

Formulario Combustión

Ecuación teórica: $C_xH_y + z_t(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow aCO_2 + bH_2O + cN_2$

Combustión completa: No aparece CO en los productos.

Combustión incompleta: Aparece CO en los productos.

Ecuación real (aire seco): $C_xH_y + z_r(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow aCO_2 + bCO + cH_2O + dN_2 + eO_2$

$z_r = \frac{\%A_t}{100} z_t$		$\%A_t$: % de aire teórico
$z_r = \left(1 + \frac{\%E}{100}\right) z_t$		$\%E$: % de aire en exceso
$z_r = \left(1 - \frac{\%D}{100}\right) z_t$		$\%D$: % de aire en defecto

Moles de aire: $n_a = n_{O_2} + n_{N_2} = n_{O_2} + 3.76n_{O_2} = 4.76n_{O_2} = 4.76z_r$

Aire húmedo: $\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{n_v M_v}{n_a M_a} \rightarrow n_v = \frac{M_a}{M_v} n_a \omega = \frac{M_a}{M_v} 4.76z_r \omega = 7.66z_r \omega$

Ecuación real: $C_xH_y + z_r(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow aCO_2 + bCO + cH_2O + dN_2 + eO_2$

Relación aire/combustible:

Aire seco: $\overline{AC} = \frac{n_{aire}}{n_{comb}} = 4.76z_r$, $AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = \frac{n_{aire} M_{aire}}{n_{comb} M_{comb}} = \frac{137.9z_r}{M_{comb}}$

Aire húmedo: $\overline{AC} = \frac{n_{aire}}{n_{comb}} = (4.76 + 7.66\omega) z_r$

Aire húmedo: $AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = \frac{n_{aire} M_{aire}}{n_{comb} M_{comb}} = \frac{(137.9 + 137.95\omega) z_r}{M_{comb}} \approx \frac{137.9(1 + \omega) z_r}{M_{comb}}$

Para hidrocarburos: $M_{comb} = M_{C_xH_y} = 12.0115x + 1.008y$

Psicrometría de los productos:

Productos secos: $n_{ps} = a + b + d + e$, Agua: $n_{H_2O} = c$ Mezcla: $n_m = n_{ps} + n_v$

No aparece condensado	Temperatura de Rocío	Aparece condensado
$n_v = n_{H_2O} = c$	$n_v = n_{H_2O} = c$	$\phi = 1$
$y_v = n_v/n_m$	$y_v = n_v/n_m$	$P_v = P_g = P_{sat}(T_m)$
$P_v = y_v P_m$	$P_v = y_v P_m$	$y_v = P_v/P_m$
$P_g = P_{sat}(T_m)$	$T_{rocío} = T_{sat}(P_v)$	$n_v = \frac{y_v n_{ps}}{1 - y_v}$
$\phi = \frac{P_v}{P_g}$		$n_f = n_{H_2O} - n_v$
$n_f = 0$		$n_f = c - n_v$
$\omega = \frac{M_v P_v}{M_{ps}(P_m - P_v)}$		$\omega = \frac{M_v P_v}{M_{ps}(P_m - P_v)}$
$T_{rocío} = T_{sat}(P_v)$		$(T_m \leq T_{rocío})$
$(T_m > T_{rocío})$		

Ensayo Orsat: Datos $\%CO_2$, $\%CO$, $\%O_2$

Ecuación real: $C_xH_y + z_r(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow aCO_2 + bCO + cH_2O + dN_2 + eO_2$

$a = \%CO_2$, $b = \%CO$, $e = \%O_2$, $d = 100 - (a + b + e)$

Balanceando C , H , O y N_2 se obtienen x , y , z_r y c .

Nota: Si el combustible es conocido se escribe xC_nH_m , donde n y m se conocen; se determina el valor de x y se divide toda la ecuación balanceada por este valor (x) para que quede por unidad molar de combustible.

Para predecir lo valores que produciría el ensayo Orsat a partir de la ecuación real:

$$\%CO_2 = \frac{100a}{n_{ps}} , \%CO = \frac{100b}{n_{ps}} , \%O_2 = \frac{100e}{n_{ps}}$$

Primera Ley: $\bar{q} - \bar{w} = \sum n_p \bar{h}_p - \sum n_r \bar{h}_r$ ($kJ/kmol_{comb}$)

$$\bar{q} = Q/n_{comb}, \quad \bar{w} = W/n_{comb}, \quad n_{comb} = 1$$

$$\bar{h} = \begin{cases} \bar{h}_f^o + (\bar{h}^o - \bar{h}_{298K}^o) & \text{sustancias tabuladas para un rango de } T \\ \bar{h}_f^o + 100 \int_{2.98}^{\theta} \frac{\bar{C}_p(\theta)}{\theta} d\theta & \text{sustancias gaseosas no tabuladas (exacto)} \\ \bar{h}_f^o + MC_p(T - 298) & \text{sustancias gaseosas no tabuladas (inexacto)} \\ \bar{h}_{f,l}^o + M [h_f(T_{en} \text{ } ^\circ C) - h_f(25^\circ C)] & \text{agua líquida} \\ \bar{h}_f^o + MC(T - 298) & \text{líquidos y sólidos} \end{cases}$$

\bar{h}_f^o : entalpía de formación, leída en tabla para los compuestos, para los elementos es cero.

