ ;  $q_{\text{cald}} = 2494,21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\dot{Q}_{\text{cald}} = \dot{m} q_{\text{cald}} \Rightarrow \dot{Q}_{\text{cald}} = 24,9421 \text{ MW}$

Referido a la masa total del ciclo

Condensador: Lado Interno:

$\dot{m}(1-y) \cdot h_8 + \dot{m} \cdot y \cdot h_{10} - \dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{m} \cdot h_1 \Rightarrow$

$q_{\text{cond}} = (1-y)h_8 + y \cdot h_{10} - h_1$

$q_{\text{cond}} = 1717,546 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\dot{Q}_{\text{cond}} = 17,17546 \text{ MW}$

Referido a la masa total del ciclo.

Turbina T.I:  $\dot{Q}_{T.I} = 553,2 \text{ kW}$  Perdido.

$$q_{T.I} = \frac{\dot{Q}_{T.I}}{\dot{m}} \Rightarrow \underline{q_{T.I} = 55,32 \text{ kJ/kg}}$$

Balanza de Energía:  $h_4 - h_5 = q_{T.I}^{\text{perdido}} + w_{T.I}^{\text{sale}}$

$$\Rightarrow \underline{w_{T.I} = 313,48 \text{ kJ/kg}}$$

Para la  $\eta_{\text{Isentrópica}}$  Necesito Determinar la corriente s. caso Isentrópico.

**CORREGIDO**

8:36, 06/02/2007

Corriente s: Isentrópica  $P_s = 4 \text{ MPa}$ ;  $s_5 = s_4 = 6,6775 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

$$T_{s_5} = 375,55 \text{ }^\circ\text{C}; v_{s_5} = 0,06905 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{ i } h_{s_5} = 3154,278 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{Isent.T.I}} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{s_5}} \Rightarrow \underline{\eta_{\text{Isent.T.I}} = 86,1637\%}$$

Relación  $\frac{q_{T.I}}{w_{T.I}} = 17,647\%$  Relación de calor Perdido

Potencia Neta del ciclo:

$$\underline{w_{\text{neto}} = w_{T.I} + (1-y) \cdot w_{T.II} - w_{\text{Bomba}}} \quad \underline{\dot{W}_{\text{neto}} = \dot{m} \cdot w_{\text{neto}}}$$

$$\underline{w_{\text{neto}} = 1023,90 \text{ kJ/kg}} \quad \underline{\dot{W}_{\text{neto}} = 10,239 \text{ MW}}$$

Calor Total de Entrada:

$$\underline{\dot{Q}_{\text{entra}} = \dot{m} \cdot q_{\text{cald}} + \dot{m} \cdot (1-y) \cdot q_{\text{recal}}}$$

$$\underline{q_{\text{entra}} = q_{\text{cald}} + (1-y) \cdot q_{\text{recal}}}$$

$$q_{\text{entra}} = 2796,757 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\underline{\dot{Q}_{\text{entra}} = 27,9676 \text{ MW}}$$

### Eficiencias del ciclo:

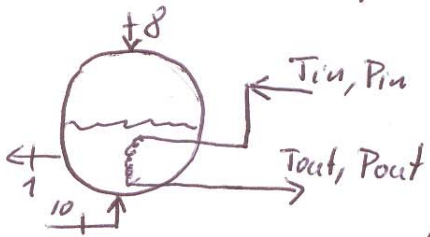
- Eficiencia Térmica:  $\eta_{T\text{ciclo}} = \frac{\dot{W}_{\text{neto}}}{\dot{Q}_{\text{entra}}} \Rightarrow \eta_{T\text{ciclo}} = 36,61\%$  Acceptable

- Eficiencia de Carnot:  $T_L = T_1 = 81,33^\circ\text{C} = 354,48\text{K}$   
 $T_H = T_4 = 600^\circ\text{C} = 873,15\text{K}$   
 $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \Rightarrow \eta_{\text{Carnot}} = 59,40\%$

- Eficiencia 2<sup>a</sup> Ley:  $\eta_{II} = \frac{\eta_T}{\eta_{\text{Carnot}}} \Rightarrow \eta_{II} = 61,63\%$

### Agua de Enfriamiento Condensador:

$\dot{q}_{\text{cond}} = 1717,546 \frac{\text{kJ}}{\text{kg vapor}}$  i  $\dot{Q}_{\text{cond}} = 17,17546 \text{ MW total.}$



$P_{in} = P_{out} = 100 \text{ kPa.}$

$T_{in} = 5^\circ\text{C}; T_{out} = 25^\circ\text{C.}$

Líquidos comprimidos, pero no aparecen en tabla..

