

FOTOVOLTAICA, BIOMASA Y COGENERACIÓN

BLOQUE II: Principios de generación y diseño de instalaciones de
biomasa. Clase XIII

5.1 Calderas

5.1.1 Tipos y estructura básica (I/IV)

Atendiendo al fluido de trabajo se clasifican en: agua caliente a presión atmosférica, agua caliente presurizada, aceite térmico, vapor saturado (vapor de procesos) y vapor recalentado (vapor de potencia).

Atendiendo a la circulación de los humos – agua: acuotubulares y pirotubulares. En las primeras el fluido circula por el interior de los tubos, mientras que, en el segundo son los gases de combustión los que pasan por el interior de los tubos.

Atendiendo al mecanismo de transmisión de calor: radiativas y convectivas. Siempre se da, en mayor o menor medida, la transmisión de calor por convección y radiación simultáneas, pero se denominan de una u otra forma en función del mecanismo de transmisión que predomina.

5.1 Calderas

5.1.1 Tipos y estructura básica (II/IV)

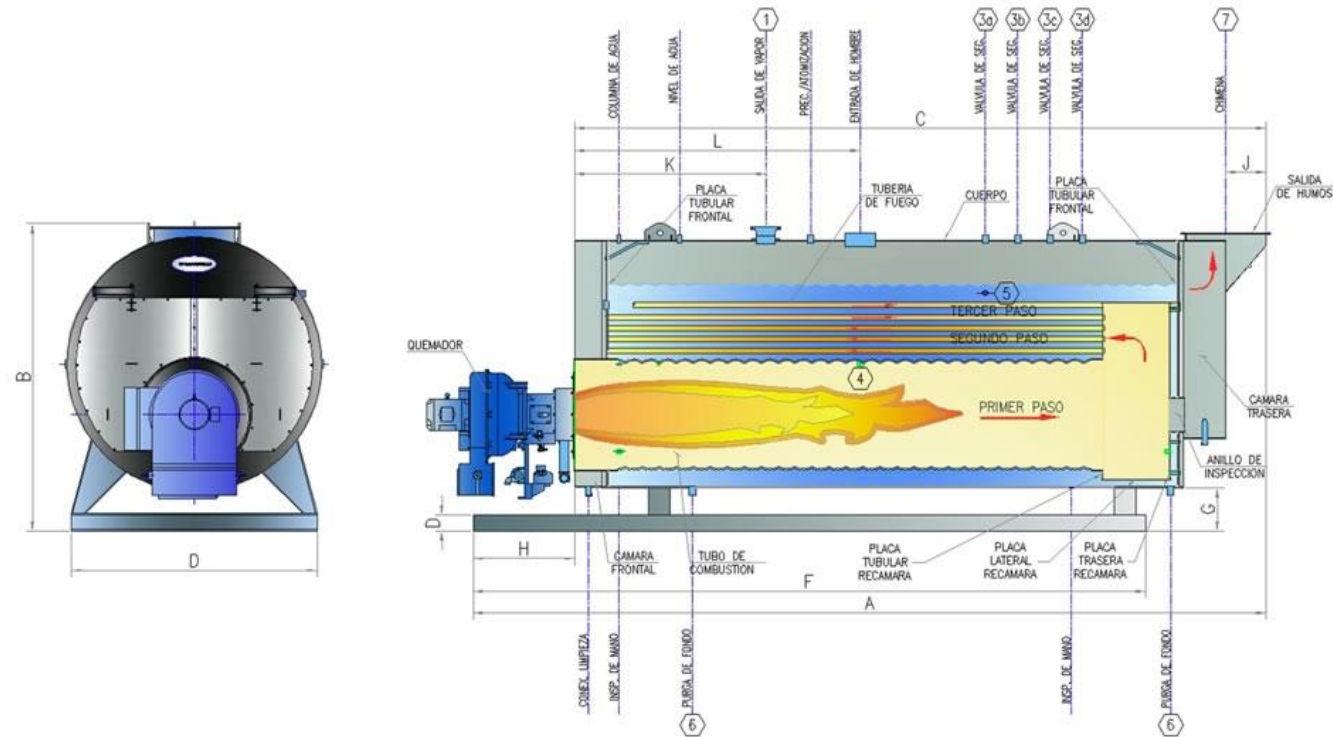
Atendiendo al mecanismo de circulación del agua: convección natural y forzada. Puede activarse la circulación del agua o, en general, el fluido de trabajo, mediante una bomba que activa la circulación del fluido de trabajo. Este tipo de caldera se dice que es de convección forzada.

Atendiendo al combustible quemado: carbón, fuelóleo, gasóleo, GN, mixtas, eléctricas, residuos, etc.

Atendiendo a su estructura: verticales y horizontales. Se refiere a la situación de los distintos intercambiadores de calor que componen la caldera, en las horizontales se sitúan al mismo nivel, uno detrás de otro, y en las verticales, uno encima del otro.

5.1 Calderas

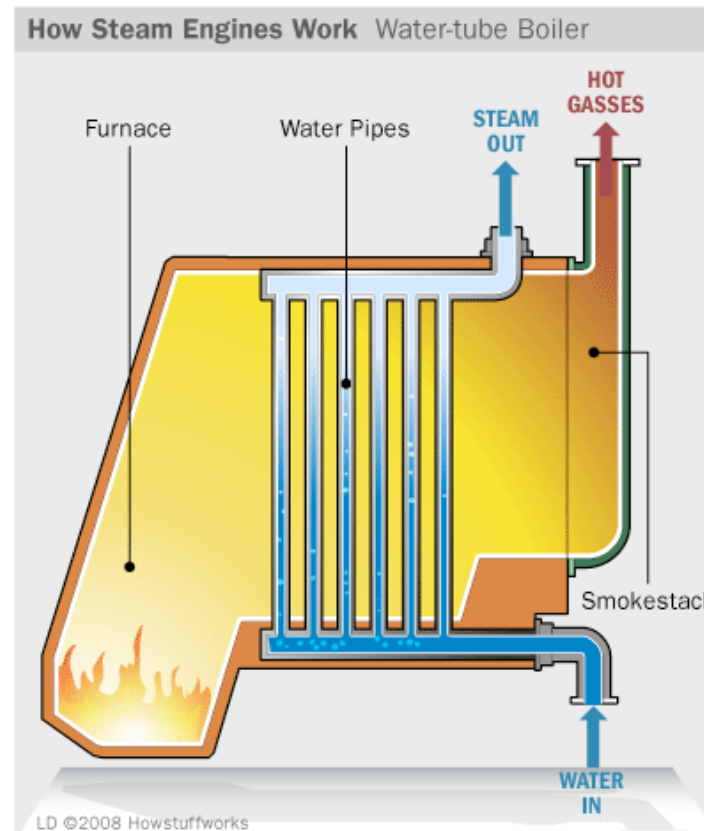
5.1.1 Tipos y estructura básica (III/IV)



