

# **Problemas de Termo**

## **Tercera Prueba**

**Balance de materia: mezcla de dos corrientes de aire**

**Sicrometría: calentamiento de un aire**

**Sicrometría: relacion entre la humedad absoluta y la humedad relativa**

**Sicrometría: cantidad de agua condensada en un deshumidificador**

**Sicrometría: calor transferido en un calentador**

**Sicrometría: condensación de vapor desde aire**

**Sicrometría: cálculo de la cantidad de aire de secado**

**Sicrometría: secado de un aire**

**Combustión: influencia de diversas variables**

**Combustión: aumento de presión por combustión**

**Combustión: balance de materia en la combustión de dos combustibles**

**Combustión: balance de energía en la combustión de dos combustibles**

**Combustión: temperatura de rocío de gases de combustión**

**Combustión: proceso de combustión incompleta (formación de CO)**

### Balance de materia: mezcla de dos corrientes de aire

Una corriente de aire a 30°C y 90% de humedad relativa es mezclada con otra corriente de aire a 5°C y 100% de humedad relativa en una cámara de mezcla adiabática. En el proceso de mezcla, puede pasar lo siguiente...:

a) Algo de agua puede condensar.	d) Todas las anteriores.
b) El aire puede salir saturado.	e) Sólo a) y c)
c) La T de salida está entre 5 y 30°C	f) Ninguna de las anteriores.

### Solución

Debido a que la cámara de mezcla es adiabática, no existe pérdida de calor que pudiese provocar un descenso de la temperatura por debajo de la mínima de ambas corrientes (5°C) o adición que pudiese provocar que la temperatura se elevara por sobre la mayor (30°C). Por lo tanto, la temperatura final debe estar entre ambas, y el valor final dependerá de la proporción que exista entre ambas corrientes.

Igualmente, dependiendo de la razón de flujos, el aire puede salir saturado (la mezcla entre ambas corrientes produce que el aire final salga saturado)

Puede ser no saturado (hay suficiente aire caliente a 30°C como para evitar que el aire a 5°C condense agua)

O puede condensar algo de agua (hay suficiente aire a 5°C para enfriar a la corriente de 30°C hasta su temperatura de rocío y comenzar a condensar agua).

Por lo tanto, la alternativa correcta es la (d), todas las anteriores.

### Sicrometría: calentamiento de un aire

En un día frío, 58 kilogramos de aire húmedo a 7°C y 80%H.R., entran a un calentador que los expulsa a 57°C. La presión permanece constante a 1 atm. El flujo de salida es aprox...:

a) 27 m <sup>3</sup>	d) 68 m <sup>3</sup>
b) 38 m <sup>3</sup>	e) Falta información.
c) 54 m <sup>3</sup>	f) Ninguna de las anteriores.

#### Solución:

El volumen de aire puede determinarse mediante la ecuación de gas ideal, puesto que la presión a la cual ocurre el calentamiento es baja (1 atm):  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$

Se necesita determinar el valor de n, el número de moles de aire que ingresan al calentador:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{58(\text{kg})}{29(\text{kg}/\text{kmol})} = 2(\text{kmol})$$

Despejando V en la ecuación de gas ideal y reemplazando los valores ya conocidos, se obtiene:

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{2000 \cdot 0.082 \cdot 330}{1} = 54210(\text{Lts})$$

La alternativa correcta es la (c), 54 m<sup>3</sup>

## Sicrometría: relacion entre la humedad absoluta y la humedad relativa

Usando la definición de humedad absoluta  $H$  y de humedad relativa  $H_R$ , encuentre una expresión matemática que relacione  $H$  con  $H_R$ . Su resultado debe ser una expresión “clara”, “limpia”, “simple” de la forma siguiente:  $H = f(H_R, T, P, const.)$ . Note que “constantes” se refiere a parámetros o propiedades conocidas del agua y del aire ( $M_a$ =peso molecular del aire;  $M_w$ = peso molecular del agua; A, B, C, constantes de Antoine en  $\ln(P_{\text{agua}}^{\text{sat}}=A-B/(T+C))$ )

