

## CR-1

Se dispone de los siguientes datos de un ciclo combinado con caldera de un solo nivel de presión:

Ciclo de vapor (cuando el agua sea líquida considerarla incompresible con  $C = 4,18 \text{ kJ/kg-K}$ ):

- Presión del calderín: 80 bar (temperatura de saturación:  $295^{\circ}\text{C}$ )
- Presión del desgasificador: 20 kPa (temperatura de saturación:  $60^{\circ}\text{C}$ )
- Rendimiento de la caldera de recuperación: 71,6%
- Pinch Point:  $5^{\circ}\text{C}$
- Acercamiento en el economizador:  $5^{\circ}\text{C}$
- Pérdida de carga en la caldera de recuperación: despreciable
- Potencia intercambiada en el economizador: 66,5 MW
- Rendimiento del ciclo de vapor: 39%
- Despréciase el incremento de temperatura en la bomba de alimentación a caldera

Ciclo de gas (gas perfecto de  $\gamma = 1,33$ ;  $C_p = 1,03 \text{ kJ/kg-K}$ ):

- Temperatura de entrada al compresor:  $15^{\circ}\text{C}$
- Rendimiento de la turbina: 90%
- Temperatura de entrada a la turbina:  $1250^{\circ}\text{C}$
- Presión ambiente: 1 bar
- Relación de presiones: 16,55

Determinar:

1. Gasto de vapor que entra en la turbina
2. Gasto de gases en la caldera de recuperación
3. Potencia disipada en el condensador



## CR-2

El ciclo de Brayton de un ciclo combinado tiene un rendimiento del 37% y el de Rankine de un 37,5%. Ambos ciclos se acoplan mediante una caldera de recuperación de un solo nivel de presión que presenta un rendimiento del 65,7%.

La temperatura y presión ambiente son 15°C y 1 bar. La temperatura de los gases a la salida de la cámara de combustión es de 1250°C. El compresor aspira 475 kg/s y se desprecia el caudal de combustible a efectos del balance másico. La turbina de gas presenta un rendimiento isentrópico del 91%. El aire se modelará como gas perfecto ( $R = 287 \text{ J/kg-K}$  y  $C_p = 1,1 \text{ kJ/kg-K}$ ).

La presión de entrada en la turbina de vapor es de 110 bar y la temperatura de 525°C. El acercamiento en el sobrecalentador es de 25°C, el “pinch point” es de 7°C y el acercamiento en el economizador es de 5°C. Se desprecian las pérdidas de presión en la caldera de recuperación.

La bomba de alimentación a la caldera aspira el agua como líquido saturado de un calentador abierto cuyo vapor se extrae de la turbina. Dicho calentador es el único precalentador del ciclo de vapor.

Se pide:

- a) Realizar un esquema del ciclo combinado con indicación numérica de los diferentes puntos significativos. Detallar los componentes de la caldera de recuperación.
- b) Representar el diagrama T-Q de la caldera de recuperación, indicando sobre sus vértices los puntos correspondientes del ciclo combinado
- c) Relación de presiones del ciclo Brayton
- d) Potencia neta producida por el ciclo Brayton
- e) Flujo másico de vapor que sale del sobrecalentador
- f) Presión de trabajo del calentador abierto del ciclo Rankine, asumiendo que la bomba de alimentación a la caldera no incrementa la temperatura del agua.
- g) Potencia neta del ciclo de Rankine
- h) Rendimiento del ciclo combinado

Nota: la entalpía del agua en la región de líquido comprimido se aproximara a la de líquido saturado a la misma temperatura.

**Tabla de saturación del agua (líquido-vapor)**

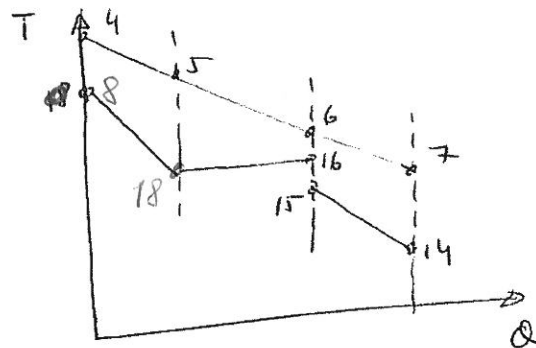
| p<br>[bar] | t<br>[°C] | vf<br>[m³/kg] | vg<br>[m³/kg] | hf<br>[kJ/kg] | hg<br>[kJ/kg] | sf<br>[kJ/kg-K] | sg<br>[kJ/kg-K] |
|------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 0,1        | 45,81     | 0,001010      | 14,67001      | 191,81        | 2583,9        | 0,64919         | 8,14884         |
| 0,12       | 49,42     | 0,001012      | 12,35822      | 206,91        | 2590,3        | 0,69628         | 8,08496         |
| 0,14       | 52,55     | 0,001013      | 10,69122      | 219,99        | 2595,8        | 0,73663         | 8,03114         |
| 0,16       | 55,31     | 0,001015      | 9,43070       | 231,56        | 2600,7        | 0,77201         | 7,98465         |
| 0,18       | 57,8      | 0,001016      | 8,44321       | 241,96        | 2605,0        | 0,80354         | 7,94375         |
| 0,2        | 60,06     | 0,001017      | 7,64810       | 251,42        | 2608,9        | 0,83202         | 7,90725         |
| 0,22       | 62,13     | 0,001018      | 6,99375       | 260,11        | 2612,6        | 0,85800         | 7,87430         |
| 0,24       | 64,05     | 0,001019      | 6,44555       | 268,15        | 2615,9        | 0,88191         | 7,84427         |
| 0,26       | 65,84     | 0,001020      | 5,97939       | 275,64        | 2619,0        | 0,90407         | 7,81670         |
| 0,28       | 67,52     | 0,001021      | 5,57801       | 282,66        | 2621,9        | 0,92472         | 7,79121         |
| 0,3        | 69,09     | 0,001022      | 5,22866       | 289,27        | 2624,6        | 0,94407         | 7,76751         |
| 0,32       | 70,58     | 0,001023      | 4,92176       | 295,52        | 2627,1        | 0,96228         | 7,74538         |
| 0,34       | 72        | 0,001024      | 4,64994       | 301,45        | 2629,5        | 0,97948         | 7,72461         |
| 0,36       | 73,34     | 0,001025      | 4,40747       | 307,09        | 2631,8        | 0,99579         | 7,70505         |
| 0,38       | 74,63     | 0,001026      | 4,18979       | 312,47        | 2634,0        | 1,01129         | 7,68657         |
| 100        | 311       | 0,001452      | 0,01803       | 1407,85       | 2725,5        | 3,36028         | 5,61589         |
| 102        | 312,5     | 0,001459      | 0,01759       | 1416,45       | 2721,8        | 3,37450         | 5,60349         |
| 104        | 313,9     | 0,001466      | 0,01717       | 1424,99       | 2718,0        | 3,38856         | 5,59115         |
| 106        | 315,3     | 0,001474      | 0,01676       | 1433,47       | 2714,2        | 3,40248         | 5,57886         |
| 108        | 316,7     | 0,001481      | 0,01637       | 1441,88       | 2710,3        | 3,41627         | 5,56662         |
| 110        | 318,1     | 0,001488      | 0,01599       | 1450,24       | 2706,3        | 3,42992         | 5,55443         |
| 112        | 319,4     | 0,001496      | 0,01562       | 1458,55       | 2702,3        | 3,44344         | 5,54227         |
| 114        | 320,8     | 0,001503      | 0,01527       | 1466,80       | 2698,2        | 3,45685         | 5,53015         |
| 116        | 322,1     | 0,001511      | 0,01492       | 1475,01       | 2694,0        | 3,47015         | 5,51805         |
| 118        | 323,4     | 0,001518      | 0,01459       | 1483,17       | 2689,8        | 3,48334         | 5,50597         |

**Tabla del agua como vapor sobrecalentado**

| 0,1 bar (sat: 45,81°C) |          |         |           | 110 bar (sat: 318,1°C) |         |         |           |
|------------------------|----------|---------|-----------|------------------------|---------|---------|-----------|
| T                      | v        | h       | s         | T                      | v       | h       | s         |
| [°C]                   | [m³/kg]  | [kJ/kg] | [kJ/kg-K] | [°C]                   | [m³/kg] | [kJ/kg] | [kJ/kg-K] |
| sat                    | 14,67001 | 2583,9  | 8,14884   | sat                    | 0,01599 | 2706,3  | 5,55443   |
| 50                     | 14,86702 | 2592,0  | 8,17411   | 325                    | 0,01695 | 2755,7  | 5,63753   |
| 60                     | 15,33494 | 2611,2  | 8,23262   | 350                    | 0,01963 | 2887,9  | 5,85423   |
| 70                     | 15,80151 | 2630,3  | 8,28914   | 375                    | 0,02172 | 2988,8  | 6,01308   |
| 80                     | 16,26714 | 2649,4  | 8,34392   | 400                    | 0,02354 | 3075,2  | 6,14400   |
| 90                     | 16,73207 | 2668,4  | 8,39713   | 425                    | 0,02518 | 3153,4  | 6,25804   |
| 100                    | 17,19645 | 2687,5  | 8,44889   | 450                    | 0,02671 | 3226,3  | 6,36068   |
| 110                    | 17,66039 | 2706,5  | 8,49931   | 475                    | 0,02816 | 3295,7  | 6,45505   |
| 120                    | 18,12398 | 2725,6  | 8,54848   | 500                    | 0,02955 | 3362,7  | 6,54311   |
| 130                    | 18,58728 | 2744,7  | 8,59648   | 525                    | 0,03089 | 3427,9  | 6,62614   |
| 140                    | 19,05035 | 2763,9  | 8,64338   | 550                    | 0,03219 | 3491,9  | 6,70507   |

$$\eta_{cv} = 37.5\%$$

$$\eta_{cr} = 65.7\%$$



$$T_6 - T_{16} = 7^\circ\text{C} \rightarrow T_6 = 325,1^\circ\text{C}$$

$$T_{16} = T_{\text{ref}} (110 \text{ bar}) = 318.1^\circ\text{C}$$

$$0,91 = \frac{1250 - 550}{1250 + 273 - T_{45}} \rightarrow T_{45} = 753,77 \text{ K}$$

$$\frac{1250 + 273}{753,77} = \sqrt{\frac{r}{r}} \rightarrow \underline{r = 14,8169}$$

$$0,287 = 1,1 - \frac{1,1}{r} \rightarrow r = 1,35301$$

$$\dot{Q}_{CR} + \dot{Q}_{OG} = 475 \times 1,1 \times (550 - 15) = 279537,5 \text{ kW}$$

$$0,37 = 1 - \frac{279537,5}{\dot{Q}_{CG}} \rightarrow \dot{Q}_{CG} = 443710,32 \text{ kW}$$

$$\underline{\dot{W}_{CG}} = 443710,32 - 279537,5 = \underline{164172,82 \text{ kW}}$$

$$0,657 = \frac{550 - T_7}{550 - 15} \rightarrow T_7 = 198,5^\circ \text{C}$$

$$\dot{Q}_{CR} = 475 \times 1,1 \times (550 - 198,5) = 183656,14 \text{ kW}$$

$$475 \times 1,1 \times (550 - 325,1) = \dot{m}_v (h_8 - h_{15}) \rightarrow \dot{m}_v = 58,5272 \text{ kg/s}$$

3427,9
1420,11

$$475 \times 1,1 \times (325,1 - 198,5) = 58,5272 (1420,11 - h_{14})$$

$$\downarrow$$

$$h_{14} = 289,89 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{14} \Rightarrow h_{14} \approx h_f(T_{14}); T_{14} \approx T_{13} \quad \text{if } x_{13} = 0 \rightarrow$$

$$P_g = P_{wet}(T_{14})$$

$$289,89 = h_f(P_g) \Rightarrow \underline{P_g = 0,302 \text{ bar}}$$

$$\dot{W}_{cv} = 0.375 \times 183\,656,14 = \underline{\underline{68\,871,05 \text{ kW}}}$$

$$\eta_{cc} = \frac{164\,172,82 + 68\,871,05}{443\,710,32} = \underline{\underline{52,52\%}}$$

Comprobación:

$$\eta_{cc} = 0.37 + 0.375(1 - 0.37)0.657 = 0.5252 \quad \checkmark$$

### CR-3

Se pretende evaluar el efecto que sobre el rendimiento de un ciclo combinado presentan los calentadores cerrados de agua de alimentación en el ciclo de vapor. Para ello se resolverá el ciclo propuesto en el esquema - 1, en cuyo ciclo de vapor sólo hay un desaerador, y posteriormente se resolverá el ciclo del esquema - 2, que añade sobre el anterior un calentador cerrado de agua de alimentación en el ciclo de vapor, comparando los resultados obtenidos.

En ambos ciclos el combustible de la turbina de gas es  $C_8H_{18}$  que entra a la cámara de combustión a  $25^\circ C$  y 8 bar. El aire entra al compresor a  $15^\circ C$  y 1 bar. La relación de presión es de 8, y la temperatura de entrada en la turbina de gas es de  $950^\circ C$ . Los rendimientos isentrópicos del compresor y la turbina de gas son 0.85.

En ambos ciclos las condiciones del vapor a la entrada de la turbina son 60 bar y  $500^\circ C$ . La presión del condensador es 5 kPa, y la del calentador abierto de 4 bar. La del calentador cerrado (esquema-2) es de 15 bar. Las bombas se consideran isentrópicas y el rendimiento de las turbinas del ciclo de vapor es de 0.8. El acercamiento mínimo de temperaturas es de  $20^\circ C$ . EL trabajo de las bombas de circulación asistida se despreciará en ambos esquemas.

