

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

Problema – 1 (60 %)

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.

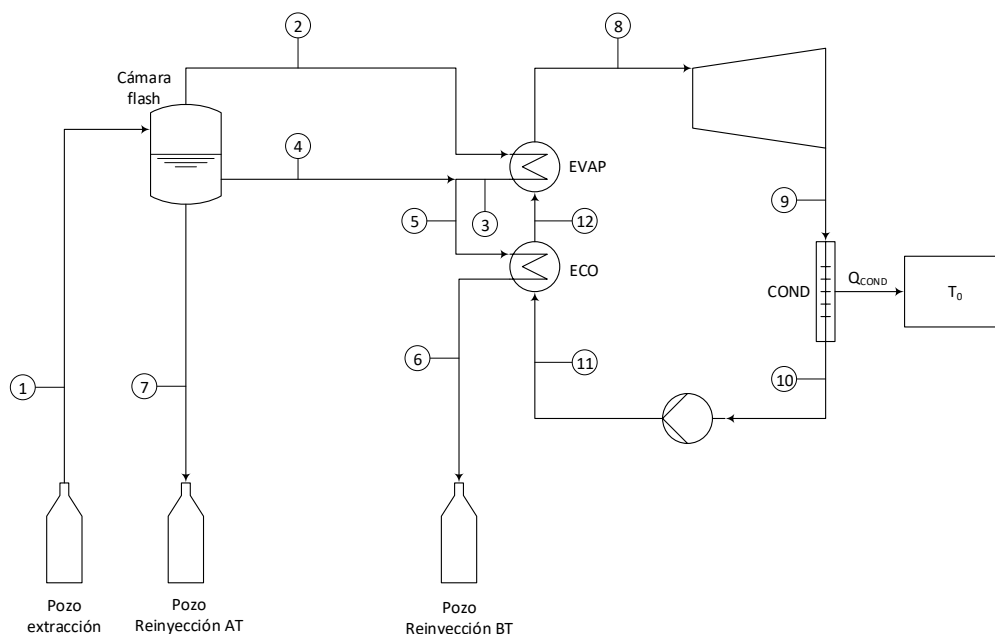
La figura adjunta representa el esquema de la planta geotérmica de Pico Vermelho en Las Azores. El fluido geotérmico (con propiedades asimilables al agua) sale como vapor húmedo a 6,5 bar del pozo de extracción (1) para dirigirse a una cámara flash, donde se separa el vapor saturado (2) del líquido saturado (4 y 7) sin perder presión. El vapor se dirige al intercambiador EVAP, donde cede calor al agua del ciclo Rankine, saliendo del mismo (3) como líquido saturado, para mezclarse a presión constante con el líquido saturado que procede de la cámara flash (4) y dirigirse al intercambiador ECO, donde también cede calor al agua del ciclo Rankine. A la salida de ECO, el fluido geotérmico (6) se encuentra a 87 °C y es reinyectado en el yacimiento a través del pozo BT.

En el ciclo Rankine, el vapor entra a la turbina (8) como saturado a 5 bar, expandiéndose hasta 6 kPa (9). La turbina presenta un rendimiento isentrópico del 83%. El condensador cede calor al ambiente (foco térmico a $T_0 = 22\text{ °C}$), saliendo el agua del mismo (10) como líquido saturado, para dirigirse a una bomba que se asume ideal (rendimiento isentrópico 100%). Tras la bomba, el agua se dirige al intercambiador ECO, del que sale (12) como líquido saturado, pasando luego al intercambiador EVAP.

El flujo másico retirado del pozo de extracción (1) es de 100 kg/s y el que entra en la turbina (8) de 21 kg/s. Se desprecian las pérdidas de presión en intercambiadores y conductos. Tómese el estado muerto a 22 °C y 1 bar.

