

Generadores de vapor

Combustión: estequiometría y humos

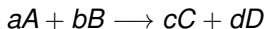
Natalia Wener, Federico Licandro

TECNÓLOGO INDUSTRIAL MECÁNICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

2024

Reacción de combustión

La reacción de combustión se puede expresar como una única ecuación global:



Donde A y B son las especies de los reactivos, las cuales se encuentran en las cantidades molares a y b respectivamente; C y D son las especies de los productos, en cantidades molares c y d .

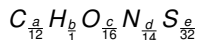
Combustible

En los casos donde la **fórmula química** del combustible es **conocida**, a efectos de la estequiometría de la combustión, resulta más cómodo trabajar con **1 kmol** de combustible como unidad básica. Por otro lado, cuando es conocida la **fracción másica** de cada elemento, es más cómodo trabajar con **1 kg** como unidad básica.

- Fórmula química conocida (1 kmol):



- Fracción másica conocida (1 kg):



Comburente

El **comburente más utilizado es el aire**, debido a su amplia disponibilidad y bajo costo asociado. Algunas aplicaciones utilizan **oxígeno** puro u otro comburente como por ejemplo **gases de escape** de otra combustión.

Comp. aprox. del aire

21% O_2

78% N_2

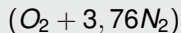
1% Otros (*Ar, CO₂, He, etc.*)

Aire teórico

O_2 21%

N_2 79%

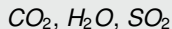
Base 1 kmol de O_2



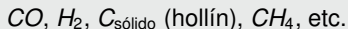
Productos de la combustión

Se denominan **productos** de combustión a los **gases**, **líquidos** volatilizados, **sólidos**, **material particulado** y **cenizas** resultantes del proceso de combustión. A los **productos gaseosos** de una combustión se los denomina **humos**.

Productos de combustión completa



Productos de combustión incompleta

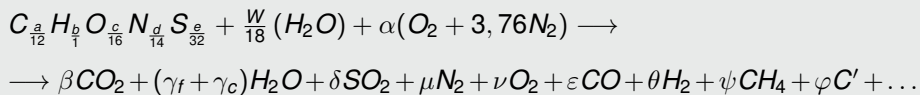


Los productos de combustión pueden tener agua debido a tres orígenes distintos:

- 1 Por la oxidación del **hidrógeno** del combustible. **Agua de formación.**
- 2 **Humedad** del combustible. **Agua de constitución.**
- 3 Humedad del aire o proveniente del secado de algún producto.

Expresión general de la combustión

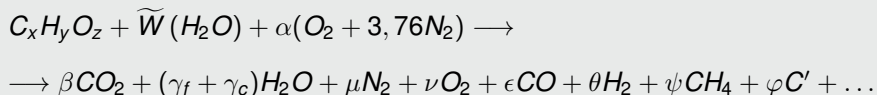
La expresión general de la combustión de **1 kg de combustible** con aire como comburente es:



- Todos los sumandos que intervienen se expresan en forma específica a la unidad del combustible, en este caso 1 kg_{Fuel} (en cualquiera de las tres bases).
- $[\alpha] = \left[\frac{kmol O_2}{kg_{Fuel}} \right]$
- $\beta, \gamma_f, \gamma_c, \delta, \mu, \nu, \varepsilon, \theta, \psi, \varphi \longrightarrow \left[\frac{kmol CO_2}{kg_{fuel}} \right], \left[\frac{kmol H_2O}{kg_{fuel}} \right] \dots \left[\frac{kmol Especie}{kg_{fuel}} \right]$
- W es la humedad másica del fuel, respetando la unidad básica. Si la base fuera 1 $kg_{Fuel, BH}$, la humedad sería $[W] = \left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{Fuel, BH}} \right]$. Notar que $\gamma_c = W/18$.

Expresión general de la combustión

Si la fórmula química del combustible es conocida se resuelve la combustión para **1 kmol de combustible**:



- Con la humedad \widetilde{W} del combustible expresada en forma molar $\left[\frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kmol } fuel} \right]$
- $\alpha, \beta, \gamma_f, \gamma_c, \delta, \mu, \nu, \epsilon, \theta, \psi, \varphi \longrightarrow \left[\frac{\text{kmol } Especie}{\text{kmol } fuel} \right]$

Balance de masa a la reacción de combustión

Durante la combustión **los átomos** de los reactivos **se recombinan** para formar los productos. La masa de cada átomo no cambia, por lo tanto, la **masa de los reactivos es igual a la masa de los productos**.

