

ANEXO 2: METODOLOGÍA DE CÁLCULO

CONTENIDO

1. OBJETO	5
2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO	6
3. CASO 1: CICLO SIMPLE DE RANKINE, REFRIGERACIÓN POR CICLO ABIERTO	7
3.1. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO	8
3.2. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS	12
3.3. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS	13
3.4. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN	14
3.5. RENDIMIENTOS DEL CICLO	16
3.6. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	17
4. CASO 2: CICLO SIMPLE DE RANKINE, AEROCONDENSADOR	18
4.1. DATOS DE ENTRADA	18
4.2. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO	19
4.3. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS	23
4.4. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS	25
4.5. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN	25
4.6. RENDIMIENTOS DEL CICLO	28
4.7. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	28
5. CASO 3: CICLO SIMPLE DE RANKINE, TORRE DE REFRIGERACIÓN	29
5.1. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO	30

5.2.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS	34
5.3.	POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS.....	36
5.4.	CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN.....	36
5.5.	RENDIMIENTOS DEL CICLO.....	39
5.6.	EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	39
6.	CASO 4: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO, REFRIGERACIÓN POR CICLO ABIERTO.....	40
6.1.	ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO	41
6.2.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS	46
6.3.	POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS.....	48
6.4.	CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN.....	48
6.5.	RENDIMIENTOS DEL CICLO.....	51
6.6.	EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	51
7.	CASO 5: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO, AEROCONDENSADOR ..	52
7.1.	ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO	53
7.2.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS	58
7.3.	POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS.....	60
7.4.	CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN.....	61
7.5.	RENDIMIENTOS DEL CICLO.....	63
7.6.	EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	63
8.	CASO 6: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO, TORRE DE REFRIGERACIÓN	64
8.1.	ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO	65
8.2.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS	70

8.3.	POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS.....	72
8.4.	CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN.....	72
8.5.	RENDIMIENTOS DEL CICLO.....	75
8.6.	EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	75
9.	CASO 7: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO Y CON RECALENTAMIENTO, REFRIGERACIÓN POR CICLO ABIERTO	76
9.1.	DATOS DE ENTRADA	76
9.2.	ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO	77
9.3.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS	86
9.4.	POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS.....	88
9.5.	CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN.....	89
9.6.	RENDIMIENTOS DEL CICLO.....	92
9.7.	EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	92
10.	CASO 8: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO Y CON RECALENTAMIENTO, AEROCONDENSADOR	93
10.1.	DATOS DE ENTRADA	93
10.2.	ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO	94
10.3.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS	103
10.4.	POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS.....	105
10.5.	CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN.....	106
10.6.	RENDIMIENTOS DEL CICLO.....	108
10.7.	EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	109
11.	CASO 9: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO Y CON RECALENTAMIENTO, TORRE DE REFRIGERACIÓN	110

11.1. DATOS DE ENTRADA	110
11.2. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO	112
11.3. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS	120
11.4. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS.....	122
11.5. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN.....	123
11.6. RENDIMIENTOS DEL CICLO.....	126
11.7. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	126

ANEXO 2: METODOLOGÍA DE CÁLCULO

1. OBJETO

El objeto de este anexo es presentar de forma detallada y ordenada la metodología de cálculo seguida en el desarrollo de la aplicación. Para ello se presenta un esquema de los pasos seguidos que son comunes a todos los casos estudiados y a continuación se detallan las ecuaciones implementadas.

2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO



3. CASO 1: CICLO SIMPLE DE RANKINE, REFRIGERACIÓN POR CICLO ABIERTO

Los datos de entrada necesarios para la definición del ciclo son:

Generador eléctrico:

- ✓ Potencia a entregar a la red
- ✓ Rendimiento eléctrico del generador

Caldera:

- ✓ Rendimiento de la caldera
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Exceso de aire de combustión

Turbina:

- ✓ Temperatura de vapor vivo
- ✓ Presión de vapor vivo
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina
- ✓ Presión de condensación

Bomba de baja presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de baja

Bomba de alta presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de alta

Circuito abierto de refrigeración:

- ✓ Pérdida de carga del circuito
- ✓ Rendimiento de bomba

Condensador:

- ✓ Efectividad del condensador

Caracterización de la biomasa:

- ✓ Análisis químico en base húmeda: Carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, humedad y cenizas

Condiciones ambiente de diseño:

- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Presión ambiente
- ✓ Humedad relativa ambiente

3.1. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO

La definición termodinámica de los puntos del ciclo empieza por la condición de vapor vivo exigido por la turbina

Punto 1:

$$T_1 = T_{vv}$$

$$p_1 = p_{vv}$$

$$h_1 = h(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$s_1 = s(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$v_1 = v(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$x_1 = x(\text{agua}, T_1, P_1)$$

Conocido el rendimiento isentrópico de la turbina se puede evaluar aproximar la curva de expansión de la turbina por una recta

Punto 3:

$$P_3 = P_{\text{cond}}$$

$$P_{3s} = P_3$$

$$s_{3s} = s_1$$

$$h_{3s} = h(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$T_{3s} = T(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$\eta_{\text{turbina}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_{3s}} \rightarrow h_3$$

$$T_3 = T(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$s_3 = s(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$v_3 = v(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$x_3 = x(\text{agua}, p_3, h_3)$$

A través de la recta de expansión de la turbina es fácil conocer el estado del punto 2, a la presión de trabajo del desgasificador

Punto 2:

$$p_2 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$p_{2s} = p_2$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = h(\text{agua}, p_{2s}, s_{2s})$$

$$\frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} \rightarrow h_2$$

$$T_2 = T(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$s_2 = s(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$v_2 = v(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$x_2 = x(\text{agua}, h_2, p_2)$$

A la salida del condensador se puede suponer líquido saturado y por lo tanto:

Punto 4:

$$p_4 = p_{\text{cond}}$$

$x_4 = 0$; se valora como líquido saturado a la salida del condensador

$$T_4 = T(\text{agua}, p_4, x_4)$$

$$h_4 = h(\text{agua}, p_4, x_4)$$

$$s_4 = s(\text{agua}, p_4, x_4)$$

$$v_4 = v(\text{agua}, p_4, x_4)$$

La bomba de condensados debe de aportar la presión necesaria para llevar el líquido hasta el desgasificador. Dado el rendimiento isentropico de la bomba, se puede despejar el incremento de temperatura sufrido por el fluido.

Punto 5:

$$p_5 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$p_{5s} = p_5$$

$$s_{5s} = s_4$$

$$h_{5s} = h(\text{agua}, p_{5s}, s_{5s})$$

$$\eta_{\text{bomba 1}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_5 - h_4}{h_{5s} - h_4} \rightarrow h_5$$

$$T_5 = T(\text{agua}, h_5, p_5)$$

$$s_5 = s(\text{agua}, h_5, p_5)$$

$$v_5 = v(\text{agua}, h_5, p_5)$$

$$x_5 = x(\text{agua}, h_5, p_5)$$

Se considera líquido saturado a la salida del desgasificador a la temperatura de saturación para su presión de funcionamiento.

Punto 6:

$$p_6 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$x_6 = 0$$

$$T_6 = T(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$h_6 = h(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$s_6 = s(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$v_6 = v(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$x_6 = x(\text{agua}, p_6, x_6)$$

Por último, la bomba de alta presión debe dar presión suficiente para las condiciones de vapor vivo más la pérdida de carga sufrida en la caldera.

Punto 7:

$$p_7 = p_6 + \Delta p_{\text{caldera}}$$

$$p_{7s} = p_7$$

$$s_{7s} = s_6$$

$$\eta_{\text{bomba 2}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_7 - h_6}{h_{7s} - h_6} \rightarrow h_7$$

$$T_7 = T(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$s_7 = s(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$v_7 = v(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$x_7 = x(\text{agua}, h_7, p_7)$$

3.2. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS

Para calcular el caudal de vapor vivo necesario para generar la potencia deseada, es necesario obtener la fracción de vapor que se extrae para el desgasificador.

$$\text{Rendimiento del generador } \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{\text{generador}}}$$

$$\text{donde: } \dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3)$$

definiendo: $\alpha = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$

sustituyendo: $\alpha = \frac{(h_6 - h_5)}{(h_2 - h_5)}$

se puede despejar $\dot{m}_1$

Del balance de masas en cada uno de los equipos se obtienen todos los caudales de las distintas corrientes de la planta.

Balance de masas:

Caldera: $\dot{m}_7 = \dot{m}_1$

Turbina: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$

Condensador: $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$

Bomba 1: $\dot{m}_5 = \dot{m}_4$

Desgasificador: $\dot{m}_2 + \dot{m}_5 = \dot{m}_6$

Bomba 2: $\dot{m}_7 = \dot{m}_6$

La última ecuación que cierra el sistema de ecuaciones es el balance de energía en el desgasificador

Balance de energía:

Desgasificador: $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_6 h_6$

3.3. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS

Para obtener las potencias térmicas y eléctricas de los distintos equipos que componen la planta se atiende a su definición, de la forma:

$$\text{Caldera:} \quad \dot{Q}_{\text{caldera}} = \dot{m}_1(h_1 - h_7)$$

$$\text{Turbina:} \quad \dot{W}_{\text{turbina}} = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + \dot{m}_3(h_2 - h_3)$$

$$\text{Condensador:} \quad \dot{Q}_{\text{condensador}} = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$$

$$\text{Bomba 1:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 1}} = v_4(p_5 - p_4)$$

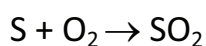
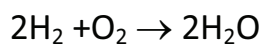
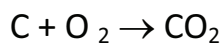
$$\text{Desgasificador:} \quad \dot{Q}_{\text{desgasificador}} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_6 h_6$$

$$\text{Bomba 2:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 2}} = v_6(p_7 - p_6)$$

3.4. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN

Obtención del aire estequiométrico seco: Cantidad de aire seco requerido para quemar completamente el combustible.

Reacciones de combustión, que generan calor útil:



Los otros constituyentes de los combustibles (distintos de C,H,S), así como el N₂ y la humedad no producen calor útil, sin embargo son

constituyentes de los gases de escape y deben ser tenidos en cuenta cuando se evalúe la eficiencia de la caldera.

No se consideran los NO_x a la hora de los cálculos de combustión, pero deben ser tenidos en cuenta a la hora de la consideración de las emisiones contaminantes.

Obtención del aire estequiométrico húmedo:

El aire de combustión utilizado en la caldera también contiene humedad en forma de vapor de agua.

Humedad absoluta en el aire. [kg agua/kg de aire seco]

Condiciones ambiente: Temperatura, presión, humedad relativa →
Cálculos Psicrométricos.

Obtención del Aire de entrada a la caldera. Exceso de aire.

Depende de un cierto número de parámetros

- ✓ Tipo de combustible
- ✓ Diseño de la caldera
- ✓ Diseño de los sistemas de quemadores
- ✓ Carga.

El exceso de aire tiene un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, ya que aumenta el nivel de energía perdida en los gases de escape. Situación de compromiso entre un buen rendimiento y una combustión eficiente.

Obtención de los gases de escape

Se consideran los siguientes componentes:

CO₂ (Combustión del combustible)

H₂O (Combustión del combustible + humedad del aire + humedad del combustible)

SO₂ (Combustión del combustible)

N₂ (Del aire de combustión + presente en el combustible)

O₂ (Del exceso de aire)

Obtención del PCS del combustible.

Composición másica del combustible en base húmeda

Composición másica del combustible en base seca

ejemplo
$$C_{bs} = C \cdot \left[\frac{100}{100 - W} \right]$$

PCS base seca → Fórmula de Milne

$$PCS_{bs} = (0,314 \cdot C_{bs} + 1,322 \cdot H_{bs} - 0,12 \cdot O_{bs} - 0,12 \cdot N_{bs} + 0,0686 \cdot S_{bs} - 0,0153 \cdot A_{bs}) \cdot 1000$$

{kJ/kg cble}

PCS base húmeda
$$PCS_{bh} = PCS_{bs} \cdot \left[1 - \frac{W}{100} \right]$$

3.5. RENDIMIENTOS DEL CICLO

Tras obtener una caracterización de la combustión se pueden calcular los distintos consumos y rendimientos de la planta

$$\eta_{ciclo}^{bruto} = \frac{W_{elec}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

$$\eta_{ciclo}^{neto} = \frac{W_{elec} - W_{auxiliares}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

3.6. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se presenta como anexo la exposición de este caso para una práctica y los resultados obtenidos tal y como los expone la hoja de cálculo

4. CASO 2: CICLO SIMPLE DE RANKINE, AEROCONDENSADOR

4.1. DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada necesarios para la definición del ciclo son:

Generador eléctrico:

- ✓ Potencia a entregar a la red
- ✓ Rendimiento eléctrico del generador

Caldera:

- ✓ Rendimiento de la caldera
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Exceso de aire de combustión

Turbina:

- ✓ Temperatura de vapor vivo
- ✓ Presión de vapor vivo
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina
- ✓ Presión de condensación

Bomba de baja presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de baja

Bomba de alta presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de alta

Aerocondensador:

- ✓ Efectividad del aerocondensador
- ✓ Pérdida de carga del lado del aire
- ✓ Rendimiento de ventiladores

Caracterización de la biomasa:

- ✓ Análisis químico en base húmeda: Carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, humedad y cenizas

Condiciones ambiente de diseño:

- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Presión ambiente
- ✓ Humedad relativa ambiente

4.2. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO

La definición termodinámica de los puntos del ciclo empieza por la condición de vapor vivo exigido por la turbina

Punto 1:

$$T_1 = T_{vv}$$

$$p_1 = p_{vv}$$

$$h_1 = h(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$s_1 = s(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$v_1 = v(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$x_1 = x(\text{agua}, T_1, P_1)$$

Conocido el rendimiento isentrópico de la turbina se puede evaluar aproximar la curva de expansión de la turbina por una recta

Punto 3:

$$P_3 = P_{\text{cond}}$$

$$P_{3s} = P_3$$

$$s_{3s} = s_1$$

$$h_{3s} = h(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$T_{3s} = T(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$\eta_{\text{turbina}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_{3s}} \rightarrow h_3$$

$$T_3 = T(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$s_3 = s(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$v_3 = v(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$x_3 = x(\text{agua}, p_3, h_3)$$

A través de la recta de expansión de la turbina es fácil conocer el estado del punto 2, a la presión de trabajo del desgasificador

Punto 2:

$$p_2 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$p_{2s} = p_2$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = h(\text{agua}, p_{2s}, s_{2s})$$

$$\frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} \rightarrow h_2$$

$$T_2 = T(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$s_2 = s(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$v_2 = v(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$x_2 = x(\text{agua}, h_2, p_2)$$

A la salida del condensador se puede suponer líquido saturado y por la tanto:

Punto 4:

$$p_4 = p_{\text{cond}}$$

$x_4 = 0$; se valora como líquido saturado a la salida del condensador

$$T_4 = T(\text{agua}, p_4, x_4)$$

$$h_4 = h(\text{agua}, p_4, x_4)$$

$$s_4 = s(\text{agua}, p_4, x_4)$$

$$v_4 = v(\text{agua}, p_4, x_4)$$

La bomba de condensados debe de aportar la presión necesaria para llevar el líquido hasta el desgasificador. Dado el rendimiento

isentropico de la bomba, se puede despejar el incremento de temperatura sufrido por el fluido.