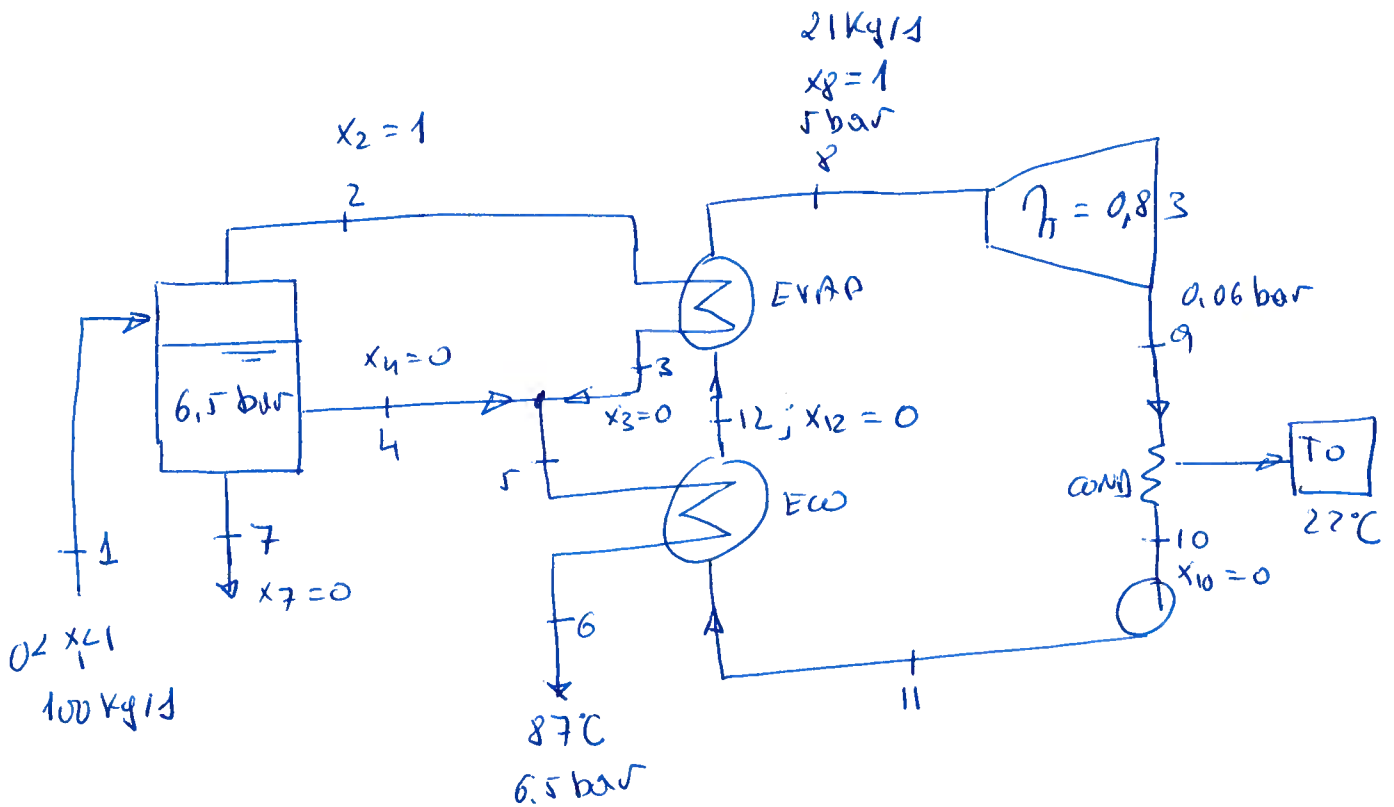
Se pide:

- Potencia neta de la planta [2 puntos]
- Flujo de fluido geotérmico (6) que se reinyecta por el pozo BT [1 punto]
- Flujo de fluido geotérmico (2) que sale de la cámara flash [1 punto]
- Título del vapor a la salida del pozo de extracción (1) [2 puntos]
- Máxima potencia neta (trabajo reversible) que podría alcanzar la planta [2 puntos]
- Diagrama de Sankey (exergías) cualitativo de la instalación, detallando todos los componentes, sin valores numéricos [2 puntos]