### Solución

Se comienza con la definición de *humedad* relativa:  $H_R = \frac{P_{\text{agua}}}{P_{\text{agua}}^{\text{sat}}}$

Es posible reemplazar la presión del agua mediante una expresión obtenida de la ecuación de gas ideal,  $P_i V = n_i R T$ :

$$H_R = \frac{n_{\text{agua}} \cdot R \cdot T}{P_{\text{agua}}^{\text{sat}}} \cdot \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{aire}}}$$

El término introducido a la derecha ( $n_{\text{aire}}/n_{\text{aire}}$ ) permitirá ejecutar la siguiente manipulación. Si se reemplaza  $n_{\text{aire}}$  utilizando la ecuación de gas ideal y se reordena el resultado, se obtiene:

$$H_R = \left( \frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{aire}}} \right) \left( \frac{R \cdot T}{V} \right) \cdot \left( \frac{P_{\text{aire}} \cdot V}{R \cdot T} \right)$$

Como el agua y el aire están en una mezcla en equilibrio, los valores de  $T$  y  $V$  son iguales para ambos, con lo que es posible despejarlos junto con  $R$ . Se observa que:

$$H_m = \frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{aire}}} = \frac{m_{\text{agua}} / M_{\text{agua}}}{m_{\text{aire}} / M_{\text{aire}}} = H \frac{M_{\text{aire}}}{M_{\text{agua}}}$$

La expresión anterior se reduce a: 
$$H_R = H \left( \frac{M_{\text{aire}}}{M_{\text{agua}}} \right) \frac{P - P_{\text{agua}}}{P^{\text{sat}}} = H \left( \frac{M_{\text{aire}}}{M_{\text{agua}}} \right) \left[ \frac{P}{P^{\text{sat}}} - \frac{P_{\text{agua}}}{P^{\text{sat}}} \right]$$

El término de la derecha es reconocido como la definición de  $H_R$ . Si se utiliza la expresión de Antoine para  $P_{\text{sat}}$ :

$$\ln(P_{\text{agua}}^{\text{sat}}) = A - \frac{B}{(T + C)} \rightarrow P_{\text{agua}}^{\text{sat}} = e^{A-B/(T+C)}$$

Su reemplazo en la ecuación previa da: 
$$H_R = H \left( \frac{M_{\text{aire}}}{M_{\text{agua}}} \right) \left[ \frac{P}{e^{A-B/(T+C)}} - H_R \right]$$

Ahora se puede despejar finalmente el valor de  $H$ :

$$H = \left( \frac{M_{\text{agua}}}{M_{\text{aire}}} \right) \left[ \frac{H_R \cdot e^{A-B/(T+C)}}{P - H_R \cdot e^{A-B/(T+C)}} \right]$$

### Sicrometría: cantidad de agua condensada en un deshumidificador

Aire húmedo a 30°C y 90% de humedad relativa ingresa a un deshumidificador a razón de 200 m<sup>3</sup>/min. El agua condensada y el aire saturado salen a 10°C a través de salidas separadas. La presión permanece constante a 1 atm. El flujo másico de agua condensada es:

a) 7.5 kg/min	c) 3.8 kg/min	e) falta información
b) 38.0 kg/min	d) 12.7 kg/min	f) ninguna de las anteriores

### Solución

Debido a que la presión es baja (1 atm), es posible utilizar la ley de los gases ideales...