Punto 5:

$$p_5 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$p_{5s} = p_5$$

$$s_{5s} = s_4$$

$$h_{5s} = h(\text{agua}, p_{5s}, s_{5s})$$

$$\eta_{\text{bomba 1}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_5 - h_4}{h_{5s} - h_4} \rightarrow h_5$$

$$T_5 = T(\text{agua}, h_5, p_5)$$

$$s_5 = s(\text{agua}, h_5, p_5)$$

$$v_5 = v(\text{agua}, h_5, p_5)$$

$$x_5 = x(\text{agua}, h_5, p_5)$$

Se considera líquido saturado a la salida del desgasificador a la temperatura de saturación para su presión de funcionamiento.

Punto 6:

$$p_6 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$x_6 = 0$$

$$T_6 = T(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$h_6 = h(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$s_6 = s(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$v_6 = v(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$x_6 = x(\text{agua}, p_6, x_6)$$

Por último, la caldera de alta presión debe dar presión suficiente para las condiciones de vapor vivo más la pérdida de carga sufrida en la caldera.

Punto 7:

$$p_7 = p_6 + \Delta p_{\text{caldera}}$$

$$p_{7s} = p_7$$

$$s_{7s} = s_6$$

$$\eta_{\text{bomba 2}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_7 - h_6}{h_{7s} - h_6} \rightarrow h_7$$

$$T_7 = T(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$s_7 = s(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$v_7 = v(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$x_7 = x(\text{agua}, h_7, p_7)$$

4.3. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS

Para calcular el caudal de vapor vivo necesario para generar la potencia deseada, es necesario obtener la fracción de vapor que se extrae para el desgasificador.

Rendimiento del generador $\eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{\text{generador}}}$

donde: $\dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3)$

definiendo: $\alpha = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$

sustituyendo: $\alpha = \frac{(h_6 - h_5)}{(h_2 - h_5)}$

se puede despejar $\dot{m}_1$

Del balance de masas en cada uno de los equipos se obtienen todos los caudales de las distintas corrientes de la planta.

Balance de masas:

Caldera: $\dot{m}_7 = \dot{m}_1$

Turbina: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$

Aerocondensador: $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$

Bomba 1: $\dot{m}_5 = \dot{m}_4$

Desgasificador: $\dot{m}_2 + \dot{m}_5 = \dot{m}_6$

Bomba 2: $\dot{m}_7 = \dot{m}_6$

La última ecuación que cierra el sistema de ecuaciones es el balance de energía en el desgasificador

Balance de energía:

Desgasificador: $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_6 h_6$

4.4. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS

Para obtener las potencias térmicas y eléctricas de los distintos equipos que componen la planta se atiende a su definición, de la forma:

$$\text{Caldera:} \quad \dot{Q}_{\text{caldera}} = \dot{m}_1(h_1 - h_7)$$

$$\text{Turbina:} \quad \dot{W}_{\text{turbina}} = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + \dot{m}_3(h_2 - h_3)$$

$$\text{Aerocondensador:} \quad \dot{Q}_{\text{aerocondensador}} = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$$

$$\text{Bomba 1:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 1}} = v_4(p_5 - p_4)$$

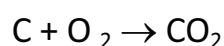
$$\text{Desgasificador:} \quad \dot{Q}_{\text{desgasificador}} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_6 h_6$$

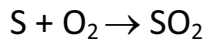
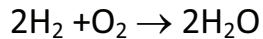
$$\text{Bomba 2:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 2}} = v_6(p_7 - p_6)$$

4.5. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN

Obtención del aire estequiométrico seco: Cantidad de aire seco requerido para quemar completamente el combustible.

Reacciones de combustión, que generan calor útil:





Los otros constituyentes de los combustibles (distintos de C,H,S), así como el N₂ y la humedad no producen calor útil, sin embargo son constituyentes de los gases de escape y deben ser tenidos en cuenta cuando se evalúe la eficiencia de la caldera.

No se consideran los NO_x a la hora de los cálculos de combustión, pero deben ser tenidos en cuenta a la hora de la consideración de las emisiones contaminantes.

Obtención del aire estequiométrico húmedo:

El aire de combustión utilizado en la caldera también contiene humedad en forma de vapor de agua.

Humedad absoluta en el aire. [kg agua/kg de aire seco]

Condiciones ambiente: Temperatura, presión, humedad relativa →
Cálculos Psicrométricos.

Obtención del Aire de entrada a la caldera. Exceso de aire.

Depende de un cierto número de parámetros

- ✓ Tipo de combustible
- ✓ Diseño de la caldera
- ✓ Diseño de los sistemas de quemadores
- ✓ Carga.

El exceso de aire tiene un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, ya que aumenta el nivel de energía perdida en los gases de

escape. Situación de compromiso entre un buen rendimiento y una combustión eficiente.

Obtención de los gases de escape

Se consideran los siguientes componentes:

CO_2 (Combustión del combustible)

H_2O (Combustión del combustible + humedad del aire + humedad del combustible)

SO_2 (Combustión del combustible)

N_2 (Del aire de combustión + presente en el combustible)

O_2 (Del exceso de aire)

Obtención del PCS del combustible.

Composición másica del combustible en base húmeda

Composición másica del combustible en base seca

ejemplo
$$C_{bs} = C \cdot \left[\frac{100}{100 - W} \right]$$

PCS base seca → Fórmula de Milne

$$\text{PCS}_{bs} = (0,314 \cdot C_{bs} + 1,322 \cdot H_{bs} - 0,12 \cdot O_{bs} - 0,12 \cdot N_{bs} + 0,0686 \cdot S_{bs} - 0,0153 \cdot A_{bs}) \cdot 1000$$

{kJ/kg cble}

PCS base húmeda
$$\text{PCS}_{bh} = \text{PCS}_{bs} \cdot \left[1 - \frac{W}{100} \right]$$

4.6. RENDIMIENTOS DEL CICLO

Tras obtener una caracterización de la combustión se pueden calcular los distintos consumos y rendimientos de la planta

$$\eta_{ciclo}^{bruto} = \frac{W_{elec}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

$$\eta_{ciclo}^{neto} = \frac{W_{elec} - W_{auxiliares}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

4.7. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se presenta como anexo la exposición de este caso para una práctica y los resultados obtenidos tal y como los expone la hoja de cálculo

5. CASO 3: CICLO SIMPLE DE RANKINE, TORRE DE REFRIGERACIÓN

Los datos de entrada necesarios para la definición del ciclo son:

Generador eléctrico:

- ✓ Potencia a entregar a la red
- ✓ Rendimiento eléctrico del generador

Caldera:

- ✓ Rendimiento de la caldera
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Exceso de aire de combustión

Turbina:

- ✓ Temperatura de vapor vivo
- ✓ Presión de vapor vivo
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina
- ✓ Presión de condensación

Bomba de baja presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de baja

Bomba de alta presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de alta

Condensador:

- ✓ Efectividad del condensador

Torre de refrigeración:

- ✓ Pérdida de carga del lado del aire
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Rendimiento de ventiladores
- ✓ Rendimiento de bombas

Caracterización de la biomasa:

- ✓ Análisis químico en base húmeda: Carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, humedad y cenizas

Condiciones ambiente de diseño:

- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Presión ambiente
- ✓ Humedad relativa ambiente

5.1. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO

La definición termodinámica de los puntos del ciclo empieza por la condición de vapor vivo exigido por la turbina

Punto 1:

$$T_1 = T_{vv}$$

$$p_1 = p_{vv}$$

$$h_1 = h(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$s_1 = s(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$v_1 = v(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$x_1 = x(\text{agua}, T_1, P_1)$$

Conocido el rendimiento isentrópico de la turbina se puede evaluar aproximar la curva de expansión de la turbina por una recta

Punto 3:

$$P_3 = P_{\text{cond}}$$

$$P_{3s} = P_3$$

$$s_{3s} = s_1$$

$$h_{3s} = h(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$T_{3s} = T(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$\eta_{\text{turbina}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_{3s}} \rightarrow h_3$$

$$T_3 = T(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$s_3 = s(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$v_3 = v(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$x_3 = x(\text{agua}, p_3, h_3)$$

A través de la recta de expansión de la turbina es fácil conocer el estado del punto 2, a la presión de trabajo del desgasificador

Punto 2:

$$p_2 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$p_{2s} = p_2$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = h(\text{agua}, p_{2s}, s_{2s})$$

$$\frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} \rightarrow h_2$$

$$T_2 = T(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$s_2 = s(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$v_2 = v(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$x_2 = x(\text{agua}, h_2, p_2)$$

A la salida del condensador se puede suponer líquido saturado y por la tanto:

Punto 4:

$$p_4 = p_{\text{cond}}$$

$x_4 = 0$; se valora como líquido saturado a la salida del condensador

$$T_4 = T(\text{agua}, p_4, x_4)$$

$$h_4 = h(\text{agua}, p_4, x_4)$$

$$s_4 = s(\text{agua}, p_4, x_4)$$

$$v_4 = v(\text{agua}, p_4, x_4)$$

La bomba de condensados debe de aportar la presión necesaria para llevar el líquido hasta el desgasificador. Dado el rendimiento

isentropico de la bomba, se puede despejar el incremento de temperatura sufrido por el fluido.

Punto 5:

$$p_5 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$p_{5s} = p_5$$

$$s_{5s} = s_4$$

$$h_{5s} = h(\text{agua}, p_{5s}, s_{5s})$$

$$\eta_{\text{bomba 1}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_5 - h_4}{h_{5s} - h_4} \rightarrow h_5$$

$$T_5 = T(\text{agua}, h_5, p_5)$$

$$s_5 = s(\text{agua}, h_5, p_5)$$

$$v_5 = v(\text{agua}, h_5, p_5)$$

$$x_5 = x(\text{agua}, h_5, p_5)$$

Se considera líquido saturado a la salida del desgasificador a la temperatura de saturación para su presión de funcionamiento.

Punto 6:

$$p_6 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$x_6 = 0$$

$$T_6 = T(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$h_6 = h(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$s_6 = s(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$v_6 = v(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$x_6 = x(\text{agua}, p_6, x_6)$$

Por último, la bomba de alta presión debe dar presión suficiente para las condiciones de vapor vivo más la pérdida de carga sufrida en la caldera.

Punto 7:

$$p_7 = p_6 + \Delta p_{\text{caldera}}$$

$$p_{7s} = p_7$$

$$s_{7s} = s_6$$

$$\eta_{\text{bomba 2}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_7 - h_6}{h_{7s} - h_6} \rightarrow h_7$$

$$T_7 = T(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$s_7 = s(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$v_7 = v(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$x_7 = x(\text{agua}, h_7, p_7)$$

5.2. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS

Para calcular el caudal de vapor vivo necesario para generar la potencia deseada, es necesario obtener la fracción de vapor que se extrae para el desgasificador.

Rendimiento del generador $\eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{\text{generador}}}$

donde: $\dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3)$

definiendo: $\alpha = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$

sustituyendo: $\alpha = \frac{(h_6 - h_5)}{(h_2 - h_5)}$

se puede despejar $\dot{m}_1$

Del balance de masas en cada uno de los equipos se obtienen todos los caudales de las distintas corrientes de la planta.

Balance de masas:

Caldera: $\dot{m}_7 = \dot{m}_1$

Turbina: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$

Condensador: $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$

Bomba 1: $\dot{m}_5 = \dot{m}_4$

Desgasificador: $\dot{m}_2 + \dot{m}_5 = \dot{m}_6$

Bomba 2: $\dot{m}_7 = \dot{m}_6$

La última ecuación que cierra el sistema de ecuaciones es el balance de energía en el desgasificador

Balance de energía:

Desgasificador: $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_6 h_6$

5.3. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS

Para obtener las potencias térmicas y eléctricas de los distintos equipos que componen la planta se atiende a su definición, de la forma:

$$\text{Caldera:} \quad \dot{Q}_{\text{caldera}} = \dot{m}_1(h_1 - h_7)$$

$$\text{Turbina:} \quad \dot{W}_{\text{turbina}} = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + \dot{m}_3(h_2 - h_3)$$

$$\text{Condensador:} \quad \dot{Q}_{\text{condensador}} = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$$

$$\text{Bomba 1:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 1}} = v_4(p_5 - p_4)$$

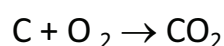
$$\text{Desgasificador:} \quad \dot{Q}_{\text{desgasificador}} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_6 h_6$$

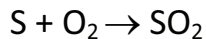
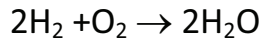
$$\text{Bomba 2:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 2}} = v_6(p_7 - p_6)$$

5.4. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN

Obtención del aire estequiométrico seco: Cantidad de aire seco requerido para quemar completamente el combustible.