Tablas del agua saturada (líquido – vapor)

p [bar]	T [°C]	v _f [m³/kg]	v _g [m³/kg]	h _f [kJ/kg]	h _g [kJ/kg]	s _f [kJ/kg-K]	s _g [kJ/kg-K]
0,02	17,50	0,00100136	66,99	73,43	2532,9	0,260577	8,72263
0,04	28,96	0,00100411	34,79	121,39	2553,7	0,422401	8,47337
0,06	36,16	0,00100646	23,73	151,48	2566,6	0,520819	8,32903
0,08	41,51	0,00100849	18,10	173,84	2576,2	0,592489	8,22731
0,1	45,81	0,00101028	14,67	191,80	2583,9	0,649191	8,14881
0,15	53,97	0,00101405	10,02	225,94	2598,3	0,754859	8,00708
0,2	60,06	0,00101716	7,648	251,42	2608,9	0,832015	7,90723
0,25	64,96	0,00101985	6,203	271,96	2617,4	0,893187	7,83018
0,3	69,09	0,00102224	5,229	289,27	2624,6	0,944067	7,76749
0,35	72,68	0,00102440	4,525	304,30	2630,7	0,987739	7,71466
0,4	75,86	0,00102638	3,993	317,62	2636,1	1,02607	7,66903
0,45	78,71	0,00102822	3,576	329,62	2640,9	1,06028	7,62888
0,5	81,32	0,00102993	3,240	340,54	2645,2	1,09120	7,59304
0,55	83,71	0,00103155	2,964	350,59	2649,2	1,11944	7,56068
0,6	85,93	0,00103307	2,732	359,91	2652,9	1,14545	7,53118
0,65	87,99	0,00103452	2,535	368,60	2656,3	1,16957	7,50409
0,7	89,93	0,00103591	2,365	376,75	2659,4	1,19208	7,47905
0,75	91,76	0,00103723	2,217	384,44	2662,4	1,21318	7,45575
0,8	93,49	0,00103850	2,087	391,71	2665,2	1,23305	7,43399
0,85	95,13	0,00103973	1,972	398,62	2667,8	1,25183	7,41357
0,9	96,69	0,00104091	1,870	405,20	2670,3	1,26965	7,39433
0,95	98,18	0,00104205	1,777	411,49	2672,7	1,28659	7,37614
1	99,61	0,00104316	1,694	417,51	2675,0	1,30276	7,35891
1,5	111,35	0,00105273	1,159	467,13	2693,1	1,43369	7,22304
2	120,21	0,00106052	0,8858	504,71	2706,3	1,53018	7,12695
2,5	127,41	0,00106722	0,7187	535,35	2716,5	1,60723	7,05250
3	133,52	0,00107317	0,6058	561,43	2724,9	1,67172	6,99167
3,5	138,86	0,00107857	0,5242	584,26	2732,0	1,72737	6,94018
4	143,61	0,00108355	0,4624	604,66	2738,1	1,77646	6,89552
4,5	147,90	0,00108819	0,4139	623,14	2743,4	1,82045	6,85606
5	151,83	0,00109255	0,3748	640,09	2748,1	1,86038	6,82069
5,5	155,46	0,00109667	0,3426	655,76	2752,3	1,89699	6,78862
6	158,83	0,00110060	0,3156	670,38	2756,2	1,93083	6,75927
6,5	161,98	0,00110435	0,2926	684,08	2759,6	1,96231	6,73221
7	164,95	0,00110796	0,2728	697,00	2762,8	1,99177	6,70708



Potencia neto plante

$$h_g = h_g(5 \text{ bar}) = 2748,1 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q = 6.82069 \text{ kJ/kg-K}$$

$$h_{95} = 151,48 + 0,8068(2566,6 - 151,48) = 2100,06 \text{ KJ/kg}$$

$$\Delta q_s = \Delta p = 0.520819 + x_{q_s} (8.32903 - 0.520819) \rightarrow x_{q_s} = 0.8068$$

$$0.83 = \frac{2748.1 - h_g}{2748.1 - 2100.06} \rightarrow h_g = 2210.23 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10} = h_f(0.06 \text{ bar}) = 151.48 \text{ kJ/kg}$$

$$\rho_{10} = 0.00100646 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\theta_{10} = 0.00100646 \text{ m}^{-1} \text{ J}$$

$$h_{11} = 151.48 + 0.00100646 (5 - 0.06) 100 = 151.98 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{12} = 640.09 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{neto}} = 21 \left[(2748.1 - 2210.23) - (151.98 - 151.48) \right] =$$