Para el i -ésimo elemento atómico (por ejemplo, i siendo C):

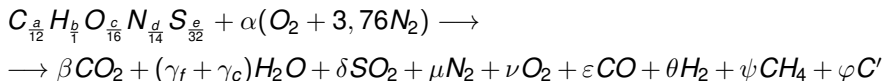
$$[m_i]_{\text{reactivos}} = [m_i]_{\text{productos}}$$

Mirando los j elementos de los reactivos y los k elementos de los productos:

$$\left[\sum_j m_{i,j} \right]_{\text{react.}} = \left[\sum_k m_{i,k} \right]_{\text{prod.}}$$

$$\left[PM_i \sum_j n_{i,j} \right]_{\text{react.}} = \left[PM_i \sum_k n_{i,k} \right]_{\text{prod.}}$$

Balance de masa a la reacción de combustión



[C]	$\frac{a}{12}$	=	$\beta + \epsilon + \psi + \varphi$
[H]	b	=	$2\gamma_f + 2\theta + 4\psi$
[O]	$\frac{c}{16} + 2\alpha$	=	$2\beta + \gamma_f + 2\delta + 2\nu + \epsilon$
[N]	$\frac{d}{14} + 2(3,76\alpha)$	=	2μ
[S]	$\frac{e}{32}$	=	δ

Para un combustible de composición elemental conocida se tienen **5 ecuaciones** (una por cada elemento) y **10 incógnitas** ($\alpha, \beta, \gamma_f, \delta, \mu, \nu, \epsilon, \theta, \psi, \varphi$), por lo que el sistema es indeterminado.

Balance de masa general



Figure: Esquema general de la reacción

Balance de masa:

$$\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{FSSC} + \dot{m}_{Ash} + \dot{m}_{H_2O,c} = \dot{m}_{HS} + \dot{m}_{H_2O,f} + \dot{m}_{H_2O,c} + \dot{m}_{Ash} + \dot{m}_{Hollin}$$

Balance de masa general

Balance de masa:

$$\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{FSSC} + \dot{m}_{Ash} + \dot{m}_{H_2O,c} = \dot{m}_{HS} + \dot{m}_{H_2O,f} + \dot{m}_{H_2O,c} + \dot{m}_{Ash} + \dot{m}_{Hollín}$$

Los flujos máscicos pueden agruparse de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{FS} = \dot{m}_{FSSC} + \dot{m}_{Ash}$$

$$\dot{m}_{FH} = \dot{m}_{FS} + \dot{m}_{H_2O,c}$$

$$\dot{m}_{HSH} = \dot{m}_{HS} + \dot{m}_{H_2O,f}$$

$$\dot{m}_{HH} = \dot{m}_{HSH} + \dot{m}_{H_2O,c}$$

- \dot{m}_{FSSC} flujo máscico de combustible seco sin cenizas
- \dot{m}_{FS} flujo máscico de combustible seco
- \dot{m}_{FH} flujo máscico de combustible húmedo
- \dot{m}_{HS} flujo máscico de humos secos
- \dot{m}_{HSH} flujo máscico de humos semi-húmedos
- \dot{m}_{HH} flujo máscico de humos húmedos

Balance de masa general

$$\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{FSSC} + \dot{m}_{Ash} + \dot{m}_{H_2O,c} = \dot{m}_{HS} + \dot{m}_{H_2O,f} + \dot{m}_{H_2O,c} + \dot{m}_{Ash} + \dot{m}_{Hollín}$$

$$\begin{aligned} \div \dot{m}_{FSSC}) \quad G_{aire} + 1 + Ash + (H_2O)_c &= G_{HS} + (H_2O)_f + (H_2O)_c + Ash + C' \\ &= G_{HSH} + (H_2O)_c + Ash + C' \\ &= G_{HH} + Ash + C' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \div \dot{m}_{FS}) \quad G_{aire} + 1 + (H_2O)_c &= G_{HS} + (H_2O)_f + (H_2O)_c + Ash + C' \\ &= G_{HSH} + (H_2O)_c + Ash + C' \\ &= G_{HH} + Ash + C' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \div \dot{m}_{FH}) \quad G_{aire} + 1 &= G_{HS} + (H_2O)_f + (H_2O)_c + Ash + C' \\ &= G_{HSH} + (H_2O)_c + Ash + C' \\ &= G_{HH} + Ash + C' \end{aligned}$$