CALDERA PIROTUBULAR DE TRES PASOS

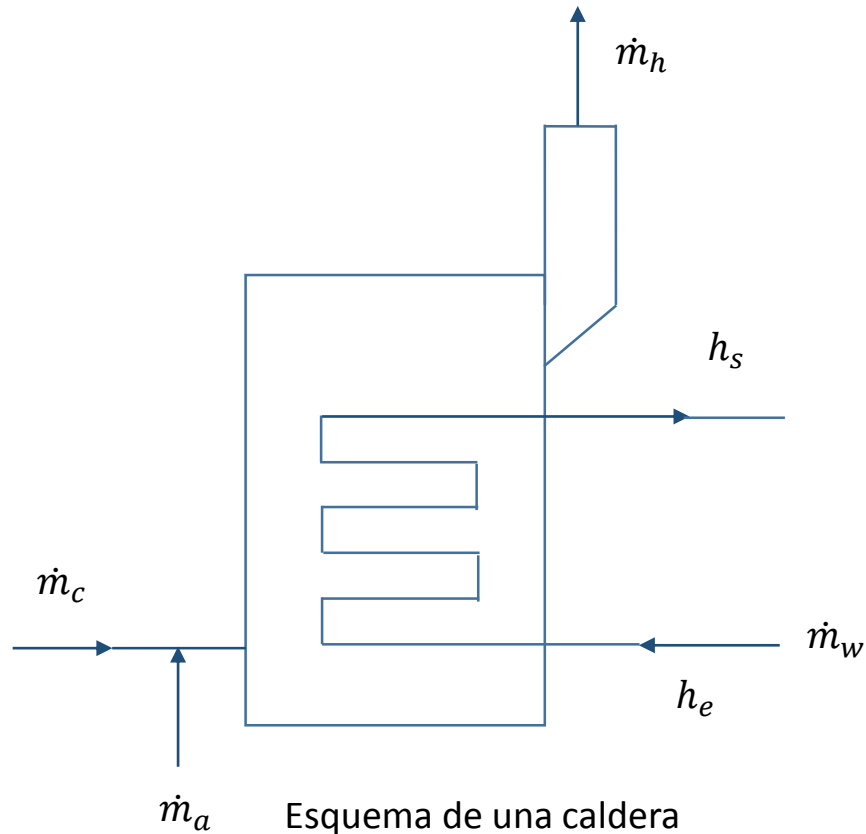
5.1 Calderas

5.1.1 Tipos y estructura básica (IV/IV)



5.1 Calderas

5.1.2 Rendimiento (I/VI)



donde

\dot{m}_c caudal másico de combustible en kg/s

\dot{m}_a caudal másico de aire en kg/s

\dot{m}_h caudal másico de gases de combustión en kg/s

\dot{m}_w caudal másico del agua en kg/s

h_{ws} entalpía específica del fluido de trabajo a la salida en J

h_{we} entalpía específica del fluido de trabajo a la entrada en J

5.1 Calderas

5.1.2 Rendimiento (II/VI)

Balance de masa

$$\dot{m}_c + \dot{m}_a = \dot{m}_h$$

donde

\dot{m}_c	caudal másico de combustible en kg/s
\dot{m}_a	caudal másico de aire en kg/s
\dot{m}_h	caudal másico de gases de combustión en kg/s

Balance de calor

$$\dot{m}_c \cdot PCI + \dot{m}_a \cdot h_a = \dot{m}_h \cdot h_h + \dot{m}_w \cdot (h_{ws} - h_{we}) + \dot{Q}_p \quad (1)$$

donde

PCI	poder calorífico inferior del combustible en J/Nm ³
h_a	entalpía específica del aire de combustión en J
h_h	entalpía específica de los gases de combustión en J
\dot{m}_w	caudal másico del agua en kg/s
h_{ws}	entalpía específica del fluido de trabajo a la salida en J
h_{we}	entalpía específica del fluido de trabajo a la entrada en J
\dot{Q}_p	pérdidas de calor a través de las paredes en W

5.1 Calderas

5.1.2 Rendimiento (III/VI)

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCI$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_w \cdot (h_{ws} - h_{we})$$

$$\eta = \dot{Q}_u / \dot{Q}_c \tag{2}$$

Donde

- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W
- \dot{m}_c caudal másico de combustible en kg/s
- PCI poder calorífico inferior del combustible en J/Nm³
- \dot{Q}_u energía útil generada en forma de calor útil en W
- \dot{m}_w caudal másico del agua en kg/s
- h_{ws} entalpía específica del fluido de trabajo a la salida en J
- h_{we} entalpía específica del fluido de trabajo a la entrada en J
- η rendimiento de la caldera, referido al PCI del combustible

5.1 Calderas

5.1.2 Rendimiento (IV/VI)

$$\eta = 1 + R_{acm} \cdot \left(\frac{c_{pa}}{PCI_m} \right) \cdot T_a - R_{hc} \cdot \left(\frac{c_{ph}}{PCI_m} \right) \cdot T_h - \dot{Q}_p / \dot{Q}_c \quad (3)$$

donde

- $R_{acm} = \dot{m}_a / \dot{m}_c$ relación másica aire-combustible en kg/kg
- \dot{m}_a caudal másico de aire en kg/s
- \dot{m}_c caudal másico de combustible en kg/s
- c_{pa} calor específico del aire a presión constante en J/(kg·K)
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- T_a temperatura centígrada a la entrada de la caldera, en °C
- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- c_{ph} calor específico de los gases de combustión a presión constante en J/(kg·K)
- T_h temperatura centígrada a la salida de la caldera, en °C
- \dot{Q}_p pérdidas de calor a través de las paredes en W
- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W