$$= \underline{\underline{11284,77 \text{ kW}}}$$

Flujo \dot{w}_6

$$\dot{w}_2 h_f (6,5 \text{ bar}) + \dot{w}_u h_f (6,5 \text{ bar}) = (\dot{w}_2 + \dot{w}_u) h_f$$

$$(\dot{w}_2 + \dot{w}_u) h_f (6,5 \text{ bar}) = (\dot{w}_2 + \dot{w}_u) h_f$$

$$\rightarrow h_f = h_f (6,5 \text{ bar})$$

$$\dot{w}_6 (h_f - h_6) = \dot{w}_v (h_{12} - h_{11})$$

$$\dot{w}_6 = \frac{21 (640,09 - 151,98)}{684,08 - 364,42} = \underline{\underline{32,07 \text{ kg/s}}}$$

$$h_6 \approx h_f (87^\circ\text{C}) = 364,42 \text{ kJ/kg}$$

Flujo \dot{w}_2

$$\dot{w}_2 (h_2 - h_3) = \dot{w}_v (h_8 - h_{12})$$

$$\dot{w}_2 = \frac{\dot{w}_v (h_8 - h_{12})}{h_g (6,5 \text{ bar}) - h_f (6,5 \text{ bar})} =$$

$$= \frac{21 (2748,1 - 640,09)}{2759,6 - 684,08} = \underline{\underline{21,33 \text{ kg/s}}}$$

Titulo x1

$$h_4 = h_7$$

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) h_4$$

$$h_1 = \frac{21,3287 \cdot 2759,6 + (100 - 21,3287) \cdot 684,08}{100} = 1126,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} =$$

$$= 684,08 + x_1 (2759,6 - 684,08) \rightarrow \boxed{x_1 = 0,2133}$$

Trabajo reversible

Operación 1: $\frac{ds_u}{dz} = 0 = -\dot{m}_1 \Delta_1 + \dot{m}_7 \Delta_7 + \dot{m}_6 \Delta_6 + \frac{\dot{q}_{\text{cond}}^*}{T_0}$

$$\begin{aligned} \hookrightarrow \dot{q}_{\text{cond}}^* &\rightarrow \dot{m}_1 h_1 = \\ &= \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_6 h_6 + \underline{\dot{W}_{\text{rev}}} + \dot{q}_{\text{cond}}^* \end{aligned}$$

Operación 2: $\frac{ds_u}{dz} = \dot{S}_{\text{gen}}^{\text{tot}} = -\dot{m}_1 \Delta_1 + \dot{m}_7 \Delta_7 + \dot{m}_6 \Delta_6 + \frac{\dot{q}_{\text{cond}}}{T_0}$

$$\dot{m}_7 = 100 - 21,3287 - \dot{m}_4 = 67,9334 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_6 = 32,0667 = 21,3287 + \dot{m}_4 \rightarrow \dot{m}_4 = 10,7379 \text{ kg/s}$$

$$\Delta_1 = 1,96231 + 0,2133 (6,73221 - 1,96231) = 2,9797 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\Delta_7 = 1,96231 \text{ kJ/kg-K}$$