Temperatura de flama adiabática (TFA): $\bar{q} = \bar{w} = 0$

A presión constante: $\sum n_p \bar{h}_p = \sum n_r \bar{h}_r$

A volumen constante: $\sum n_p \bar{u}_p = \sum n_r \bar{u}_r \rightarrow \sum n_p (\bar{h}_p) - \bar{R}T_p \sum n_p = \sum n_r (\bar{h}_r) - \bar{R}T_r \sum n_r$

Nota: La máxima TFA se obtiene con la ecuación teórica usando solo oxígeno. La TFA se pueda regular (reducir) dependiendo de la cantidad de aire en exceso que se use.

Máxima presión de explosión: es la que ocurre a la temperatura de flama en un proceso

isométrico: $P_{max} = \frac{n_p \bar{R}T_{flama}}{V_p}$ ($V_p = V_r$)

Entalpía de combustión: $\bar{h}_{rp}^o = \sum n_p \bar{h}_p - \sum n_r \bar{h}_r$, donde n_p y n_r son calculados de la ecuación teórica y la temperatura y presión de los productos y reactivos es $25^\circ C$ y $100 kPa$.

$\bar{h}_{rp,s}^o$: se considera el agua en los productos en fase líquida.

$\bar{h}_{rp,i}^o$: se considera el agua en los productos en fase gaseosa.

Energía interna de combustión: $\bar{u}_{rp}^o = \sum n_p \bar{u}_p - \sum n_r \bar{u}_r = \sum n_p (\bar{h}_p - P\bar{v}_p) - \sum n_r (\bar{h}_r - P\bar{v}_r)$

Considerando los gases ideales y despreciando el volumen de los líquidos y sólidos:

$$\bar{u}_{rp}^o = \bar{h}_{rp}^o - \bar{R}T (\sum n_{p,g} - \sum n_{r,g}) \quad (T = 298K)$$

Poder calorífico: es el negativo de la entalpía de combustión para procesos isobáricos o el negativo de la energía interna de combustión para procesos isométricos. El poder calorífico se denomina *superior* si el agua de los productos está en fase líquida, y se le denomina *inferior* si el agua en los productos está en fase gaseosa.

$$PC_s = -\bar{h}_{rp,s}^o/M_{comb}, \quad PC_i = -\bar{h}_{rp,i}^o/M_{comb}$$

$$\bar{h}_{rp,s}^o = \bar{h}_{rp,i}^o + n_{H_2O,p} (\bar{h}_{f,H_2O_f}^o - \bar{h}_{f,H_2O_g}^o) \rightarrow \bar{h}_{rp,s}^o = \bar{h}_{rp,i}^o - 44010n_{H_2O,p}$$

$$-PC_s M_{comb} = -PC_i M_{comb} - 44010n_{H_2O,p} \rightarrow PC_s = PC_i + 44010n_{H_2O,p}/M_{comb}$$

Segunda Ley:

$$\bar{s} = \begin{cases} \bar{s}_g^o - \bar{R} \ln \left(\frac{y_i P_m}{100} \right) & \text{sustancias tabuladas para un rango de } T \\ \bar{s}_{g,298K}^o + \int_{2.98}^{\theta} \frac{\bar{C}_p(\theta)}{\theta} d\theta - \bar{R} \ln \left(\frac{y_i P_m}{100} \right) & \text{sustancias no tabuladas (exacto)} \\ \bar{s}_{g,298K}^o + MC_p \ln \left(\frac{T}{298} \right) - \bar{R} \ln \left(\frac{y_i P_m}{100} \right) & \text{sustancias no tabuladas (inexacto)} \\ \bar{s}_{l,298K}^o + M [s_f(T_{en} \text{ } ^\circ C) - s_f(25^\circ C)] & \text{agua líquida} \\ \bar{s}_{298K}^o + MC \ln \left(\frac{T}{298} \right) & \text{líquidos y sólidos} \end{cases}$$

$$\bar{s}_{Universo} = \sum n_p \bar{s}_p - \sum n_r \bar{s}_r - \frac{\bar{q}_{vc}}{T_o} \quad (kJ/kmol_{comb}K)$$