Reacciones de combustión, que generan calor útil:





Los otros constituyentes de los combustibles (distintos de C,H,S), así como el N₂ y la humedad no producen calor útil, sin embargo son constituyentes de los gases de escape y deben ser tenidos en cuenta cuando se evalúe la eficiencia de la caldera.

No se consideran los NO_x a la hora de los cálculos de combustión, pero deben ser tenidos en cuenta a la hora de la consideración de las emisiones contaminantes.

Obtención del aire estequiométrico húmedo:

El aire de combustión utilizado en la caldera también contiene humedad en forma de vapor de agua.

Humedad absoluta en el aire. [kg agua/kg de aire seco]

Condiciones ambiente: Temperatura, presión, humedad relativa →
Cálculos Psicrométricos.

Obtención del Aire de entrada a la caldera. Exceso de aire.

Depende de un cierto número de parámetros

- ✓ Tipo de combustible
- ✓ Diseño de la caldera
- ✓ Diseño de los sistemas de quemadores
- ✓ Carga.

El exceso de aire tiene un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, ya que aumenta el nivel de energía perdida en los gases de

escape. Situación de compromiso entre un buen rendimiento y una combustión eficiente.

Obtención de los gases de escape

Se consideran los siguientes componentes:

CO₂ (Combustión del combustible)

H₂O (Combustión del combustible + humedad del aire + humedad del combustible)

SO₂ (Combustión del combustible)

N₂ (Del aire de combustión + presente en el combustible)

O₂ (Del exceso de aire)

Obtención del PCS del combustible.

Composición másica del combustible en base húmeda

Composición másica del combustible en base seca

ejemplo
$$C_{bs} = C \cdot \left[\frac{100}{100 - W} \right]$$

PCS base seca → Fórmula de Milne

$$PCS_{bs} = (0,314 \cdot C_{bs} + 1,322 \cdot H_{bs} - 0,12 \cdot O_{bs} - 0,12 \cdot N_{bs} + 0,0686 \cdot S_{bs} - 0,0153 \cdot A_{bs}) \cdot 1000$$

{kJ/kg cble}

PCS base húmeda
$$PCS_{bh} = PCS_{bs} \cdot \left[1 - \frac{W}{100} \right]$$

5.5. RENDIMIENTOS DEL CICLO

Tras obtener una caracterización de la combustión se pueden calcular los distintos consumos y rendimientos de la planta

$$\eta_{ciclo}^{bruto} = \frac{W_{elec}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

$$\eta_{ciclo}^{neto} = \frac{W_{elec} - W_{auxiliares}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

5.6. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se presenta como anexo la exposición de este caso para una práctica y los resultados obtenidos tal y como los expone la hoja de cálculo

6. CASO 4: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO, REFRIGERACIÓN POR CICLO ABIERTO

Los datos de entrada necesarios para la definición del ciclo son:

Generador eléctrico:

- ✓ Potencia a entregar a la red
- ✓ Rendimiento eléctrico del generador

Caldera:

- ✓ Rendimiento de la caldera
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Exceso de aire de combustión

Turbina:

- ✓ Temperatura de vapor vivo
- ✓ Presión de vapor vivo
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina
- ✓ Presión de condensación

Bomba de baja presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de baja

Bomba de alta presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de alta

Condensador:

- ✓ Efectividad del aerocondensador

Circuito abierto de refrigeración:

- ✓ Pérdida de carga del circuito
- ✓ Rendimiento de bomba
- ✓

Caracterización de la biomasa:

- ✓ Análisis químico en base húmeda: Carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, humedad y cenizas

Condiciones ambiente de diseño:

- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Presión ambiente
- ✓ Humedad relativa ambiente

6.1. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO

La definición termodinámica de los puntos del ciclo empieza por la condición de vapor vivo exigido por la turbina

Punto 1:

$$T_1 = T_{vv}$$

$$p_1 = p_{vv}$$

$$h_1 = h(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$s_1 = s(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$v_1 = v(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$x_1 = x(\text{agua}, T_1, P_1)$$

Conocido el rendimiento isentrópico de la turbina se puede evaluar aproximar la curva de expansión de la turbina por una recta

Punto 5:

$$P_5 = P_{\text{cond}}$$

$$P_{5s} = P_5$$

$$s_{5s} = s_1$$

$$h_{5s} = h(\text{agua}, p_{5s}, s_{5s})$$

$$T_{5s} = T(\text{agua}, p_{5s}, s_{5s})$$

$$\eta_{\text{turbina}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_1 - h_5}{h_1 - h_{5s}} \rightarrow h_5$$

$$T_5 = T(\text{agua}, p_5, h_5)$$

$$s_5 = s(\text{agua}, p_5, h_5)$$

$$v_5 = v(\text{agua}, p_5, h_5)$$

$$x_5 = x(\text{agua}, p_5, h_5)$$

A través de la recta de expansión de la turbina es fácil conocer el estado del punto 2, a la presión de trabajo del desgasificador

Punto 2:

$$p_2 = p_{\text{extracción 1}}$$

$$p_{2s} = p_2$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = h(\text{agua}, p_{2s}, s_{2s})$$

$$\frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} \rightarrow h_2$$

$$T_2 = T(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$s_2 = s(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$v_2 = v(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$x_2 = x(\text{agua}, h_2, p_2)$$

Punto 3:

$$p_3 = p_{\text{extracción 2}}$$

$$p_{3s} = p_3$$

$$s_{3s} = s_1$$

$$h_{3s} = h(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$\frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} = \frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} \rightarrow h_3$$

$$T_3 = T(\text{agua}, h_3, p_3)$$

$$s_3 = s(\text{agua}, h_3, p_3)$$

$$v_3 = v(\text{agua}, h_3, p_3)$$

$$x_3 = x(\text{agua}, h_3, p_3)$$

Punto 4:

$$p_4 = p_{\text{extracción 3}}$$

$$p_{4s} = p_4$$

$$s_{4s} = s_1$$

$$h_{4s} = h(\text{agua}, p_{4s}, s_{4s})$$

$$\frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} = \frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} \rightarrow h_4$$

$$T_4 = T(\text{agua}, h_4, p_4)$$

$$s_4 = s(\text{agua}, h_4, p_4)$$

$$v_4 = v(\text{agua}, h_4, p_4)$$

$$x_4 = x(\text{agua}, h_4, p_4)$$

A la salida del condensador se puede suponer líquido saturado y por la tanto:

Punto 6:

$$p_6 = p_{\text{cond}}$$

$x_6 = 0$; se valora como líquido saturado a la salida del condensador

$$T_6 = T(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$h_6 = h(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$s_6 = s(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$v_6 = v(\text{agua}, p_6, x_6)$$

La bomba de condensados debe de aportar la presión necesaria para llevar el líquido hasta el desgasificador. Dado el rendimiento isentrópico de la bomba, se puede despejar el incremento de temperatura sufrido por el fluido.

Punto 7:

$$p_7 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$p_{7s} = p_7$$

$$s_{7s} = s_4$$

$$h_{7s} = h(\text{agua}, p_{7s}, s_{7s})$$

$$\eta_{\text{bomba 1}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_7 - h_4}{h_{7s} - h_4} \rightarrow h_7$$

$$T_7 = T(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$s_7 = s(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$v_7 = v(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$x_7 = x(\text{agua}, h_7, p_7)$$

Se considera líquido saturado a la salida del desgasificador a la temperatura de saturación para su presión de funcionamiento.

Punto 10:

$$p_{10} = p_{\text{desgasificador}}$$

$$x_{10} = 0$$

$$T_{10} = T(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$h_{10} = h(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$s_{10} = s(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$v_{10} = v(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$x_{10} = x(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

Por último, la caldera de alta presión debe dar presión suficiente para las condiciones de vapor vivo más la pérdida de carga sufrida en la caldera.

Punto 11:

$$p_{11} = p_{10} + \Delta p_{\text{caldera}}$$

$$p_{11s} = p_{11}$$

$$s_{11s} = s_6$$

$$\eta_{\text{bomba 2}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_{11} - h_6}{h_{11s} - h_6} \rightarrow h_{11}$$

$$T_{11} = T(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

$$s_{11} = s(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

$$v_{11} = v(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

$$x_{11} = x(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

6.2. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS

Para calcular el caudal de vapor vivo necesario para generar la potencia deseada, es necesario obtener la fracción de vapor que se extrae para el desgasificador.

$$\text{Rendimiento del generador } \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{\text{generador}}}$$

$$\text{donde: } \dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4)$$

$$\text{definiendo: } \alpha 1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha 2 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha 3 = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_1}$$

se puede despejar $\dot{m}_1$

Del balance de masas en cada uno de los equipos se obtienen todos los caudales de las distintas corrientes de la planta.

Balance de masas:

$$\text{Caldera: } \dot{m}_{12} = \dot{m}_1$$

$$\text{Turbina: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5$$

$$\text{Condensador: } \dot{m}_5 = \dot{m}_6$$

$$\text{Bomba 1: } \dot{m}_6 = \dot{m}_7$$

$$\text{Desgasificador: } \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_8 = \dot{m}_{10}$$

Bomba 2: $\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$

La última ecuación que cierra el sistema de ecuaciones es el balance de energía en el desgasificador

Balance de energía:

Desgasificador: $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_{10} h_{10}$

6.3. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS

Para obtener las potencias térmicas y eléctricas de los distintos equipos que componen la planta se atiende a su definición, de la forma:

Caldera: $\dot{Q}_{caldera} = \dot{m}_1 (h_1 - h_{12})$

Turbina: $\dot{W}_{turbina} = \dot{m}_1 (h_1 - h_2) + \dot{m}_2 (h_2 - h_3) + \dot{m}_3 (h_3 - h_4) + \dot{m}_4 (h_4 - h_5)$

Condensador: $\dot{Q}_{condensador} = \dot{m}_5 (h_5 - h_6)$

Bomba 1: $\dot{W}_{bomba\ 1} = v_6 (p_7 - p_6)$

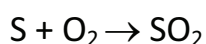
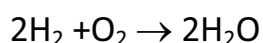
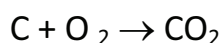
Desgasificador: $\dot{Q}_{desgasificador} = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_{10} h_{10}$

Bomba 2: $\dot{W}_{bomba\ 2} = v_{11} (p_{12} - p_{11})$

6.4. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN

Obtención del aire estequiométrico seco: Cantidad de aire seco requerido para quemar completamente el combustible.

Reacciones de combustión, que generan calor útil:



Los otros constituyentes de los combustibles (distintos de C,H,S), así como el N₂ y la humedad no producen calor útil, sin embargo son constituyentes de los gases de escape y deben ser tenidos en cuenta cuando se evalúe la eficiencia de la caldera.

No se consideran los NO_x a la hora de los cálculos de combustión, pero deben ser tenidos en cuenta a la hora de la consideración de las emisiones contaminantes.

Obtención del aire estequiométrico húmedo:

El aire de combustión utilizado en la caldera también contiene humedad en forma de vapor de agua.

Humedad absoluta en el aire. [kg agua/kg de aire seco]

Condiciones ambiente: Temperatura, presión, humedad relativa →
Cálculos Psicrométricos.

Obtención del Aire de entrada a la caldera. Exceso de aire.

Depende de un cierto número de parámetros

- ✓ Tipo de combustible
- ✓ Diseño de la caldera
- ✓ Diseño de los sistemas de quemadores
- ✓ Carga.

El exceso de aire tiene un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, ya que aumenta el nivel de energía perdida en los gases de escape. Situación de compromiso entre un buen rendimiento y una combustión eficiente.

Obtención de los gases de escape

Se consideran los siguientes componentes:

CO_2 (Combustión del combustible)

H_2O (Combustión del combustible + humedad del aire + humedad del combustible)

SO_2 (Combustión del combustible)

N_2 (Del aire de combustión + presente en el combustible)

O_2 (Del exceso de aire)

Obtención del PCS del combustible.

Composición másica del combustible en base húmeda

Composición másica del combustible en base seca

ejemplo
$$C_{bs} = C \cdot \left[\frac{100}{100 - W} \right]$$

PCS base seca → Fórmula de Milne

$$PCS_{bs} = (0,314 \cdot C_{bs} + 1,322 \cdot H_{bs} - 0,12 \cdot O_{bs} - 0,12 \cdot N_{bs} + 0,0686 \cdot S_{bs} - 0,0153 \cdot A_{bs}) \cdot 1000$$

{kJ/kg cble}

$$PCS_{bh} = PCS_{bs} \cdot \left[1 - \frac{W}{100} \right]$$

PCS base húmeda

6.5. RENDIMIENTOS DEL CICLO

Tras obtener una caracterización de la combustión se pueden calcular los distintos consumos y rendimientos de la planta

$$\eta_{ciclo}^{bruto} = \frac{W_{elec}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

$$\eta_{ciclo}^{neto} = \frac{W_{elec} - W_{auxiliares}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

6.6. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se presenta como anexo la exposición de este caso para una práctica y los resultados obtenidos tal y como los expone la hoja de cálculo

7. CASO 5: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO, AEROCONDENSADOR

Los datos de entrada necesarios para la definición del ciclo son:

Generador eléctrico:

- ✓ Potencia a entregar a la red
- ✓ Rendimiento eléctrico del generador

Caldera:

- ✓ Rendimiento de la caldera
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Exceso de aire de combustión

Turbina:

- ✓ Temperatura de vapor vivo
- ✓ Presión de vapor vivo
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina
- ✓ Presión de condensación
- ✓ Presión de todas las extracciones

Bomba de baja presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de baja

Bomba de alta presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de alta

Precalentadores

- ✓ Numero de extracciones
- ✓ Diferencia terminal de temperaturas

Aerocondensador:

- ✓ Efectividad del aerocondensador
- ✓ Pérdida de carga del lado del aire
- ✓ Rendimiento de ventiladores

Caracterización de la biomasa:

- ✓ Análisis químico en base húmeda: Carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, humedad y cenizas

Condiciones ambiente de diseño:

- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Presión ambiente
- ✓ Humedad relativa ambiente

7.1. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO

La definición termodinámica de los puntos del ciclo empieza por la condición de vapor vivo exigido por la turbina