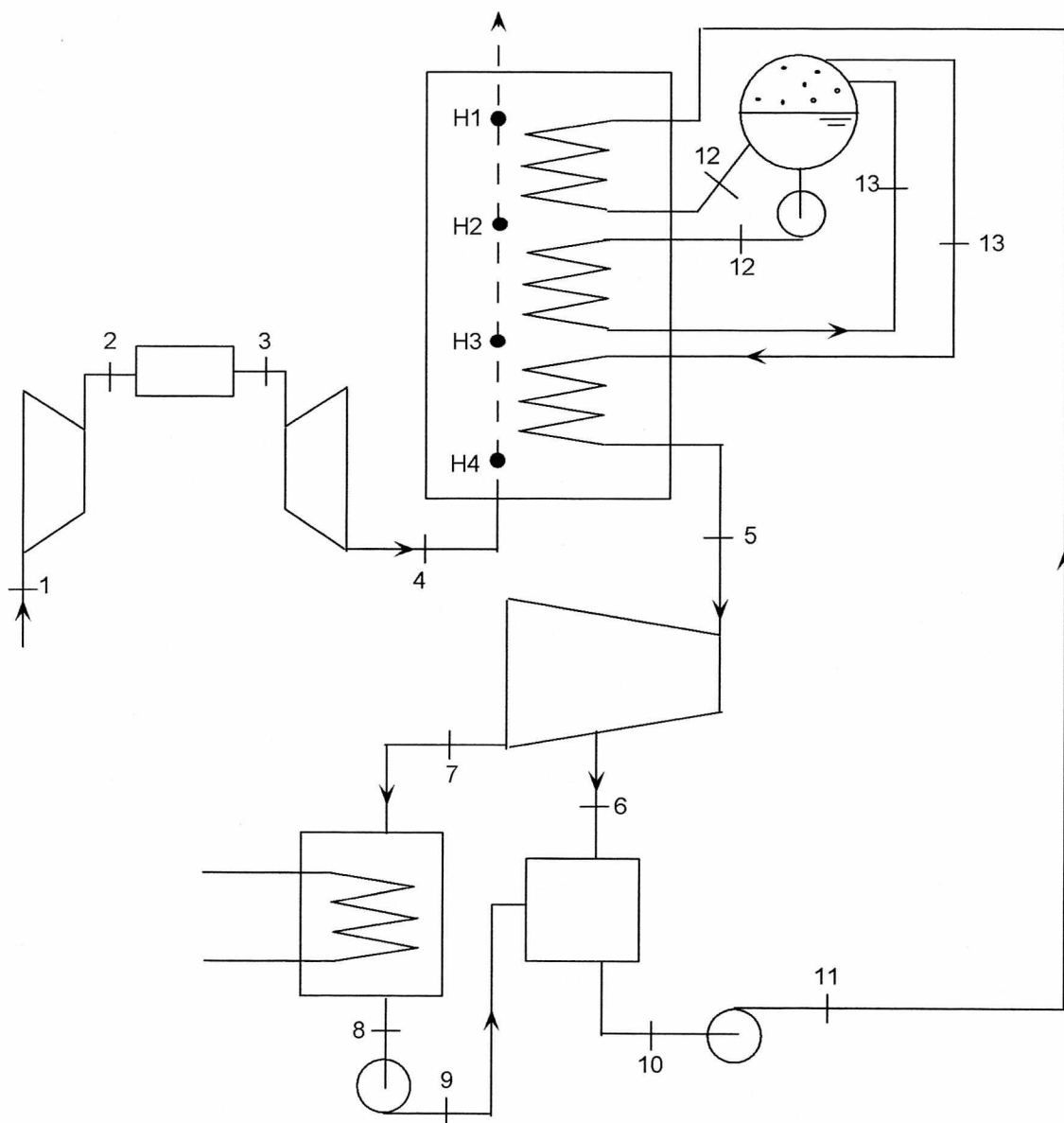
Determinar:

- Perfil de temperaturas frente a calor aportado en cal caldera de recuperación en ambos ciclos
- Rendimiento del ciclo de vapor y de gas en ambos esquemas
- Potencia neta del ciclo de vapor y gas en ambos esquemas
- Rendimiento global del ciclo combinado en ambos esquemas

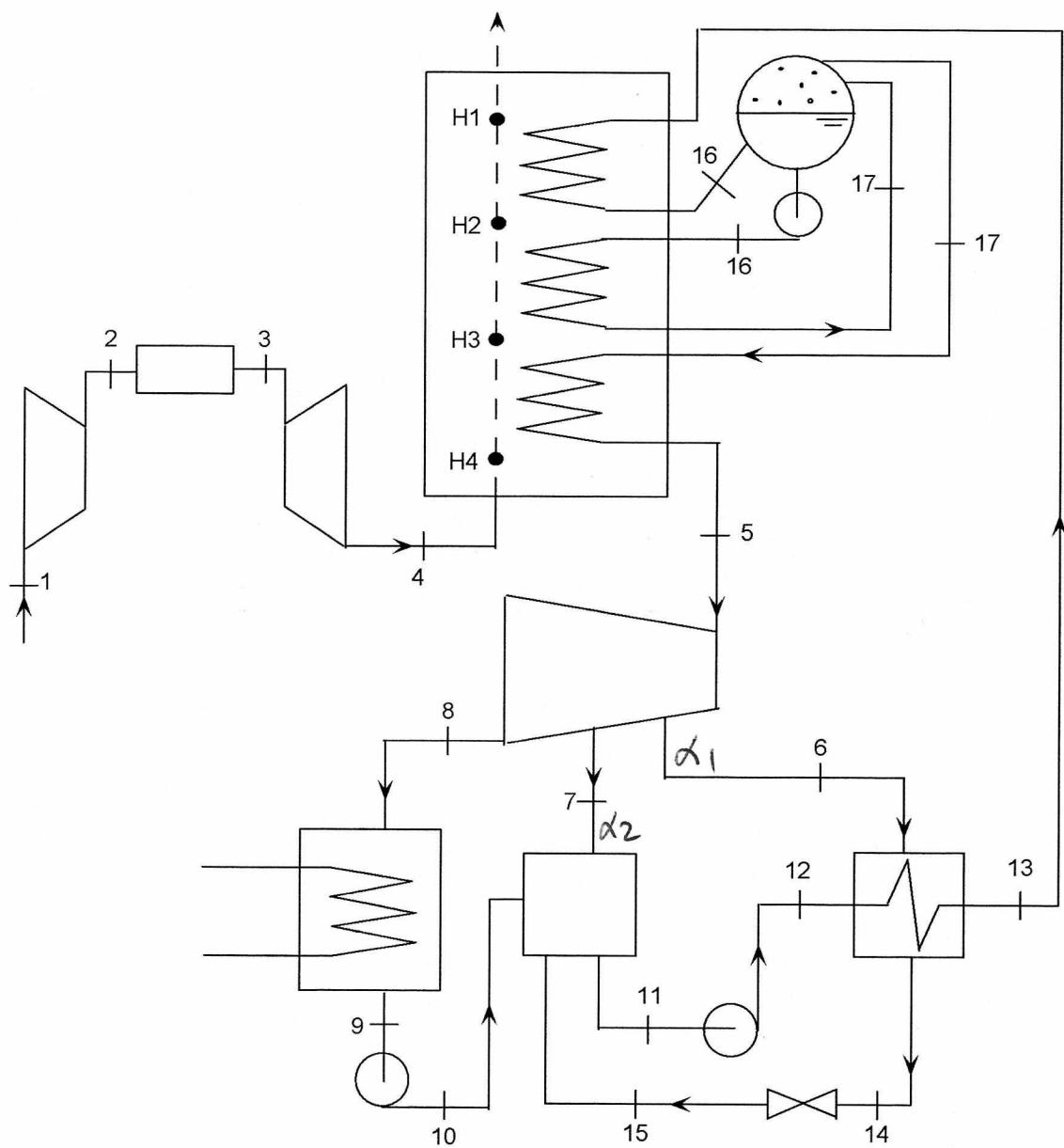
Datos:

|        | $C_p$ [kJ/kmol-K] |                 | $\bar{h}_f^0$ [kJ/kmol] |
|--------|-------------------|-----------------|-------------------------|
| $CO_2$ | 53                | $C_8H_{18}$ (l) | -249910                 |
| $H_2O$ | 40                | $CO_2$          | -393520                 |
| $N_2$  | 32                | $H_2O$ (v)      | -241820                 |
| $O_2$  | 34.4              |                 |                         |





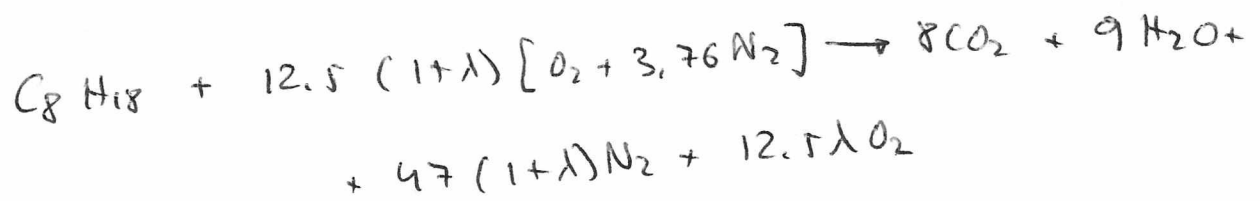
Esquema - 1



Esquema-2

Problema - 3

ciclo de gas



$$\bar{h}_{\text{comb}} + [8 \times 53 + 9 \times 40 + 47(1+\lambda)32 + 12.5\lambda 34.4][T_3 - T_0] =$$

$$= 12.5(1+\lambda)[34.4 + 3.76 \times 32](T_2 - T_0)$$

$$T_3 = 950^\circ\text{C} \quad \bar{h}_{\text{comb}} = -5074630 \text{ kJ/kmol}$$

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

Resolviendo el compresor:

$$\eta_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\eta_{2s} - \eta_1 = 0 = [34.4 + 3.76 \times 32] \ln \frac{T_{2s}}{T_1} -$$

$$- 8'314(1 + 3.76) \ln 8 \Rightarrow T_{2s} = 490,2154 \text{ K}$$

$$T_2 = 525,9 \text{ K}$$

$$\text{Operando } \lambda = 2,5211$$

Pour la turbine:

$$\eta_T = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}}$$

$$\Delta s_{4s} - \Delta s_3 = 0 = \left[ 424 + 360 + 5295,73 + 1084,073 \right] \ln \frac{T_{4s}}{T_3} + 8,314 \left[ 8 + 9 + 165,4917 + 31,5138 \right] \ln \left( \frac{1}{8} \right)$$

$$T_{4s} = 729,673 \text{ K}$$

$$T_4 = 803,67 \text{ K}$$

En ce qui concerne les puissances:

$$\begin{aligned} \bar{h}_3 - \bar{h}_4 &= 7163,803 (950 + 273 - 803,67) = \\ &= 3003997,512 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_2 - \bar{h}_1 &= 12,5 \times 3,5211 \times 154,72 (525,9 - 288) = \\ &= 1620053,18 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_T - \dot{W}_C &= \dot{W}_{CC} = (3003997,512 - 1620053,18) \frac{1/60}{114} = \\ &= 202,33 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{CC} = \frac{1}{60} \times \frac{5074630}{114} = 741,9 \text{ kW}$$

$$\eta_{CC} = \underline{\underline{27,27\%}}$$

Para facilitar el cálculo de la celda de recuperación:

$$c_p^{\text{gas}} = \frac{3003947,512}{950 + 273 - 803,67} \times \frac{1}{114} \times \frac{1}{54,0931} = 1,1617 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{12,5 \times 3,5211 \times 4,76 \times 28,89}{114} = 53,0931$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_f = \dot{m}_f \left[ \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} + 1 \right]$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_f \times 54,0931 = 0,9016 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g \times c_p^g = 1,0474 \text{ kW/K}$$

Ciclo de vapor

Se encuentran remolts e EES. Como ecuaciones importante tenemos:

$$\alpha h_6 + (1-\alpha) h_9 = h_{10} \Rightarrow \alpha$$

$$\begin{cases} \dot{m}_v (h_5 - h_{12}) = \dot{Q}_g (T_4 - T_{H2}) \Rightarrow \dot{m}_v \\ T_{H2} = T_{12} + \delta \end{cases}$$

Por tanto,  $\dot{m}_v$  queda fijado a partir del

cido de gas, del "pinch point" y de las condiciones del vapor generado. De ahí que añadir precalentadores provoque reducción de  $\dot{W}_{TV}$  y caída de  $\eta_{cc}$ .

$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{neto vapor}} = \dot{W}_{CV} &= 111,16 - 0,6762 - 0,0367 = \\ &= 110,45 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\eta_{cc} = \frac{110,45 + 202,33}{741,9} = 42,16 \%$$

Se trata de un  $\eta_{\text{Bajo}}$ . Ello se debe a la baja presión del CV. No se puede subir más por el título o lo volido de la turbina, que es de 0,9. Para resolverlo sería preciso sobrecalentar más, lo que requeriría reducir la relación de presiones en el lado de gas y/o hacer una post-combustión en el lado de gas.

### apartado 3-2

Ardo de gas  $\equiv$  idénticos resultados

Ardo de vapor  $\equiv$  EES

las ecuaciones generales son:

$$\alpha_1 h_6 + h_{12} = h_{13} + \alpha_1 h_{14}$$

$$\alpha_2 h_7 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) h_{10} + \alpha_1 h_{15} = h_{11}$$

Se puede caer en lo cuenta q de que es conveniente comenzar planteando la ecuación por el calentador de mayor presión en cámara, para así obtener un sistema triangular que se despeje de 1 a 1.