$$\Delta_6 \approx \Delta_1 (87^\circ\text{C}) = 1,158 \text{ kJ/kg-K}$$

$$\dot{q}_{\text{cond}} = 21 (2210,23 - 151,48) = 43233,75 \text{ kW}$$



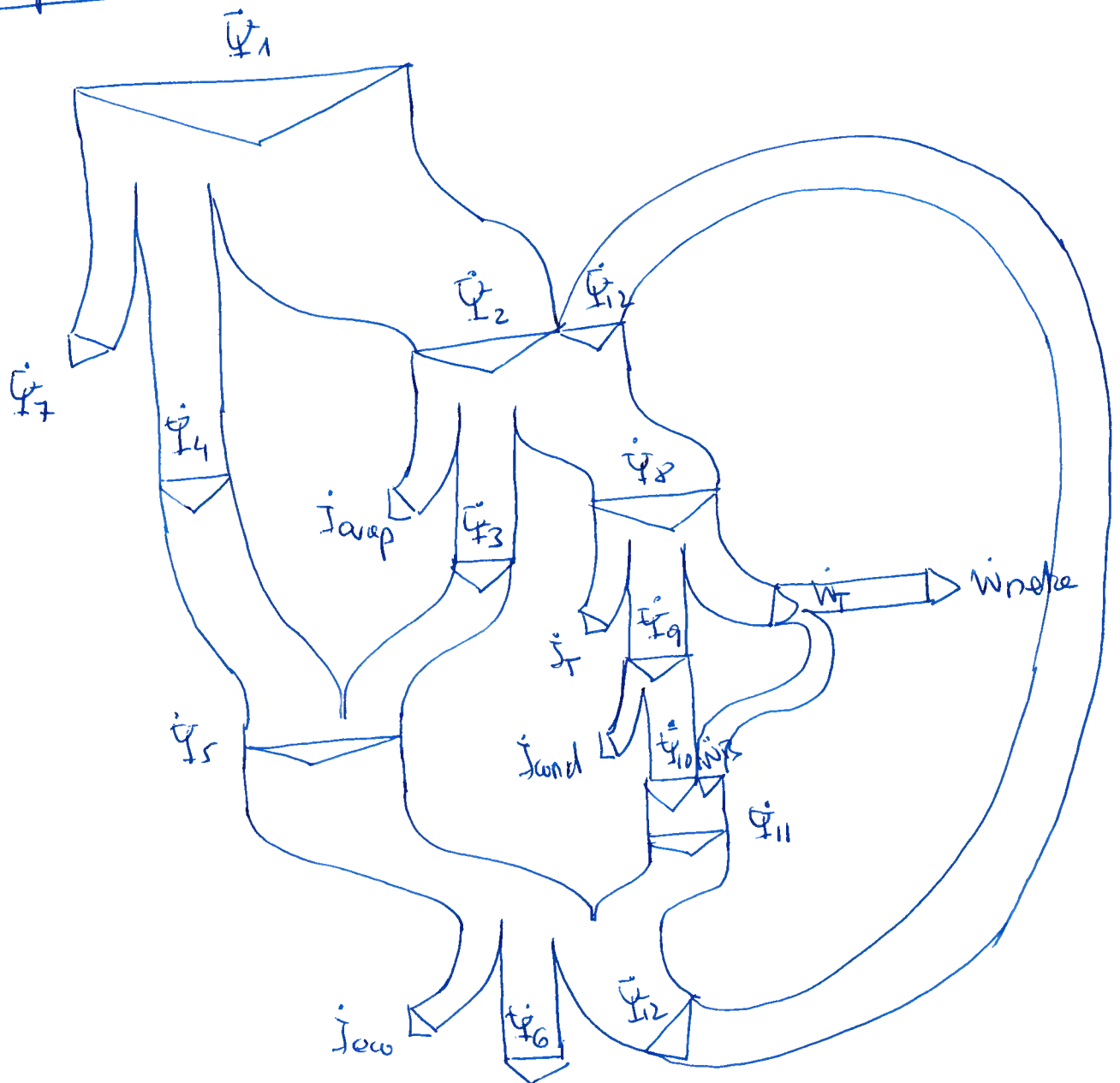
valor realmente cedido en el condensador. El \dot{q}_{cond}^* de la "operación 1" sería el cedido en el caso totalmente reversible ($\dot{q}_{\text{cond}}^* < \dot{q}_{\text{cond}}$)

$$\frac{ds_u}{dz} = -100 \times 2.9797 + 67.9334 \times 1.96231 + 32.0667 \times 1.158 + \frac{43233.75}{295} = 19.0211 \frac{\text{KJ}}{\text{K}}$$

$$\dot{I}_{TOT} = T_0 \cdot \frac{dS_u}{dz} = 5611,21 \text{ kW}$$

$$\underline{\underline{W_{rev}}} = W_{net} + J_{dot} = \underline{\underline{16895,98 \text{ kW}}}$$

Diagram Sankey



TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

Problema – 2 (40 %)

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 motor de encendido provocado de cuatro tiempos y cuatro cilindros con relación de compresión igual a 9 consume gasolina (PCI = 43,9 MJ/kg) con un dosado de 0,06 entregando una potencia efectiva de 30 kW a un régimen de 3000 rpm, siendo la presión media efectiva de 4,6 bar. El rendimiento indicado es el 44% del que presenta el ciclo de aire equivalente, siendo las condiciones del aire al inicio de la carrera de compresión de 1 bar y 300 K (tómense estas condiciones como las de referencia para el rendimiento volumétrico). El rendimiento mecánico es 85%.