5.1 Calderas

5.1.2 Rendimiento (V/VI)

$$R_{acv} = PC \cdot (1 + n) \quad (4)$$

donde

- R_{acv} relación aire-combustible en volumen en Nm^3 aire/ Nm^3
- PC poder comburívoro en kg/kg
- n exceso de aire en tanto por uno y en masa

5.1 Calderas

5.1.2 Rendimiento (VI/VI)

Combustible gas	PCS (MJ/Nm ³)	PCI (MJ/Nm ³)	ρ (kg/Nm ³)	PC (Nm ³ / Nm ³)
Gas natural	44.00	39.60	0.75	11.2
Propano comercial	93.30	85.75	1.85	24
Butano comercial	119.70	110.35	2.41	31.1
Combustible líquido	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	ρ (kg/Nm ³)	PC (Nm ³ / Nm ³)
Gasóleo	43.10	42.30	830/870	11.5
Fuelóleo	42.70	40.60	920/970	11.0
Fuente: UNE 123-007-94				

Características de los combustibles más usados

5.1 Calderas (Ejemplo de cálculo)

Una caldera de gas natural tiene una potencia útil de 5 MW, la temperatura de entrada del aire es 15 °C y la de salida de los gases de combustión 130 °C (quemador), el exceso de aire es del 5%, las pérdidas a través de las paredes son un 3% de la potencia consumida en forma de combustible.

Otros datos: calor específico del aire es 1.01 kJ/(kg·K), densidad del aire 1.29 kg/Nm³, calor específico de los gases de combustión 1.07 kJ/(kg·K), y la tabla de la diapositiva anterior. Calcular el rendimiento esperado de la caldera y los caudales de gas natural, aire y gases de combustión.

5.1 Calderas (Pistas)

$$R_{acm} = R_{acv} \cdot (\rho_a / \rho_c)$$

donde

- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- R_{acv} relación aire-combustible en volumen en Nm³ aire/Nm³
- ρ_a densidad del aire en kg/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³

5.1 Calderas (Pistas, pasos I/III)

Paso 1: Cálculo de la relación aire-combustible en volumen (4). $R_{acv} = PC \cdot (1 + n)$

Paso 2: Cálculo de la relación aire-combustible en masa. $R_{acm} = R_{acv} \cdot (\rho_a / \rho_c)$

Paso 3: Cálculo de la relación gases-combustible en masa. $R_{hc} = R_{acm} + 1$

Paso 4: Cálculo del PCI referido a la unidad de masa. $PCI_m = \frac{PCI}{\rho_c}$

donde

- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PC poder comburívoro en kg/kg
- n exceso de aire en tanto por uno y en masa
- R_{acv} relación aire-combustible en volumen en Nm³ aire/Nm³
- ρ_a densidad del aire en kg/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³
- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- PCI poder calorífico inferior del combustible en MJ/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³

5.1 Calderas (Pistas, pasos II/III)

Paso 5: Cálculo del rendimiento (3). $\eta = 1 + R_{acm} \cdot \left(\frac{c_{pa}}{PCI_m}\right) \cdot T_a - R_{hc} \cdot \left(\frac{c_{ph}}{PCI_m}\right) \cdot T_h - \frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_c}$

donde

- $R_{acm} = \dot{m}_a / \dot{m}_c$ relación másica aire-combustible en kg/kg
- \dot{m}_a caudal másico de aire en kg/s
- \dot{m}_c caudal másico de combustible en kg/s
- c_{pa} calor específico del aire a presión constante en J/(kg·K)
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- T_a temperatura centígrada a la entrada de la caldera, en °C
- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- c_{ph} calor específico de los gases de combustión a presión constante en J/(kg·K)
- T_h temperatura centígrada a la salida de la caldera, en °C
- \dot{Q}_p pérdidas de calor a través de las paredes en W
- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W

5.1 Calderas (Pistas, pasos III/III)

Paso 6: Cálculo de la potencia térmica consumida en forma de gas natural.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCI; \dot{Q}_u = \dot{m}_w \cdot (h_{ws} - h_{we}); \eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_c} \rightarrow \dot{Q}_c = \frac{\dot{Q}_u}{\eta}$$

Paso 7: Cálculo de los caudales máxicos.

gas natural $\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_c}{PCI_m}$; aire $\dot{m}_a = \dot{m}_c \cdot R_{acm}$; gases de combustión $\dot{m}_h = \dot{m}_c + \dot{m}_a$

donde:

- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W
- \dot{m}_c caudal máxico de combustible en kg/s
- PCI poder calorífico inferior del combustible en J/Nm³
- \dot{Q}_u energía útil generada en forma de calor útil en W
- \dot{m}_w caudal máxico del agua en kg/s
- h_{ws} entalpía específica del fluido de trabajo a la salida en J
- h_{we} entalpía específica del fluido de trabajo a la entrada en J
- η rendimiento de la caldera, referido al PCI del combustible
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- \dot{m}_a caudal máxico de aire en kg/s
- $R_{acm} = \dot{m}_a / \dot{m}_c$ relación máxica aire-combustible en kg/kg
- \dot{m}_h caudal máxico de gases de combustión en kg/s

5.1 Calderas (Pistas, pasos I/III)

Paso 1: Cálculo de la relación aire-combustible en volumen (4). $R_{acv} = PC \cdot (1 + n)$

Paso 2: Cálculo de la relación aire-combustible en masa. $R_{acm} = R_{acv} \cdot (\rho_a / \rho_c)$

Paso 3: Cálculo de la relación gases-combustible en masa. $R_{hc} = R_{acm} + 1$

Paso 4: Cálculo del PCI referido a la unidad de masa. $PCI_m = \frac{PCI}{\rho_c}$

donde

- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PC poder comburívoro en kg/kg
- n exceso de aire en tanto por uno y en masa
- R_{acv} relación aire-combustible en volumen en Nm³ aire/Nm³
- ρ_a densidad del aire en kg/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³
- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- PCI poder calorífico inferior del combustible en MJ/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³