$$\dot{S}_{Universo} = \dot{n}_{comb} \bar{s}_{Universo} \quad (kW/K)$$

PRODUCTOS		CO_2	CO	$H_2O_{,g}$	$H_2O_{,l}$	N_2	O_2	Σ
n_i		a	b	n_v	n_f	d	e	n_p
$y_i = \frac{n_i}{n_{ps}}$								1
M_i								
$m_i = n_i M_i$								m_p
h_f°								
$\Delta \bar{h} = \begin{cases} (\bar{h}^\circ - \bar{h}_{298K}^\circ)_{\text{gas tabulado}} \\ M [h_f(T_{\text{en } ^\circ C}) - h_f(25^\circ C)]_{\text{agua líquida}} \end{cases}$								
$h_f^\circ + \Delta h$								
$n_i (h_f^\circ + \Delta h)$								H_p
$\bar{s}^\circ = \begin{cases} \bar{s}_{\text{gas tabulado}}^\circ \\ \bar{s}_{298K}^\circ + M [s_f(T_{\text{en } ^\circ C}) - s_f(25^\circ C)]_{\text{agua líquida}} \end{cases}$								
$\bar{R} \ln \left(\frac{y_i P_p}{100} \right)$								
$\bar{s}^\circ - \bar{R} \ln \left(\frac{y_i P_p}{100} \right)$								
$n_i \left[\bar{s}^\circ - \bar{R} \ln \left(\frac{y_i P_p}{100} \right) \right]$								S_p

$$\bar{e}_p = H_p + m_p \frac{\mathcal{V}_p^2}{2000} \quad \text{donde } \mathcal{V}_p \text{ es la velocidad de los productos en } m/s$$

Nota: $c = n_v + n_f$

AIRE		$H_2O_{,g}$	N_2	O_2	Σ
n_i		$7.66\omega z$	$3.76z$	z	n_a
$y_i = \frac{n_i}{n_a}$					1
M_i		18.015	28.013	31.999	
$m_i = n_i M_i$					m_a
h_f°		-241820	0	0	
$\Delta \bar{h} = (\bar{h}^\circ - \bar{h}_{298K}^\circ)_{\text{gas tabulado}}$					
$h_f^\circ + \Delta h$					
$n_i (h_f^\circ + \Delta h)$					H_a
$\bar{s}^\circ = \bar{s}_{\text{gas tabulado}}^\circ$					
$\bar{R} \ln \left(\frac{y_i P_a}{100} \right)$					
$\bar{s}^\circ - \bar{R} \ln \left(\frac{y_i P_a}{100} \right)$					
$n_i \left[\bar{s}^\circ - \bar{R} \ln \left(\frac{y_i P_a}{100} \right) \right]$					S_a

$$\bar{e}_a = H_a + m_a \frac{\mathcal{V}_a^2}{2000} \quad \text{donde } \mathcal{V}_a \text{ es la velocidad del aire en } m/s$$

COMBUSTIBLE	Comb ₁	Comb ₂		Comb _n	Σ
n_i					n_c
$y_i = \frac{n_i}{n_{cs}}$					1
M_i					
$m_i = n_i M_i$					m_c
h_f°					
$\Delta \bar{h} = \begin{cases} 100 \int_{2.98}^{\theta} \bar{C}_p(\theta) d\theta_{\text{gas no tabulado}} \\ MC_p (T - 298)_{\text{gas no tabulado}} \\ M [h_f(T_{\text{en } \circ C}) - h_f(25^\circ C)]_{\text{agua líquida}} \\ MC (T - 298)_{\text{líquidos o sólidos.}} \end{cases}$					
$h_f^\circ + \Delta h$					
$n_i (h_f^\circ + \Delta h)$					H_c
$\bar{s}^\circ = \begin{cases} \bar{s}_{298K}^\circ + \int_{2.98}^{\theta} \frac{\bar{C}_p(\theta)}{\theta} d\theta_{\text{gas no tabulado}} \\ \bar{s}_{298K}^\circ + MC_p \ln\left(\frac{T}{298}\right)_{\text{gas no tabulado}} \\ \bar{s}_{298K}^\circ + M [s_f(T_{\text{en } \circ C}) - s_f(25^\circ C)]_{\text{agua líquida}} \\ \bar{s}_{298K}^\circ + MC \ln\left(\frac{T}{298}\right)_{\text{líquidos o sólidos.}} \end{cases}$					
$\bar{R} \ln\left(\frac{y_i P_c}{100}\right)$					
$\bar{s}^\circ - \bar{R} \ln\left(\frac{y_i P_c}{100}\right)$					
$n_i \left[\bar{s}^\circ - \bar{R} \ln\left(\frac{y_i P_c}{100}\right) \right]$					S_c

$\bar{e}_c = H_c + m_c \frac{\mathcal{V}_c^2}{2000}$ donde \mathcal{V}_c es la velocidad del combustible en m/s
 $\bar{q} - \bar{w} = \bar{e}_p - \bar{e}_c - \bar{e}_a$

Nota: Se escribe \bar{e} en lugar de E porque esta energía aunque parece extensiva, viene dada por $kgmol$ de combustible.

Evaluación de Equipos:

$\eta_{comb} = \frac{AC_{real}}{AC_{ideal}}$ condición: $T_{p,ideal} = T_{p,real}$

AC_{ideal} : no se forma CO .

AC_{real} : se puede formar CO y pueden haber pérdidas de calor.

$\eta_{\text{generador de vapor}} = \frac{\dot{m}_{H_2O} (h_s - h_e)_{H_2O}}{\dot{m}_{comb} PC_s}$ $\eta_{\text{máquina de combustión interna}} = \frac{\dot{W}_{neta}}{\dot{m}_{comb} PC_s}$