Se pide:

- Cilindrada y volumen de la cámara de combustión [1 punto]
- Par efectivo [0,5 puntos]
- Rendimiento efectivo y volumétrico [4 puntos]
- Presiones medias indicada y de pérdidas mecánicas [1 punto]

Se realiza una modificación en el sistema de alimentación del motor para que consuma gas natural (PCI 39,9 MJ/kg) en vez de gasolina, pasando a tener una relación de aire/combustible másica de 18. En el punto de trabajo correspondiente al motor anterior (régimen de 3000 rpm) se observa que tanto el rendimiento volumétrico como el indicado se reducen un 5%, manteniéndose el mecánico.

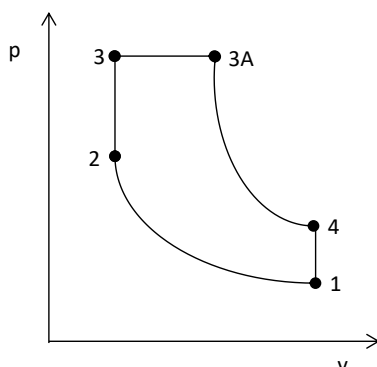
Para este motor modificado, y en ese punto de trabajo, se pide:

- Rendimiento efectivo [0,5 puntos]
- Potencia efectiva [1 punto]
- Par efectivo [0,5 puntos]
- Presiones medias efectiva, indicada y de pérdidas mecánicas [1,5 puntos]

Propiedades del aire:

- $R = 287 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- $\gamma = 1,4$

Formulario:



$$\alpha = \frac{p_3}{p_2} \quad \beta = \frac{v_{3A}}{v_3}$$

$$q_{23A} = \frac{R \cdot T_1 \cdot r^{\gamma-1}}{\gamma-1} [\alpha - 1 + \alpha \cdot \gamma \cdot (\beta - 1)]$$

$$p_{mi} = p_1 \cdot \left(\frac{r}{r-1} \right)^{\frac{r^{\gamma-1} \{1 - \alpha \cdot [1 + \gamma \cdot (\beta - 1)]\} + \alpha \cdot \beta^{\gamma} - 1}{1 - \gamma}}$$

MEP, $4T, z=4, r=9$
 gasoline $\left| \begin{array}{l} p_{c1} = 43,9 \text{ MPa/kg} \\ F = 0,06 \end{array} \right.$

$$\dot{W}_e = 30 \text{ kW}$$

$$N = 3000 \text{ rpm}$$

$$p_{me} = 4,6 \text{ bar}$$

$$\eta_i = 0,44 \quad \eta_i^{ado}$$

$$P_1 = 1 \text{ bar}; T_1 = 300 \text{ K}$$

$$460 = p_{me} = \frac{\dot{W}_e}{V_T \frac{N}{60} \cdot i} = \frac{30 \text{ KPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}}{V_T \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \cdot \frac{3000 \text{ rpm}}{60 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ giro}}{2 \text{ rev}}}$$

$$V_T = 0,0026 \text{ m}^3 = \underline{\underline{2608,6957 \text{ cm}^3}}$$

$$r=9 = \frac{V_{cc} + V_D}{V_{cc}} = 1 + \frac{V_D}{V_{cc}}$$

$$V_D = \frac{2608,6957}{4} = 652,1739 \text{ cm}^3$$

$$\rightarrow \underline{\underline{V_{cc} = 81,52 \text{ cm}^3}}$$

$$M_e = \frac{30 \text{ KJ/s}}{\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \times \frac{3000 \text{ rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}} = 0,0955 \frac{\text{kJ} \cdot \text{m}}{\text{rad}} = \underline{\underline{95,493 \text{ mN}}}$$