$$\dot{m}_v (h_5 - h_{16}) = \dot{C}_g (T_4 - T_{12})$$

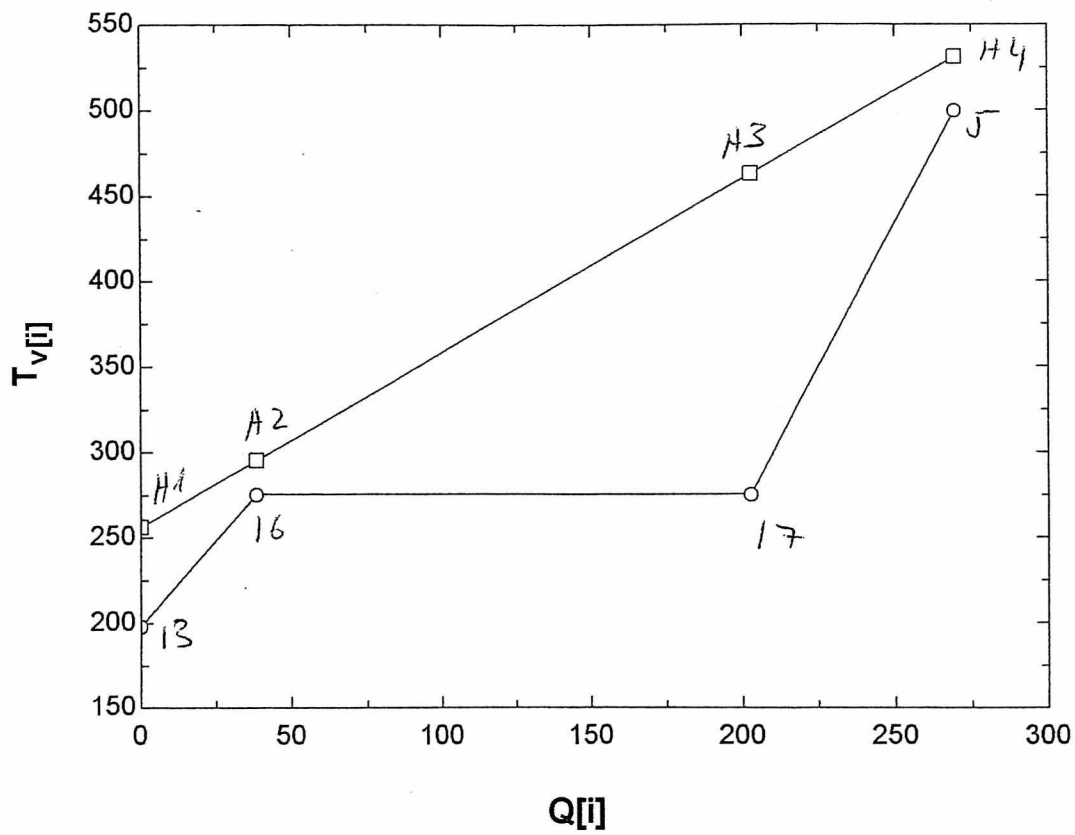
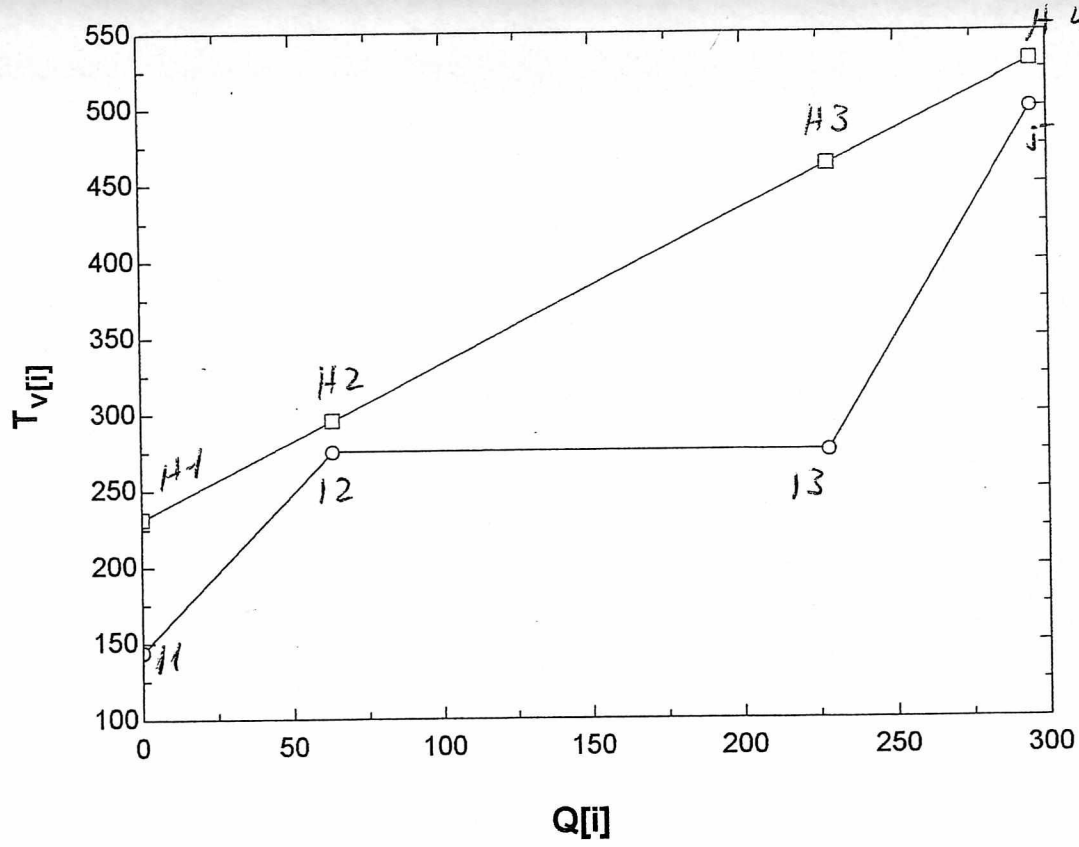
$$T_{12} = T_{16} + \delta$$

Por tanto,  $\dot{m}_v$  es igual que el apartado anterior.

$$\dot{W}_{cv} = 705,5 - 0,6762 - 0,03322 = 104,79 \text{ kW}$$

$$\eta_{cc} = \frac{104,79 + 202,33}{741,9} = 41,4 \% < \text{antes}$$

$$\eta_v^{\text{ahora}} = 36,52 \% > 35,4 \% = \eta_v^{\text{antes}}$$





#### CR-4

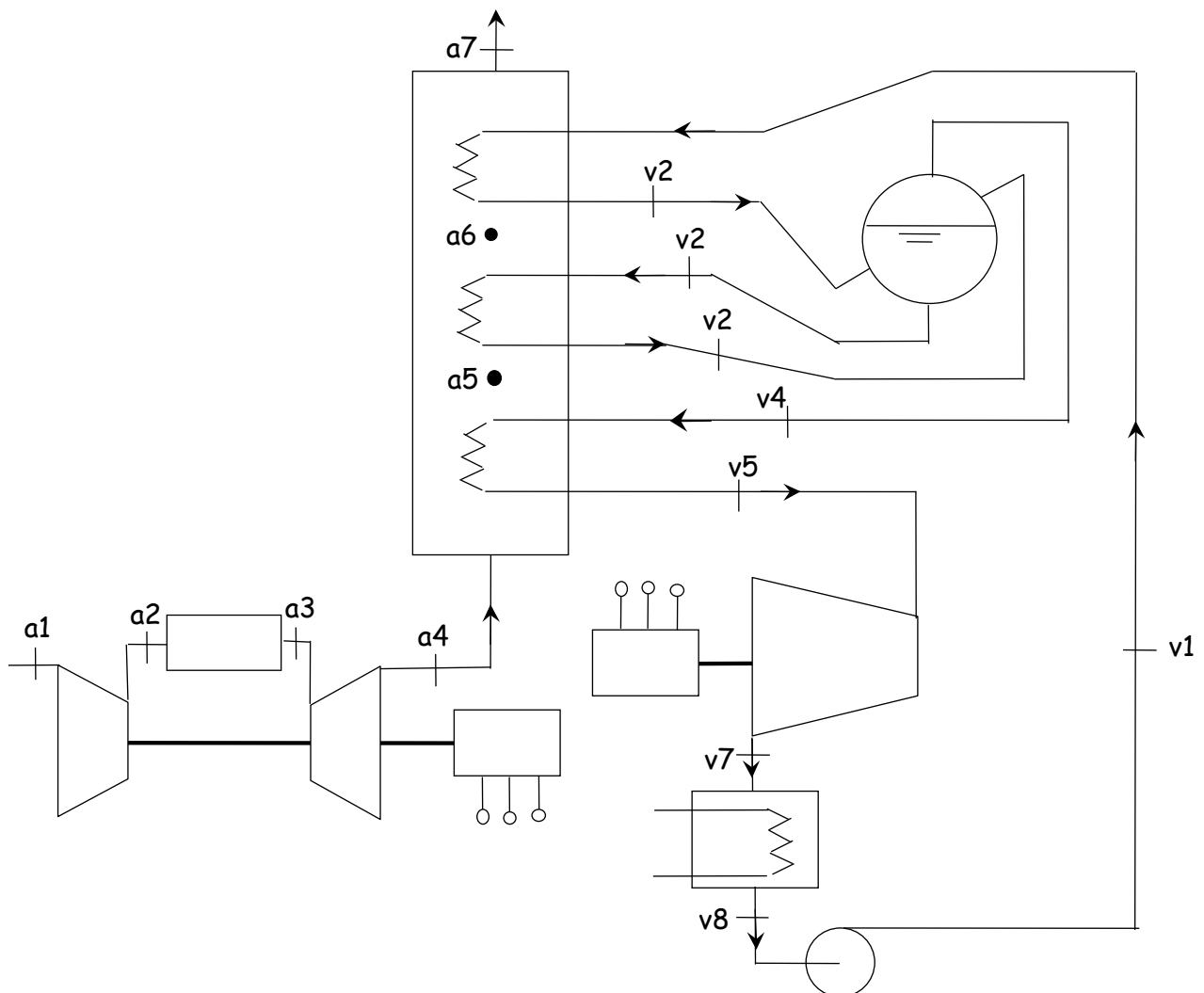
Se tiene un ciclo combinado con un ciclo CBT en el lado de gas y un ciclo Rankine sin regeneración ni recalentamiento en el lado del vapor. El gasto de aire es de 560 kg/s, entrando en el compresor a 15°C y 1 bar. La temperatura de entrada a la turbina de gas es de 1120°C.

El vapor sale del HRSG a 80 bar y 520°C, expansionándose hasta 5 kPa en el condensador. El HRSG trabaja con un punto de ebullición de 20 K, acercamiento en el economizador de 12 K y en el sobrecalentador de 30 K.

Los rendimientos isentrópicos de todas las turbinas son 0,85 y los de las bombas 1. El aire se considera gas perfecto de  $C_p = 1,1 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  y  $\gamma = 1,33$ .

Determinar:

- Rendimientos del ciclo de gas, vapor y combinado
- Potencias netas del ciclo de gas, vapor y combinado
- Gasto de vapor
- Temperatura de entrada de gases en el HRSG
- Temperatura de salida de gases en el HRSG
- Temperatura de entrada del agua de alimentación
- Representar el diagrama T-Q del HRSG



Determinamos el gasto de vapor

$$T_{a4} = 30 + 520 = 550^{\circ}\text{C}$$

$$h_{v5} = h(80 \text{ bar}, 520^{\circ}\text{C}) = 3449 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{v3} = T_{\text{sat}}(80 \text{ bar}) = 295^{\circ}\text{C}$$

$$T_{v2} = T_{v3} - EA = 295 - 12 = 283^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{v2} \approx h_f(T_{v2}) = 1252 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{a6} = T_{v3} + PP = 295 + 20 = 315^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{m}_g C_p (T_{a4} - T_{a6}) = \dot{m}_v (h_{v5} - h_{v2})$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_v = 65,89 \text{ kg/s}}}$$

El gasto que circula por el evaporador:

$$\dot{m}_v h_{v2} + \dot{m}_{ev} h_{v2'} = \dot{m}_{ev} h_{v2} + \dot{m}_v h_{v4}$$

$$\underbrace{\dot{m}_{ev} (h_{v2'} - h_{v2})}_{\text{caud. interns}} = \underbrace{\dot{m}_v (h_{v4} - h_{v2})}_{\text{caud. externs}}$$

Habría que fijar  $h_{v2'} \approx h(P_{v2}, x \approx 0,1) \rightarrow \dot{m}_{ev}$

$$\text{Si tomamos } x_{2'} = 0,1 \rightarrow h_{v2'} = 1461 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{de donde } \frac{\dot{m}_{ev}}{\dot{m}_v} = \frac{h_{v4} - h_{v2}}{h_{v2'} - h_{v2}} = 7,21$$

$$h_{v4} = h_g(80 \text{ bar}) = 2759 \text{ kJ/kg}$$

Continuando con el ciclo de vapor:

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{h_{v5} - h_{v7}}{h_{v5} - h_{v7s}} \\ h_{v7s} &= 2070 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \right\} \rightarrow h_{v7} = 2277 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_v (h_{v7} - h_{v8}) = 77\,222,9 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_B = \dot{m}_v (h_{v1} - h_{v8}) = 527,11$$

$$h_{v8} = h_f(5 \text{ kPa}) = 137,8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v1} = h_{v8} + v_{v8} (80 - 0,05) 100 = 145,8 \text{ kJ/kg} \approx h_f(T_{v1})$$

$$\downarrow$$

$$\underline{T_{v1} = 33,07^\circ\text{C}}$$

$$v_{v8} = v_f(5 \text{ kPa}) = 0,001005 \text{ m}^3/\text{kg}$$

~~$$\dot{W}_{cv} = 527,11 \text{ kW}$$~~

$$\underline{\dot{W}_{cv} = 76695,8 \text{ kW}}$$

Los calores en las HRSG son:

$$\dot{Q}_{econ} = \dot{m}_v (h_{v2} - h_{v1}) = 72\,887,5 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_v (h_{v4} - h_{v2}) = 99296,2 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{sobr} = \dot{m}_v (h_{v5} - h_{v4}) = 45464,1 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{HRSG} = 217647,8 \text{ kW}$$

$$\underline{\eta_{cv} = \frac{76,695}{217,65} = 35,24\%}$$

Resolviendo el ciclo de gas

$$T_{a4} = 550^\circ\text{C}$$

$$T_{a3} = 1120^\circ\text{C}$$

$$\eta = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{a5}} \rightarrow T_{a5} = 449,41^\circ\text{C}$$

$$\frac{T_{a5}}{T_3} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \rightarrow \underline{r = 14,1}$$

$$T_{a2s} = 288 \times 14,1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 555,31 \text{ K}$$

$$\eta = \frac{T_{a2s} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}} \Rightarrow T_{a2} = 602,48 \text{ K}$$

$$\dot{W}_C = 560 \times 1.1 \times (602.48 - 288) = 193722.598 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_T = 560 \times 1.1 (1120 - 550) = 351120 \text{ kW}$$

$$\underline{\dot{W}_{CG}} = 157.4 \text{ MW}$$

$$\dot{Q}_{CC} = 560 \times 1.1 (1120 + 273 - 602.48) = 486.96 \text{ MW}$$

$$\underline{\eta_{CG}} = \frac{157.4}{486.96} = \underline{32.32\%}$$

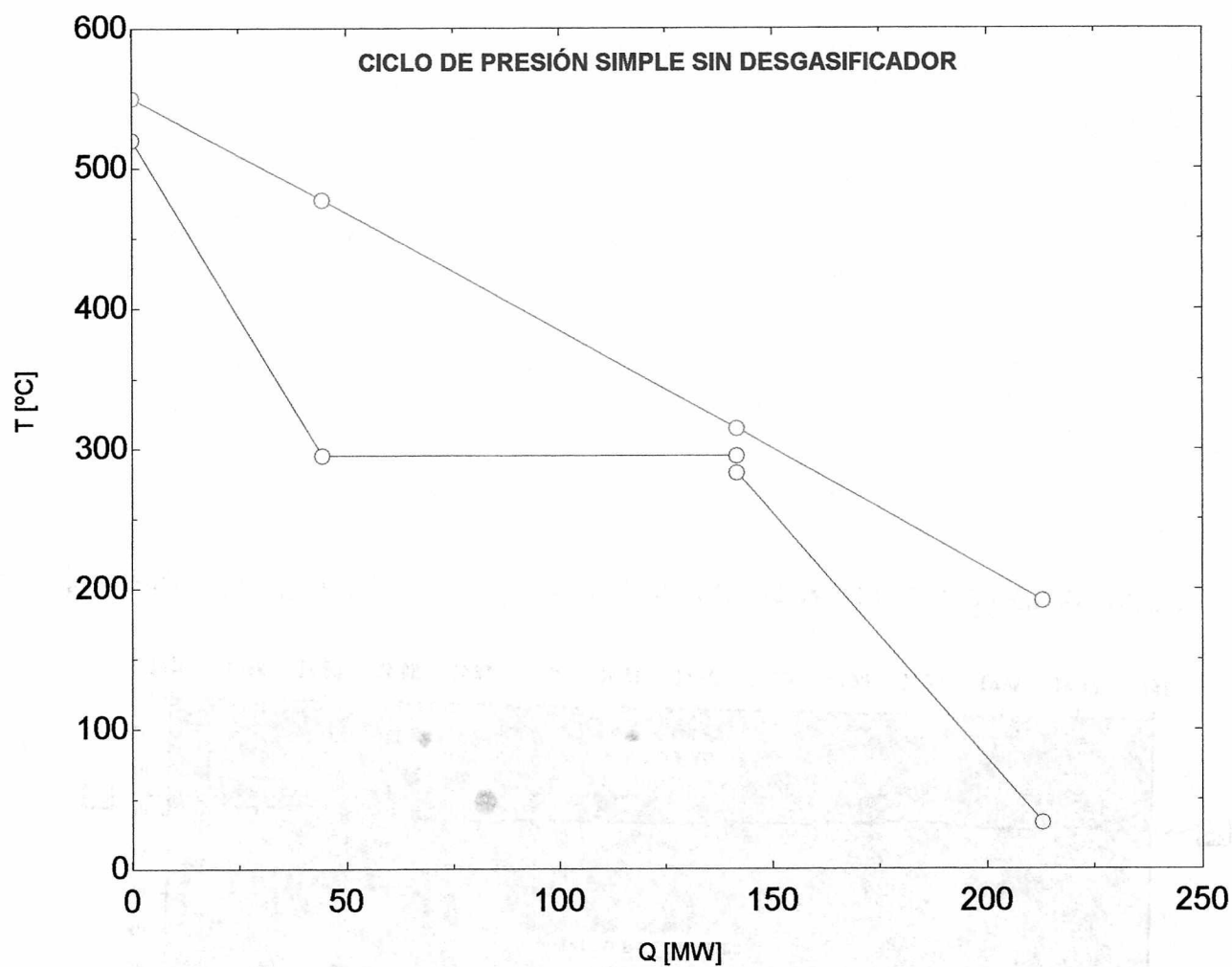
$$\underline{\eta_{CC}} = \frac{76.695 + 157.4}{486.96} = \underline{48.07\%}$$