Punto 1:

$$T_1 = T_{vv}$$

$$p_1 = p_{vv}$$

$$h_1 = h(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$s_1 = s(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$v_1 = v(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$x_1 = x(\text{agua}, T_1, P_1)$$

Conocido el rendimiento isentrópico de la turbina se puede evaluar aproximar la curva de expansión de la turbina por una recta

Punto 5:

$$P_5 = P_{\text{cond}}$$

$$P_{5s} = P_5$$

$$s_{5s} = s_1$$

$$h_{5s} = h(\text{agua}, p_{5s}, s_{5s})$$

$$T_{5s} = T(\text{agua}, p_{5s}, s_{5s})$$

$$\eta_{\text{turbina}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_1 - h_5}{h_1 - h_{5s}} \rightarrow h_5$$

$$T_5 = T(\text{agua}, p_5, h_5)$$

$$s_5 = s(\text{agua}, p_5, h_5)$$

$$v_5 = v(\text{agua}, p_5, h_5)$$

$$x_5 = x(\text{agua}, p_5, h_5)$$

A través de la recta de expansión de la turbina es fácil conocer el estado del punto 2, a la presión de trabajo del desgasificador

Punto 2:

$$p_2 = p_{\text{extracción 1}}$$

$$p_{2s} = p_2$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = h(\text{agua}, p_{2s}, s_{2s})$$

$$\frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} \rightarrow h_2$$

$$T_2 = T(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$s_2 = s(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$v_2 = v(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$x_2 = x(\text{agua}, h_2, p_2)$$

Punto 3:

$$p_3 = p_{\text{extracción 2}}$$

$$p_{3s} = p_3$$

$$s_{3s} = s_1$$

$$h_{3s} = h(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$\frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} = \frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} \rightarrow h_3$$

$$T_3 = T(\text{agua}, h_3, p_3)$$

$$s_3 = s(\text{agua}, h_3, p_3)$$

$$v_3 = v(\text{agua}, h_3, p_3)$$

$$x_3 = x(\text{agua}, h_3, p_3)$$

Punto 4:

$$p_4 = p_{\text{extracción 3}}$$

$$p_{4s} = p_4$$

$$s_{4s} = s_1$$

$$h_{4s} = h(\text{agua}, p_{4s}, s_{4s})$$

$$\frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} = \frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} \rightarrow h_4$$

$$T_4 = T(\text{agua}, h_4, p_4)$$

$$s_4 = s(\text{agua}, h_4, p_4)$$

$$v_4 = v(\text{agua}, h_4, p_4)$$

$$x_4 = x(\text{agua}, h_4, p_4)$$

A la salida del condensador se puede suponer líquido saturado y por la tanto:

Punto 6:

$$p_6 = p_{\text{cond}}$$

$x_6 = 0$; se valora como líquido saturado a la salida del condensador

$$T_6 = T(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$h_6 = h(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$s_6 = s(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$v_6 = v(\text{agua}, p_6, x_6)$$

La bomba de condensados debe de aportar la presión necesaria para llevar el líquido hasta el desgasificador. Dado el rendimiento isentropico de la bomba, se puede despejar el incremento de temperatura sufrido por el fluido.

Punto 7:

$$p_7 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$p_{7s} = p_7$$

$$s_{7s} = s_4$$

$$h_{7s} = h(\text{agua}, p_{7s}, s_{7s})$$

$$\eta_{\text{bomba 1}}^{\text{isentropico}} = \frac{h_7 - h_4}{h_{7s} - h_4} \rightarrow h_7$$

$$T_7 = T(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$s_7 = s(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$v_7 = v(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$x_7 = x(\text{agua}, h_7, p_7)$$

Se considera líquido saturado a la salida del desgasificador a la temperatura de saturación para su presión de funcionamiento.

Punto 10:

$$p_{10} = p_{\text{desgasificador}}$$

$$x_{10} = 0$$

$$T_{10} = T(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$h_{10} = h(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$s_{10} = s(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$v_{10} = v(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$x_{10} = x(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

Por último, la caldera de alta presión debe dar presión suficiente para las condiciones de vapor vivo más la pérdida de carga sufrida en la caldera.

Punto 11:

$$p_{11} = p_{10} + \Delta p_{\text{caldera}}$$

$$p_{11s} = p_{11}$$

$$s_{11s} = s_6$$

$$\eta_{\text{bomba 2}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_{11} - h_6}{h_{11s} - h_6} \rightarrow h_{11}$$

$$T_{11} = T(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

$$s_{11} = s(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

$$v_{11} = v(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

$$x_{11} = x(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

7.2. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS

Para calcular el caudal de vapor vivo necesario para generar la potencia deseada, es necesario obtener la fracción de vapor que se extrae para el desgasificador.

$$\text{Rendimiento del generador } \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{\text{generador}}}$$

$$\text{donde: } \dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4)$$

$$\text{definiendo: } \alpha 1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha 2 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha 3 = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_1}$$

se puede despejar $\dot{m}_1$

Del balance de masas en cada uno de los equipos se obtienen todos los caudales de las distintas corrientes de la planta.

Balance de masas:

$$\text{Caldera: } \dot{m}_{12} = \dot{m}_1$$

$$\text{Turbina: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5$$

$$\text{Aerocondensador: } \dot{m}_5 = \dot{m}_6$$

$$\text{Bomba 1: } \dot{m}_6 = \dot{m}_7$$

$$\text{Desgasificador: } \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_8 = \dot{m}_{10}$$

Bomba 2: $\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$

La última ecuación que cierra el sistema de ecuaciones es el balance de energía en el desgasificador

Balance de energía:

Desgasificador: $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_{10} h_{10}$

7.3. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS

Para obtener las potencias térmicas y eléctricas de los distintos equipos que componen la planta se atiende a su definición, de la forma:

Caldera: $\dot{Q}_{caldera} = \dot{m}_1 (h_1 - h_{12})$

Turbina: $\dot{W}_{turbina} = \dot{m}_1 (h_1 - h_2) + \dot{m}_2 (h_2 - h_3) + \dot{m}_3 (h_3 - h_4) + \dot{m}_4 (h_4 - h_5)$

Aerocondensador: $\dot{Q}_{aerocondensador} = \dot{m}_5 (h_5 - h_6)$

Bomba 1: $\dot{W}_{bomba\ 1} = v_6 (p_7 - p_6)$

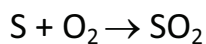
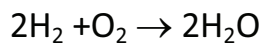
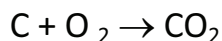
Desgasificador: $\dot{Q}_{desgasificador} = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_{10} h_{10}$

Bomba 2: $\dot{W}_{bomba\ 2} = v_{11} (p_{12} - p_{11})$

7.4. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN

Obtención del aire estequiométrico seco: Cantidad de aire seco requerido para quemar completamente el combustible.

Reacciones de combustión, que generan calor útil:



Los otros constituyentes de los combustibles (distintos de C,H,S), así como el N₂ y la humedad no producen calor útil, sin embargo son constituyentes de los gases de escape y deben ser tenidos en cuenta cuando se evalúe la eficiencia de la caldera.

No se consideran los NO_x a la hora de los cálculos de combustión, pero deben ser tenidos en cuenta a la hora de la consideración de las emisiones contaminantes.

Obtención del aire estequiométrico húmedo:

El aire de combustión utilizado en la caldera también contiene humedad en forma de vapor de agua.

Humedad absoluta en el aire. [kg agua/kg de aire seco]

Condiciones ambiente: Temperatura, presión, humedad relativa →
Cálculos Psicrométricos.

Obtención del Aire de entrada a la caldera. Exceso de aire.

Depende de un cierto número de parámetros

- ✓ Tipo de combustible
- ✓ Diseño de la caldera
- ✓ Diseño de los sistemas de quemadores
- ✓ Carga.

El exceso de aire tiene un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, ya que aumenta el nivel de energía perdida en los gases de escape. Situación de compromiso entre un buen rendimiento y una combustión eficiente.

Obtención de los gases de escape

Se consideran los siguientes componentes:

CO_2 (Combustión del combustible)

H_2O (Combustión del combustible + humedad del aire
+ humedad del combustible)

SO_2 (Combustión del combustible)

N_2 (Del aire de combustión + presente en el combustible)

O_2 (Del exceso de aire)

Obtención del PCS del combustible.

Composición másica del combustible en base húmeda

Composición másica del combustible en base seca

ejemplo
$$C_{bs} = C \cdot \left[\frac{100}{100 - W} \right]$$

PCS base seca → Fórmula de Milne

$$PCS_{bs} = (0,314 \cdot C_{bs} + 1,322 \cdot H_{bs} - 0,12 \cdot O_{bs} - 0,12 \cdot N_{bs} + 0,0686 \cdot S_{bs} - 0,0153 \cdot A_{bs}) \cdot 1000$$

{kJ/kg cble}

$$PCS_{bh} = PCS_{bs} \cdot \left[1 - \frac{W}{100} \right]$$

PCS base húmeda

7.5. RENDIMIENTOS DEL CICLO

Tras obtener una caracterización de la combustión se pueden calcular los distintos consumos y rendimientos de la planta

$$\eta_{ciclo}^{bruto} = \frac{W_{elec}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

$$\eta_{ciclo}^{neto} = \frac{W_{elec} - W_{auxiliares}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

7.6. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se presenta como anexo la exposición de este caso para una práctica y los resultados obtenidos tal y como los expone la hoja de cálculo

8. CASO 6: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO, TORRE DE REFRIGERACIÓN

Los datos de entrada necesarios para la definición del ciclo son:

Generador eléctrico:

- ✓ Potencia a entregar a la red
- ✓ Rendimiento eléctrico del generador

Caldera:

- ✓ Rendimiento de la caldera
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Exceso de aire de combustión

Turbina:

- ✓ Temperatura de vapor vivo
- ✓ Presión de vapor vivo
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina
- ✓ Presión de condensación

Bomba de baja presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de baja

Bomba de alta presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de alta

Condensador:

- ✓ Efectividad del aerocondensador

Torre de refrigeración

- ✓ Pérdida de carga del lado del aire
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Rendimiento de ventiladores
- ✓ Rendimiento de bombas

Caracterización de la biomasa:

- ✓ Análisis químico en base húmeda: Carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, humedad y cenizas

Condiciones ambiente de diseño:

- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Presión ambiente
- ✓ Humedad relativa ambiente

8.1. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO

La definición termodinámica de los puntos del ciclo empieza por la condición de vapor vivo exigido por la turbina

Punto 1:

$$T_1 = T_{vv}$$

$$p_1 = p_{vv}$$

$$h_1 = h(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$s_1 = s(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$v_1 = v(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$x_1 = x(\text{agua}, T_1, P_1)$$

Conocido el rendimiento isentrópico de la turbina se puede evaluar aproximar la curva de expansión de la turbina por una recta

Punto 5:

$$P_5 = P_{\text{cond}}$$

$$P_{5s} = P_5$$

$$s_{5s} = s_1$$

$$h_{5s} = h(\text{agua}, p_{5s}, s_{5s})$$

$$T_{5s} = T(\text{agua}, p_{5s}, s_{5s})$$

$$\eta_{\text{turbina}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_1 - h_5}{h_1 - h_{5s}} \rightarrow h_5$$

$$T_5 = T(\text{agua}, p_5, h_5)$$

$$s_5 = s(\text{agua}, p_5, h_5)$$

$$v_5 = v(\text{agua}, p_5, h_5)$$

$$x_5 = x(\text{agua}, p_5, h_5)$$

A través de la recta de expansión de la turbina es fácil conocer el estado del punto 2, a la presión de trabajo del desgasificador

Punto 2:

$$p_2 = p_{\text{extracción 1}}$$

$$p_{2s} = p_2$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = h(\text{agua}, p_{2s}, s_{2s})$$

$$\frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} \rightarrow h_2$$

$$T_2 = T(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$s_2 = s(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$v_2 = v(\text{agua}, h_2, p_2)$$

$$x_2 = x(\text{agua}, h_2, p_2)$$

Punto 3:

$$p_3 = p_{\text{extracción 2}}$$

$$p_{3s} = p_3$$

$$s_{3s} = s_1$$

$$h_{3s} = h(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$\frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} = \frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} \rightarrow h_3$$

$$T_3 = T(\text{agua}, h_3, p_3)$$

$$s_3 = s(\text{agua}, h_3, p_3)$$

$$v_3 = v(\text{agua}, h_3, p_3)$$

$$x_3 = x(\text{agua}, h_3, p_3)$$

Punto 4:

$$p_4 = p_{\text{extracción 3}}$$

$$p_{4s} = p_4$$

$$s_{4s} = s_1$$

$$h_{4s} = h(\text{agua}, p_{4s}, s_{4s})$$

$$\frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} = \frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} \rightarrow h_4$$

$$T_4 = T(\text{agua}, h_4, p_4)$$

$$s_4 = s(\text{agua}, h_4, p_4)$$

$$v_4 = v(\text{agua}, h_4, p_4)$$

$$x_4 = x(\text{agua}, h_4, p_4)$$

A la salida del condensador se puede suponer líquido saturado y por la tanto:

Punto 6:

$$p_6 = p_{\text{cond}}$$

$x_6 = 0$; se valora como líquido saturado a la salida del condensador

$$T_6 = T(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$h_6 = h(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$s_6 = s(\text{agua}, p_6, x_6)$$

$$v_6 = v(\text{agua}, p_6, x_6)$$

La bomba de condensados debe de aportar la presión necesaria para llevar el líquido hasta el desgasificador. Dado el rendimiento isentropico de la bomba, se puede despejar el incremento de temperatura sufrido por el fluido.

Punto 7:

$$p_7 = p_{\text{desgasificador}}$$

$$p_{7s} = p_7$$

$$s_{7s} = s_4$$

$$h_{7s} = h(\text{agua}, p_{7s}, s_{7s})$$

$$\eta_{\text{bomba 1}}^{\text{isentropico}} = \frac{h_7 - h_4}{h_{7s} - h_4} \rightarrow h_7$$

$$T_7 = T(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$s_7 = s(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$v_7 = v(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$x_7 = x(\text{agua}, h_7, p_7)$$

Se considera líquido saturado a la salida del desgasificador a la temperatura de saturación para su presión de funcionamiento.