Gasto de aire

El **gasto de aire** es el consumo másico (o molar) de aire que participa en la combustión, por unidad de combustible: masa (o moles) de aire empleada para la combustión por cada *kilogramo* o *kilomol* de fuel.

$$\tilde{G}_{\text{aire}} \left[\frac{\text{kmol aire}}{\text{unidad fuel}} \right] = 4,76 \left[\frac{\text{kmol aire}}{\text{kmol O}_2} \right] \alpha \left[\frac{\text{kmol O}_2}{\text{unidad fuel}} \right]$$

$$PM_{\text{aire}} = 0,21 PM_{\text{O}_2} + 0,79 PM_{\text{N}_2}$$

$$PM_{\text{aire}} = 0,21 \left[\frac{\text{kmol O}_2}{\text{kmol Air}} \right] 32 \left[\frac{\text{kg O}_2}{\text{kmol O}_2} \right] + 0,79 \left[\frac{\text{kmol N}_2}{\text{kmol Air}} \right] 28 \left[\frac{\text{kg N}_2}{\text{kmol N}_2} \right] \approx 29 \left[\frac{\text{kg aire}}{\text{kmol aire}} \right]$$

$$G_{\text{aire}} = 4,76 \left[\frac{\text{kmol aire}}{\text{kmol O}_2} \right] \alpha \left[\frac{\text{kmol O}_2}{\text{unidad fuel}} \right] 29 \left[\frac{\text{kg aire}}{\text{kmol aire}} \right] \approx 138 \alpha \left[\frac{\text{kg aire}}{\text{unidad fuel}} \right]$$

Gasto de humos

El **gasto de humos** también puede calcularse como la sumatoria del gasto másico de cada especie (cantidad molar de cada especie por su peso molar):

$$G_{HH} \left[\frac{\text{kg humos húmedos}}{\text{unidad fuel}} \right] = \beta PM_{CO_2} + (\gamma_f + \gamma_c) PM_{H_2O} + \delta PM_{SO_2} + \mu PM_{N_2} + \nu PM_{O_2} + \epsilon PM_{CO} + \theta PM_{H_2} + \dots$$

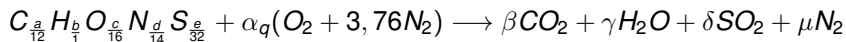
Notar que para HSH no se consideraría γ_c y para HS no se consideraría ni γ_f ni γ_c .

Combustión estequiométrica

Definición

Se define como una **combustión completa** en la cual **no hay excedente de oxígeno**.

Por lo tanto: $\nu = \epsilon = \theta = \psi = \varphi = 0$



$$[C] \quad \frac{a}{12} = \beta$$

$$[H] \quad b = 2\gamma$$

$$[O] \quad \frac{c}{16} + 2\alpha_q = 2\beta + \gamma + 2\delta$$

$$[N] \quad \frac{d}{14} + 2(3,76\alpha_q) = 2\mu$$

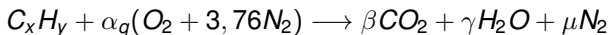
$$[S] \quad \frac{e}{32} = \delta$$

$$[\alpha_q] = \left[\frac{\text{kmol } O_2}{\text{kg}_{Fuel}} \right]$$

$$\alpha_q = \frac{a}{12} + \frac{b}{4} + \frac{e}{32} - \frac{c}{32}$$

Combustión estequiométrica

Hidrocarburo (C_xH_y):



$$[C] \quad x = \beta$$

$$[H] \quad y = 2\gamma$$

$$[O] \quad 2\alpha_q = 2\beta + \gamma$$

$$[N] \quad 3,76\alpha_q = \mu$$

$$\alpha_q = x + \frac{y}{4}$$

α_q es la **cantidad** (molar) **mínima de** O_2 teóricamente necesaria para **quemar completamente** un combustible. **Depende únicamente del combustible.**

Ejemplo de cálculo de α_q

Combustible: GLP (supergas). $C_3H_8 = 40\%$, $C_4H_{10} = 60\%$

Exceso

$$E = \frac{\dot{m}_{aire} - \dot{m}_{aireq}}{\dot{m}_{aireq}} = \frac{G_{aire} - G_{aireq}}{G_{aireq}} \implies \boxed{E = \frac{\alpha - \alpha_q}{\alpha_q}}$$

El exceso depende de:

- Tipo y características del **combustible**.
- Características propias del **sistema de combustión**.
- Porcentaje de **carga** de operación.
- Condiciones ambientales.
- Velocidades alcanzadas del aire y humos.