$$\underline{\dot{W}_{neto}} = 76.695 + 157.4 = \underline{234.1 \text{ MW}}$$

$$\dot{Q}_{econ} = 72887.5 = \dot{m} g c_p (T_{a6} - T_{a7}) \rightarrow \underline{T_{a7} = 196.7^\circ\text{C}}$$

$$\dot{Q}_{sobre} = 45464.1 = \dot{m} g c_p (T_{a4} - T_{a7}) \rightarrow \underline{T_{a7} = 476.2^\circ\text{C}}$$

|   | $T_{adib,i}$ | $T_{vdib,i}$ |
|---|--------------|--------------|
| 1 | 550          | 520          |
| 2 | 477,5        | 295          |
| 3 | 315          | 295          |
| 4 | 191,8        | 283          |
| 5 |              | 33,07        |
| 6 |              |              |
| 7 |              |              |
| 8 |              |              |



## CR-5

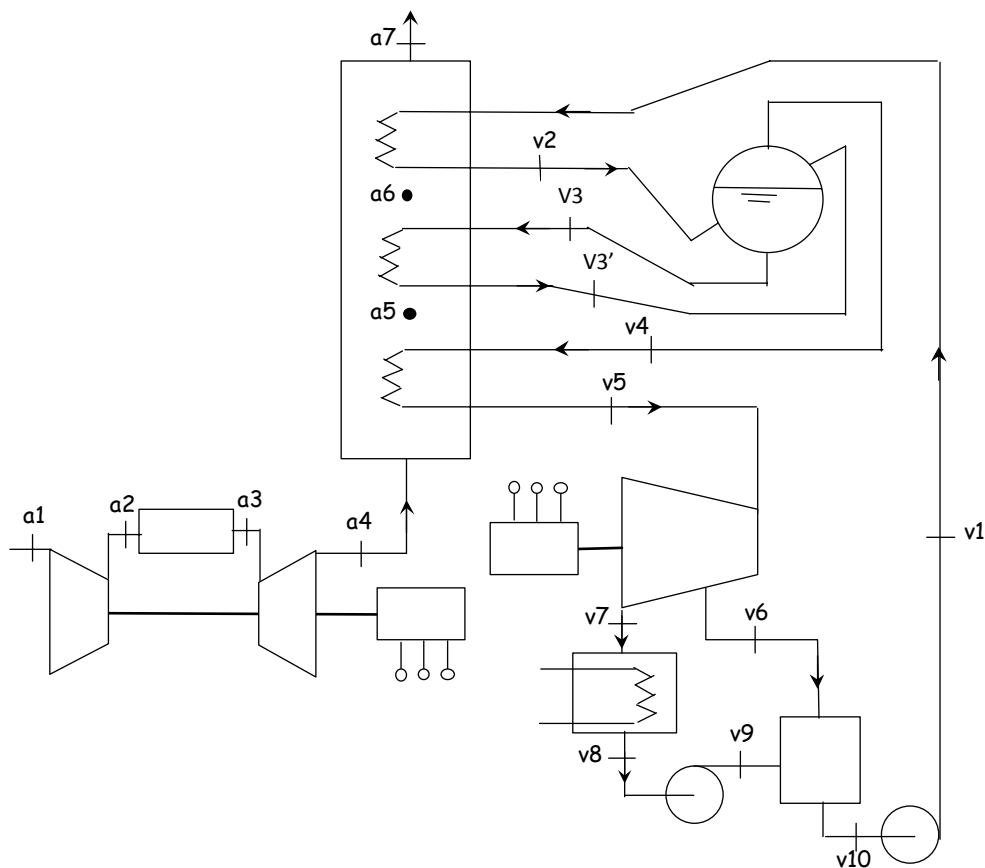
Se tiene un ciclo combinado con un ciclo CBT en el lado de gas y un ciclo Rankine con un desgasificador y sin recalentamiento en el lado del vapor. El gasto de aire es de 560 kg/s, entrando en el compresor a 15°C y 1 bar. La temperatura de entrada a la turbina de gas es de 1120°C.

El vapor sale del HRSG a 80 bar y 520°C, expansionándose hasta 5 kPa en el condensador. El HRSG trabaja con un punto de estricción de 20 K, acercamiento en el economizador de 12 K y en el sobrecalentador de 30 K. El desgasificador recibe el vapor de una extracción de la turbina a 2,5 bar.

Los rendimientos isentrópicos de todas las turbinas son 0,85 y los de las bombas 1. El aire se considera gas perfecto de  $C_p = 1,1 \text{ kJ/kg-K}$  y  $\gamma = 1,33$ .

Determinar:

- Rendimientos del ciclo de gas, vapor y combinado
- Potencias netas del ciclo de gas, vapor y combinado
- Gasto de vapor
- Temperatura de entrada de gases en el HRSG
- Temperatura de salida de gases en el HRSG
- Temperatura de entrada del agua de alimentación
- Representar el diagrama T-Q del HRSG



Determinamos el gasto de vapor

$$T_{a4} = 30 + 520 = 550^{\circ}\text{C}$$

$$h_{v5} = h(80\text{ bar}; 520^{\circ}\text{C}) = 3449 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{v3} = T_{\text{sat}}(80\text{ bar}) = 295^{\circ}\text{C}$$

$$T_{v2} = T_{v3} - EA = 295 - 12 = 283^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{v2} \approx h_f(T_{v2}) = 1252 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_{a6} = T_{v3} + PP = 295 + 20 = 315^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{m}_g C_p (T_{a4} - T_{a6}) = \dot{m}_v (h_{v5} - h_{v2})$$

$$\dot{m}_v = \underline{\underline{65.89 \text{ kg/s}}}$$

El gasto que circula por el evaporador:

$$\dot{m}_v h_{v2} + \dot{m}_{ev} h_{v3'} = \dot{m}_{ev} h_{v3} + \dot{m}_v h_{v4}$$

$$\underbrace{\dot{m}_{ev} (h_{v3'} - h_{v3})}_{\text{casc. intern}} = \underbrace{\dot{m}_v (h_{v4} - h_{v2})}_{\text{casc. extern}}$$

Habría que fijar  $h_{v3'} \approx h(P_{\text{sat}}; x \approx 0.1) \rightarrow \dot{m}_{ev}$

Tomando  $x_{3'} = 0.1 \rightarrow h_{v3'} = 1461 \text{ kJ/kg}$ , de donde:

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{\dot{m}_v} = \frac{h_{v4} - h_{v2}}{h_{v3'} - h_{v2}} = 7.21$$

$$h_{v4} = h_g(80\text{ bar}) = 2759 \text{ kJ/kg}$$

Continuando con el ciclo de vapor:

$$\eta = \frac{h_{v5} - h_{v6}}{h_{v5} - h_{v6s}} \left. \vphantom{\eta} \right\} \rightarrow h_{v6} = \frac{2277}{2737} \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v6s} = \frac{2070}{2611} \text{ kJ/kg}$$

$$\alpha h_{v6} + (1-\alpha) h_{v9} = h_{v10}$$

$$h_{v8} = h_f(5 \text{ kPa}) = 137.8 \text{ kJ/kg}; \quad v_{v8} = v_f(5 \text{ kPa}) = 0.001005 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_{v9} = h_{v8} + v_{v8}(P_{\text{desy}} - P_{\text{con}}) = 138 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v10} = h_f(2.5 \text{ bar}) = 535.3 \text{ kJ/kg}$$

$$\rightarrow \alpha = 0.1529$$

$$h_{v1} = h_{v10} + v_{v10}(80 - 2.5)100 = 543.6 \text{ kJ/kg} \approx h_f(T_{v1})$$

$\downarrow$   
 $T_{v1} = 128^\circ\text{C}$

$$v_{v10} = v_f(2.5 \text{ bar}) = 0.001067 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_v (h_{v5} - \alpha h_{v6} - (1-\alpha) h_{v7})$$

$$\eta = \frac{h_{v6} - h_{v7}}{h_{v6} - h_{v7s}} \quad \left. \begin{array}{l} \rightarrow h_{v7} = 2251 \text{ kJ/kg} \\ \dot{W}_{TV} = 74011.22 \text{ kW} \end{array} \right\}$$

$h_{v7s} = 2166 \text{ kJ/kg}$

$$\dot{W}_{B\text{con}} = \dot{m}_v (1-\alpha) (h_{v9} - h_{v8}) = 13.74 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{B\text{desy}} = \dot{m}_v (h_{v1} - h_{v10}) = 544.95 \text{ kW}$$

$$\underline{\underline{\dot{W}_{cv}}} = 74011.22 - 13.74 - 544.95 = \underline{\underline{73452.53 \text{ kW}}}$$

Los calores del HRSG son:

$$\dot{Q}_{\text{con}} = \dot{m}_v (h_{v2} - h_{v1}) = 46668.3 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \dot{m}_v (h_{v4} - h_{v2}) = 99296.23 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{sobre}} = \dot{m}_v (h_{v5} - h_{v4}) = 45464.1 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{col}} = 191428.6 \text{ kW}$$

$$\underline{\underline{\eta_{cv}}} = \frac{73.45}{191.43} = \underline{\underline{38.37\%}}$$



Resolvemos el ciclo del aire:

$$T_{a4} = 550^{\circ}\text{C}$$

$$T_{a3} = 1120^{\circ}\text{C}$$

$$\eta = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{us}} \rightarrow T_{us} = 449,41^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{T_{us}}{T_3} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \rightarrow \underline{r = 14,1}$$

$$T_{a2s} = 288 \times 14,1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 555,31 \text{ K}$$

$$\eta = \frac{T_{a2s} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}} \rightarrow T_{a2} = 602,48 \text{ K}$$

$$\dot{W}_c = 560 \times 1,1 (602,48 - 288) = 193722,598 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_T = 560 \times 1,1 (1120 - 550) = 351120 \text{ kW}$$

$$\underline{\dot{W}_{ca} = 157,4 \text{ MW}}$$

$$\dot{Q}_{cc} = 560 \times 1,1 \times (1120 + 273 - 602,48) = 486,96 \text{ MW}$$

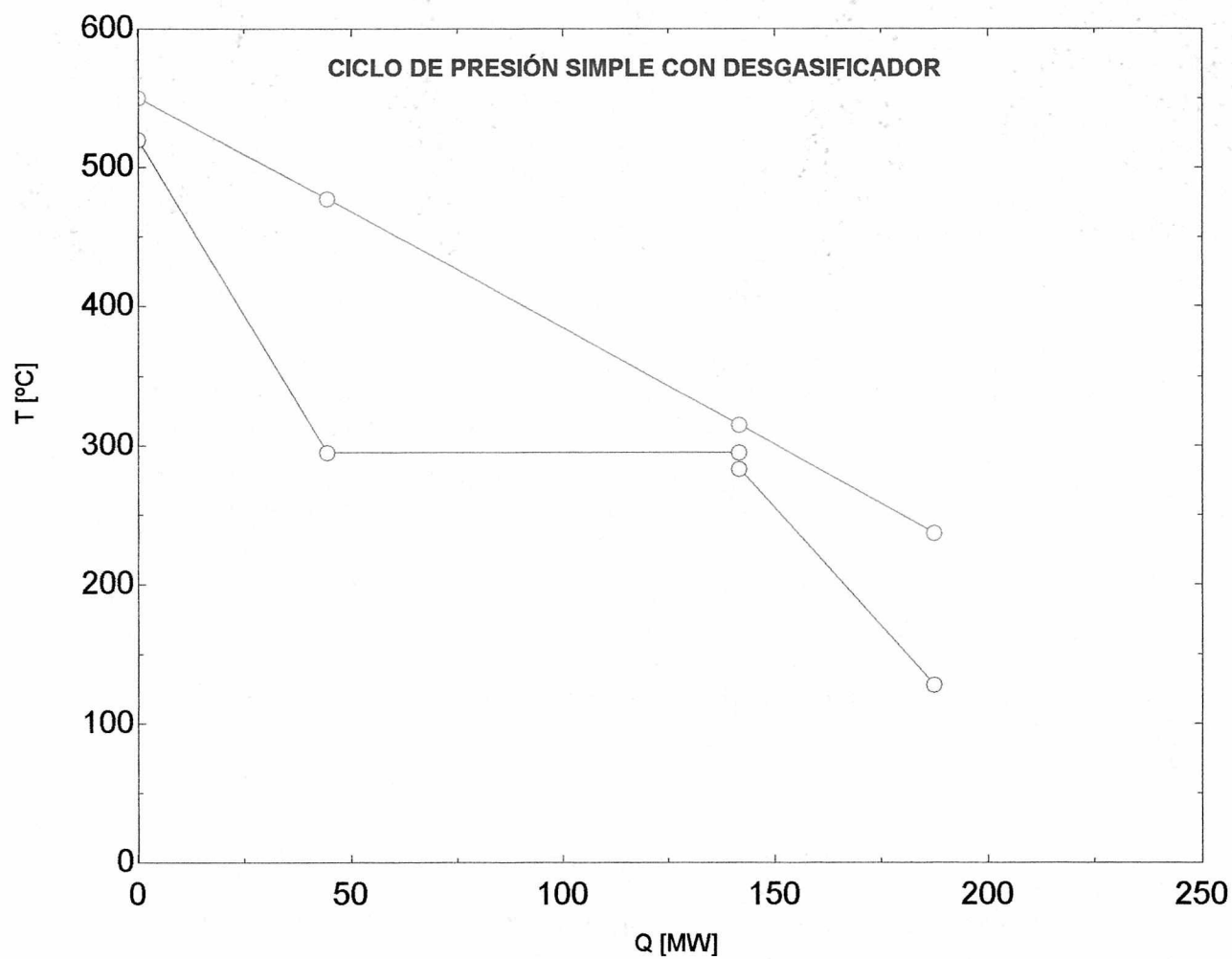
$$\underline{\eta_{ca} = \frac{157,4}{486,96} = 32,32\%}$$

$$\underline{\eta_{cc} = \frac{157,4 + 73,45}{486,96} = 47,41\%}$$

$$\dot{Q}_{econ} = \dot{m} g c_p (T_{a6} - T_{a7}) \rightarrow \underline{T_{a7} = 239^{\circ}\text{C}}$$

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{m} g c_p (T_{a4} - T_{a5}) \rightarrow \underline{T_{a5} = 476^{\circ}\text{C}}$$

$$\underline{\dot{W}_{cc} = 230,85 \text{ MW}}$$



Un ciclo combinado con caldera de recuperación de un único nivel de presión presenta el esquema adjunto. El aire y los productos de la combustión se pueden modelar como gases perfectos. El combustible (gas natural) tiene una composición volumétrica de 85%  $\text{CH}_4$  y 15%  $\text{C}_2\text{H}_6$  y entra en la cámara de combustión a  $25^\circ\text{C}$  y 18 bar.