5.1 Calderas

Ejemplo de cálculo (Solución I/VII)

Cálculo de la relación aire-combustible en volumen (4)

$$R_{acv} = PC \cdot (1 + n) = 11.2 \cdot (1 + 0.05) = 11.76 \text{ (Nm}^3 \text{ aire)/(Nm}^3 \text{ GN)} \quad (4)$$

donde

- R_{acv} relación aire-combustible en volumen en $\text{Nm}^3 \text{ aire/Nm}^3$
- PC poder comburívoro del combustible en Nm^3/Nm^3
- n exceso de aire en tanto por uno y en masa

5.1 Calderas (Pistas, pasos I/III)

Paso 1: Cálculo de la relación aire-combustible en volumen (4). $R_{acv} = PC \cdot (1 + n)$

Paso 2: Cálculo de la relación aire-combustible en masa. $R_{acm} = R_{acv} \cdot (\rho_a / \rho_c)$

Paso 3: Cálculo de la relación gases-combustible en masa. $R_{hc} = R_{acm} + 1$

Paso 4: Cálculo del PCI referido a la unidad de masa. $PCI_m = \frac{PCI}{\rho_c}$

donde

- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PC poder comburívoro en kg/kg
- n exceso de aire en tanto por uno y en masa
- R_{acv} relación aire-combustible en volumen en Nm³ aire/Nm³
- ρ_a densidad del aire en kg/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³
- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- PCI poder calorífico inferior del combustible en MJ/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³

5.1 Calderas

Ejemplo de cálculo (Solución II/)

Cálculo de la relación aire-combustible en masa

$$R_{acm} = R_{acv} \cdot (\rho_a / \rho_c) = 11.76 \cdot \left(\frac{1.29}{0.75} \right) = 20.23 \text{ kg/kg}$$

donde

- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- R_{acv} relación aire-combustible en volumen en Nm³ aire/Nm³
- ρ_a densidad del aire en kg/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³

5.1 Calderas (Pistas, pasos I/III)

Paso 1: Cálculo de la relación aire-combustible en volumen (4). $R_{acv} = PC \cdot (1 + n)$

Paso 2: Cálculo de la relación aire-combustible en masa. $R_{acm} = R_{acv} \cdot (\rho_a / \rho_c)$

Paso 3: Cálculo de la relación gases-combustible en masa. $R_{hc} = R_{acm} + 1$

Paso 4: Cálculo del PCI referido a la unidad de masa. $PCI_m = \frac{PCI}{\rho_c}$

donde

- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PC poder comburívoro en kg/kg
- n exceso de aire en tanto por uno y en masa
- R_{acv} relación aire-combustible en volumen en Nm³ aire/Nm³
- ρ_a densidad del aire en kg/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³
- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- PCI poder calorífico inferior del combustible en MJ/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³

5.1 Calderas

Ejemplo de cálculo (Solución III/VII)

Cálculo de la relación gases-combustible en masa

$$R_{hc} = R_{acm} + 1 = 20.23 + 1 = 21.23$$

donde

- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg

5.1 Calderas (Pistas, pasos I/III)

Paso 1: Cálculo de la relación aire-combustible en volumen (4). $R_{acv} = PC \cdot (1 + n)$

Paso 2: Cálculo de la relación aire-combustible en masa. $R_{acm} = R_{acv} \cdot (\rho_a / \rho_c)$

Paso 3: Cálculo de la relación gases-combustible en masa. $R_{hc} = R_{acm} + 1$

Paso 4: Cálculo del PCI referido a la unidad de masa. $PCI_m = \frac{PCI}{\rho_c}$

donde

- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PC poder comburívoro en kg/kg
- n exceso de aire en tanto por uno y en masa
- R_{acv} relación aire-combustible en volumen en Nm³ aire/Nm³
- ρ_a densidad del aire en kg/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³
- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- R_{acm} relación másica aire-combustible en kg/kg
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- PCI poder calorífico inferior del combustible en MJ/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³

5.1 Calderas

Ejemplo de cálculo (Solución IV/VII)

Cálculo del PCI referido a la unidad de masa

$$PCI_m = \frac{PCI}{\rho_c} = \frac{39.60}{0.75} = 52.8 \text{ MJ/kg}$$

donde

- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- PCI poder calorífico inferior del combustible en MJ/Nm³
- ρ_c densidad del combustible en kg/Nm³

5.1 Calderas (Pistas, pasos II/III)

Paso 5: Cálculo del rendimiento (3). $\eta = 1 + R_{acm} \cdot \left(\frac{c_{pa}}{PCI_m}\right) \cdot T_a - R_{hc} \cdot \left(\frac{c_{ph}}{PCI_m}\right) \cdot T_h - \frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_c}$

donde

- $R_{acm} = \dot{m}_a / \dot{m}_c$ relación másica aire-combustible en kg/kg
- \dot{m}_a caudal másico de aire en kg/s
- \dot{m}_c caudal másico de combustible en kg/s
- c_{pa} calor específico del aire a presión constante en J/(kg·K)
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- T_a temperatura centígrada a la entrada de la caldera, en °C
- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- c_{ph} calor específico de los gases de combustión a presión constante en J/(kg·K)
- T_h temperatura centígrada a la salida de la caldera, en °C
- \dot{Q}_p pérdidas de calor a través de las paredes en W
- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W

5.1 Calderas

Ejemplo de cálculo (Solución V/VII)