Corriente in:  $T_{in} = 5^\circ\text{C}; P_{in} = 100 \text{ kPa}$

$P_{\text{sat}@5^\circ\text{C}} = 0,8721 \text{ kPa}; v_f = 0,001 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; h_f = 20,98 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Aproximación:  $h(P,T) \approx h_f(T) + v_f(T) \cdot (P - P_{\text{sat}}(T))$  líquido comp.

$h_{in} = 21,079 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Corriente Out:  $T_{out} = 25^\circ\text{C}; P_{out} = 100 \text{ kPa.}$

$P_{\text{sat}@25^\circ\text{C}} = 3,1691 \text{ kPa}; v_f = 0,001003 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; h_f = 104,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_{out} = 104,9697 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

(6)

$$h_{out} - h_{in} = 83,8906 \frac{kJ}{kg_{H_2O}} \quad \left| \begin{array}{l} \text{Esta es la Energía} \\ \text{que Retira 1kg. de} \\ \text{H}_2\text{O de Enfriamiento.} \end{array} \right.$$

Balace Condensador: lado Externo:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} \cdot q_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (h_{out} - h_{in}) = 0$$

$$\Gamma_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{m}_{\text{vapor}}} = \frac{q_{\text{cond}}}{(h_{out} - h_{in})} \quad \left| \begin{array}{l} \text{Relación de Masas.} \\ \text{Agua Enfriamiento o} \\ \text{Vapor en el ciclo.} \end{array} \right.$$

$$\Gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 20,47 \frac{\text{Kg H}_2\text{O Enf.}}{\text{Kg Vapor ciclo}} \quad \left| \quad \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \dot{m}_{\text{vapor}} \cdot \Gamma_{\text{H}_2\text{O}} \right.$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 204,7 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{sg}} \quad \left| \begin{array}{l} \text{Flujo Requerido de} \\ \text{Agua de Enfriamiento.} \end{array} \right.$$

FIN.

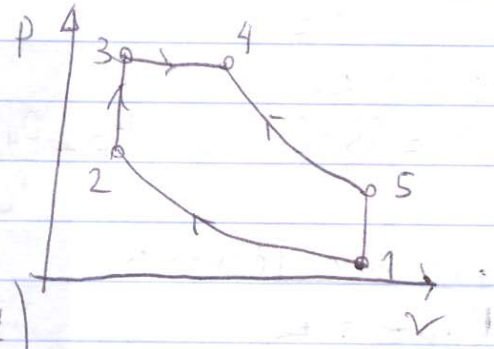
# Solución Problema 2

Suposición Aire Frio Estándar:  $C_p = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  ;  $C_v = 0,718 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$   
 $R = 0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  ;  $k = 1,4$

Se tiene como datos:  $T_1 = 25^\circ\text{C} = 298,1 \text{ K}$  ;  $T_4 = 2000 \text{ K}$   
 $P_1 = 100 \text{ kPa}$  ;  $P_4 = 6 \text{ MPa} = 6000 \text{ kPa}$

## Estado 1

$$\left. \begin{matrix} T_1 = 298,15 \text{ K} \\ P_1 = 100 \text{ kPa} \end{matrix} \right\} v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = 0,8557 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$



## Estado 4

$$\left. \begin{matrix} T_4 = 2000 \text{ K} \\ P_4 = 6 \text{ MPa} = 6000 \text{ kPa} \end{matrix} \right\} v_4 = 0,09567 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \left( v_4 = \frac{RT_4}{P_4} \right)$$

## Estado 3

$$P_3 = P_4 = 6000 \text{ kPa} \quad r_c = \frac{v_4}{v_3} \Rightarrow v_3 = \frac{v_4}{r_c} \Rightarrow v_3 = 0,06378 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$T_3 = \frac{P_3 v_3}{R} \Rightarrow T_3 = 1333,37 \text{ K}$$

## Estado 2

$$v_2 = v_3 = 0,06378 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \Rightarrow r = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow r = 13,42$$

Proceso isentrópico (1)-(2)

$$\left( \frac{T_2}{T_1} \right) = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$



$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \Rightarrow T_2 = 842,34 \text{ K} \quad P_2 = \frac{RT_2}{v_2} \Rightarrow P_2 = 3790,39 \text{ kPa}$$