Valor óptimo (se determina mediante ensayos):

- Exceso **elevado**: **menor temperatura** en el hogar y **caída** en la **eficiencia** térmica del sistema.
- Exceso **menor**: aparición o aumento de productos de **combustión incompleta**.

Exceso

Table: Excesos usuales según el tipo de combustibles

Gases	3% - 15%
Líquidos	5% - 20%
Sólidos	>25%

Riqueza y dilución

Dilución:

$$\lambda = \frac{m_{O_2}}{m_{O_2,q}} = \frac{n_{O_2}}{n_{O_2,q}} = \frac{\alpha}{\alpha_q}$$

Riqueza (de combustible):

$$\phi = \frac{\alpha_q}{\alpha} = \frac{1}{\lambda}$$

Otros:

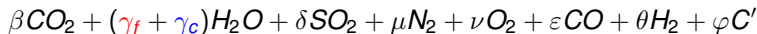
$$\left[\frac{\text{kmol aire}}{\text{kmol fuel}} \right]; \left[\frac{\text{kg aire}}{\text{kg fuel}} \right]; \left[\frac{\text{Nm}^3 \text{ aire}}{\text{kg fuel}} \right]; \left[\frac{\text{Nm}^3 \text{ aire}}{\text{Nm}^3 \text{ fuel}} \right]; \text{ etc.}$$

Composición molar (o volumétrica) de humos

La composición molar de los humos hace referencia a la relación entre el número de moles de cada especie sobre el total (o subtotal) de **especies gaseosas** que lo componen.

$$X_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^N n_j}$$

Considerando los siguientes productos de combustión:



Donde:

- C' : carbono en estado **sólido** (hollín). No se considera en la sumatoria.
- Se asumió el agua en los humos en estado vapor (dependerá del caso).
- $\beta, \gamma, \delta \dots$ son los *kilomoles* de cada especie por unidad de combustible.

Clasificación de humos y bases para expresarlos

Humos húmedos, semi-húmedos y secos

- Humos húmedos: $\beta, \gamma_f, \gamma_c, \delta, \mu, \nu, \varepsilon, \theta$.
- Humos semi-húmedos: $\beta, \gamma_f, \delta, \mu, \nu, \varepsilon, \theta$. (sólo agua de formación)
- Humos secos: $\beta, \delta, \mu, \nu, \varepsilon, \theta$.

Base húmeda, semi-húmeda y seca

- Base Húmeda: $\beta + \gamma_f + \gamma_c + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta$
- Base semi-húmeda: $\beta + \gamma_f + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta$
- Base seca: $\beta + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta$

Observación: se utilizan **paréntesis rectos []** para representar composiciones molares de gases en **base húmeda** o total y **paréntesis curvos ()** para representar composiciones molares de gases en **base seca**.

Composición molar de humos húmedos en base total

Humos Húmedos en Base Húmeda

$$[CO_2] = \frac{\beta}{\beta + \gamma_f + \gamma_c + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$[N_2] = \frac{\mu}{BH}$$

$$[H_2] = \frac{\theta}{BH}$$

$$[H_2O] = \frac{\gamma_f + \gamma_c}{BH}$$

$$[O_2] = \frac{\nu}{BH}$$

$$[SO_2] = \frac{\delta}{BH}$$

$$[CO] = \frac{\varepsilon}{BH}$$

Observaciones:

- La composición molar **no depende de la base** en que se encuentre el **combustible**.
- Los **líquidos y sólidos no deben ser considerados** como parte de los humos gaseoso.

Composición molar de humos húmedos en base seca

Humos Húmedos en Base Seca

$$(CO_2) = \frac{\beta}{\beta + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$(H_2O) = \frac{\gamma_f + \gamma_c}{BS}$$

$$(SO_2) = \frac{\delta}{BS}$$

$$(N_2) = \frac{\mu}{BS}$$

$$(O_2) = \frac{\nu}{BS}$$

$$(CO) = \frac{\varepsilon}{BS}$$

$$(H_2) = \frac{\theta}{BS}$$

Observación: en este caso $\sum X_i > 1$

Composición molar de los humos secos

Humos Secos en Base Seca

$$(CO_2) = \frac{\beta}{\beta + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$(N_2) = \frac{\mu}{\beta + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$(CO) = \frac{\varepsilon}{\beta + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$(SO_2) = \frac{\delta}{\beta + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$(O_2) = \frac{\nu}{\beta + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$(H_2) = \frac{\theta}{\beta + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