Cálculo del rendimiento (3)

$$\eta = 1 + R_{acm} \cdot \left(\frac{c_{pa}}{PCI_m} \right) \cdot T_a - R_{hc} \cdot \left(\frac{c_{ph}}{PCI_m} \right) \cdot T_h - \frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_c} =$$

$$= 1 + 20.23 \cdot \left(\frac{1.01}{52\,800} \right) \cdot 15 - 21.23 \cdot \left(\frac{1.07}{52\,800} \right) \cdot 130 - \frac{0.03}{1} = 1 + 0.006 - 0.056 - 0.03 = 0.92 \text{ (92\%)} \quad (3)$$

donde

- $R_{acm} = \dot{m}_a / \dot{m}_c$ relación másica aire-combustible en kg/kg
- \dot{m}_a caudal másico de aire en kg/s
- \dot{m}_c caudal másico de combustible en kg/s
- c_{pa} calor específico del aire a presión constante en kJ/(kg·K)
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- T_a temperatura centígrada a la entrada de la caldera, en °C
- $R_{hc} = R_{acm} + 1$ relación másica gases-combustible en kg/kg
- c_{ph} calor específico de los gases de combustión a presión constante en kJ/(kg·K)
- T_h temperatura centígrada a la salida de la caldera, en °C
- \dot{Q}_p pérdidas de calor a través de las paredes en W
- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W

5.1 Calderas (Pistas, pasos III/III)

Paso 6: Cálculo de la potencia térmica consumida en forma de gas natural.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCI; \dot{Q}_u = \dot{m}_w \cdot (h_{ws} - h_{we}); \eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_c} \rightarrow \dot{Q}_c = \frac{\dot{Q}_u}{\eta}$$

Paso 7: Cálculo de los caudales máxicos.

gas natural $\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_c}{PCI_m}$; aire $\dot{m}_a = \dot{m}_c \cdot R_{acm}$; gases de combustión $\dot{m}_h = \dot{m}_c + \dot{m}_a$

donde:

- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W
- \dot{m}_c caudal máxico de combustible en kg/s
- PCI poder calorífico inferior del combustible en J/Nm³
- \dot{Q}_u energía útil generada en forma de calor útil en W
- \dot{m}_w caudal máxico del agua en kg/s
- h_{ws} entalpía específica del fluido de trabajo a la salida en J
- h_{we} entalpía específica del fluido de trabajo a la entrada en J
- η rendimiento de la caldera, referido al PCI del combustible
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- \dot{m}_a caudal máxico de aire en kg/s
- $R_{acm} = \dot{m}_a / \dot{m}_c$ relación máxica aire-combustible en kg/kg
- \dot{m}_h caudal máxico de gases de combustión en kg/s

5.1 Calderas

Ejemplo de cálculo (Solución VI/VII)

Potencia térmica consumida en forma de gas natural

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCI$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_w \cdot (h_{ws} - h_{we})$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_c} \rightarrow \dot{Q}_c = \frac{\dot{Q}_u}{\eta} = \frac{5}{0.92} = 5.43 \text{ MW} \quad (2)$$

Donde

- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W
- \dot{m}_c caudal másico de combustible en kg/s
- PCI poder calorífico inferior del combustible en J/Nm³
- \dot{Q}_u energía útil generada en forma de calor útil en W
- \dot{m}_w caudal másico del agua en kg/s
- h_{ws} entalpía específica del fluido de trabajo a la salida en J
- h_{we} entalpía específica del fluido de trabajo a la entrada en J
- η rendimiento de la caldera, referido al PCI del combustible

5.1 Calderas (Pistas, pasos III/III)

Paso 6: Cálculo de la potencia térmica consumida en forma de gas natural.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCI; \dot{Q}_u = \dot{m}_w \cdot (h_{ws} - h_{we}); \eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_c} \rightarrow \dot{Q}_c = \frac{\dot{Q}_u}{\eta}$$

Paso 7: Cálculo de los caudales máxicos.

gas natural $\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_c}{PCI_m}$; aire $\dot{m}_a = \dot{m}_c \cdot R_{acm}$; gases de combustión $\dot{m}_h = \dot{m}_c + \dot{m}_a$

donde:

- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W
- \dot{m}_c caudal máxico de combustible en kg/s
- PCI poder calorífico inferior del combustible en J/Nm³
- \dot{Q}_u energía útil generada en forma de calor útil en W
- \dot{m}_w caudal máxico del agua en kg/s
- h_{ws} entalpía específica del fluido de trabajo a la salida en J
- h_{we} entalpía específica del fluido de trabajo a la entrada en J
- η rendimiento de la caldera, referido al PCI del combustible
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- \dot{m}_a caudal máxico de aire en kg/s
- $R_{acm} = \dot{m}_a / \dot{m}_c$ relación máxica aire-combustible en kg/kg
- \dot{m}_h caudal máxico de gases de combustión en kg/s

5.1 Calderas

Ejemplo de cálculo (Solución VII/VII)

Cálculo de los caudales máxicos

gas natural	$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_c}{PCI_m} = \frac{5.43}{52.8} = 0.103 \text{ kg/s}$
aire	$\dot{m}_a = \dot{m}_c \cdot R_{acm} = 0.103 \cdot 20.23 = 2.082 \text{ kg/s}$
gases de combustión	$\dot{m}_h = \dot{m}_c + \dot{m}_a = 0.103 + 2.082 = 2.185 \text{ kg/s}$

donde

- \dot{m}_c caudal máxico de combustible en kg/s
- \dot{Q}_c energía consumida en forma de combustible en W (ó en J/s)
- PCI_m poder calorífico inferior referido a la unidad de masa en MJ/kg
- \dot{m}_a caudal máxico de aire en kg/s
- \dot{m}_c caudal máxico de combustible en kg/s
- $R_{acm} = \dot{m}_a / \dot{m}_c$ relación máxica aire-combustible en kg/kg
- \dot{m}_h caudal máxico de gases de combustión en kg/s

5.2 Equipos auxiliares. Chimeneas



5.2.1 Equipos auxiliares. Requisitos mínimos de la chimenea

- **Proporcione el tiro necesario impuesto por la caldera**
- **Evite la formación de condensados en su interior, debidos al vapor de agua contenido en los gases, en marcha normal**
- **Asegure la estanqueidad para evitar fugas de productos de combustión a locales cerrados**
- **Asegure que la temperatura de su superficie exterior no puede provocar daños a personas y equipos**
- **Asegure que no ocasiona molestias sensibles a instalaciones y propiedades vecinas**

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (I/V)

a) la composición del combustible

+

b) las reacciones de combustión

+

c) y el exceso de aire

o

d) conociendo el poder comburívoro del combustible

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (II/V)

a) Combustión estequiométrica

b) 21% oxígeno y 79% nitrógeno

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (III/V)