Punto 10:

$$p_{10} = p_{\text{desgasificador}}$$

$$x_{10} = 0$$

$$T_{10} = T(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$h_{10} = h(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$s_{10} = s(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$v_{10} = v(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$x_{10} = x(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

Por último, la caldera de alta presión debe dar presión suficiente para las condiciones de vapor vivo más la pérdida de carga sufrida en la caldera.

Punto 11:

$$p_{11} = p_{10} + \Delta p_{\text{caldera}}$$

$$p_{11s} = p_{11}$$

$$s_{11s} = s_6$$

$$\eta_{\text{bomba 2}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_{11} - h_6}{h_{11s} - h_6} \rightarrow h_{11}$$

$$T_{11} = T(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

$$s_{11} = s(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

$$v_{11} = v(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

$$x_{11} = x(\text{agua}, h_{11}, p_{11})$$

8.2. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS

Para calcular el caudal de vapor vivo necesario para generar la potencia deseada, es necesario obtener la fracción de vapor que se extrae para el desgasificador.

$$\text{Rendimiento del generador } \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{\text{generador}}}$$

$$\text{donde: } \dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4)$$

$$\text{definiendo: } \alpha 1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha 2 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha 3 = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_1}$$

se puede despejar $\dot{m}_1$

Del balance de masas en cada uno de los equipos se obtienen todos los caudales de las distintas corrientes de la planta.

Balance de masas:

$$\text{Caldera: } \dot{m}_{12} = \dot{m}_1$$

$$\text{Turbina: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5$$

$$\text{Condensador: } \dot{m}_5 = \dot{m}_6$$

$$\text{Bomba 1: } \dot{m}_6 = \dot{m}_7$$

$$\text{Desgasificador: } \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_8 = \dot{m}_{10}$$

Bomba 2: $\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$

La última ecuación que cierra el sistema de ecuaciones es el balance de energía en el desgasificador

Balance de energía:

Desgasificador: $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_{10} h_{10}$

8.3. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS

Para obtener las potencias térmicas y eléctricas de los distintos equipos que componen la planta se atiende a su definición, de la forma:

Caldera: $\dot{Q}_{caldera} = \dot{m}_1 (h_1 - h_{12})$

Turbina: $\dot{W}_{turbina} = \dot{m}_1 (h_1 - h_2) + \dot{m}_2 (h_2 - h_3) + \dot{m}_3 (h_3 - h_4) + \dot{m}_4 (h_4 - h_5)$

Condensador: $\dot{Q}_{condensador} = \dot{m}_5 (h_5 - h_6)$

Bomba 1: $\dot{W}_{bomba\ 1} = v_6 (p_7 - p_6)$

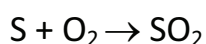
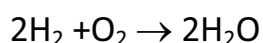
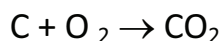
Desgasificador: $\dot{Q}_{desgasificador} = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_{10} h_{10}$

Bomba 2: $\dot{W}_{bomba\ 2} = v_{11} (p_{12} - p_{11})$

8.4. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN

Obtención del aire estequiométrico seco: Cantidad de aire seco requerido para quemar completamente el combustible.

Reacciones de combustión, que generan calor útil:



Los otros constituyentes de los combustibles (distintos de C,H,S), así como el N₂ y la humedad no producen calor útil, sin embargo son constituyentes de los gases de escape y deben ser tenidos en cuenta cuando se evalúe la eficiencia de la caldera.

No se consideran los NO_x a la hora de los cálculos de combustión, pero deben ser tenidos en cuenta a la hora de la consideración de las emisiones contaminantes.

Obtención del aire estequiométrico húmedo:

El aire de combustión utilizado en la caldera también contiene humedad en forma de vapor de agua.

Humedad absoluta en el aire. [kg agua/kg de aire seco]

Condiciones ambiente: Temperatura, presión, humedad relativa → Cálculos Psicrométricos.

Obtención del Aire de entrada a la caldera. Exceso de aire.

Depende de un cierto número de parámetros

- ✓ Tipo de combustible
- ✓ Diseño de la caldera
- ✓ Diseño de los sistemas de quemadores
- ✓ Carga.

El exceso de aire tiene un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, ya que aumenta el nivel de energía perdida en los gases de escape. Situación de compromiso entre un buen rendimiento y una combustión eficiente.

Obtención de los gases de escape

Se consideran los siguientes componentes:

CO_2 (Combustión del combustible)

H_2O (Combustión del combustible + humedad del aire + humedad del combustible)

SO_2 (Combustión del combustible)

N_2 (Del aire de combustión + presente en el combustible)

O_2 (Del exceso de aire)

Obtención del PCS del combustible.

Composición másica del combustible en base húmeda

Composición másica del combustible en base seca

ejemplo
$$C_{bs} = C \cdot \left[\frac{100}{100 - W} \right]$$

PCS base seca → Fórmula de Milne

$$PCS_{bs} = (0,314 \cdot C_{bs} + 1,322 \cdot H_{bs} - 0,12 \cdot O_{bs} - 0,12 \cdot N_{bs} + 0,0686 \cdot S_{bs} - 0,0153 \cdot A_{bs}) \cdot 1000$$

{kJ/kg cble}

$$PCS_{bh} = PCS_{bs} \cdot \left[1 - \frac{W}{100} \right]$$

PCS base húmeda

8.5. RENDIMIENTOS DEL CICLO

Tras obtener una caracterización de la combustión se pueden calcular los distintos consumos y rendimientos de la planta

$$\eta_{ciclo}^{bruto} = \frac{W_{elec}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

$$\eta_{ciclo}^{neto} = \frac{W_{elec} - W_{auxiliares}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

8.6. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se presenta como anexo la exposición de este caso para una práctica y los resultados obtenidos tal y como los expone la hoja de cálculo

9. CASO 7: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO Y CON RECALENTAMIENTO, REFRIGERACIÓN POR CICLO ABIERTO

9.1. DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada necesarios para la definición del ciclo son:

Generador eléctrico:

- ✓ Potencia a entregar a la red
- ✓ Rendimiento eléctrico del generador

Caldera:

- ✓ Rendimiento de la caldera
- ✓ Temperatura de recalentamiento
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Exceso de aire de combustión

Turbina:

- ✓ Temperatura de vapor vivo
- ✓ Presión de vapor vivo
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina de alta
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina de baja
- ✓ Presión de condensación
- ✓ Presión del desgasificador
- ✓ Presión de todas las extracciones

Bomba de baja presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de baja

Bomba de alta presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de alta

Precalentadores:

- ✓ Diferencia terminal de temperaturas
- ✓ Pérdida de presión

Condensador:

- ✓ Efectividad del aerocondensador

Circuito abierto de refrigeración:

- ✓ Pérdida de carga del circuito
- ✓ Rendimiento de bomba

Caracterización de la biomasa:

- ✓ Análisis químico en base húmeda: Carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, humedad y cenizas

Condiciones ambiente de diseño:

- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Presión ambiente
- ✓ Humedad relativa ambiente

9.2. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO

La definición termodinámica de los puntos del ciclo empieza por la condición de vapor vivo exigido por la turbina

Punto 1:

$$T_1 = T_{vv}$$

$$p_1 = p_{vv}$$

$$h_1 = h(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$s_1 = s(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$v_1 = v(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$x_1 = x(\text{agua}, T_1, P_1)$$

Punto 4:

$$p_4 = p_{\text{recalentamiento}}$$

$$p_{4s} = p_4$$

$$s_{4s} = s_1$$

$$h_{4s} = h(\text{agua}, p_{4s}, s_{4s})$$

$$\eta_{\text{turbina alta}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_1 - h_4}{h_1 - h_{4s}} \rightarrow h_4$$

$$T_4 = T(\text{agua}, p_4, h_4)$$

$$s_4 = s(\text{agua}, p_4, h_4)$$

$$v_4 = v(\text{agua}, p_4, h_4)$$

$$x_4 = x(\text{agua}, p_4, h_4)$$

Punto 2:

$$p_2 = p_{\text{extracción 1}}$$

$$p_{2s} = p_2$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = h(\text{agua}, p_{2s}, s_{2s})$$

$$\frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} \rightarrow h_2$$

$$T_2 = T(\text{agua}, p_2, h_2)$$

$$s_2 = s(\text{agua}, p_2, h_2)$$

$$v_2 = v(\text{agua}, p_2, h_2)$$

$$x_2 = x(\text{agua}, p_2, h_2)$$

Punto 3:

$$P_3 = P_{\text{extracción 2}}$$

$$P_{3s} = P_3$$

$$s_{3s} = s_1$$

$$h_{3s} = h(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$\frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} = \frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} \rightarrow h_3$$

$$T_3 = T(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$s_3 = s(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$v_3 = v(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$x_3 = x(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$p_3 = p(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$h_3 = h(\text{agua}, p_3, h_3)$$

Punto 5:

$$T_5 = T_4$$

$$p_5 = p_4 - \Delta p_{\text{deshumidificador}}$$

$$h_5 = h(\text{agua}, T_5, p_5)$$

$$s_5 = s(\text{agua}, T_5, p_5)$$

$$v_5 = v(\text{agua}, T_5, p_5)$$

$$x_5 = x(\text{agua}, T_5, p_5)$$

Punto 6:

$$p_6 = p_5 - \Delta p_{\text{precalentador}}$$

$$T_6 = T_1$$

$$h_6 = h(\text{agua}, p_6, T_6)$$

$$s_6 = s(\text{agua}, p_6, T_6)$$

$$v_6 = v(\text{agua}, p_6, T_6)$$

$$x_6 = x(\text{agua}, p_6, T_6)$$

Punto 9:

$$p_9 = p_{\text{cond}}$$

$$p_{9s} = p_9$$

$$s_{9s} = s_6$$

$$h_{9s} = h(\text{agua}, p_{9s}, s_{9s})$$

$$\eta_{\text{turbina baja}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_6 - h_9}{h_6 - h_{9s}} \rightarrow h_9$$

$$T_9 = T(\text{agua}, h_9, p_9)$$

$$s_9 = s(\text{agua}, h_9, p_9)$$

$$v_9 = v(\text{agua}, h_9, p_9)$$

$$x_9 = x(\text{agua}, h_9, p_9)$$

Punto 7:

$$p_7 = p_{\text{extracción 3}}$$

$$p_{7s} = p_7$$

$$s_{7s} = s_6$$

$$h_{7s} = h(\text{agua}, p_{7s}, s_{7s})$$

$$\frac{h_6 - h_{7s}}{h_6 - h_7} = \frac{h_6 - h_{9s}}{h_6 - h_9} \rightarrow h_7$$

$$T_7 = T(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$s_7 = s(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$v_7 = v(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$x_7 = x(\text{agua}, h_7, p_7)$$

Punto 8:

$$p_8 = p_{\text{extracción 4}}$$

$$p_{8s} = p_8$$

$$s_{8s} = s_6$$

$$h_{8s} = h(\text{agua}, p_{8s}, s_{8s})$$

$$\frac{h_6 - h_{8s}}{h_6 - h_8} = \frac{h_6 - h_{9s}}{h_6 - h_9} \rightarrow h_8$$

$$T_8 = T(\text{agua}, h_8, p_8)$$

$$s_8 = s(\text{agua}, h_8, p_8)$$

$$v_8 = v(\text{agua}, h_8, p_8)$$

$$x_8 = x(\text{agua}, h_8, p_8)$$

Punto 10:

$$p_{10} = p_{\text{cond}}$$

$$x_{10} = 0$$

$$T_{10} = T(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$h_{10} = h(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$s_{10} = s(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$v_{10} = v(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$x_{10} = x(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

Punto 11:

$$p_{11} = p_7 + \Delta p_{\text{precalentador}}$$

$$p_{11s} = p_{11}$$

$$s_{11s} = s_{10}$$

$$\eta_{bomba\ 1}^{isentrópico} = \frac{h_{11} - h_{10}}{h_{11s} - h_{10}} \rightarrow h_{11}$$

$$T_{11} = T(agua, h_{11}, p_{11})$$

$$s_{11} = s(agua, h_{11}, p_{11})$$

$$v_{11} = v(agua, h_{11}, p_{11})$$

$$x_{11} = x(agua, h_{11}, p_{11})$$

Punto 12:

$$\Delta TT_{precalentador\ 1} = T_{saturación}(p_{extracción}) - T_{12} \rightarrow T_{12}$$

$$p_{12} = p_7$$

$$h_{12} = h(agua, T_{12}, p_{12})$$

$$s_{12} = s(agua, T_{12}, p_{12})$$

$$v_{12} = v(agua, T_{12}, p_{12})$$

$$x_{12} = x(agua, T_{12}, p_{12})$$

Punto 13:

$$p_{13} = p_{extracción\ 4}$$

$$x_{13} = 0$$

$$T_{13} = T(agua, p_{13}, x_{13})$$

$$h_{13} = h(agua, p_{13}, x_{13})$$

$$s_{13} = s(\text{agua}, P_{13}, X_{13})$$

$$v_{13} = v(\text{agua}, P_{13}, X_{13})$$

$$x_{13} = x(\text{agua}, P_{13}, X_{13})$$

Punto 14:

$$p_{14} = p_{\text{extracción 3}}$$

$$x_{14} = 0$$

$$T_{14} = T(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

$$h_{14} = h(\text{agua}, p_{14}, X_{14})$$

$$s_{14} = s(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

$$v_{14} = v(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

$$x_{14} = x(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

Punto 15:

$$p_{15} = p_{\text{extracción 2}}$$

$$x_{15} = 0$$

$$T_{15} = T(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

$$h_{15} = h(\text{agua}, p_{15}, X_{15})$$

$$s_{15} = s(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

$$v_{15} = v(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

$$x_{15} = x(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

Punto 16:

$$P_{16} = P_1 + \Delta P_{caldera} + \Delta P_{precalentador\ 4} + \Delta P_{precalentador\ 3}$$

$$p_{16s} = p_{16}$$

$$s_{16s} = s_{14}$$

$$h_{16s} = h(\text{agua}, p_{16s}, s_{16s})$$

$$\eta_{bomba\ 2}^{isentrópico} = \frac{h_{16} - h_{14}}{h_{16s} - h_{14}} \rightarrow h_{16}$$

$$T_{16} = T(\text{agua}, h_{16}, p_{16})$$

$$s_{16} = s(\text{agua}, h_{16}, p_{16})$$

$$v_{16} = v(\text{agua}, h_{16}, p_{16})$$

$$x_{16} = x(\text{agua}, h_{16}, p_{16})$$

Punto 17:

$$\Delta T T_{precalentador\ 3} = T_{saturación}(p_3) - T_{17} \rightarrow T_{17}$$

$$P_{17} = P_1 + \Delta P_{caldera} + \Delta P_{precalentador\ 4}$$

$$h_{17} = h(\text{agua}, p_{17}, T_{17})$$

$$s_{17} = s(\text{agua}, p_{17}, T_{17})$$

$$v_{17} = v(\text{agua}, p_{17}, T_{17})$$

$$x_{17} = x(\text{agua}, p_{17}, T_{17})$$

Punto 18:

$$p_{18} = p_{extracción\ 1}$$

$$x_{18} = 0$$

$$h_{18} = h(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

$$s_{18} = s(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

$$v_{18} = v(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

$$x_{18} = x(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

Punto 19:

$$\Delta T T_{\text{precalentador } 4} = T_{\text{saturación}}(p_2) - T_{19} \rightarrow T_{19}$$

$$P_{19} = P_1 + \Delta P_{\text{caldera}} + \Delta P_{\text{precalentador } 4}$$

$$h_{19} = h(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

$$s_{19} = s(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

$$v_{19} = v(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

$$x_{19} = x(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

9.3. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS

Para calcular el caudal de vapor vivo necesario para generar la potencia deseada, es necesario obtener la fracción de vapor que se extrae para el desgasificador.