$$\eta_i^{ado} = \frac{p_{mi}^{ado} \times (\theta_1 - \theta_2)}{q_{23A}}$$

$$q_{23A} = \frac{\dot{m}_f P_{CI}}{\dot{m}_f + \dot{m}_a} = \frac{P_{CI}}{1 + \frac{1}{F}} = \frac{43900}{1 + \frac{1}{0.06}} =$$

$$= 2484,9052 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \frac{0.287 \times 300 \times 9^{0.4}}{0.4} \cdot [\alpha - 1]$$

adiotto $\Rightarrow R=1$

$$\alpha = 5.7937$$

$$p_{mi,ado} = 100 \text{ kPa} \cdot \left(\frac{9}{8} \right)^{\frac{9^{0.4} \{ 1 - 5.7937[1] \} + 5.7937 - 1}{-0.4}} =$$

$$= 1898,6 \text{ kPa}$$

$$v_1 - v_2 = v_1 \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right) = \frac{0.287 + 300}{100} \times \left(1 - \frac{1}{9} \right) =$$

$$= 0.7653 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\eta_i^{ado} = \frac{1898,6 \times 0.7653}{2484,9052} = 0.5848$$

$$\eta_i = 0.2573$$

$$\underline{\eta_e} = \eta_i \cdot \eta_m = 0.2573 \times 0.85 = \underline{0.2187} = \frac{30}{\dot{m}_f \cdot 43900}$$

$$\dot{m}_f = 3,1247 \text{ g/s}$$

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_f}{F} = \frac{3,1247}{0.06} = 52,0786 \text{ g/s}$$

$$\eta = \frac{0,0520786}{\left(\frac{100}{0,287 \times 300} \right) \cdot 2608,6957 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3000}{60} \times \frac{1}{2}} = \underline{\underline{68,75\%}}$$

$$\underline{\underline{p_{mi}}} = \frac{\dot{w}_i}{V_t \cdot \frac{N}{60} \cdot i} = \frac{35,295}{2608,6957 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3000}{120}} = \underline{\underline{541,19 \text{ kPa}}}$$

$$\dot{w}_i = 8,1247 \cdot 10^{-3} \times 43900 \times 0,2573 = 35,295 \text{ kW}$$

$$p_{mpm} = 541,19 - 460 = \underline{\underline{81,19 \text{ kPa}}}$$

Motor modificado

$$PC1 = 39,7 \text{ MJ/Kg}$$

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{w}_t} = 18 \quad N = 3000 \text{ rpm}$$

$$\eta_v = 0,6875 \times 0,95 = 0,6531$$

$$\eta_i = 0,2573 \times 0,95 = 0,2444$$

$$\eta_m = 0,85$$

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = \underline{\underline{0,2078}}$$

$$0,6531 = \frac{\dot{w}_a}{\left(\frac{100}{0,287 \cdot 300} \right) \times 2608,6957 \cdot 10^{-6} \times \frac{3000}{120}}$$

$$\rightarrow \dot{w}_a = 49,4717 \text{ g/s}$$

$$\dot{m}_f = \frac{49,4712}{18} = 2,7484 \text{ g/s}$$

$$0,2078 = \frac{\dot{W}_e}{2,7484 \cdot 10^{-3} \cdot 39900} \rightarrow \underline{\underline{\dot{W}_e = 22,788 \text{ kW}}}$$

$$M_e = \frac{22,788}{\frac{2\pi}{60} \times 3000} \times 10^3 = \underline{\underline{72,54 \text{ mN}}}$$

$$\underline{\underline{p_{me}}} = \frac{22,788}{2608,8957 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3000}{120}} = \underline{\underline{349,42 \text{ kPa}}}$$

$$0,2444 = \frac{\dot{W}_i}{2,7484 \cdot 10^{-3} \cdot 39900} \rightarrow \dot{W}_i = 26,8012 \text{ kW}$$

$$\underline{\underline{p_{mi}}} = \frac{26,8012}{2608,6957 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3000}{120}} = \underline{\underline{410,9515 \text{ kPa}}}$$

$$p_{mpm} = 410,95 - 349,42 = \underline{\underline{61,54 \text{ kPa}}}$$