

Ecuaciones básicas que modelan el funcionamiento de la cámara de combustión.

Una vez introducidas las hipótesis realizadas sobre el modelo real, se relacionarán a continuación las ecuaciones que modelarán el comportamiento de la cámara de combustión, y que no serán más que el fruto de dichas hipótesis.

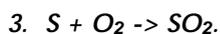
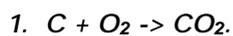
Las siguientes ecuaciones se obtendrán a partir de balances másicos y entálpicos, y permitirán el cálculo de las composiciones másicas de las corrientes, y de las temperaturas a las que se encuentran las mismas. En el último apartado se muestra la ecuación utilizada para evaluar la pérdida de presión dentro de la cámara.

1. Balances másicos.

A continuación se muestran las ecuaciones obtenidas a partir de los balances másicos realizados en distintas secciones de la cámara de combustión, que servirán para la determinación de los caudales másicos de las diferentes sustancias dentro de la cámara.

Obtención de los productos de combustión.

Se realizará a continuación un balance másico de las reacciones de combustión que tendrán lugar en la Zona 1. Dichas reacciones serán:



A partir de las reacciones, y suponiendo conocida la composición másica del combustible, obtenemos los gastos de los productos de combustión en función de la composición del combustible:

- Reacción 1:

$$\dot{m}_{O_2}(1) = \frac{32}{12} \cdot \dot{m}_C ; \dot{m}_{O_2}(1) \Rightarrow \text{Oxígeno necesario para quemar todo el carbono.}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_C + \dot{m}_{O_2}(1) = \left(1 + \frac{32}{12}\right) \cdot \dot{m}_C = 3.667 \cdot \dot{m}_C ;$$

- Reacción 2:

$$\dot{m}_{O_2}(2) = \frac{16}{2} \cdot \dot{m}_{H_2} ; \dot{m}_{O_2}(2) \Rightarrow \text{Oxígeno necesario para quemar todo el hidrógeno.}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{O_2}(2) = (1 + 8) \cdot \dot{m}_{H_2} = 9 \cdot \dot{m}_{H_2} ;$$

- Reacción 3:

$$\dot{m}_{O_2}(3) = \frac{16}{32} \cdot \dot{m}_S ; \dot{m}_{O_2} \Rightarrow \text{Oxígeno necesario para quemar todo el azufre.}$$

$$\dot{m}_{SO_2} = \dot{m}_S + \dot{m}_{O_2}(3) = \left(1 + \frac{16}{32}\right) \cdot \dot{m}_S = 1.5 \cdot \dot{m}_S ;$$

Obtención del oxígeno necesario en la Zona 1.

Una vez calculado el oxígeno estequiométrico que es consumido en la combustión de cada uno de los componentes del combustible, el oxígeno total necesario en la Zona 1 se obtendrá como la suma del consumido en cada una de las reacciones parciales anteriores.

$$\dot{m}_{O_2}(estq.) = \dot{m}_{O_2}(1) + \dot{m}_{O_2}(2) + \dot{m}_{O_2}(3) = 2.667 \cdot \dot{m}_C + 8 \cdot \dot{m}_{H_2} + 0.5 \cdot \dot{m}_S ;$$

Obtención del nitrógeno no reaccionante en la Zona 1.

Suponiendo que el aire está compuesto por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, la cantidad de nitrógeno que atraviesa la Zona 1 la podremos calcular directamente de la cantidad de oxígeno anteriormente obtenida:

$$\dot{m}_{N_2} = \frac{0.79}{0.21} \cdot \dot{m}_{O_2} = 10.0317 \cdot \dot{m}_C + 30.095 \cdot \dot{m}_{H_2} + 1.881 \cdot \dot{m}_S ;$$

Obtención del aire estequiométrico necesario en la Zona 1.

Del mismo modo podremos calcular la cantidad de aire consumida en las reacciones que tienen lugar en la Zona 1:

$$\dot{m}_{AIRE}(estq) = \frac{1}{0.21} \cdot \dot{m}_{O_2} = 12.7 \cdot \dot{m}_C + 38.095 \cdot \dot{m}_{H_2} + 2.381 \cdot \dot{m}_S ;$$

Obtención del vapor de agua saliente de la Zona 1.

La cantidad de vapor de agua que saldrá de la Zona 1 provendrá de:

1. Humedad del aire de alimentación.
2. Inyección de vapor para controlar las emisiones.

3. Producto de la combustión del H₂.

Por lo tanto dicho vapor total se obtendrá como la suma de las cantidades anteriormente relacionadas:

$$\dot{m}_{H_2O}(Z1) = \dot{m}_{H_2O}(aire) + \dot{m}_{H_2O}(iny) + \dot{m}_{H_2O}(2) ;$$

Obtención de la composición de la corriente de salida de la cámara de combustión.

La diferencia entre la corriente de salida de la Zona 1 y de la Zona 2 será la incorporación en esta zona del aire en exceso que no ha sido utilizado en la combustión. Por lo tanto, la corriente de salida de la Zona 2 estará compuesta por los mismos elementos que la corriente de salida de la Zona 1, además del aire de exceso. Aquí pues se calculará el aire de exceso, suponiendo para ello conocido el gasto másico total de aire de alimentación a la cámara de combustión:

$$\dot{m}_{AIRE}(exc) = \dot{m}_{AIRE} - \dot{m}_{AIRE}(estq) ;$$

2. Balances entálpicos.

A continuación se muestran las ecuaciones que sirven para determinar las temperaturas necesarias dentro de la cámara de combustión, obtenidas a partir de balances entálpicos en distintas secciones de la misma.