Humos Secos en Base Húmeda

$$[CO_2] = \frac{\beta}{\beta + \gamma_f + \gamma_c + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$[SO_2] = \frac{\delta}{\beta + \gamma_f + \gamma_c + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$[N_2] = \frac{\mu}{\beta + \gamma_f + \gamma_c + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$[O_2] = \frac{\nu}{\beta + \gamma_f + \gamma_c + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

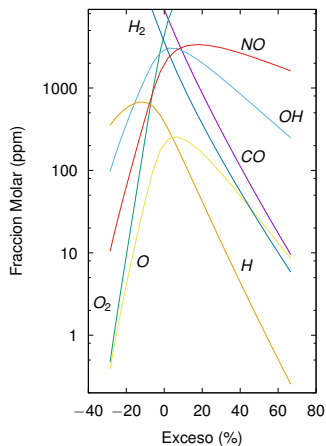
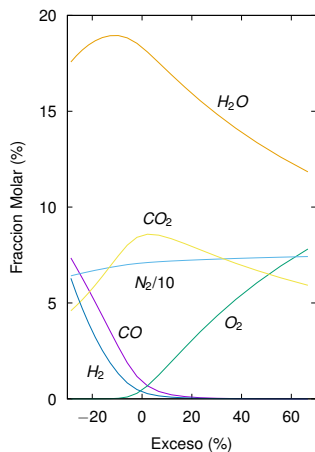
$$[CO] = \frac{\varepsilon}{\beta + \gamma_f + \gamma_c + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

$$[H_2] = \frac{\theta}{\beta + \gamma_f + \gamma_c + \delta + \mu + \nu + \varepsilon + \theta}$$

Observación: en este caso $\sum X_i < 1$

Variación de la composición de humos con el exceso

Concentración de especies según el exceso para una combustión de **metanoaire**, considerando equilibrio químico y combustión adiabática:



Analizadores de gases

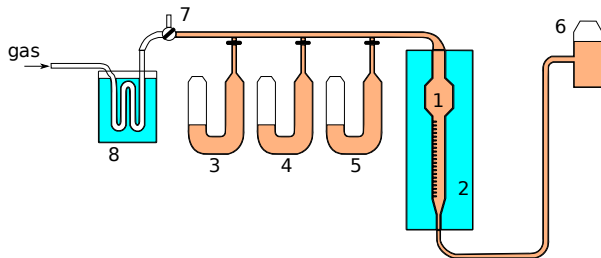
- Se utilizan para la evaluación del rendimiento de un sistema.
- Miden fracciones volumétricas (molares) de ciertos gases de combustión.
- Dependiendo de la tecnología que utilice el analizador, la composición de humos que miden estos equipos puede ser en base seca o base húmeda.

Los analizadores de gases realizan la toma de una muestra de gases mediante una **vaina** que se introduce en la corriente de humos a través de un **orificio**. En general, las mediciones se realizan inmediatamente después que los humos abandonan las **superficies de intercambio** (por ejemplo, al inicio de la chimenea de una caldera).

Historia: Orsat



(a) Fotografía de Analizador Orsat



(b) Esquema de Analizador Orsat

- Mediciones en base seca de $CO_2 + SO_2$, O_2 y CO .

Analizadores portátiles

- Medidas básicas: (CO) y (O_2)
- Otros gases: (CO_2), (NO_x), (SO_x), (H_2), etc.
- Suelen medir temperatura, presión (para determinar el tiro de la chimenea), velocidad de los gases (pitot), temperatura ambiente y CO ambiente.
- Miden de forma continua pero no están diseñados para grandes períodos.
- Los gases de combustión se enfrían hasta que condensa el agua presente en los humos por lo que los resultados que proporcionan son en **base seca**.



(a) Analizador de gases residencial



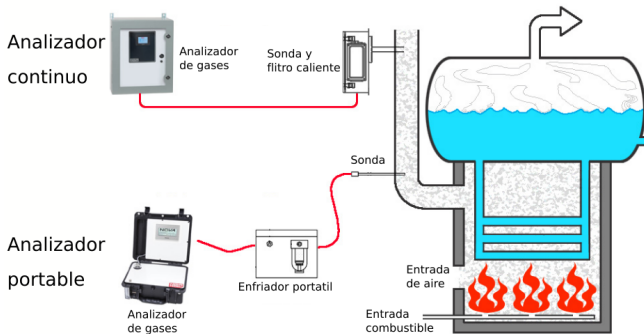
(b) Analizador de gases industrial

Analizadores portátiles



Analizadores continuos

- Instalados en forma fija.
- Análisis continuo de humos.
- Puede estar conectado a un control automático del sistema de combustión.
- Costo más elevado.
- No es necesario enfriar los humos para su análisis por tanto las mediciones son en **base húmeda**.