Estado 5

Proceso isentrópico (4)-(5)

$$\frac{T_5}{T_4} = \left( \frac{v_4}{v_5} \right)^{\kappa-1} = \left( \frac{v_4}{v_1} \right)^{\kappa-1} \Rightarrow T_5 = T_4 \left( \frac{v_4}{v_1} \right)^{\kappa-1} \Rightarrow T_5 = 832,55 \text{ K}$$

$$P_5 = \frac{RT_5}{v_5} \Rightarrow P_5 = 249,23 \text{ kPa}$$

Se tiene:

$$r = 13,42 \quad \text{y} \quad r_p = \frac{P_4}{P_2} = 1,583$$

Eficiencia Térmica

$$\eta_{\text{ter}} = 1 - \frac{q_L}{q_H}$$

$$q_L = u_5 - u_1 = c_v (T_5 - T_1) = 0,718 (832,55 - 298,15) = 383,699 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_H = (u_3 - u_2) + (h_4 - h_3) = c_v (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3)$$

$$q_H = 0,718 (1333,37 - 842,34) + 1,005 (2000 - 1333,37) = 1022,52 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{ter}} = 1 - \frac{383,699}{1022,52} = \underline{0,625 \text{ ó } 62,5\%}$$

$$\eta_{\text{carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{298,15}{2000} = 0,8509 \text{ ó } 85,09\%$$

$$\eta_{\pi} = \frac{\eta_{\text{ter}}}{\eta_{\text{carnot}}} = 0,734 \text{ ó } 73,4\%$$

Trabajo Neto

$$w_{\text{neto}} = q_H - q_L = 1022,52 - 383,699 = 638,821 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$PME = \frac{w_{\text{neto}}}{v_{\text{max}} - v_{\text{min}}} = \frac{w_{\text{neto}}}{v_1 - v_2} \Rightarrow PME = 806,67 \text{ kPa}$$

Masa en cada cilindro

Se conoce: Carrera:  $C_{\text{ar}} = 102 \text{ mm} = 0,102 \text{ m}$

Calibre:  $C_{\text{al}} = 91 \text{ mm} = 0,091 \text{ m}$

Volumen Desplazado:  $\Delta V = C_{\text{ar}} \times \frac{\pi (C_{\text{al}})^2}{4}$

$$\Delta V = \frac{0,102 \text{ m} (0,091 \text{ m})^2 \pi}{4} = 6,634 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Pero:  $\Delta V = V_{\text{max}} - V_{\text{min}} \Rightarrow \frac{\Delta V}{m} = \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{m} = v_{\text{max}} - v_{\text{min}} = v_1 - v_2$

$$m = \frac{\Delta V}{v_1 - v_2} = 8,377 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

Potencia en HP

Para cada ciclo se tiene:  $w_{\text{neto}} = w_{\text{neto}} \cdot m = 0,535 \text{ kJ}$

ciclo-cilindro

$$\dot{w}_{\text{neto}} = 0,535 \frac{\text{kJ}}{\text{ciclo-cilindro}} \cdot 6 \text{ cilindros} \cdot \frac{1 \text{ ciclo}}{2 \text{ rev}} \cdot \frac{3600 \text{ rev}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 96,32 \text{ kW}$$

$$\dot{w}_{\text{neto}} = 129,175 \text{ hp}$$

Trabajo Reversible:

Balancede Exergía

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) q_k - \int W - P_0 (V_{\text{fin}} - V_{\text{ini}}) - \overset{0}{x_{\text{pes}}} = q_{\text{ini}} - q_{\text{fin}}$$

Para el proceso de adición de calor (2)-(4)

$$q_{in} \left(1 - \frac{T_0}{T_4}\right) - [w_{rev} - P_0(v_4 - v_2)] = d_4 - d_2$$

$$w_{rev} = \left(1 - \frac{T_0}{T_4}\right) q_{in} + P_0(v_4 - v_2) - (d_4 - d_2)$$

$$= \left(1 - \frac{T_0}{T_4}\right) q_{in} + P_0(v_4 - v_2) - [u_4 - u_2 + P_0(v_4 - v_2) - T_0(s_4 - s_2)]$$

$$= \left(1 - \frac{T_0}{T_4}\right) q_{in} - C_v(T_4 - T_2) + T_0 \left[ c_p \ln \frac{T_4}{T_2} - R \ln \frac{P_4}{P_2} \right]$$

$$= \left(1 - \frac{298,15}{2000}\right) \cdot 1022,52 - 0,718(2000 - 842,34)$$

$$+ 298,15 \left[ 1,005 \ln \frac{2000}{842,34} - 0,287 \ln \frac{6000}{3190,39} \right]$$

$w_{rev} = 258,69 \frac{kJ}{kg}$