$$\text{Rendimiento del generador } \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{\text{generador}}}$$

$$\text{donde: } \dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_4 - h_7) +$$

$$(\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7)(h_7 - h_8) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7 - \dot{m}_8)(h_8 - h_9)$$

definiendo: $\alpha_1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$

$$\alpha_2 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha_3 = \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha_4 = \frac{\dot{m}_8}{\dot{m}_1}$$

sustituyendo: $\alpha_1 = \frac{(h_{19} - h_{17})}{(h_2 - h_{18})}$

$$\alpha_2 = \frac{(h_{17} - h_{16})}{(h_3 - h_{15})}$$

$$\alpha_3 = \frac{h_{14} - (1 - \alpha_1 - \alpha_2)h_{12} - \alpha_4 h_5}{(h_7 - h_{12})}$$

$$\alpha_4 = \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)(h_{12} - h_{11})}{(h_8 - h_{10})}$$

se puede despejar $\dot{m}_1$

Del balance de masas en cada uno de los equipos se obtienen todos los caudales de las distintas corrientes de la planta.

Balance de masas:

Caldera: $\dot{m}_{19} = \dot{m}_1$

Turbina alta: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4$

Turbina baja: $\dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9$

Condensador: $\dot{m}_9 + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{10}$

Bomba 1: $\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$

Desgasificador: $\dot{m}_7 + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{15} = \dot{m}_{14}$

Precalentador 1: $\dot{m}_8 = \dot{m}_{13} ; \dot{m}_{12} = \dot{m}_{11}$

Precalentador 3: $\dot{m}_{15} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{18} ; \dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$

Precalentador 4: $\dot{m}_{17} = \dot{m}_{19} ; \dot{m}_2 = \dot{m}_{18}$

Bomba 2: $\dot{m}_{14} = \dot{m}_{16}$

Las ecuaciones que cierran el sistema de ecuaciones es el balance de energía en el desgasificador y precalentadores

Balance de energía:

Precalentador 1: $\dot{m}_8(h_8 - h_{13}) = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$

Desgasificador: $\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{15} h_{15} = \dot{m}_{14} h_{14}$

Precalentador 3: $\dot{m}_3(h_3 - h_{15}) = \dot{m}_{16}(h_{17} - h_{16})$

Precalentador 4: $\dot{m}_2(h_2 - h_{18}) = \dot{m}_{17}(h_9 - h_{17})$

9.4. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS

Para obtener las potencias térmicas y eléctricas de los distintos equipos que componen la planta se atiende a su definición, de la forma:

$$\text{Caldera:} \quad \dot{Q}_{\text{caldera}} = \dot{m}_1(h_1 - h_{19}) + \dot{m}_1(h_4 - h_6)$$

$$\begin{aligned} \text{Turbina:} \quad \dot{W}_t = & \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) + \\ & (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_4 - h_7) + \\ & (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7)(h_7 - h_8) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7 - \dot{m}_8)(h_8 - \\ & h_9) \end{aligned}$$

$$\text{Condensador:} \quad \dot{Q}_{\text{condensador}} = \dot{m}_9(h_9 - h_{10})$$

$$\text{Bomba 1:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 1}} = v_{10}(p_{11} - p_{10})$$

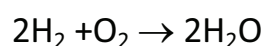
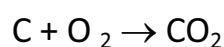
$$\text{Desgasificador:} \quad \dot{Q}_{\text{desgasificador}} = \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_{12} h_{12}$$

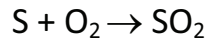
$$\text{Bomba 2:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 2}} = v_{14}(p_{16} - p_{14})$$

9.5. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN

Obtención del aire estequiométrico seco: Cantidad de aire seco requerido para quemar completamente el combustible.

Reacciones de combustión, que generan calor útil:





Los otros constituyentes de los combustibles (distintos de C,H,S), así como el N₂ y la humedad no producen calor útil, sin embargo son constituyentes de los gases de escape y deben ser tenidos en cuenta cuando se evalúe la eficiencia de la caldera.

No se consideran los NO_x a la hora de los cálculos de combustión, pero deben ser tenidos en cuenta a la hora de la consideración de las emisiones contaminantes.

Obtención del aire estequiométrico húmedo:

El aire de combustión utilizado en la caldera también contiene humedad en forma de vapor de agua.

Humedad absoluta en el aire. [kg agua/kg de aire seco]

Condiciones ambiente: Temperatura, presión, humedad relativa →
Cálculos Psicrométricos.

Obtención del Aire de entrada a la caldera. Exceso de aire.

Depende de un cierto número de parámetros

- ✓ Tipo de combustible
- ✓ Diseño de la caldera
- ✓ Diseño de los sistemas de quemadores
- ✓ Carga.

El exceso de aire tiene un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, ya que aumenta el nivel de energía perdida en los gases de

escape. Situación de compromiso entre un buen rendimiento y una combustión eficiente.

Obtención de los gases de escape

Se consideran los siguientes componentes:

CO_2 (Combustión del combustible)

H_2O (Combustión del combustible + humedad del aire + humedad del combustible)

SO_2 (Combustión del combustible)

N_2 (Del aire de combustión + presente en el combustible)

O_2 (Del exceso de aire)

Obtención del PCS del combustible.

Composición másica del combustible en base húmeda

Composición másica del combustible en base seca

ejemplo
$$C_{bs} = C \cdot \left[\frac{100}{100 - W} \right]$$

PCS base seca → Fórmula de Milne

$$\text{PCS}_{bs} = (0,314 \cdot C_{bs} + 1,322 \cdot H_{bs} - 0,12 \cdot O_{bs} - 0,12 \cdot N_{bs} + 0,0686 \cdot S_{bs} - 0,0153 \cdot A_{bs}) \cdot 1000$$

{kJ/kg cble}

PCS base húmeda
$$\text{PCS}_{bh} = \text{PCS}_{bs} \cdot \left[1 - \frac{W}{100} \right]$$

9.6. RENDIMIENTOS DEL CICLO

Tras obtener una caracterización de la combustión se pueden calcular los distintos consumos y rendimientos de la planta

$$\eta_{ciclo}^{bruto} = \frac{W_{elec}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

$$\eta_{ciclo}^{neto} = \frac{W_{elec} - W_{auxiliares}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

9.7. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se presenta como anexo la exposición de este caso para una práctica y los resultados obtenidos tal y como los expone la hoja de cálculo

10. CASO 8: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO Y CON RECALENTAMIENTO, AEROCONDENSADOR

10.1. DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada necesarios para la definición del ciclo son:

Generador eléctrico:

- ✓ Potencia a entregar a la red
- ✓ Rendimiento eléctrico del generador

Caldera:

- ✓ Rendimiento de la caldera
- ✓ Temperatura de recalentamiento
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Exceso de aire de combustión

Turbina:

- ✓ Temperatura de vapor vivo
- ✓ Presión de vapor vivo
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina de alta
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina de baja
- ✓ Presión de condensación
- ✓ Presión del desgasificador
- ✓ Presión de todas las extracciones

Bomba de baja presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de baja

Bomba de alta presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de alta

Precalentadores:

- ✓ Diferencia terminal de temperaturas
- ✓ Pérdida de presión

Aerocondensador:

- ✓ Efectividad del aerocondensador
- ✓ Pérdida de carga del lado del aire
- ✓ Rendimiento de ventiladores

Caracterización de la biomasa:

- ✓ Análisis químico en base húmeda: Carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, humedad y cenizas

Condiciones ambiente de diseño:

- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Presión ambiente
- ✓ Humedad relativa ambiente

10.2. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO

La definición termodinámica de los puntos del ciclo empieza por la condición de vapor vivo exigido por la turbina

Punto 1:

$$T_1 = T_{vv}$$

$$p_1 = p_{vv}$$

$$h_1 = h(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$s_1 = s(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$v_1 = v(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$x_1 = x(\text{agua}, T_1, P_1)$$

Punto 4:

$$p_4 = p_{\text{recalentamiento}}$$

$$p_{4s} = p_4$$

$$s_{4s} = s_1$$

$$h_{4s} = h(\text{agua}, p_{4s}, s_{4s})$$

$$\eta_{\text{turbina alta}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_1 - h_4}{h_1 - h_{4s}} \rightarrow h_4$$

$$T_4 = T(\text{agua}, p_4, h_4)$$

$$s_4 = s(\text{agua}, p_4, h_4)$$

$$v_4 = v(\text{agua}, p_4, h_4)$$

$$x_4 = x(\text{agua}, p_4, h_4)$$

Punto 2:

$$p_2 = p_{\text{extracción 1}}$$

$$p_{2s} = p_2$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = h(\text{agua}, p_{2s}, s_{2s})$$

$$\frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} \rightarrow h_2$$

$$T_2 = T(\text{agua}, p_2, h_2)$$

$$s_2 = s(\text{agua}, p_2, h_2)$$

$$v_2 = v(\text{agua}, p_2, h_2)$$

$$x_2 = x(\text{agua}, p_2, h_2)$$

Punto 3:

$$P_3 = P_{\text{extracción 2}}$$

$$P_{3s} = P_3$$

$$s_{3s} = s_1$$

$$h_{3s} = h(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$\frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} = \frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} \rightarrow h_3$$

$$T_3 = T(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$s_3 = s(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$v_3 = v(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$x_3 = x(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$p_3 = p(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$h_3 = h(\text{agua}, p_3, h_3)$$

Punto 5:

$$T_5 = T_4$$

$$p_5 = p_4 - \Delta p_{\text{deshumidificador}}$$

$$h_5 = h(\text{agua}, T_5, p_5)$$

$$s_5 = s(\text{agua}, T_5, p_5)$$

$$v_5 = v(\text{agua}, T_5, p_5)$$

$$x_5 = x(\text{agua}, T_5, p_5)$$

Punto 6:

$$p_6 = p_5 - \Delta p_{\text{recalentador}}$$

$$T_6 = T_1$$

$$h_6 = h(\text{agua}, p_6, T_6)$$

$$s_6 = s(\text{agua}, p_6, T_6)$$

$$v_6 = v(\text{agua}, p_6, T_6)$$

$$x_6 = x(\text{agua}, p_6, T_6)$$

Punto 9:

$$p_9 = p_{\text{cond}}$$

$$p_{9s} = p_9$$

$$s_{9s} = s_6$$

$$h_{9s} = h(\text{agua}, p_{9s}, s_{9s})$$

$$\eta_{\text{turbina baja}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_6 - h_9}{h_6 - h_{9s}} \rightarrow h_9$$

$$T_9 = T(\text{agua}, h_9, p_9)$$

$$s_9 = s(\text{agua}, h_9, p_9)$$

$$v_9 = v(\text{agua}, h_9, p_9)$$

$$x_9 = x(\text{agua}, h_9, p_9)$$

Punto 7:

$$p_7 = p_{\text{extracción 3}}$$

$$p_{7s} = p_7$$

$$s_{7s} = s_6$$

$$h_{7s} = h(\text{agua}, p_{7s}, s_{7s})$$

$$\frac{h_6 - h_{7s}}{h_6 - h_7} = \frac{h_6 - h_{9s}}{h_6 - h_9} \rightarrow h_7$$

$$T_7 = T(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$s_7 = s(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$v_7 = v(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$x_7 = x(\text{agua}, h_7, p_7)$$

Punto 8:

$$p_8 = p_{\text{extracción 4}}$$

$$p_{8s} = p_8$$

$$s_{8s} = s_6$$

$$h_{8s} = h(\text{agua}, p_{8s}, s_{8s})$$

$$\frac{h_6 - h_{8s}}{h_6 - h_8} = \frac{h_6 - h_{9s}}{h_6 - h_9} \rightarrow h_8$$

$$T_8 = T(\text{agua}, h_8, p_8)$$

$$s_8 = s(\text{agua}, h_8, p_8)$$

$$v_8 = v(\text{agua}, h_8, p_8)$$

$$x_8 = x(\text{agua}, h_8, p_8)$$

Punto 10:

$$p_{10} = p_{cond}$$

$$x_{10} = 0$$

$$T_{10} = T(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$h_{10} = h(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$s_{10} = s(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$v_{10} = v(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$x_{10} = x(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