Cálculo de exceso a partir de análisis de humos

Si la cantidad de nitrógeno del combustible es despreciable respecto a la cantidad de nitrógeno del aire, $\frac{D}{2n_{TS}} \ll (N_2)$, se tiene para combustiones con aire como comburente:

$$E = \frac{(O_2) - \frac{(CO)}{2}}{\frac{(N_2)}{3,76} - \left[(O_2) - \frac{(CO)}{2} \right]}$$

Para el caso donde la combustión sea completa:

$$E = \frac{(O_2)}{\frac{(N_2)}{3,76} - (O_2)}$$

Definición

Temperatura de llama adiabática

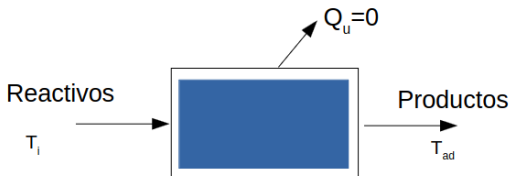


Figure: Proceso adiabático a P cte

La temperatura de llama adiabática T_{ad} es la **temperatura que alcanzan los productos** en una **combustión adiabática** (no hay pérdidas de calor).

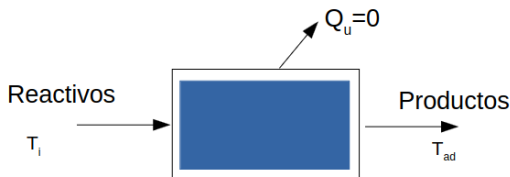
Tipos

Se diferencian dos temperaturas de llama adiabática:

- En una combustión a presión constante, $T_{ad,P}$
- En una combustión a volumen constante, $T_{ad,V}$

Los procesos de combustión de los generadores de vapor son a presión aproximadamente constante, por lo que se calculará la temperatura de llama adiabática a presión constante.

Temperatura de llama adiabática a P cte



Proceso a P cte:

Cuando una mezcla combustible - comburente (generalmente aire) se quema a presión constante y de forma adiabática, la entalpía absoluta de los reactivos a la entrada ($T = T_i$) es igual a la entalpía absoluta de los productos a la salida ($T = T_{ad}$).

A partir del balance de energía al volumen de control:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e h_R - \dot{m}_s h_P \implies \boxed{0 = h_R(T_i) - h_P(T_{ad})}$$

Definición de entalpía total

Entalpía total:

$$h = h_q + h_s + h_l$$

donde h_q es la entalpía química, h_s es la entalpía sensible y h_l es la entalpía latente.

- Entalpía química: entalpía liberada por una sustancia combustible en una reacción de combustión.
- Entalpía sensible: entalpía debida únicamente a la temperatura.
- Entalpía latente: la consideraremos únicamente para el cambio de estado del agua. En ese caso se utiliza h_{fg} (calor latente de vaporización), y corresponde al calor requerido para vaporizar una unidad de masa de agua a una temperatura dada. $h_{fg} = h_{v,sat}(T) - h_{l,sat}(T)$

Entalpía sensible

- Ecuación de estado: $h = h(T, P)$
- Definición de calor específico a presión constante: $c_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P$
- Para gases ideales: $dh = c_P dT$

Integrando dh :

$$h(T) - h(T_{ref}) = h(T) - h_{ref} = \int_{T_{ref}}^T c_P dT$$

Nota: el calor específico suele ser función de la temperatura.

Suele definirse como origen de entalpía (referencia): $h_{ref} = 0$ a cierta T_{ref} ; en este curso se utilizará $T_{ref} = 25\text{ °C} = 298,15\text{ K}$. Si además la sustancia puede cambiar de estado (como el agua) se debe también definir una referencia del estado de agregación de la sustancia (vapor o líquido).

Tabla de entalpías sensibles por especies

Tablas de entalpías sensibles para diferentes gases, con origen $T=25^{\circ}\text{C}$ y considerando gases ideales.