Gas	Volumen en Nm ³ /kg	Masa en kg/kg
O ₂ estequiométrico	$V_{O^*} = 1.87 c + 5.59 h + 0.70 s - 0.70 o$	$M_{O^*} = 1.43 \cdot V_{O^*}$
N ₂ estequiométrico	$V_{N^*} = 3.76 V_{O^*}$	$M_{N^*} = 1.43 \cdot V_{N^*}$
Aire estequiométrico	$V_{a^*} = V_{O^*} + V_{N^*}$	$M_{a^*} = 1.29 \cdot V_{a^*}$
Aire real	$V_{a,cn} = V_{a^*} \cdot (1 + n)$	$M_a = M_{a^*} \cdot (1 + n)$

Cálculo del aire de combustión necesario

donde

- c porcentaje, en peso, de carbono
- h porcentaje, en peso, de hidrógeno
- s porcentaje, en peso, de azufre
- o porcentaje, en peso, de oxígeno
- n porcentaje de exceso de aire
- $V_{a,cn}$ volumen real en condiciones normales

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (IV/V)

Gas	Volumen en Nm ³ /kg	Masa en kg/kg
CO ₂	$v1 = 1.87 \cdot c + 0.51 \cdot co$	$m1 = 1.96 \cdot v1$
SO ₂	$v2 = 0.70 \cdot s$	$m2 = 2.86 \cdot v2$
H ₂ O	$v3 = 11.19 \cdot h + 1.24 \cdot w$	$m3 = 0.813 \cdot v3$
O ₂	$v4 = n \cdot V_{O*}$	$m4 = 1.43 \cdot v4$
N ₂	$v5 = (1 + n) \cdot V_{N*}$	$m5 = 1.25 \cdot v5$
Gases totales	$V_{g,cn} = v1 + v2 + v3 + v4 + v5$	$M_g = m1 + m2 + m3 + m4 + m5$
donde co es el tanto por uno de CO₂ en masa, contenido en el combustible		

Cantidad de los gases de combustión húmedos

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (V/V)

$$V = V_{cn} \cdot \frac{273.2+T}{273.2} \cdot \frac{1.013}{p} \quad (16)$$

donde

V_{cn} volumen de las distintas sustancias en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C)

T temperatura en grados centígrados

p presión en bar

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Ejemplo de cálculo)

La composición, en peso, de un gasóleo es la siguiente: carbono 84.8%, hidrógeno 14.9%, agua 0.1%, y azufre 0.2%.

El exceso de aire es del 7%, la temperatura del aire en la aspiración es 25°C y la presión 1.01 bares y los gases se expulsan a la temperatura de 140 °C y presión 1.01 bar.

Calcular la cantidad de aire necesario y la cantidad de gases generados si el exceso de aire es del 7%, la temperatura del aire en la aspiración es 25°C y la presión 1.01 bar.

Para el cálculo del volumen estequiométrico de oxígeno del gasóleo y, para los propósitos de este ejercicio, se considerará despreciable el porcentaje en peso de oxígeno.

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas)

Cálculo de la masa de gases en caso de que la masa se conserve

$$M_g = M_a + 1$$

donde

M_g masa de gases de la combustión en kg/kg
 M_a masa de aire de la combustión en kg/kg

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas, pasos I/IV)

Paso 1: Cálculo del volumen de aire estequiométrico en condiciones normales

$$V_{O*} = 1.87 c + 5.59 h + 0.70 s - 0.70 o$$

$$V_{N*} = 3.76 \cdot V_{O*}$$

$$V_{a*} = V_{O*} + V_{N*}$$

y del volumen real en condiciones normales

$$V_{a,cn} = V_{a*} \cdot (1 + n)$$

donde

V_{O*}	volumen de oxígeno estequiométrico en Nm ³ /kg
c	porcentaje, en peso, de carbono
h	porcentaje, en peso, de hidrógeno
s	porcentaje, en peso, de azufre
o	porcentaje, en peso, de oxígeno
V_{N*}	volumen de nitrógeno estequiométrico en Nm ³ /kg
V_{a*}	volumen de aire estequiométrico en Nm ³ /kg
$V_{a,cn}$	volumen real en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C) en Nm ³ /kg
n	porcentaje de exceso de aire

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas, pasos II/IV)

Paso 2: Cálculo del volumen de aire en condiciones de aspiración (16)

$$V_a = V_{a,cn} \cdot \frac{273.2 + T}{273.2} \cdot \frac{1.013}{p}$$

Paso 3: Cálculo de la masa de aire $M_a = 1.29 \cdot V_{a*} \cdot (1 + n)$; y de la masa de gases $M_g = M_a + 1$

donde

V_a	volumen de aire en condiciones de aspiración en m ³ /kg
$V_{a,cn}$	volumen real en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C) en Nm ³ /kg
T	temperatura en grados centígrados
p	presión a la que se expulsan los gases en bar
M_a	masa de aire de la combustión en kg/kg
V_{a*}	volumen de aire estequiométrico en Nm ³ /kg
n	porcentaje de exceso de aire
M_g	masa de gases de la combustión en kg/kg

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas, pasos III/IV)

Paso 4: Cálculo del volumen de gases de la combustión a partir de la tabla correspondiente

Gas	Volumen en Nm ³ /kg	Masa en kg/kg
CO ₂	$v1 = 1.87 \cdot c + 0.51 \cdot co$	$m1 = 1.96 \cdot v1$
SO ₂	$v2 = 0.70 \cdot s$	$m2 = 2.86 \cdot v2$
H ₂ O	$v3 = 11.19 \cdot h + 1.24 \cdot w$	$m3 = 0.813 \cdot v3$
O ₂	$v4 = n \cdot V_{O^*}$	$m4 = 1.43 \cdot v4$
N ₂	$v5 = (1 + n) \cdot V_{N^*}$	$m5 = 1.25 \cdot v5$
Gases totales	$V_{g,cn} = v1 + v2 + v3 + v4 + v5$	$M_g = m1 + m2 + m3 + m4 + m5$
donde co es el tanto por uno de CO₂ en masa, contenido en el combustible		

donde

- c porcentaje, en peso, de carbono
- co tanto por uno de CO₂ en masa, contenido en el combustible
- s porcentaje, en peso, de azufre
- h porcentaje, en peso, de hidrógeno
- w porcentaje, en peso, de agua
- n porcentaje de exceso de aire
- $V_{g,cn}$ volumen de gases totales en Nm³/kg