Punto 11:

$$p_{11} = p_7 + \Delta p_{precalentador}$$

$$p_{11s} = p_{11}$$

$$s_{11s} = s_{10}$$

$$\eta_{bomba\ 1}^{isentrópico} = \frac{h_{11} - h_{10}}{h_{11s} - h_{10}} \rightarrow h_{11}$$

$$T_{11} = T(agua, h_{11}, p_{11})$$

$$s_{11} = s(agua, h_{11}, p_{11})$$

$$v_{11} = v(agua, h_{11}, p_{11})$$

$$x_{11} = x(agua, h_{11}, p_{11})$$

Punto 12:

$$\Delta T T_{precalentador\ 1} = T_{saturación}(p_{extracción}) - T_{12} \rightarrow T_{12}$$

$$p_{12} = p_7$$

$$h_{12} = h(agua, T_{12}, p_{12})$$

$$s_{12} = s(agua, T_{12}, p_{12})$$

$$v_{12} = v(agua, T_{12}, p_{12})$$

$$x_{12} = x(agua, T_{12}, p_{12})$$

Punto 13:

$$p_{13} = p_{extracción\ 4}$$

$$x_{13} = 0$$

$$T_{13} = T(agua, p_{13}, x_{13})$$

$$h_{13} = h(agua, p_{13}, x_{13})$$

$$s_{13} = s(agua, p_{13}, x_{13})$$

$$v_{13} = v(\text{agua}, P_{13}, X_{13})$$

$$x_{13} = x(\text{agua}, P_{13}, X_{13})$$

Punto 14:

$$P_{14} = P_{\text{extracción 3}}$$

$$x_{14} = 0$$

$$T_{14} = T(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

$$h_{14} = h(\text{agua}, p_{14}, X_{14})$$

$$s_{14} = s(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

$$v_{14} = v(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

$$x_{14} = x(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

Punto 15:

$$P_{15} = P_{\text{extracción 2}}$$

$$x_{15} = 0$$

$$T_{15} = T(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

$$h_{15} = h(\text{agua}, p_{15}, X_{15})$$

$$s_{15} = s(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

$$v_{15} = v(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

$$x_{15} = x(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

Punto 16:

$$P_{16} = P_1 + \Delta P_{\text{caldera}} + \Delta P_{\text{precalentador 4}} + \Delta P_{\text{precalentador 3}}$$

$$p_{16s} = p_{16}$$

$$s_{16s} = s_{14}$$

$$h_{16s} = h(\text{agua}, p_{16s}, s_{16s})$$

$$\eta_{bomba\ 2}^{isentrópico} = \frac{h_{16} - h_{14}}{h_{16s} - h_{14}} \rightarrow h_{16}$$

$$T_{16} = T(\text{agua}, h_{16}, p_{16})$$

$$s_{16} = s(\text{agua}, h_{16}, p_{16})$$

$$v_{16} = v(\text{agua}, h_{16}, p_{16})$$

$$x_{16} = x(\text{agua}, h_{16}, p_{16})$$

Punto 17:

$$\Delta TT_{precalentador\ 3} = T_{saturación}(p_3) - T_{17} \rightarrow T_{17}$$

$$P_{17} = P_1 + \Delta P_{caldera} + \Delta P_{precalentador\ 4}$$

$$h_{17} = h(\text{agua}, p_{17}, T_{17})$$

$$s_{17} = s(\text{agua}, p_{17}, T_{17})$$

$$v_{17} = v(\text{agua}, p_{17}, T_{17})$$

$$x_{17} = x(\text{agua}, p_{17}, T_{17})$$

Punto 18:

$$p_{18} = p_{\text{extracción 1}}$$

$$x_{18} = 0$$

$$h_{18} = h(\text{agua}, p_{18}, x_{18})$$

$$s_{18} = s(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

$$v_{18} = v(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

$$x_{18} = x(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

Punto 19:

$$\Delta TT_{\text{precalentador } 4} = T_{\text{saturación}}(p_2) - T_{19} \rightarrow T_{19}$$

$$P_{19} = P_1 + \Delta P_{\text{caldera}} + \Delta P_{\text{precalentador } 4}$$

$$h_{19} = h(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

$$s_{19} = s(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

$$v_{19} = v(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

$$x_{19} = x(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

10.3. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS

Para calcular el caudal de vapor vivo necesario para generar la potencia deseada, es necesario obtener la fracción de vapor que se extrae para el desgasificador.

$$\text{Rendimiento del generador } \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{\text{generador}}}$$

$$\begin{aligned} \text{donde: } \dot{W}_t = & \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) + \\ & (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_4 - h_7) + \\ & (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7)(h_7 - h_8) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7 - \dot{m}_8)(h_8 - \\ & h_9) \end{aligned}$$

definiendo: $\alpha_1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$

$$\alpha_2 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha_3 = \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha_1 = \frac{\dot{m}_8}{\dot{m}_1}$$

sustituyendo: $\alpha_1 = \frac{(h_{19}-h_{17})}{(h_2-h_{18})}$

$$\alpha_2 = \frac{(h_{17}-h_{16})}{(h_3-h_{15})}$$

$$\alpha_3 = \frac{h_{14} - (1 - \alpha_1 - \alpha_2)h_{12} - \alpha_2 h_5}{(h_7 - h_{12})}$$

$$\alpha_4 = \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)(h_{12} - h_{11})}{(h_8 - h_{10})}$$

se puede despejar $\dot{m}_1$

Del balance de masas en cada uno de los equipos se obtienen todos los caudales de las distintas corrientes de la planta.

Balance de masas:

Caldera: $\dot{m}_{19} = \dot{m}_1$

Turbina alta: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4$

Turbina baja: $\dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9$

Aerocondensador: $\dot{m}_9 + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{10}$

Bomba 1: $\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$

Desgasificador: $\dot{m}_7 + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{15} = \dot{m}_{14}$

Precalentador 1: $\dot{m}_8 = \dot{m}_{13} ; \dot{m}_{12} = \dot{m}_{11}$

Precalentador 3: $\dot{m}_{15} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{18} ; \dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$

Precalentador 4: $\dot{m}_{17} = \dot{m}_{19} ; \dot{m}_2 = \dot{m}_{18}$

Bomba 2: $\dot{m}_{14} = \dot{m}_{16}$

Las ecuaciones que cierran el sistema de ecuaciones es el balance de energía en el desgasificador y precalentadores

Balance de energía:

Precalentador 1: $\dot{m}_8(h_8 - h_{13}) = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$

Desgasificador: $\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{15} h_{15} = \dot{m}_{14} h_{14}$

Precalentador 3: $\dot{m}_3(h_3 - h_{15}) = \dot{m}_{16}(h_{17} - h_{16})$

Precalentador 4: $\dot{m}_2(h_2 - h_{18}) = \dot{m}_{17}(h_9 - h_{17})$

10.4. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS

Para obtener las potencias térmicas y eléctricas de los distintos equipos que componen la planta se atiende a su definición, de la forma:

Caldera: $\dot{Q}_{\text{caldera}} = \dot{m}_1(h_1 - h_{19}) + \dot{m}_1(h_4 - h_6)$

Turbina: $\dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) +$
 $(\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_4 - h_7) +$
 $(\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7)(h_7 - h_8) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7 - \dot{m}_8)(h_8 -$
 $h_9)$

Aerocondensador: $\dot{Q}_{\text{aerocondensador}} = \dot{m}_9(h_9 - h_{10})$

Bomba 1: $\dot{W}_{\text{bomba 1}} = v_{10}(p_{11} - p_{10})$

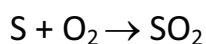
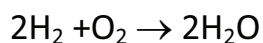
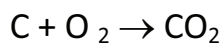
Desgasificador: $\dot{Q}_{\text{desgasificador}} = \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_{12} h_{12}$

Bomba 2: $\dot{W}_{\text{bomba 2}} = v_{14}(p_{16} - p_{14})$

10.5. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN

Obtención del aire estequiométrico seco: Cantidad de aire seco requerido para quemar completamente el combustible.

Reacciones de combustión, que generan calor útil:



Los otros constituyentes de los combustibles (distintos de C,H,S), así como el N₂ y la humedad no producen calor útil, sin embargo son

constituyentes de los gases de escape y deben ser tenidos en cuenta cuando se evalúe la eficiencia de la caldera.

No se consideran los NO_x a la hora de los cálculos de combustión, pero deben ser tenidos en cuenta a la hora de la consideración de las emisiones contaminantes.

Obtención del aire estequiométrico húmedo:

El aire de combustión utilizado en la caldera también contiene humedad en forma de vapor de agua.

Humedad absoluta en el aire. [kg agua/kg de aire seco]

Condiciones ambiente: Temperatura, presión, humedad relativa →
Cálculos Psicrométricos.

Obtención del Aire de entrada a la caldera. Exceso de aire.

Depende de un cierto número de parámetros

- ✓ Tipo de combustible
- ✓ Diseño de la caldera
- ✓ Diseño de los sistemas de quemadores
- ✓ Carga.

El exceso de aire tiene un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, ya que aumenta el nivel de energía perdida en los gases de escape. Situación de compromiso entre un buen rendimiento y una combustión eficiente.

Obtención de los gases de escape

Se consideran los siguientes componentes:

CO₂ (Combustión del combustible)

H₂O (Combustión del combustible + humedad del aire + humedad del combustible)

SO₂ (Combustión del combustible)

N₂ (Del aire de combustión + presente en el combustible)

O₂ (Del exceso de aire)

Obtención del PCS del combustible.

Composición másica del combustible en base húmeda

Composición másica del combustible en base seca

ejemplo
$$C_{bs} = C \cdot \left[\frac{100}{100 - W} \right]$$

PCS base seca → Fórmula de Milne

$$PCS_{bs} = (0,314 \cdot C_{bs} + 1,322 \cdot H_{bs} - 0,12 \cdot O_{bs} - 0,12 \cdot N_{bs} + 0,0686 \cdot S_{bs} - 0,0153 \cdot A_{bs}) \cdot 1000$$

{kJ/kg cble}

PCS base húmeda
$$PCS_{bh} = PCS_{bs} \cdot \left[1 - \frac{W}{100} \right]$$

10.6. RENDIMIENTOS DEL CICLO

Tras obtener una caracterización de la combustión se pueden calcular los distintos consumos y rendimientos de la planta

$$\eta_{\text{ciclo}}^{\text{bruto}} = \frac{\dot{W}_{\text{elec}}}{\dot{m}_{\text{combustible}} \cdot \text{PCI}_{\text{humeda}}}$$

$$\eta_{\text{ciclo}}^{\text{neto}} = \frac{\dot{W}_{\text{elec}} - \dot{W}_{\text{auxiliares}}}{\dot{m}_{\text{combustible}} \cdot \text{PCI}_{\text{humeda}}}$$

10.7. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se presenta como anexo la exposición de este caso para una práctica y los resultados obtenidos tal y como los expone la hoja de cálculo

11. CASO 9: CICLO DE RANKINE REGENERATIVO Y CON RECALENTAMIENTO, TORRE DE REFRIGERACIÓN

11.1. DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada necesarios para la definición del ciclo son:

Generador eléctrico:

- ✓ Potencia a entregar a la red
- ✓ Rendimiento eléctrico del generador

Caldera:

- ✓ Rendimiento de la caldera
- ✓ Temperatura de recalentamiento
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Exceso de aire de combustión

Turbina:

- ✓ Temperatura de vapor vivo
- ✓ Presión de vapor vivo
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina de alta
- ✓ Rendimiento isentrópico de la turbina de baja
- ✓ Presión de condensación
- ✓ Presión del desgasificador
- ✓ Presión de todas las extracciones

Bomba de baja presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de baja

Bomba de alta presión:

- ✓ Rendimiento de la bomba de alta

Precalentadores:

- ✓ Diferencia terminal de temperaturas
- ✓ Pérdida de presión

Condensador:

- ✓ Efectividad del aerocondensador

Torre de refrigeración:

- ✓ Pérdida de carga del lado del aire
- ✓ Pérdida de carga del lado del agua
- ✓ Rendimiento de bombas
- ✓ Rendimiento de ventiladores

Caracterización de la biomasa:

- ✓ Análisis químico en base húmeda: Carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, humedad y cenizas

Condiciones ambiente de diseño:

- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Presión ambiente
- ✓ Humedad relativa ambiente

11.2. ESTADO TERMODINÁMICO DE LOS PUNTOS DEL CICLO

La definición termodinámica de los puntos del ciclo empieza por la condición de vapor vivo exigido por la turbina