T (°C)	T (K)	h CO ₂ (kJ/kmol)	h CO (kJ/kmol)	h H ₂ O (kJ/kmol)	h O ₂ (kJ/kmol)	h SO ₂ (kJ/kmol)	h N ₂ (kJ/kmol)	h H ₂ (kJ/kmol)	h Aire (kJ/kmol)
0	273	- 913,8	- 728,3	- 838,5	- 733,1	- 984,8	- 728,0	- 718,4	- 727,2
5	278	- 733,4	- 582,7	- 670,9	- 586,7	- 789,6	- 582,4	- 575,2	- 581,8
10	283	- 551,8	- 437,0	- 503,3	- 440,2	- 593,6	- 436,8	- 431,7	- 436,4
15	288	- 369,0	- 291,4	- 335,7	- 293,5	- 396,6	- 291,2	- 288,0	- 291,0
20	293	- 185,1	- 145,7	- 167,9	- 146,8	- 198,8	- 145,6	- 144,1	- 145,5
25	298	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	303	186,2	145,7	168,0	147,0	199,7	145,6	144,3	145,5
35	308	373,6	291,5	336,1	294,0	400,2	291,3	288,7	291,1
40	313	562,1	437,2	504,3	441,3	601,7	436,9	433,3	436,7
45	318	751,8	583,0	672,7	588,6	804,1	582,6	578,0	582,3
50	323	942,5	728,8	841,2	736,1	1 007,4	728,3	722,8	728,0
55	328	1 134,3	874,7	1 009,8	883,8	1 211,5	874,0	867,8	873,8
60	333	1 327,2	1 020,6	1 178,6	1 031,6	1 416,6	1 019,7	1 012,9	1 019,6
65	338	1 521,1	1 166,5	1 347,5	1 179,6	1 622,6	1 165,4	1 158,1	1 165,4
70	343	1 716,1	1 312,5	1 516,6	1 327,8	1 829,5	1 311,2	1 303,3	1 311,3
75	348	1 912,1	1 458,5	1 685,9	1 476,1	2 037,2	1 457,0	1 448,7	1 457,3
80	353	2 109,2	1 604,5	1 855,3	1 624,7	2 245,9	1 602,8	1 594,1	1 603,3
85	358	2 307,3	1 750,6	2 024,9	1 773,4	2 455,4	1 748,7	1 739,7	1 749,3
90	363	2 506,4	1 896,8	2 194,7	1 922,3	2 665,8	1 894,6	1 885,2	1 895,5
95	368	2 706,5	2 043,0	2 364,7	2 071,4	2 877,1	2 040,5	2 030,9	2 041,7
100	373	2 907,5	2 189,3	2 534,8	2 220,7	3 089,3	2 186,5	2 176,6	2 188,0
105	378	3 109,6	2 335,7	2 705,1	2 370,2	3 302,3	2 332,5	2 322,3	2 334,4
110	383	3 312,6	2 482,1	2 875,7	2 519,9	3 516,2	2 478,5	2 468,1	2 480,8
115	388	3 516,5	2 628,6	3 046,4	2 669,9	3 730,9	2 624,6	2 614,0	2 627,3
120	393	3 721,4	2 775,1	3 217,3	2 820,0	3 946,5	2 770,8	2 759,9	2 773,9
125	398	3 927,2	2 921,8	3 388,5	2 970,4	4 163,0	2 917,0	2 905,8	2 920,6

Tabla de entalpías sensibles de humos semihúmedos

1. Gas Natural

T		$CO_2 = 9\%(b.s.)$		$CO_2 = 10\%(b.s.)$		$CO_2 = 11\%(b.s.)$	
		h_{h9h}		h_{h9h}		h_{h9h}	
$^{\circ}C$	K	kJ/kg_{hsh}	$kcal/kg_{hsh}$	kJ/kg_{hsh}	$kcal/kg_{hsh}$	kJ/kg_{hsh}	$kcal/kg_{hsh}$
0	273	-27,2	-6,5	-27,347	-6,5	-27,5	-6,6
10	283	-16,3	-3,9	-16,4	-3,9	-16,5	-4,0
20	293	-5,4	-1,3	-5,5	-1,3	-5,5	-1,3
30	303	5,4	1,3	5,5	1,3	5,5	1,3
40	313	16,3	3,9	16,5	3,9	16,6	4,0
50	323	27,3	6,5	27,5	6,6	27,6	6,6
60	333	38,2	9,1	38,5	9,2	38,7	9,3
70	343	49,2	11,8	49,5	11,8	49,8	11,9
80	353	60,1	14,4	60,6	14,5	61,0	14,6
90	363	71,1	17,0	71,6	17,1	72,1	17,2
100	373	82,2	19,6	82,7	19,8	83,3	19,9
110	383	93,2	22,3	93,9	22,4	94,5	22,6
120	393	104,2	24,9	105,0	25,1	105,7	25,3
130	403	115,3	27,6	116,2	27,8	117,0	28,0
140	413	126,4	30,2	127,3	30,4	128,2	30,7
150	423	137,5	32,9	138,6	33,1	139,5	33,4