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas, pasos IV/IV)

Paso 5: Cálculo del volumen de gases en su expulsión (16)

$$V_g = V_{g,cn} \cdot \frac{273.2+T}{273.2} \cdot \frac{1.013}{p} \quad (16)$$

donde

- V_g volumen de gases a una temperatura y presión determinada en m^3/kg
- $V_{g,cn}$ volumen de gases totales de la combustión en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C) en Nm^3/kg
- T temperatura en grados centígrados
- p presión a la que se expulsan los gases en bar

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas, pasos I/IV)

Paso 1: Cálculo del volumen de aire estequiométrico en condiciones normales

$$V_{O*} = 1.87 c + 5.59 h + 0.70 s - 0.70 o$$

$$V_{N*} = 3.76 \cdot V_{O*}$$

$$V_{a*} = V_{O*} + V_{N*}$$

y del volumen real en condiciones normales

$$V_{a,cn} = V_{a*} \cdot (1 + n)$$

donde

V_{O*}	volumen de oxígeno estequiométrico en Nm ³ /kg
c	porcentaje, en peso, de carbono
h	porcentaje, en peso, de hidrógeno
s	porcentaje, en peso, de azufre
o	porcentaje, en peso, de oxígeno
V_{N*}	volumen de nitrógeno estequiométrico en Nm ³ /kg
V_{a*}	volumen de aire estequiométrico en Nm ³ /kg
$V_{a,cn}$	volumen real en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C) en Nm ³ /kg
n	porcentaje de exceso de aire

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Solución I/V)

Gas	Volumen en Nm ³ /kg	Masa en kg/kg
O ₂ estequiométrico	$V_{O^*} = 1.87 c + 5.59 h + 0.70 s - 0.70 o$	$M_{O^*} = 1.43 \cdot V_{O^*}$
N ₂ estequiométrico	$V_{N^*} = 3.76 V_{O^*}$	$M_{N^*} = 1.43 \cdot V_{N^*}$
Aire estequiométrico	$V_{a^*} = V_{O^*} + V_{N^*}$	$M_{a^*} = 1.29 \cdot V_{a^*}$
Aire real	$V_{a,cn} = V_{a^*} \cdot (1 + n)$	$M_a = M_{a^*} \cdot (1 + n)$

Cálculo del volumen de aire estequiométrico en condiciones normales

$$V_{O^*} = 1.87 c + 5.59 h + 0.70 s - 0.70 o =$$

$$= 1.87 \cdot 0.848 + 5.59 \cdot 0.149 + 0.70 \cdot 0.002 - 0.70 \cdot 0 = 2.419 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{N^*} = 3.76 \cdot V_{O^*} = 3.76 \cdot 2.419 = 9.095 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{a^*} = V_{O^*} + V_{N^*} = 2.419 + 9.095 = 11.514 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Cálculo del volumen real en condiciones normales

$$V_{a,cn} = V_{a^*} \cdot (1 + n) = 11.514 \cdot (1 + 0.07) = 12.32 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Cálculo del aire de combustión necesario

donde

c	porcentaje, en peso, de carbono
h	porcentaje, en peso, de hidrógeno
s	porcentaje, en peso, de azufre
o	porcentaje, en peso, de oxígeno
n	porcentaje de exceso de aire
$V_{a,cn}$	volumen real en condiciones normales en Nm ³ /kg

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas, pasos II/IV)

Paso 2: Cálculo del volumen de aire en condiciones de aspiración (16)

$$V_a = V_{a,cn} \cdot \frac{273.2 + T}{273.2} \cdot \frac{1.013}{p}$$

Paso 3: Cálculo de la masa de aire $M_a = 1.29 \cdot V_{a*} \cdot (1 + n)$; y de la masa de gases $M_g = M_a + 1$

donde

V_a	volumen de aire en condiciones de aspiración en m ³ /kg
$V_{a,cn}$	volumen real en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C) en Nm ³ /kg
T	temperatura en grados centígrados
p	presión a la que se expulsan los gases en bar
M_a	masa de aire de la combustión en kg/kg
V_{a*}	volumen de aire estequiométrico en Nm ³ /kg
n	porcentaje de exceso de aire
M_g	masa de gases de la combustión en kg/kg

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Solución II/V)

Cálculo del volumen de aire en condiciones de aspiración (16)

$$V_a = V_{a,cn} \cdot \frac{273.2+T}{273.2} \cdot \frac{1.013}{p} = 12.32 \cdot \frac{273.2+25}{273.2} \cdot \frac{1.013}{1.01} = 13.49 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (16)$$

donde

V_a volumen de aire en condiciones de aspiración en m^3/kg

$V_{a,cn}$ volumen real en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C) en Nm^3/kg

T temperatura en grados centígrados

p presión a la que se expulsan los gases en bar

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas, pasos II/IV)

Paso 2: Cálculo del volumen de aire en condiciones de aspiración (16)

$$V_a = V_{a,cn} \cdot \frac{273.2 + T}{273.2} \cdot \frac{1.013}{p}$$

Paso 3: Cálculo de la masa de aire $M_a = 1.29 \cdot V_{a*} \cdot (1 + n)$; y de la masa de gases $M_g = M_a + 1$

donde

V_a	volumen de aire en condiciones de aspiración en m ³ /kg
$V_{a,cn}$	volumen real en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C) en Nm ³ /kg
T	temperatura en grados centígrados
p	presión a la que se expulsan los gases en bar
M_a	masa de aire de la combustión en kg/kg
V_{a*}	volumen de aire estequiométrico en Nm ³ /kg
n	porcentaje de exceso de aire
M_g	masa de gases de la combustión en kg/kg

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Solución III/V)