Punto 1:

$$T_1 = T_{vv}$$

$$p_1 = p_{vv}$$

$$h_1 = h(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$s_1 = s(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$v_1 = v(\text{agua}, T_1, P_1)$$

$$x_1 = x(\text{agua}, T_1, P_1)$$

Punto 4:

$$p_4 = p_{\text{recalentamiento}}$$

$$p_{4s} = p_4$$

$$s_{4s} = s_1$$

$$h_{4s} = h(\text{agua}, p_{4s}, s_{4s})$$

$$\eta_{\text{turbina alta}}^{\text{isentrópico}} = \frac{h_1 - h_4}{h_1 - h_{4s}} \rightarrow h_4$$

$$T_4 = T(\text{agua}, p_4, h_4)$$

$$s_4 = s(\text{agua}, p_4, h_4)$$

$$v_4 = v(\text{agua}, p_4, h_4)$$

$$x_4 = x(\text{agua}, p_4, h_4)$$

Punto 2:

$$p_2 = p_{\text{extracción 1}}$$

$$p_{2s} = p_2$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = h(\text{agua}, p_{2s}, s_{2s})$$

$$\frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} \rightarrow h_2$$

$$T_2 = T(\text{agua}, p_2, h_2)$$

$$s_2 = s(\text{agua}, p_2, h_2)$$

$$v_2 = v(\text{agua}, p_2, h_2)$$

$$x_2 = x(\text{agua}, p_2, h_2)$$

Punto 3:

$$P_3 = P_{\text{extracción 2}}$$

$$P_{3s} = P_3$$

$$s_{3s} = s_1$$

$$h_{3s} = h(\text{agua}, p_{3s}, s_{3s})$$

$$\frac{h_1 - h_{3s}}{h_1 - h_3} = \frac{h_1 - h_{4s}}{h_1 - h_4} \rightarrow h_3$$

$$T_3 = T(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$s_3 = s(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$v_3 = v(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$x_3 = x(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$p_3 = p(\text{agua}, p_3, h_3)$$

$$h_3 = h(\text{agua}, p_3, h_3)$$

Punto 5:

$$T_5 = T_4$$

$$p_5 = p_4 - \Delta p_{\text{deshumidificador}}$$

$$h_5 = h(\text{agua}, T_5, p_5)$$

$$s_5 = s(\text{agua}, T_5, p_5)$$

$$v_5 = v(\text{agua}, T_5, p_5)$$

$$x_5 = x(\text{agua}, T_5, p_5)$$

Punto 6:

$$p_6 = p_5 - \Delta p_{\text{precalentador}}$$

$$T_6 = T_1$$

$$h_6 = h(\text{agua}, p_6, T_6)$$

$$s_6 = s(\text{agua}, p_6, T_6)$$

$$v_6 = v(\text{agua}, p_6, T_6)$$

$$x_6 = x(\text{agua}, p_6, T_6)$$

Punto 9:

$$p_9 = p_{cond}$$

$$p_{9s} = p_9$$

$$s_{9s} = s_6$$

$$h_{9s} = h(\text{agua}, p_{9s}, s_{9s})$$

$$\eta_{turbina\ baja}^{isentrópico} = \frac{h_6 - h_9}{h_6 - h_{9s}} \rightarrow h_9$$

$$T_9 = T(\text{agua}, h_9, p_9)$$

$$s_9 = s(\text{agua}, h_9, p_9)$$

$$v_9 = v(\text{agua}, h_9, p_9)$$

$$x_9 = x(\text{agua}, h_9, p_9)$$

Punto 7:

$$p_7 = p_{extracción\ 3}$$

$$p_{7s} = p_7$$

$$s_{7s} = s_6$$

$$h_{7s} = h(\text{agua}, p_{7s}, s_{7s})$$

$$\frac{h_6 - h_{7s}}{h_6 - h_7} = \frac{h_6 - h_{9s}}{h_6 - h_9} \rightarrow h_7$$

$$T_7 = T(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$s_7 = s(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$v_7 = v(\text{agua}, h_7, p_7)$$

$$x_7 = x(\text{agua}, h_7, p_7)$$

Punto 8:

$$p_8 = p_{\text{extracción 4}}$$

$$p_{8s} = p_8$$

$$s_{8s} = s_6$$

$$h_{8s} = h(\text{agua}, p_{8s}, s_{8s})$$

$$\frac{h_6 - h_{8s}}{h_6 - h_8} = \frac{h_6 - h_{9s}}{h_6 - h_9} \rightarrow h_8$$

$$T_8 = T(\text{agua}, h_8, p_8)$$

$$s_8 = s(\text{agua}, h_8, p_8)$$

$$v_8 = v(\text{agua}, h_8, p_8)$$

$$x_8 = x(\text{agua}, h_8, p_8)$$

Punto 10:

$$p_{10} = p_{\text{cond}}$$

$$x_{10} = 0$$

$$T_{10} = T(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$h_{10} = h(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$s_{10} = s(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$v_{10} = v(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

$$x_{10} = x(\text{agua}, p_{10}, x_{10})$$

Punto 11:

$$p_{11} = p_7 + \Delta p_{precalentador}$$

$$p_{11s} = p_{11}$$

$$s_{11s} = s_{10}$$

$$\eta_{bomba\ 1}^{isentrópico} = \frac{h_{11} - h_{10}}{h_{11s} - h_{10}} \rightarrow h_{11}$$

$$T_{11} = T(agua, h_{11}, p_{11})$$

$$s_{11} = s(agua, h_{11}, p_{11})$$

$$v_{11} = v(agua, h_{11}, p_{11})$$

$$x_{11} = x(agua, h_{11}, p_{11})$$

Punto 12:

$$\Delta T T_{precalentador\ 1} = T_{saturación}(p_{extracción}) - T_{12} \rightarrow T_{12}$$

$$p_{12} = p_7$$

$$h_{12} = h(agua, T_{12}, p_{12})$$

$$s_{12} = s(agua, T_{12}, p_{12})$$

$$v_{12} = v(agua, T_{12}, p_{12})$$

$$x_{12} = x(agua, T_{12}, p_{12})$$

Punto 13:

$$p_{13} = p_{extracción\ 4}$$

$$x_{13} = 0$$

$$T_{13} = T(agua, p_{13}, x_{13})$$

$$h_{13} = h(\text{agua}, p_{13}, X_{13})$$

$$s_{13} = s(\text{agua}, P_{13}, X_{13})$$

$$v_{13} = v(\text{agua}, P_{13}, X_{13})$$

$$x_{13} = x(\text{agua}, P_{13}, X_{13})$$

Punto 14:

$$p_{14} = p_{\text{extracción 3}}$$

$$x_{14} = 0$$

$$T_{14} = T(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

$$h_{14} = h(\text{agua}, p_{14}, X_{14})$$

$$s_{14} = s(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

$$v_{14} = v(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

$$x_{14} = x(\text{agua}, P_{14}, X_{14})$$

Punto 15:

$$p_{15} = p_{\text{extracción 2}}$$

$$x_{15} = 0$$

$$T_{15} = T(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

$$h_{15} = h(\text{agua}, p_{15}, X_{15})$$

$$s_{15} = s(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

$$v_{15} = v(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

$$x_{15} = x(\text{agua}, P_{15}, X_{15})$$

Punto 16:

$$P_{16} = P_1 + \Delta P_{caldera} + \Delta P_{precalentador\ 4} + \Delta P_{precalentador\ 3}$$

$$p_{16s} = p_{16}$$

$$s_{16s} = s_{14}$$

$$h_{16s} = h(agua, p_{16s}, s_{16s})$$

$$\eta_{bomba\ 2}^{isentrópico} = \frac{h_{16} - h_{14}}{h_{16s} - h_{14}} \rightarrow h_{16}$$

$$T_{16} = T(agua, h_{16}, p_{16})$$

$$s_{16} = s(agua, h_{16}, p_{16})$$

$$v_{16} = v(agua, h_{16}, p_{16})$$

$$x_{16} = x(agua, h_{16}, p_{16})$$

Punto 17:

$$\Delta T T_{precalentador\ 3} = T_{saturación}(p_3) - T_{17} \rightarrow T_{17}$$

$$P_{17} = P_1 + \Delta P_{caldera} + \Delta P_{precalentador\ 4}$$

$$h_{17} = h(agua, p_{17}, T_{17})$$

$$s_{17} = s(agua, p_{17}, T_{17})$$

$$v_{17} = v(agua, p_{17}, T_{17})$$

$$x_{17} = x(agua, p_{17}, T_{17})$$

Punto 18:

$$P_{18} = P_{extracción\ 1}$$

$$x_{18} = 0$$

$$h_{18} = h(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

$$s_{18} = s(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

$$v_{18} = v(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

$$x_{18} = x(\text{agua}, p_{18}, X_{18})$$

Punto 19:

$$\Delta TT_{\text{precalentador } 4} = T_{\text{saturación}}(p_2) - T_{19} \rightarrow T_{19}$$

$$P_{19} = P_1 + \Delta P_{\text{caldera}} + \Delta P_{\text{precalentador } 4}$$

$$h_{19} = h(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

$$s_{19} = s(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

$$v_{19} = v(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

$$x_{19} = x(\text{agua}, p_{19}, T_{19})$$

11.3. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EQUIPOS

Para calcular el caudal de vapor vivo necesario para generar la potencia deseada, es necesario obtener la fracción de vapor que se extrae para el desgasificador.

$$\text{Rendimiento del generador } \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{\text{generador}}}$$

donde:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) +$$

$$(\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_4 - h_7) +$$

$$(\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7)(h_7 - h_8) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7 - \dot{m}_8)(h_8 -$$

$$h_9)$$

definiendo:

$$\alpha_1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha_2 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha_3 = \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_1}$$

$$\alpha_4 = \frac{\dot{m}_8}{\dot{m}_1}$$

sustituyendo:

$$\alpha_1 = \frac{(h_{19} - h_{17})}{(h_2 - h_{18})}$$

$$\alpha_2 = \frac{(h_{17} - h_{16})}{(h_3 - h_{15})}$$

$$\alpha_3 = \frac{h_{14} - (1 - \alpha_1 - \alpha_2)h_{12} - \alpha_4 h_5}{(h_7 - h_{12})}$$

$$\alpha_4 = \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)(h_{12} - h_{11})}{(h_8 - h_{10})}$$

se puede despejar $\dot{m}_1$

Del balance de masas en cada uno de los equipos se obtienen todos los caudales de las distintas corrientes de la planta.

Balance de masas:

Caldera: $\dot{m}_{19} = \dot{m}_1$

Turbina alta: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4$

Turbina baja: $\dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9$

Condensador: $\dot{m}_9 + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{10}$

Bomba 1: $\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$

Desgasificador: $\dot{m}_7 + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{15} = \dot{m}_{14}$

Precalentador 1: $\dot{m}_8 = \dot{m}_{13} ; \dot{m}_{12} = \dot{m}_{11}$

Precalentador 3: $\dot{m}_{15} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{18} ; \dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$

Precalentador 4: $\dot{m}_{17} = \dot{m}_{19} ; \dot{m}_2 = \dot{m}_{18}$

Bomba 2: $\dot{m}_{14} = \dot{m}_{16}$

Las ecuaciones que cierran el sistema de ecuaciones es el balance de energía en el desgasificador y precalentadores

Balance de energía:

Precalentador 1: $\dot{m}_8(h_8 - h_{13}) = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$

Desgasificador: $\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{15} h_{15} = \dot{m}_{14} h_{14}$

Precalentador 3: $\dot{m}_3(h_3 - h_{15}) = \dot{m}_{16}(h_{17} - h_{16})$

Precalentador 4: $\dot{m}_2(h_2 - h_{18}) = \dot{m}_{17}(h_9 - h_{17})$

11.4. POTENCIAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS EN EQUIPOS

Para obtener las potencias térmicas y eléctricas de los distintos equipos que componen la planta se atiende a su definición, de la forma:

$$\text{Caldera:} \quad \dot{Q}_{\text{caldera}} = \dot{m}_1(h_1 - h_{19}) + \dot{m}_1(h_4 - h_6)$$

$$\begin{aligned} \text{Turbina:} \quad \dot{W}_t = & \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) + \\ & (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_4 - h_7) + \\ & (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7)(h_7 - h_8) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_7 - \dot{m}_8)(h_8 - \\ & h_9) \end{aligned}$$

$$\text{Condensador:} \quad \dot{Q}_{\text{condensador}} = \dot{m}_9(h_9 - h_{10})$$

$$\text{Bomba 1:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 1}} = v_{10}(p_{11} - p_{10})$$

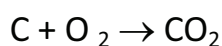
$$\text{Desgasificador:} \quad \dot{Q}_{\text{desgasificador}} = \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_{12} h_{12}$$

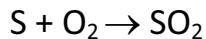
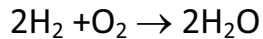
$$\text{Bomba 2:} \quad \dot{W}_{\text{bomba 2}} = v_{14}(p_{16} - p_{14})$$

11.5. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN

Obtención del aire estequiométrico seco: Cantidad de aire seco requerido para quemar completamente el combustible.

Reacciones de combustión, que generan calor útil:





Los otros constituyentes de los combustibles (distintos de C,H,S), así como el N₂ y la humedad no producen calor útil, sin embargo son constituyentes de los gases de escape y deben ser tenidos en cuenta cuando se evalúe la eficiencia de la caldera.

No se consideran los NO_x a la hora de los cálculos de combustión, pero deben ser tenidos en cuenta a la hora de la consideración de las emisiones contaminantes.

Obtención del aire estequiométrico húmedo:

El aire de combustión utilizado en la caldera también contiene humedad en forma de vapor de agua.

Humedad absoluta en el aire. [kg agua/kg de aire seco]

Condiciones ambiente: Temperatura, presión, humedad relativa →
Cálculos Psicrométricos.

Obtención del Aire de entrada a la caldera. Exceso de aire.

Depende de un cierto número de parámetros

- ✓ Tipo de combustible
- ✓ Diseño de la caldera
- ✓ Diseño de los sistemas de quemadores
- ✓ Carga.

El exceso de aire tiene un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, ya que aumenta el nivel de energía perdida en los gases de

escape. Situación de compromiso entre un buen rendimiento y una combustión eficiente.

Obtención de los gases de escape

Se consideran los siguientes componentes:

CO₂ (Combustión del combustible)

H₂O (Combustión del combustible + humedad del aire + humedad del combustible)

SO₂ (Combustión del combustible)

N₂ (Del aire de combustión + presente en el combustible)

O₂ (Del exceso de aire)

Obtención del PCS del combustible.

Composición másica del combustible en base húmeda

Composición másica del combustible en base seca

ejemplo
$$C_{bs} = C \cdot \left[\frac{100}{100 - W} \right]$$

PCS base seca → Fórmula de Milne

$$PCS_{bs} = (0,314 \cdot C_{bs} + 1,322 \cdot H_{bs} - 0,12 \cdot O_{bs} - 0,12 \cdot N_{bs} + 0,0686 \cdot S_{bs} - 0,0153 \cdot A_{bs}) \cdot 1000$$

{kJ/kg cble}

PCS base húmeda
$$PCS_{bh} = PCS_{bs} \cdot \left[1 - \frac{W}{100} \right]$$

11.6. RENDIMIENTOS DEL CICLO

Tras obtener una caracterización de la combustión se pueden calcular los distintos consumos y rendimientos de la planta

$$\eta_{ciclo}^{bruto} = \frac{W_{elec}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

$$\eta_{ciclo}^{neto} = \frac{W_{elec} - W_{auxiliares}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI_{humeda}}$$

11.7. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se presenta como anexo la exposición de este caso para una práctica y los resultados obtenidos tal y como los expone la hoja de cálculo