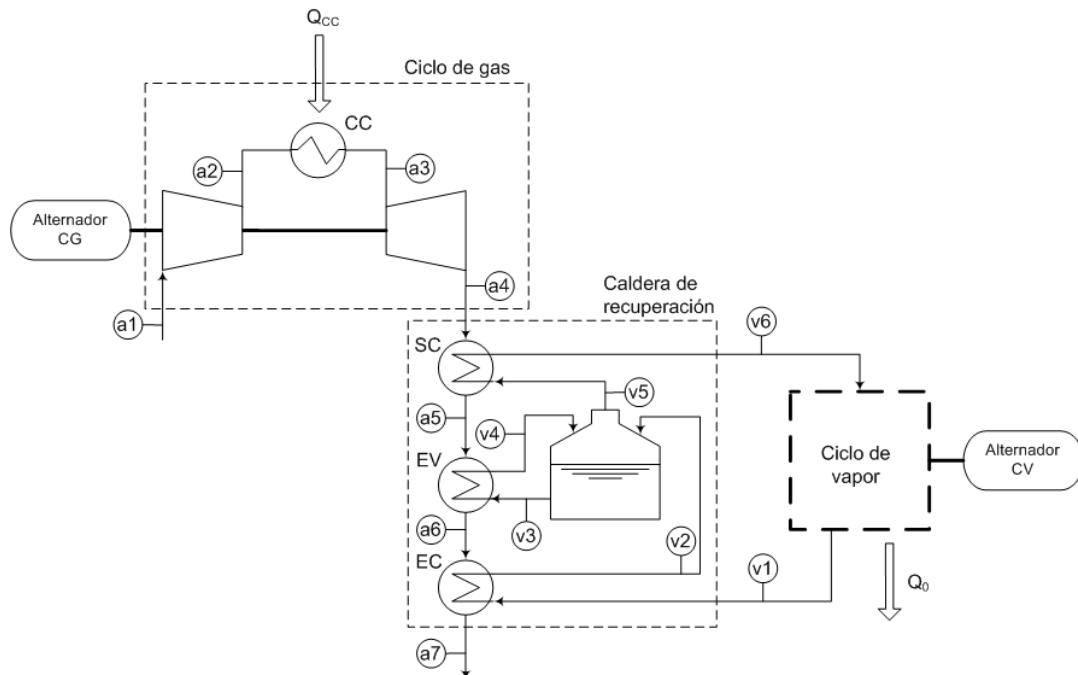
En la caldera de recuperación se tiene un acercamiento en el sobrecalentador es de  $26^\circ\text{C}$  y en el economizador de  $15^\circ\text{C}$ . El rendimiento de la caldera de recuperación es de 70,6%. El gasto de aire aspirado por el compresor es de 450 kg/s.

Los productos de la combustión carecen de CO y presentan una composición de  $\text{O}_2$  en base seca del 15%.

Determinar:

- Exceso de aire en la combustión
- Consumo de gas natural
- Temperatura de salida de los gases de la turbina
- Pinch Point en el evaporador
- Gasto másico de vapor del sobrecalentador
- Gasto másico de vapor del evaporador

|                        | aire |     |     |     |     |     |     | agua |     |     |     |     |     |
|------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                        | a1   | a2  | a3  | a4  | a5  | a6  | a7  | v1   | v2  | v3  | v4  | v5  | v6  |
| T [ $^\circ\text{C}$ ] | 15   | 423 | --- | --- | --- | --- | 180 | 60   | --- | --- | --- | --- | --- |
| p [bar]                | 1    | 18  | 18  | 1   | 1   | 1   | 1   | 60   | 60  | 60  | 60  | 60  | 60  |
| x [p.u.]               | ---  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | ---  | --- | 0   | 0,1 | 1   | --- |



**Tabla de vapor sobrecalentado**

| 60 bar ( $T_{sat} = 275,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) |                            |         |           |
|--|----------------------------|---------|-----------|
| T  | v                          | h       | s         |
| [ $^{\circ}\text{C}$ ]                               | [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] | [kJ/kg] | [kJ/kg-K] |
| sat  | 0,03245                    | 2785    | 5,8902    |
| 440  | 0,05124                    | 3278    | 6,6878    |
| 460  | 0,05308                    | 3327    | 6,7553    |
| 480  | 0,05489                    | 3375    | 6,8201    |
| 500  | 0,05667                    | 3423    | 6,8826    |
| 520  | 0,05843                    | 3471    | 6,9432    |
| 540  | 0,06016                    | 3518    | 7,0020    |
| 560  | 0,06188                    | 3565    | 7,0592    |
| 580  | 0,06358                    | 3612    | 7,1149    |
| 600  | 0,06527                    | 3659    | 7,1693    |

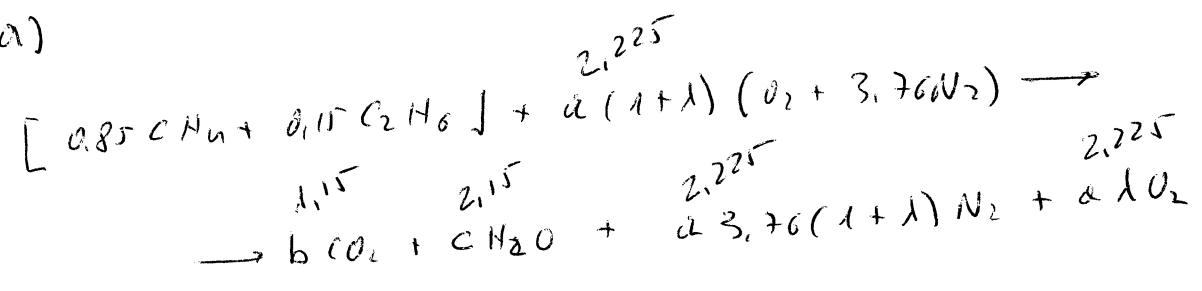
**Tabla de saturación (líquido-vapor)**

| p     | T                      | $v_f$                      | $v_g$                      | $h_f$   | $h_g$   | $s_f$     | $s_g$     |
|-------|------------------------|----------------------------|----------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| [bar] | [ $^{\circ}\text{C}$ ] | [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] | [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] | [kJ/kg] | [kJ/kg] | [kJ/kg-K] | [kJ/kg-K] |
| 0,05  | 32,87                  | 0,001005                   | 28,18521                   | 137,75  | 2560,7  | 0,4762    | 8,3938    |
| 0,1   | 45,81                  | 0,001010                   | 14,67001                   | 191,81  | 2583,9  | 0,6492    | 8,1488    |
| 0,15  | 53,97                  | 0,001014                   | 10,02014                   | 225,94  | 2598,3  | 0,7549    | 8,0071    |
| 0,2   | 60                     | 0,001017                   | 7,64810                    | 251,42  | 2608,9  | 0,8320    | 7,9073    |
| 0,25  | 64,96                  | 0,001020                   | 6,20342                    | 271,96  | 2617,5  | 0,8932    | 7,8302    |
| 5     | 151,8                  | 0,001093                   | 0,37483                    | 640,09  | 2748,1  | 1,8604    | 6,8207    |
| 10    | 179,9                  | 0,001127                   | 0,19436                    | 762,51  | 2777,1  | 2,1381    | 6,5850    |
| 15    | 198,3                  | 0,001154                   | 0,13171                    | 844,55  | 2791,0  | 2,3143    | 6,4430    |
| 20    | 212,4                  | 0,001177                   | 0,09959                    | 908,47  | 2798,3  | 2,4467    | 6,3390    |
| 25    | 223,9                  | 0,001197                   | 0,07995                    | 961,87  | 2801,9  | 2,5542    | 6,2558    |
| 30    | 233,9                  | 0,001217                   | 0,06667                    | 1008,29 | 2803,2  | 2,6454    | 6,1856    |
| 35    | 242,6                  | 0,001235                   | 0,05706                    | 1049,72 | 2802,7  | 2,7253    | 6,1244    |
| 40    | 250,4                  | 0,001252                   | 0,04978                    | 1087,39 | 2800,8  | 2,7966    | 6,0696    |
| 45    | 257,4                  | 0,001269                   | 0,04406                    | 1122,13 | 2798,0  | 2,8613    | 6,0198    |
| 50    | 263,9                  | 0,001286                   | 0,03945                    | 1154,50 | 2794,2  | 2,9207    | 5,9737    |
| 55    | 270                    | 0,001303                   | 0,03564                    | 1184,94 | 2789,7  | 2,9759    | 5,9307    |
| 60    | 275,6                  | 0,001319                   | 0,03245                    | 1213,75 | 2784,6  | 3,0275    | 5,8902    |

**Datos de los reactivos y productos de la combustión**

|                               | M         | $\bar{h}_f^0$ | $\bar{C}_p$ |
|-------------------------------|-----------|---------------|-------------|
|                               | [kg/kmol] | [kJ/kmol-K]   | [kJ/kmol-K] |
| CH <sub>4</sub>               | 16        | -74.595       | 35,9        |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 30        | -83.846       | 52,9        |
| O <sub>2</sub>                | 32        | 0             | 31,5        |
| N <sub>2</sub>                | 28        | 0             | 30,0        |
| CO <sub>2</sub>               | 44        | -393.486      | 48,3        |
| H <sub>2</sub> O              | 16        | -241.811      | 36,9        |

a)



$$\begin{aligned} \text{C: } 0,85 + 2 \times 0,15 &= b = 1,15 \\ \text{H: } 4 \times 0,85 + 6 \times 0,15 &= 2c; c = 2,15 \\ \text{O: } 2a &= 2b + c \Rightarrow a = 2,225 \end{aligned}$$

Para hallar  $\lambda$  se usa el contenido de  $\text{O}_2$  de los productos:

$$0,15 = \frac{2,225 \lambda}{1,15 + 2,225 \times 3,76(1+\lambda) + 2,225 \lambda}$$
$$\Rightarrow \lambda = \underline{\underline{2,2431}}$$

b) Del balance m\u00e1sico:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{2,225 \times 3,2431 (32 + 3,76 \times 28)}{(0,85 \times 16 + 0,15 \times 30) \times 18,1} = 54,7292$$

$$\dot{m}_f = \frac{450}{54,7292} = 8,222 \text{ kg/s}$$

$$\dot{V}_f = 8,222 \times \frac{1}{18,1} \times 22,4 \times 60 = \underline{\underline{610,54 \text{ Nm}^3/\text{min}}}$$

c) Del rendimiento de la caldera:

$$0,706 = \frac{T_{a4} - 180}{T_{a4} - 15} \Rightarrow \underline{T_{a4} = 576,225^\circ\text{C}}$$

d)  $T_{v3} = T_{\text{rot}} (60 \text{ bar}) = 275,6^\circ\text{C}$

$$T_{v2} = 275,6 - 15 = 260,6^\circ\text{C}$$

$$T_{v5} = T_{v3} = T_{v4} = 275,6^\circ\text{C}$$

$$T_{v6} = 576,225 - 26 = 550,225^\circ\text{C}$$

$$T_{v1} = 60^\circ\text{C}$$

Para todo la caldera:

$$\dot{m}_f (576,225 - 180) \leq \eta_p \bar{Q}_{p,p} = \dot{m}_v (h_{v6} - h_{v1})$$

$$\begin{aligned} \leq \eta_p \bar{Q}_{p,p} &= 1,15 \times 48,3 + 2,15 \times 36,9 + 2,225 \times 3,76 \times 3,2431 \times \\ &\times 30 + 2,225 \times 2,2431 \times 31,5 = 1106,065 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

$$h_{v1} = 251,42 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v6} = 3542,029 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_f = \frac{81222}{18,1} = 0,4543 \text{ kg/s}$$

Por tanto:  $\underline{\dot{m}_v = 60,499 \text{ kg/s}}$

En el economizador:

$$\dot{m}_f (T_{a6} - 180) \sum n_p \bar{c}_{p,p} = \dot{m}_v (h_{v2} - h_{v1})$$

$$h_{v2} = 1138,07 \text{ kJ/kg}$$

$$0,4543 (T_{a6} - 180) \times 1106,065 = 60,5 (1138,07 - 251,42)$$

$$\rightarrow T_{a6} = 286,754^\circ\text{C}$$

$$PP = T_{a6} - T_{v3} = 286,754 - 275,6 = \underline{11,15^\circ\text{C}}$$

e)  $\dot{m}_v = 60,5 \text{ kg/s}$

$$f) 0,4543 \times (576,225 - T_{a5}) 1106,065 = 60,5 (3542,029 - 2784,6)$$

$$h_{v6} = 3542,029 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v5} = 2784,6 \text{ kJ/kg}$$

$$\downarrow$$

$$T_{a5} = 485,03^\circ\text{C}$$

$$0,4543 (485,03 - 286,754) 1106,065 = \dot{m}_{v3} (h_{v4} - h_{v3})$$

$$h_{v4} = 1213,75 + 0,1 (2784,6 - 1213,75) = 1370,84 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v3} = 1213,75 = 1213,75 \text{ kJ/kg}$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_{v3} = 634,25 \text{ kg/s}}}$$

## CR-7

Se tiene un ciclo combinado con un ciclo CBT en el lado de gas y un ciclo Rankine con un desgasificador y sin recalentamiento en el lado del vapor. El gasto de aire es de 560 kg/s, entrando en el compresor a 15°C y 1 bar. La temperatura de entrada a la turbina de gas es de 1250°C. El condensador del ciclo de vapor trabaja a 5 kPa.