Obtención de la temperatura máxima en la cámara de combustión.

Para la obtención de la temperatura máxima alcanzada en la cámara de combustión, se realiza un balance de entalpías entre la entrada de la cámara y la salida de la Zona 1. En dicho balance se toman los gastos másicos calculados anteriormente. Supiendo además la adiabaticidad del proceso:

$$\begin{aligned} \dot{m}_f \cdot H_p + \dot{m}_{AIRE} \cdot Cp_{AIRE}(T_{in}) \cdot T_{in} + \dot{m}_{H_2O}(aire) \cdot h_{H_2O}(T_{in}, p_{pin}) + \dot{m}_{H_2O}(iny) \cdot h_{H_2O}(T_{iny}, p_{pin}) = \\ + \left(\dot{m}_{CO_2} \cdot Cp_{CO_2}(T_{max}) + \dot{m}_{H_2} \cdot Cp_{H_2}(T_{max}) + \dot{m}_{SO_2} \cdot Cp_{SO_2}(T_{max}) + \dot{m}_{AIRE}(exc) \cdot Cp_{AIRE}(T_{max}) \right) \cdot T_{max} + \\ + \dot{m}_{H_2O}(Z1) \cdot h_{H_2O}(T_{max}, p_{pin}) \end{aligned}$$

Sobre la anterior ecuación habrá que hacer varias aclaraciones. En primer lugar decir que la temperatura incognita no podrá ser despejada directamente, por lo que para la obtención de ésta se hará uso del solucionador de ecuaciones que incluye **SIMULINK**.

También decir que los calores específicos que aparecen en la ecuación, serán

modelados por los polinómios previamente calculados y que son mostrados en la sección dedicada a las propiedades de las sustancias que intervienen.

Además poner también de manifiesto que el cálculo de las entalpías del vapor de agua recalentado se realizará mediante las aproximaciones del diagrama de Molier tomadas de la bibliografía propuesta, y que es señalada en la sección referida anteriormente. Dichas aproximaciones utilizan como entradas la temperatura del flujo y la presión parcial del vapor en la mezcla de gases.

Obtención de la temperatura de salida de la cámara de combustión.

Para la obtención de la temperatura de salida de la cámara de combustión, se realiza un balance de entalpías entre la entrada de la cámara y la salida de la misma. En dicho balance se toman los gastos másicos calculados anteriormente. Suponiendo además la adiabaticidad del proceso:

$$\begin{aligned} \dot{m}_f \cdot H_p \cdot \mathbf{h}_{CC} + \dot{m}_{AIRE} \cdot C_{p_{AIRE}}(T_{in}) \cdot T_{in} + \dot{m}_{H_2O(aire)} \cdot h_{H_2O}(T_{in}, p_{pin}) + \dot{m}_{H_2O(iny)} \cdot h_{H_2O}(T_{iny}, p_{iny}) = \\ + (\dot{m}_{CO_2} \cdot C_{p_{CO_2}}(T_{out}) + \dot{m}_{H_2} \cdot C_{p_{H_2}}(T_{out}) + \dot{m}_{SO_2} \cdot C_{p_{SO_2}}(T_{out}) + \dot{m}_{AIRE(exc)} \cdot C_{p_{AIRE}}(T_{out})) \cdot T_{out} + \\ + \dot{m}_{H_2O(Z1)} \cdot h_{H_2O}(T_{out}, p_{pout}) \end{aligned}$$

Señalar en este caso además de las aclaraciones hechas en la sección anterior, el hecho de que ahora se ha introducido en la ecuación el rendimiento de la cámara de combustión (η_{CC}).

3. Pérdida de presión total en la cámara de combustión.

En esta sección se introduce la expresión empírica que se usa dentro del modelo para evaluar las pérdidas de presión total dentro de la cámara:

$$\Delta p = p_{in} \cdot \left(\left(K_1 + K_2 \cdot \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} - 1 \right) \right) \cdot \frac{R_g}{2} \cdot \left(\frac{\dot{m}_g}{A_m \cdot p_{in}} \right)^2 \cdot T_{in} \right); \quad p_{out} = p_{in} - \Delta p$$

Donde: $K_1, K_2 \Rightarrow$ Parametros dependientes de la geometría.

$A_m \Rightarrow$ Area media de la cámara de combustión.

$R_g \Rightarrow$ Constante media de los gases de escape.

Cálculo de R_g para el flujo de gases de escape.

La constante general de los gases expresada en J/kg*K para una mezcla de gases se obtendrá como la media ponderada de los R_g de los gases que la forman en función

de sus fracciones másicas. Así la ecuación que permite el cálculo será:

$$R_g = \frac{(\dot{m}_{AIRE} - \dot{m}_{AIRE}(est\dot{q})) \cdot R_{gAIRE} + \dot{m}_{C_2O} \cdot R_{gC_2O} + \dot{m}_{N_2} \cdot R_{gN_2} + \dot{m}_{SO_2} \cdot R_{gSO_2} + (\dot{m}_{H_2O}(Z1) + \dot{m}_{H_2O}(Z2)) \cdot R_{gH_2O}}{\dot{m}_g}$$

Donde los valores de los R_g se muestran en la sección de propiedades termodinámicas de los gases.