Tabla de entalpías de humos semihúmedos de la combustión completa de Gas Natural con aire para tres excesos distintos. La referencia de temperatura es 25 °C.

Utilización con formulómetro del curso

Se utilizarán las tablas de entalpías sensibles de humos semihúmedos.

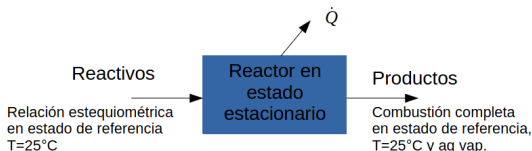
Balance General (combustible en base total)

$$\begin{aligned}
 Q_p^s - Q_{perdidas} = & G_v \cdot (h_2 - h_1) + G_{H9H} \cdot [h_{H9H}(T_{ch}) - h_{H9H}(T_o)] + 9H \cdot h_{fg}(T_o) + \\
 & + (H_2O)_{fuel} \cdot [h_{fg}(T_o) + c_{p_{vapor}} \cdot (T_{ch} - T_o) - c_{p_{liq}} \cdot (T_{fuel} - T_o)] + \\
 & - [1 - (H_2O)_{fuel}] \cdot c_{p_{fuel}} \cdot (T_f - T_o) - G_{as} \cdot c_{p_a} \cdot (T_a - T_o) + \\
 & + G_{as} \cdot w_{as} \cdot c_{p_{vapor}} \cdot (T_{ch} - T_a) + G_{purga} \cdot (h_{liq,sat} - h_1) + \\
 & + Ash \cdot c_{p_{ash}} \cdot (T_{ash} - T_o) + H_{qC'}^* + H_{qCO}^*
 \end{aligned}$$

Balance al Hogar (combustible en base total)

$$\begin{aligned}
 Q_p^s = & + Q_H + G_{H9H} \cdot [h_{H9H}(T_{SH}) - h_{H9H}(T_o)] + 9H \cdot h_{fg}(T_o) + \\
 & + (H_2O)_{fuel} \cdot [h_{fg}(T_o) + c_{p_{vapor}} \cdot (T_{SH} - T_o) - c_{p_{liq}} \cdot (T_f - T_o)] + \\
 & - [1 - (H_2O)_{fuel}] \cdot c_{p_f} \cdot (T_f - T_o) - G_{as} \cdot c_{p_a} \cdot (T_{a'} - T_o) + \\
 & + G_{as} \cdot w_{as} \cdot c_{p_{vapor}} \cdot (T_{SH} - T_{a'}) + \\
 & + Ash \cdot c_{p_{ash}} \cdot (T_{ash} - T_o) + H_{qC'}^* + H_{qCO}^*
 \end{aligned}$$

Relación PC y entalpía química



Planteando el balance de energía al volumen de control conformado por el reactor y considerando un proceso estacionario, volumen rígido y una única entrada (reactivos) y una única salida (productos):

$$\dot{Q} = \dot{m}_R h_R - \dot{m}_P h_P = \dot{m}_R (h_s + h_q + h_l)_R - \dot{m}_P (h_s + h_q + h_l)_P$$

tomando como origen $T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ y agua en estado de vapor, y considerando que el combustible no tiene humedad y que el agua formada es vapor:

$$\dot{Q} = \dot{m}_R (h_q)_R \implies \dot{Q} = \dot{m}_R X_{Fuel} (h_q)_{Fuel} \implies h_{q,Fuel} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{Fuel}} = PCI$$

Relación PC y entalpía química

- Si el estado de referencia es agua vapor, se demostró que la entalpía química del combustible es el PCI.
- De forma análoga, si el estado de referencia es agua líquida, la entalpía química del combustible es el PCS

En el formulómetro de este curso se consideró como origen de entalpía

$T_{ref} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y agua en estado líquido para escribir la entalpía de los humos.