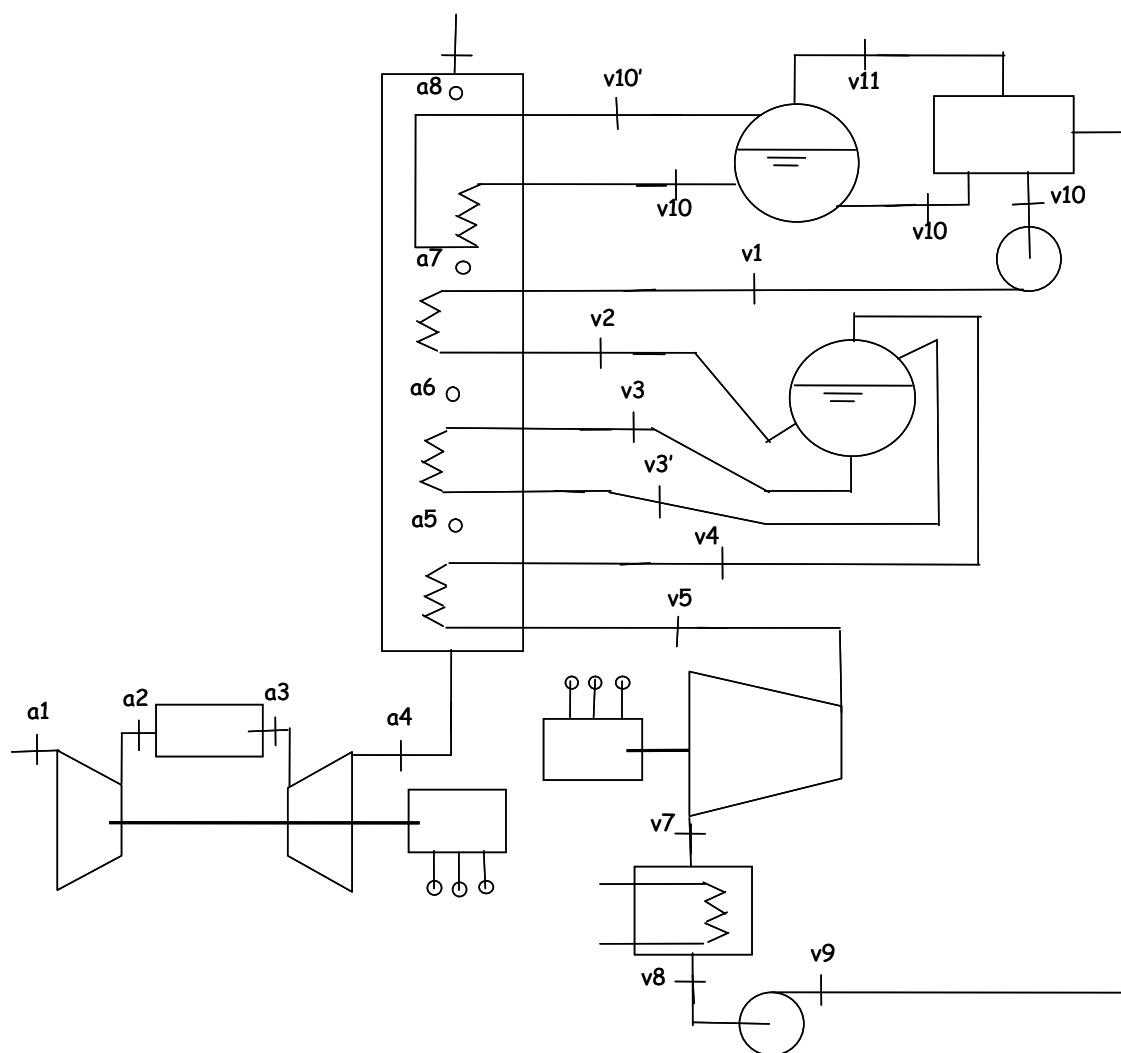
El HRSG es de dos presiones. Parte del líquido saturado que produce el desgasificador es impulsado por una bomba de circulación al calderín de baja presión. El vapor producido se emplea en el propio desgasificador. El resto del líquido saturado producido en el desgasificador ve elevada su presión por una bomba hasta 80 bar, presión a la que trabaja el calderín de alta, el economizador y el sobrecalentador. El vapor entra a la turbina a 70 bar y 550°C. El HRSG trabaja con un punto de estricción de 20 K tanto en el calderín de alta como de baja, acercamiento en el economizador de 12 K y en el sobrecalentador de 30 K.

Los rendimientos isentrópicos de todas las turbinas y del compresor son 0,85 y los de las bombas 1. El aire se considera gas perfecto de  $C_p = 1,1 \text{ kJ/kg-K}$  y  $\gamma = 1,33$ .

Determinar:

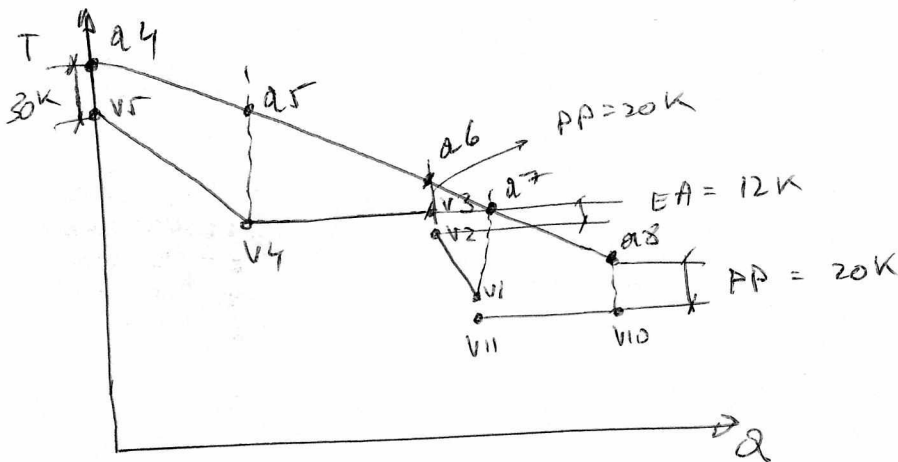
- a) Rendimientos del ciclo de gas, vapor y combinado
- b) Potencias netas del ciclo de gas, vapor y combinado
- c) Gasto de vapor
- d) Temperatura de entrada de gases en el HRSG
- e) Temperatura de salida de gases en el HRSG
- f) Temperatura de entrada del agua de alimentación
- g) Representar el diagrama T-Q del HRSG





①

## Ciclo de gas



$$T_{a1} = 300^\circ\text{C} \rightarrow T_{a4} = 580^\circ\text{C}$$

$$\eta_T = 0.85 = \frac{T_{a3} - T_{a4}}{T_{a3} - T_{a1}} = \frac{1 - \frac{T_{a4}}{T_{a3}}}{1 - r^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}} \rightarrow r = 18.87$$

$$w_T = 1.1(1250 - 580) = 737 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_c = 0.85 = \frac{T_{a2s} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}} = \frac{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{a2}}{T_{a1}} - 1} \Rightarrow T_{a2} = 651.48 \text{ K} = 378.48^\circ\text{C}$$

$$w_c = 1.1(378.48 - 15) = 399.83 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{CG} = \dot{m}_g (w_T - w_c) = 188815.99 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{CC} = \dot{m}_g C_p (T_{a3} - T_{a2}) =$$

$$= 560 \times 1.1(1250 - 378.48) = 536856.32 \text{ kW}$$

$$\eta_{CG} = \frac{188.82}{536.86} = 35.17\%$$

Ciclo de vapor

$$T_{v3} = T_{v4} = T_{sat}(7 \text{ bar}) = 285.8^\circ\text{C}$$

$$T_{a6} = 285.8 + 20 = 305.8^\circ\text{C}$$

$$T_{v2} = 285.8 - 12 = 273.8^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} m_v C_p (T_{a4} - T_{a6}) &= m_v (h_{v5} - h_{v2}) \\ h_{v5} &= 3532 \text{ kJ/kg} \\ h_{v2} &\approx h_f(T_{v2}) = 1204 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \rightarrow m_v = 71.16 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{TV} &= m_v (h_{v5} - h_{v7}) \\ \eta_{TV} &= \frac{h_{v5} - h_{v7}}{h_{v5} - h_{v7s}} \\ h_{v7s} &= 2119 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \rightarrow \dot{W}_{TV} = 85441 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Sobre}} &= m_v (h_{v5} - h_{v4}) = 54012 \text{ kW} \\ h_{v4} &= h_g(7 \text{ bar}) = 2773 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_v h_{v2} + m_{\text{evAP}} h_{v3p} &= m_v h_{v4} + m_{\text{evAP}} h_{v3} \\ m_v (h_{v4} - h_{v2}) &= m_{\text{evAP}} (h_{v3p} - h_{v3}) \end{aligned}$$

Se toma  $x_{3p} \approx 0.1$  para evita el apilamiento de los tubos. Eso supone:

$$h_{v3p} = h_f(7 \text{ bar}) + 0.1 h_{fg}(7 \text{ bar}) =$$

$$= 1418 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v3} = h_f(70 \text{ bar}) = 1267 \text{ kJ/kg}$$

$$\rightarrow \dot{m}_{\text{evap}} = 741,4 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \dot{m}_v(h_{v4} - h_{v2}) = 111599 \text{ kW}$$

$$h_{v8} = h_f(0,05 \text{ bar}) = 137,8 \text{ kJ/kg}$$

$$v_{v8} = 0,001005 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\underline{h_{v9}} = h_{v8} + v_{v8} \left( \underset{\substack{\uparrow \\ \text{bar}}}{P_{\text{desy}}} - \overset{0,05}{\cancel{70} \text{ bar}} \right) 100$$

$$\dot{m}_{\text{desy}} h_{v10} + \dot{m}_{\text{evap}} h_{v10}' = \dot{m}_{\text{desy}} h_{v11} + \dot{m}_{\text{evap}} h_{v10}$$

$$\dot{m}_{\text{desy}} (h_{v11} - h_{v10}) = \dot{m}_{\text{evap}} (h_{v10}' - h_{v10})$$

$$h_{v11} = h_g(P_{\text{desy}})$$

$$h_{v10} = h_f(\text{"})$$

$$h_{v10}' = h_f(\text{"}) + 0,1 h_{fg}(P_{\text{desy}})$$

comme antes

$\dot{m}_{\text{desy}}$   
 $\dot{m}_{\text{evap}}$   
 $P_{\text{desy}}$

$$\dot{m}_{\text{desy}} (h_{v11} - h_{v10}) = \dot{m}_g q_p (T_{a7} - T_{a8}) \rightarrow \dot{m}_{\text{desy}} = f(P_d)$$

$$T_{a8} = T_{v10} + 20$$

$$T_{v10} = T_{\text{sat}}(P_{\text{desy}})$$

$$\dot{m}_v (h_{v2} - h_{v1}) = \dot{m}_g q_p (T_{a6} - T_{a7})$$

$$h_{v1} = h_{v10} + \underbrace{v_{v10}}_{v_f(P_{\text{desy}})} (70 \text{ bar} - \underset{\substack{\uparrow \\ \text{bar}}}{P_{\text{desy}}}) 100 \rightarrow T_{a7} = f(P_d)$$

$$\dot{m}_v h_{v9} + \dot{m}_{desg} h_{v11} = \dot{m}_v h_{v10} + \dot{m}_{desg} h_{v10}$$

$$\rightarrow \dot{m}_{desg} = \dot{q} (P_d)$$

Resolviendo:

$$\dot{m}_{desg} = 17.54 \text{ kg/s}$$

$$P_{desg} = 5.48 \text{ bar}$$

$$T_{a7} = 239.5^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_{evBP} = 175.4 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q}_{desg} = \dot{m}_{desg} (h_{v11} - h_{v10}) = 36783 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{econ0} = \dot{m}_v (h_{v2} - h_{v1}) = 38579 \text{ kW}$$

$$h_{v1} = 662.3 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{Bconde} = \dot{m}_v (h_{v9} - h_{v8}) = 38.85 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{Bdesg} = \dot{m}_v (h_{v1} - h_{v10}) = 503.4 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{cv} = 84899 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{HRS4} = \dot{m}_g c_p (T_{a6} - T_{a7}) = 240,984.96 \text{ kW}$$

$$\eta_{cv} = 35.23\%$$

$$\eta_{cc} = \frac{\dot{W}_{cv} + \dot{W}_{cg}}{\dot{Q}_{cc}} = 52.34\%$$

## RP-1

La Figura 1 representa el esquema de una central térmica de carbón que produce 450 MWe. El estado termodinámico de todos los puntos se da en la Tabla 1. Se quiere llevar a cabo sobre ella un repowering mediante agua de alimentación, según el esquema dado en la Figura 2, donde se han sustituido los precalentadores cerrados de mayor presión por la caldera de recuperación de una turbina de gas. El estado termodinámico de los puntos del ciclo Brayton se da en la Tabla 2.

Se supondrá que la relación de aire/combustible en la cámara de combustión de la turbina de gas es muy elevada y que tanto el gasto de vapor que entra en la turbina como el estado termodinámico de los puntos del ciclo de vapor se mantienen constantes tras el repowering.