Gas	Volumen en Nm ³ /kg	Masa en kg/kg
O ₂ estequiométrico	$V_{O^*} = 1.87 c + 5.59 h + 0.70 s - 0.70 o$	$M_{O^*} = 1.43 \cdot V_{O^*}$
N ₂ estequiométrico	$V_{N^*} = 3.76 V_{O^*}$	$M_{N^*} = 1.43 \cdot V_{N^*}$
Aire estequiométrico	$V_{a^*} = V_{O^*} + V_{N^*}$	$M_{a^*} = 1.29 \cdot V_{a^*}$
Aire real	$V_{a,cn} = V_{a^*} \cdot (1 + n)$	$M_a = M_{a^*} \cdot (1 + n)$

Cálculo de la masa de aire

$$M_a = 1.29 \cdot V_{a^*} \cdot (1 + n) = 1.29 \cdot 11.514 \cdot (1 + 0.07) = 15.89 \text{ kg/kg}$$

Cálculo de la masa de gases

$$M_g = M_a + 1 = 15.89 + 1 = 16.89 \text{ kg/kg}$$

Donde

M_a	masa de aire de la combustión en kg/kg
V_{a^*}	volumen de aire estequiométrico en Nm ³ /kg
n	porcentaje de exceso de aire
M_g	masa de gases de la combustión en kg/kg

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas, pasos III/IV)

Paso 4: Cálculo del volumen de gases de la combustión a partir de la tabla correspondiente

Gas	Volumen en Nm ³ /kg	Masa en kg/kg
CO ₂	$v1 = 1.87 \cdot c + 0.51 \cdot co$	$m1 = 1.96 \cdot v1$
SO ₂	$v2 = 0.70 \cdot s$	$m2 = 2.86 \cdot v2$
H ₂ O	$v3 = 11.19 \cdot h + 1.24 \cdot w$	$m3 = 0.813 \cdot v3$
O ₂	$v4 = n \cdot V_{O^*}$	$m4 = 1.43 \cdot v4$
N ₂	$v5 = (1 + n) \cdot V_{N^*}$	$m5 = 1.25 \cdot v5$
Gases totales	$V_{g,cn} = v1 + v2 + v3 + v4 + v5$	$M_g = m1 + m2 + m3 + m4 + m5$
donde co es el tanto por uno de CO₂ en masa, contenido en el combustible		

donde

- c porcentaje, en peso, de carbono
- co tanto por uno de CO₂ en masa, contenido en el combustible
- s porcentaje, en peso, de azufre
- h porcentaje, en peso, de hidrógeno
- w porcentaje, en peso, de agua
- n porcentaje de exceso de aire
- $V_{g,cn}$ volumen de gases totales en Nm³/kg

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Solución IV/V)

Gas	Volumen en Nm ³ /kg	Masa en kg/kg
CO ₂	$v1 = 1.87 \cdot c + 0.51 \cdot co$	$m1 = 1.96 \cdot v1$
SO ₂	$v2 = 0.70 \cdot s$	$m2 = 2.86 \cdot v2$
H ₂ O	$v3 = 11.19 \cdot h + 1.24 \cdot w$	$m3 = 0.813 \cdot v3$
O ₂	$v4 = n \cdot V_{O*}$	$m4 = 1.43 \cdot v4$
N ₂	$v5 = (1 + n) \cdot V_{N*}$	$m5 = 1.25 \cdot v5$
Gases totales	$V_{g,cn} = v1 + v2 + v3 + v4 + v5$	$M_g = m1 + m2 + m3 + m4 + m5$

donde co es el tanto por uno de CO₂ en masa, contenido en el combustible

donde

- c porcentaje, en peso, de carbono
- co tanto por uno de CO₂ en masa, contenido en el combustible
- s porcentaje, en peso, de azufre
- h porcentaje, en peso, de hidrógeno
- w porcentaje, en peso, de agua
- n porcentaje de exceso de aire
- $V_{g,cn}$ volumen de gases totales en Nm³/kg

VOLUMEN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

CO₂ $v1 = 1.87 \cdot c + 0.51 \cdot co = 1.87 \cdot 0.848 + 0.51 \cdot 0 = 1.586 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

SO₂ $v2 = 0.70 \cdot s = 0.70 \cdot 0.002 = 0.001 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

H₂O $v3 = 11.19 \cdot h + 1.24 \cdot w = 11.19 \cdot 0.149 + 1.24 \cdot 0.001 = 1.669 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

O₂ $v4 = n \cdot V_{O*} = 0.07 \cdot 2.419 = 0.169 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

N₂ $v5 = (1 + n) \cdot V_{N*} = (1 + 0.07) \cdot 9.095 = 9.732 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

Total $V_{g,cn} = v1 + v2 + v3 + v4 + v5 = 1.586 + 0.001 + 1.669 + 0.169 + 9.732 = 13.157 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Pistas, pasos IV/IV)

Paso 5: Cálculo del volumen de gases en su expulsión (16)

$$V_g = V_{g,cn} \cdot \frac{273.2+T}{273.2} \cdot \frac{1.013}{p} \quad (16)$$

donde

- V_g volumen de gases a una temperatura y presión determinada en m^3/kg
- $V_{g,cn}$ volumen de gases totales de la combustión en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C) en Nm^3/kg
- T temperatura en grados centígrados
- p presión a la que se expulsan los gases en bar

5.2.2 Cálculo del caudal de gases de combustión (Solución V/V)

Cálculo del volumen de gases en su expulsión (16)

$$V_g = V_{g,cn} \cdot \frac{273.2+T}{273.2} \cdot \frac{1.013}{p} = 13.157 \cdot \frac{273.2+140}{273.2} \cdot \frac{1.013}{1.01} = 19.958 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (16)$$

donde

V_g volumen de gases a una temperatura y presión determinada en m^3/kg

$V_{g,cn}$ volumen de gases totales de la combustión en condiciones normales (1.013 bar y 0 °C) en Nm^3/kg

T temperatura en grados centígrados

p presión a la que se expulsan los gases en bar

FOTOVOLTAICA, BIOMASA Y COGENERACIÓN

FIN

¿¿¿¿PREGUNTAS????

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