Determinar, para el nuevo ciclo combinado

- a) Gasto másico de vapor que entra en la turbina 2p
- b) Extracciones de vapor de la turbina para los precalentadores (desgasificador y precalentador cerrado de baja presión) 2p
- c) Potencia neta del ciclo de vapor 1p
- d) Calor aportado por el carbón 1p
- e) Potencia térmica intercambiada en la caldera de recuperación 1p
- f) Flujo másico de gases 1p
- g) Potencia neta del ciclo Brayton 1p
- h) Rendimiento del ciclo combinado 1p

Tabla 1. Estados del agua en el ciclo de vapor de partida

|    | p [bar] | T [°C] | h [kJ/kg] | v [m <sup>3</sup> /kg] |
|----|---------|--------|-----------|------------------------|
| 1  | 120     | 550    | 3482      |                        |
| 2  | 40      | 395    | 3203      |                        |
| 3  | 15      | 277,5  | 2988      |                        |
| 4  | 5       | 166,9  | 2783      |                        |
| 5  | 0,5     | 81,32  | 2443      |                        |
| 6  | 0,08    | 41,51  | 2222      |                        |
| 7  | 0,08    | 41,51  | 173,8     | 0,001008               |
| 8  | 5       | 41,52  | 174,3     |                        |
| 9  | 5       | 71,32  | 299       |                        |
| 10 | 5       | 151,8  | 640,1     | 0,001093               |
| 11 | 120     | 153,1  | 652,7     |                        |
| 12 | 120     | 188,3  | 805       |                        |
| 13 | 120     | 240,4  | 1040      |                        |
| 14 | 40      | 250,4  | 1087      |                        |
| 15 | 15      | 198,3  | 1087      |                        |
| 16 | 15      | 198,3  | 844,5     |                        |
| 17 | 5       | 151,8  | 844,5     |                        |
| 18 | 0,5     | 81,32  | 340,5     |                        |
| 19 | 0,08    | 41,51  | 340,5     |                        |

Tabla 2. Estados de los gases en el ciclo Brayton

|    | T [°C] | p [bar] | h [kJ/kg] |
|----|--------|---------|-----------|
| 20 | 15     | 1       | 288,5     |
| 21 | 384,2  | 13,8    | 667,9     |
| 22 | 1250   | 13,8    | 1664      |
| 23 | 597,7  | 1       | 900,7     |
| 24 | 170    | 1       | 445,1     |

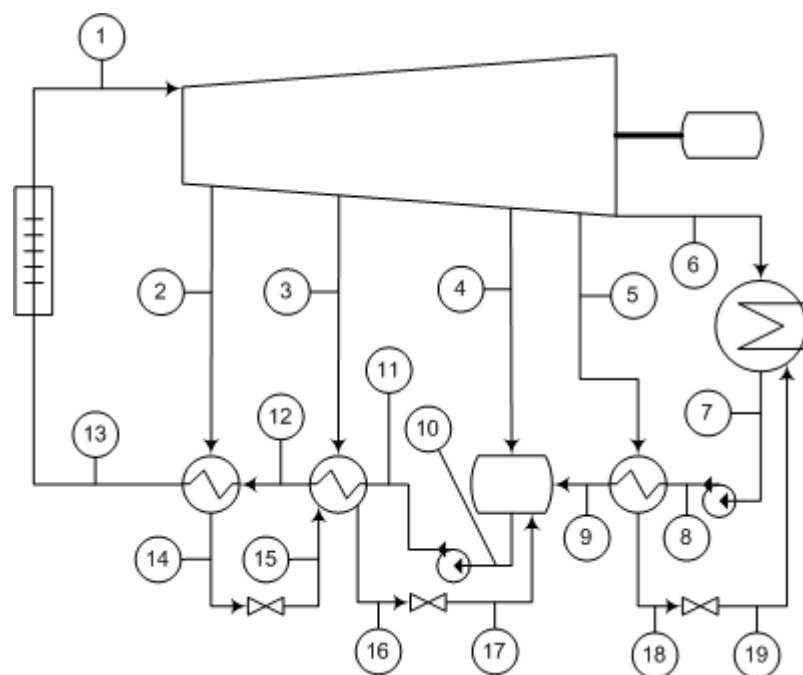


Fig. 1. Ciclo de vapor de partida

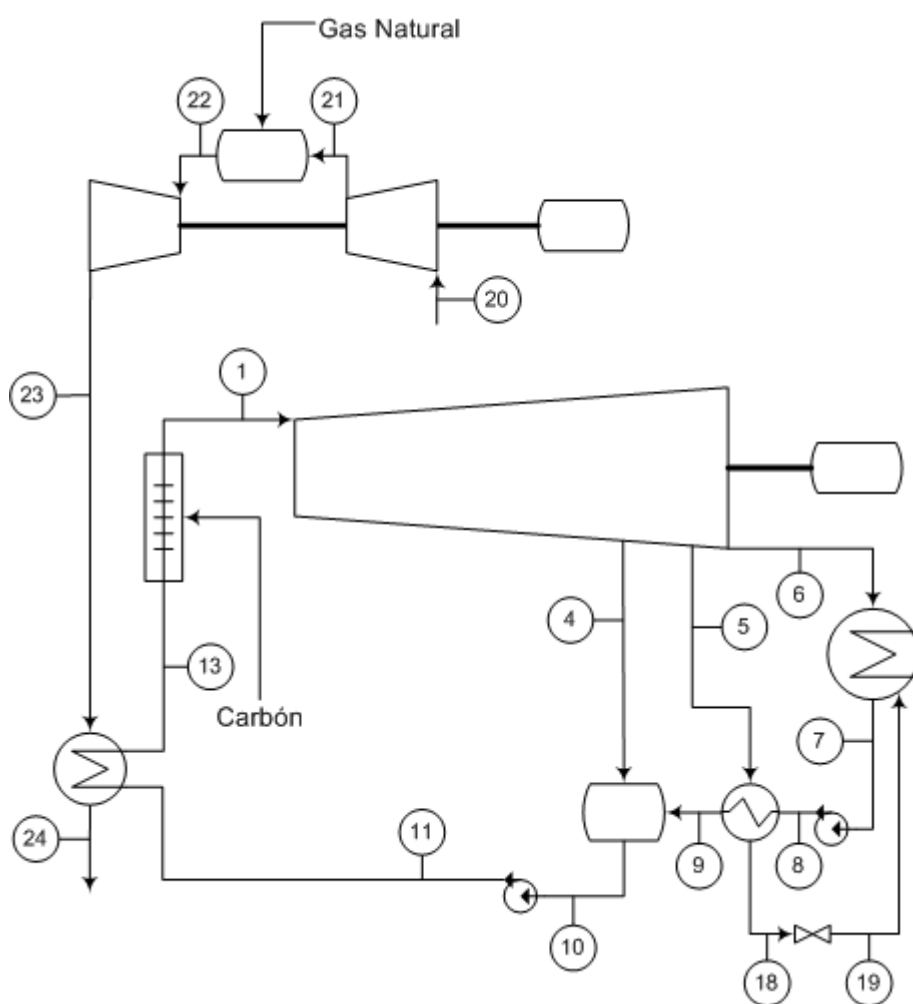


Fig. 2. Ciclo combinado tras el repowering

a) El gasto unitario de vapor, constante tras el repowering, se halla a partir del trabajo neto del ciclo de vapor:

$$(V) w_{TV} = h_1 - \alpha_1 h_2 - \alpha_2 h_3 - \alpha_3 h_4 - \alpha_4 h_5 - (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) h_6$$

$$(VI) w_B = (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)(h_8 - h_7) + (h_{11} - h_{10})$$

Para hallar las extracciones:

$$(I) \alpha_1 h_2 + h_{12} = h_{13} + \alpha_1 h_{14} \rightarrow \alpha_1 = 0.1112$$

$$(II) \alpha_2 h_3 + h_{11} + \alpha_1 h_{15} = h_{12} + (\alpha_1 + \alpha_2) h_{16} \rightarrow \alpha_2 = 0.05847$$

$$(III) \alpha_3 h_4 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) h_9 + (\alpha_1 + \alpha_2) h_{17} = h_{10} \rightarrow \alpha_3 = 0.1$$

$$(IV) \alpha_4 h_5 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) h_8 = (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) h_9 + \alpha_4 h_{18}$$

$$\alpha_4 = 0.04329$$

Finalmente:

$$w_{TV} = 1040 \text{ kJ/kg} ; w_B = 12.93 \text{ kJ/kg}$$

$$450 \times 10^3 = \dot{m}_V (1040 - 12.93) \Rightarrow \underline{\underline{\dot{m}_V = 438 \text{ kg/s}}}$$

b) En el nuevo ciclo combinado desaparecen las extracciones  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , con lo que aumentará el trabajo del ciclo de vapor al ser el mismo flujo de entrada a la turbina. Las ecuaciones III y IV se mantienen; aunque dando resultados diferentes:

$$\alpha_3 h_4 + (1 - \alpha_3) h_9 = h_{10} \Rightarrow \underline{\underline{\alpha_3 = 0.1373}}$$

$$\alpha_4 h_5 + (1 - \alpha_3) h_8 = (1 - \alpha_3) h_9 + \alpha_4 h_{18} \rightarrow \underline{\underline{\alpha_4 = 0.05114}}$$



c) Replantando las ecuaciones V y VI se tiene:

$$w_{TV} = h_1 - \alpha_3 h_4 - \alpha_4 h_5 - (1 - \alpha_3 - \alpha_4) h_6 = 1172 \text{ kJ/kg}$$

$$w_B = (1 - \alpha_3)(h_8 - h_9) + (h_{11} - h_{10}) = 12,99 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{CV} = 438(1172 - 12,99) = 507488 \text{ kW} = \underline{\underline{507,5 \text{ MW}}}$$

$$d) \dot{Q}_{cond} = \dot{m}_v(h_1 - h_{13}) = 438(3482 - 1040) = \underline{\underline{1069 \text{ MW}}}$$

$$e) \dot{Q}_{HRSG} = \dot{m}_v(h_{13} - h_{11}) = 438(1040 - 652,7) = \underline{\underline{170 \text{ MW}}}$$

$$f) 170 \text{ MW} = \dot{m}_g(h_{23} - h_{24}) \Rightarrow \dot{m}_g = \underline{\underline{372,9 \text{ kg/s}}}$$

$$g) \dot{W}_{CG} = 372,9[-(667,9 - 288,5) + (1664 - 900,7)] = \underline{\underline{143,24 \text{ MW}}}$$

h) Rendimiento  $\eta$ .

$$\dot{Q}_{gn} = 372,9(1664 - 667,9) = 371,5 \text{ MW}$$

$$\eta_{cc} = \frac{507,5 + 143,24}{1069 + 371,5} = \underline{\underline{45,17\%}}$$

$$\frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{W}_{CG}} = \frac{507,5}{143,24} = 3,543$$

# Ecuaciones de eficiencia

$$W_{CV} = 507,5 \text{ MW}$$

$$W_{CH} = 143,24 \text{ MW}$$

$$Q_H = 1069 \text{ MW}$$

$$Q_{CH} = 371,5 \text{ MW}$$

$$Q_R = 170 \text{ MW}$$

$$\eta_{CR} = \frac{900,7 - 455,1}{900,7 - 288,5} = 0,7279$$

$$\eta_{CV} = \frac{507,5}{1069 + 170} = 0,4092$$

$$\eta_{CH} = \frac{143,24}{371,5} = 0,3856$$

$$\eta_{CC} = \underbrace{\frac{1}{1 + \frac{1069}{371,5}}}_{0,2579} \left[ \underbrace{0,3856 \left( 1 + \frac{507,5}{143,24} \right)}_{1,7518} \right] = 0,4517$$

$$\eta_{CC} = \frac{1}{1 + \frac{1069}{371,5}} \left[ \overbrace{0,3856 + 0,4092 (1 - 0,3856) 0,7279}^{0,5686} + \underbrace{0,4092 \frac{1069}{371,5}}_{1,1775} \right] = 0,4503 =$$

$$= \underbrace{0,1466}_{\text{cc conversi\u00f3n}} + \underbrace{0,3037}_{\text{CV}}$$

## RP-2

La Figura 1 representa el esquema de una central térmica de carbón que produce 500 MWe. El estado termodinámico de todos los puntos se da en la Tabla 1. Se quiere llevar a cabo sobre ella un repowering mediante postcombustión, según el esquema dado en la Figura 2, donde la fracción del agua de alimentación que atraviesa los dos precalentadores cerrados de mayor presión es el 70% de la que impulsa la bomba. El estado termodinámico de los puntos del ciclo Brayton se da en la Tabla 2.

Se supondrá que la relación de aire/combustible tanto en la combustión como en la postcombustión es muy elevada y que tanto el gasto de vapor que entra en la turbina como el estado termodinámico de los puntos del ciclo de vapor se mantienen constantes tras el repowering.

Determinar, para el nuevo ciclo combinado

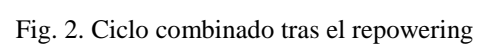
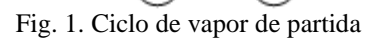
- a) Gasto másico de vapor que entra en la turbina
- b) Extracciones de vapor de la turbina para los precalentadores
- c) Potencia neta del ciclo de vapor
- d) Flujo másico de gases
- e) Potencia térmica aportada en la postcombustión
- f) Potencia neta del ciclo Brayton
- g) Rendimiento del ciclo combinado

Tabla 1. Estados del agua en el ciclo de vapor de partida

|    | p [bar] | T [°C] | h [kJ/kg] | v [m <sup>3</sup> /kg] |
|----|---------|--------|-----------|------------------------|
| 1  | 120     | 550    | 3482      |                        |
| 2  | 40      | 395    | 3203      |                        |
| 3  | 15      | 277,5  | 2988      |                        |
| 4  | 5       | 166,9  | 2783      |                        |
| 5  | 0,5     | 81,32  | 2443      |                        |
| 6  | 0,08    | 41,51  | 2222      |                        |
| 7  | 0,08    | 41,51  | 173,8     | 0,001008               |
| 8  | 5       | 41,52  | 174,3     |                        |
| 9  | 5       | 71,32  | 299       |                        |
| 10 | 5       | 151,8  | 640,1     | 0,001093               |
| 11 | 120     | 153,1  | 652,7     |                        |
| 12 | 120     | 188,3  | 805       |                        |
| 13 | 120     | 240,4  | 1040      |                        |
| 14 | 40      | 250,4  | 1087      |                        |
| 15 | 15      | 198,3  | 1087      |                        |
| 16 | 15      | 198,3  | 844,5     |                        |
| 17 | 5       | 151,8  | 844,5     |                        |
| 18 | 0,5     | 81,32  | 340,5     |                        |
| 19 | 0,08    | 41,51  | 340,5     |                        |

Tabla 2. Estados de los gases en el ciclo Brayton

|    | T [°C] | p [bar] | h [kJ/kg] |
|----|--------|---------|-----------|
| 20 | 15     | 1       | 288,5     |
| 21 | 384,2  | 13,8    | 667,9     |
| 22 | 1250   | 13,8    | 1664      |
| 23 | 597,7  | 1       | 900,7     |
| 24 | 1600   | 1       | 2094      |
| 25 | 170    | 1       | 445,1     |



a) El gasto masivo de vapor, constante tras el repowering, se halla a partir del trabajo neto del ciclo de Rankine:

$$(V) w_{TV} = h_1 - \alpha_1 h_2 - \alpha_2 h_3 - \alpha_3 h_4 - \alpha_4 h_5 - (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) h_6$$

$$(VI) w_B = (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) (h_8 - h_7) + (h_{11} - h_{10})$$

Para hallar las extracciones:

$$(I) \alpha_1 h_2 + h_{12} = h_{13} + \alpha_1 h_{14} \rightarrow \alpha_1 = 0,1112$$

$$(II) \alpha_2 h_3 + h_{11} + \alpha_1 h_{15} = h_{12} + (\alpha_1 + \alpha_2) h_{16} \rightarrow \alpha_2 = 0,05847$$

$$(III) \alpha_3 h_4 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) h_9 + (\alpha_1 + \alpha_2) h_{17} = h_{10} \rightarrow \alpha_3 = 0,1$$

$$(IV) \alpha_4 h_5 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) h_8 = (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) h_9 + \alpha_4 h_{18}$$

$$\downarrow$$

$$\alpha_4 = 0,04329$$

Finalmente:

$$w_{TV} = 1040 \text{ kJ/kg}$$

$$w_B = 12,93 \text{ kJ/kg}$$

$$500 \times 10^3 = \dot{m}_v (1040 - 12,93) \Rightarrow \boxed{\dot{m}_v = 486,6 \text{ kg/s}}$$

b) En el nuevo ciclo combinado el by-pass de las últimas precalentadores modifica las extracciones, aumentando el trabajo del ciclo de vapor.

Las ecuaciones (I) y (II) ponen a ver: ( $\beta = 0.3$ )

$$\alpha_1 h_2 + (1-\beta) h_{12} = (1-\beta) h_{13} + \alpha_1 h_{14} \rightarrow \underline{\alpha_1 = 0.07787}$$

$$\alpha_2 h_3 + (1-\beta) h_{11} + \alpha_1 h_{15} = (1-\beta) h_{12} + (\alpha_1 + \alpha_2) h_{16} \\ \rightarrow \underline{\alpha_2 = 0.04093}$$

Las ecuaciones III y IV no se modifican, aunque si sus valores ( $\alpha_3$  y  $\alpha_4$ ) debido a la modificación de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ :

$$\alpha_3 = 0.1112$$

$$\alpha_4 = 0.04564 //$$

Como se ve, son muy similares a las anteriores.

c) Con las nuevas extracciones se aplican nuevamente las ecuaciones V y VI y se obtiene:

$$w_{TV} = 1080 \text{ kJ/kg}$$

$$w_B = 12.95 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{CV} = \dot{m}_V (w_{TV} - w_B) = \underline{519107 \text{ kW}}$$

d) Para hallar el flujo de gas se pide analizar los calderos de recuperación

$$\dot{Q}_{\text{vapor}} = \dot{m}_V [h_1 - \beta h_{11} - (1-\beta) h_{13}] = \underline{1244722.8 \text{ kW}}$$

Desde el lado de los gases:

$$\dot{m}_g(h_{24} - h_{25}) = \dot{Q}_{\text{vapor}} \Rightarrow \underline{\underline{\dot{m}_g = 754.7 \text{ kg/s}}}$$

e) El balance en la postcombustión genera:

$$\dot{Q}_{\text{post}} = \dot{m}_g(h_{24} - h_{23}) = \underline{\underline{900741 \text{ kW}}}$$

f) La potencia neta del Brayton:

$$\dot{W}_{CG} = \dot{m}_g[(h_{22} - h_{23}) - (h_{21} - h_{20})] = \underline{\underline{289895 \text{ kW}}}$$

g) El rendimiento del ciclo combinado:

$$\dot{Q}_{\text{comb}} = \dot{m}(h_{22} - h_{21}) = 751894 \text{ kW}$$

$$\eta_{cc} = \frac{519107 + 289895}{900741 + 751894} = \underline{\underline{48.95\%}}$$

El rendimiento es algo bajo para un CC, pero lógico al ser un ciclo derivado de un repowering mediante post-comb.

El incremento de potencia:

$$\frac{809002}{500000} = \underline{\underline{1.618}}$$

El ratio vapor a gas:

$$\frac{519107}{289895} = \underline{\underline{1.79}}$$

# Equations de efficacite

$$W_{cc} = 289,9 \text{ MW}$$

$$Q_U = 900,7 \text{ MW}$$

$$Q_R = 1244,7 \text{ MW}$$

$$W_{cv} = 519,1 \text{ MW}$$

$$Q_g = 751,9 \text{ MW}$$

$$\eta_{cv} = \frac{519,1}{1244,7} = 0,4171$$

$$\eta_{cg} = \frac{289,9}{751,9} = 0,3856$$

$$\eta_{CR} = \frac{1244,7}{1244,7 + 118,2} = \frac{2094 - 445,1}{2094 - 288,1} = 0,9133$$

$$\frac{Q_R}{Q_R + Q_{cc}} = \frac{h_{24} - h_{25}}{h_{24} - h_{20}}$$

$$\eta_{cc} = \left( \frac{1}{1 + \frac{900,7}{751,9}} \right) \left[ 0,3856 \left( 1 + \frac{519,1}{289,9} \right) \right] = 0,4896$$

0,45448                      1,0761

$$\eta_{cc} = \frac{1}{1 + \frac{900,7}{751,9}} \left[ \overbrace{0,3856 + 0,9133 \times 0,4171 \times (1 - 0,3856)}^{0,6197} + \underbrace{0,4171 \times 0,9133 \times \frac{900,7}{751,9}}_{0,456324} \right] =$$

$$= \underbrace{0,281927}_{CC \text{ convert}} + \underbrace{0,207618}_{CV} = 0,4896$$



## STIG-1

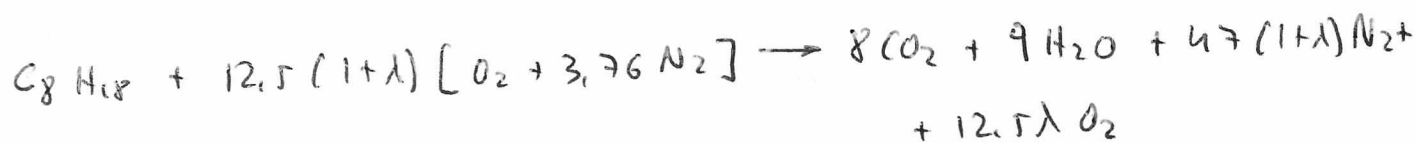
Se pretende analizar el método STIG de inyección de vapor en la cámara de combustión de ciclos CBT como procedimiento para la reducción de NOx. Para ello se realizarán los siguientes pasos:

- a) Resolver un ciclo CBT con aire a 15°C y 1 bar a la entrada al compresor. Los rendimientos isentrópicos tanto del compresor como de la turbina son 0,85. Como combustible se emplea C<sub>8</sub>H<sub>18</sub> que entra en la cámara de combustión a 25°C y 8 bar. La relación de presión es de 8. Se determinará el exceso de aire necesario para que la temperatura de entrada en turbina sea de 950°C. Se calculará la potencia neta producida para 1 kg/min de combustible, así como el rendimiento.
- b) Al ciclo anterior se le inyecta vapor saturado en la cámara de combustión a 8 bar. El flujo másico de vapor inyectado es el 15% del flujo másico de aire. Manteniendo el gasto de combustible y el exceso de aire del apartado anterior, determinar la temperatura de entrada a turbina, el rendimiento y la potencia neta producida. El agua se modelará como gas perfecto, entrando a la cámara de combustión a su temperatura de saturación a 8 bar.
- c) Analizar los resultados.

Datos:

|                  | Cp [kJ/kmol-K] |                                    | $\bar{h}_f^0$ [kJ/kmol] |
|------------------|----------------|------------------------------------|-------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 53             | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l) | -249910                 |
| H <sub>2</sub> O | 40             | CO <sub>2</sub>                    | -393520                 |
| N <sub>2</sub>   | 32             | H <sub>2</sub> O (v)               | -241820                 |
| O <sub>2</sub>   | 34.4           |                                    |                         |

a) AIRE SIN VAPOR



~~$\bar{h}_{comb}$~~

$$\bar{h}_{comb} + [8 \times 53 + 9 \times 40 + 47(1+\lambda)32 + 12.5\lambda 34.4](T_3 - T_0) =$$

$$= 12.5(1+\lambda) [34.4 + 3.76 \times 32](T_2 - T_0) +$$

$$+ \frac{1}{750} \times 114(800 - 101.325)$$

$$T_3 = 950^\circ C ; T_0 = 25^\circ C$$

$$\bar{h}_{comb} = -5074630 \text{ kJ/kmol}$$

$$106,1986 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

Para hallar  $T_2$  vamos al compresor:

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$h_{2s} - h_1 = (34.4 + 3.76 \times 32)(T_{2s} - T_1)$$

$$h_2 - h_1 = ( \quad ) (T_2 - T_1)$$

$$\Delta_{2s} - \Delta_1 = 0 = 34.4 L \frac{T_{2s}}{T_1} - 8'314 L 8 + 3.76 \times 32 L \frac{T_{2s}}{T_1} -$$

$$- 3.76 \times 8'314 \times L 8$$

$$8'314 \times 4.76 \times L 8 = 154.72 L \frac{T_{2s}}{288} \Rightarrow T_{2s} = 490.2154 K$$

$$T_2 = 525.9 K$$

Operando

$$\begin{aligned}
 & -5074630 + 2116400 + 1788950\lambda = \\
 & = 440758,6 + 440758,6\lambda \rightarrow \underline{\underline{\lambda = 2,522}} \\
 & + 106,1986
 \end{aligned}$$

Turbina

$$\eta_T = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4g}}$$

$$\begin{aligned}
 s_3 - s_{us} = 0 \Rightarrow & 424 \text{ L } \frac{T_{us}}{T_3} + 360 \text{ L } \frac{T_{us}}{T_3} + 5295,73 \text{ L } \frac{T_{us}}{T_3} + \\
 & + 1084,073 \text{ L } \frac{T_{us}}{T_3} = 81314 \left[ 8 + 9 + 165,4917 + \right. \\
 & \left. + 31,5138 \right] \text{ L } \left( \frac{1}{8} \right) \Rightarrow T_{us} = 729,676 \text{ K} \\
 & \underline{T_4 = 803,67 \text{ K}} \checkmark
 \end{aligned}$$

$$\bar{h}_3 - \bar{h}_4 = 7163,803 \cdot (950 + 273 - 803,67) = 3003997,512 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{h}_2 - \bar{h}_1 &= 12,5 \times 3,5211 \times 154,72 (525,9 - 288) = \\
 &= 1620053,180 \text{ kJ/kmol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_T - \dot{W}_c &= (3003997,512 - 1620053,180) \frac{1/60}{114} = \\
 &= 202,33 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{cc} = \frac{1}{60} \times \frac{5074630}{114} = 741,9 \text{ kW}$$

$$\eta = 27.27\%$$

$$C_{p, \text{medio}}^{\text{gas}} = \frac{3003997.512}{950 + 273 - 803.67} \times \frac{1}{114} \times \frac{1}{54.0931} =$$

$$= 1.1617 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

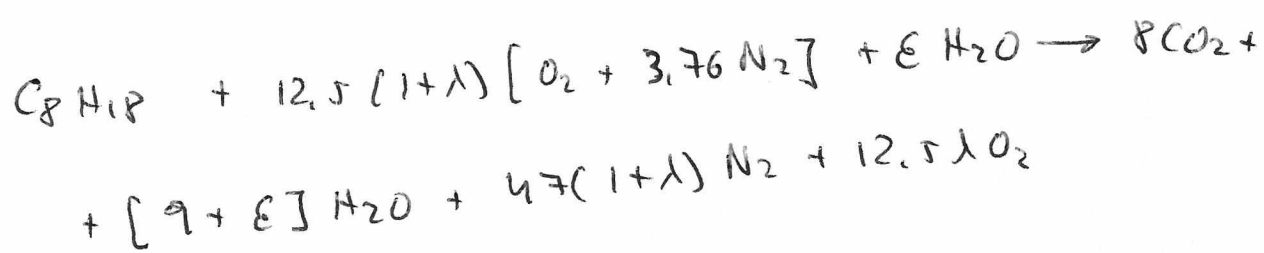
↑  
gas

$$\frac{w_a}{w_f} = \frac{12.5 \times 3.5211 \times 4.76 \times 28.89}{114} = 53.0931$$

$$w_g = w_a + w_f = w_f \left( \frac{w_a}{w_f} + 1 \right)$$

$$\frac{w_g}{w_f} = 54.0931$$

$$w_g = 0.9016 \text{ kg/s}$$

b) CICLO CON VAPOR

$$\frac{\dot{w}_v}{\dot{w}_a} = 0,15 = \frac{\epsilon \cdot 18}{12,5(1+\lambda) \cdot 4,76 \cdot 28,84} \Rightarrow \epsilon = 14,3(1+\lambda)$$

$$\bar{h}_{comb}^o + [8 \times 53 + 14,3(1+\lambda) \times 40 + 9 \times 40 + 47(1+\lambda)32 +$$

$$+ 12,5\lambda 34,4] [T_3 - T_0] =$$

$$= 12,5(1+\lambda) [34,4 + 3,76 \times 32] [T_2 - T_0] +$$

$$+ 14,3(1+\lambda) 40 (T_v - T_0) + 106,1986$$

$$T_0 = 25^\circ C \quad \lambda = \lambda_{aire} = 2,5211$$

$$T_3 = ? \quad T_v = T_{sat}(8 \text{ bar}) = 170,4^\circ C$$

$$T_2 = 525,9 \text{ K (igual caso a)}$$

$$T_3 = 1051,925 \text{ K} = 778,925^\circ C$$

$$\eta_T = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{us}}$$

$$\Delta_3 - \Delta_{us} = 0 \Rightarrow [424 + 2374,0692 + 5295,7344 + 1084,073] L \frac{T_{4s}}{T_3} = 81314 \sqrt{264,3572} L \left(\frac{1}{8}\right)$$

$$T_{4s} = 639,3194 \text{ K}$$

$$T_4 = 701,2103 \text{ K}$$

$$\bar{h}_3 - \bar{h}_u = 3218816,238 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_2 - \bar{h}_1 = 1620053,180 \text{ "}$$

$$\dot{W}_T - \dot{W}_c = (3218816,238 - 1620053,180) \frac{1/60}{114} =$$

$$= \frac{233,73 \text{ kW}}{\left. \begin{array}{l} \dot{Q}_{cc} = 741,9 \text{ kW} = \dot{W}_f \text{ PCI} \end{array} \right\} \eta = 31,51\%}$$

$$c_{p,medo}^{gas} = \frac{3218816,238}{1051,925 - 701,2103} \times \frac{1}{114} \times \frac{1}{62,0571} =$$

$$= 1,2973 \text{ kJ/kg-K}$$

$$\dot{W}_g = \dot{W}_a + \dot{W}_v + \dot{W}_t = \dot{W}_f \left[ \frac{\dot{W}_a}{\dot{W}_t} + \frac{\dot{W}_v}{\dot{W}_t} + 1 \right] =$$

$$= \dot{W}_f \left[ \frac{\dot{W}_a}{\dot{W}_t} \left( \underbrace{1 + \frac{\dot{W}_v}{\dot{W}_a}}_{1,15} \right) + 1 \right]$$

$$\frac{\dot{W}_a}{\dot{W}_t} = \frac{12,5 \times 3,5211 \times 4,76 \times 28,189}{114} = 53,0931$$

$$\dot{W}_g = \dot{W}_f \times 62,0571$$

Nota: Habría que comprobar que la cantidad de agua aportada no sobrepasa la saturación:

$$12.5(1+2.5211)(O_2 + 3.76 N_2) + \varepsilon H_2O$$

Aire húmedo a 8 bar y 526 K =  $T_2$

$$P_v = y_v P$$

$$y_v = \frac{14.3(1+2.5211) = \varepsilon}{12.5(1+2.5211)(4.76) + 14.3(1+2.5211)} =$$

$$= 0.1933$$

$$\left. \begin{aligned} P_v &= 0.1933 \times 8 = 1.55 \text{ bar} \\ P_{\text{wet}}(526 \text{ K}) &= 41.8 \text{ bar} \end{aligned} \right\} \phi = \frac{1.55}{41.8} = 3.7\%$$

Luego el vapor aún tiene "cabe" en ~~el~~  
aire como vapor.