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T = \frac{m}{M} R \cdot T$$

Despejando m:  $m = \frac{M \cdot P \cdot V}{R \cdot T}$

Reemplazando los datos se obtiene:  $m = \frac{29 \cdot 1 \cdot 200 \times 10^3}{82 \times 10^{-3} \cdot 303} = 0.266 \times 10^6 = 233 \left( \frac{\text{kg}}{\text{min}} \right)$

De una carta sicrométrica, se lee el contenido de humedad del aire en la entrada:

$$h_1 = 0.024 \text{ (kg agua/ kg aire seco)}$$

$$h_1' = 0.0234 \text{ (kg agua/ kg aire seco)}$$

De la definición de humedad relativa, se obtiene la masa de agua en la entrada:

$$m_{\text{agua}} = 233 \times 0.0234 = 5.4611 \text{ kg de agua./min}$$

Entonces, la masa de aire seco que ingresa al secador es:

$$m_{\text{aire seco}} = m_{\text{total}} - m_{\text{agua}} = 233 - 5.4611 = 227.5389 \text{ kg aire seco./min}$$

En la salida, el aire se encuentra saturado a una temperatura de 10°C. Para esta condición, se lee en el diagrama sicrométrico:  $h_{\text{salida}} = 0.0075 \text{ (kg agua/kg aire seco)}$

La masa de agua en el aire de salida,  $m_{\text{as}}$  es:  $m_{\text{as}} = h_{\text{salida}} \cdot m_{\text{salida}} = 0.0075 \cdot 227.5384 = 1.7605 \text{ kg. agua/min}$

Así, el agua condensada es igual a:

$$m_{\text{agua condensada}} = m_{\text{agua, entrada}} - m_{\text{agua, salida}} = 5.4611 - 1.7605 = 3.7546 \text{ kg/min.}$$

La alternativa correcta es la (c), 3.8 kg/min

### Sicrometría: calor transferido en un calentador

Aire a 12°C y 80 % de humedad relativa entra a un calentador a razón de 150 m<sup>3</sup>/min. La mezcla es calentada hasta que sale a 82°C. La presión permanece constante a 1 atm. El calor transferido es:

a) 6300 Kcal/min	d) 5000 Kcal/min
b) 3150 Kcal/min	e) falta información
c) 2500 Kcal/min	f) ninguna de las anteriores

### Solución

La carta sicrométrica permite obtener la humedad del aire de entrada al calentador:

$$h_1 = 0.007 \text{ (kg agua/kg aire seco)}$$

Debido a que el proceso ocurre a baja presión (1 atm), puede utilizarse la ecuación de gas ideal:

$$P \cdot V = \frac{m}{M} R \cdot T$$

Se despeja la masa m:

$$m = \frac{P \cdot V \cdot M}{R \cdot T} = \frac{1 \cdot 150 \cdot 29 \times 10^3}{0.082 \cdot 285} = 186136 \approx 186 \left( \frac{\text{kg}}{\text{min}} \right)$$

El calor transferido se encuentra aplicando la primera Ley: Para el aire que ingresa al calentador, queda:

$$Q = \Delta H = m \cdot C_p \cdot \Delta T = 186 \left( \frac{7}{29} \right) \cdot 70 = 3142 \text{ (Kcal)}$$

La alternativa correcta es la (b), 3150 Kcal.

### Sicrometría: condensación de vapor desde aire

Aire a 25°C, 760 mmHg y 70% de humedad relativa se comprime a 10 atm. La temperatura a la que debe enfriarse la mezcla gas-vapor para que se condense el 30% del agua es, aprox...

a) 83°C	d) 19°C
b) 14°C	e) No se puede calcular.
c) 55°C	f) Ninguna de las anteriores.

### Solución

Del diagrama sicrométrico, se lee la humedad absoluta del aire que es comprimido:

$$h = 0.014(\text{gr.agua} / \text{gr.aire} - \text{sec o})$$

Si se comprime a 10 atm, la humedad del no debería cambiar, a menos que la temperatura cambie. En este caso, ya no puede utilizarse la carta sicrométrica, puesto que sólo es válida para 25°C, 760 mmHg.

Recordando que:  $h_r = \frac{P_i}{P_{sat}}$

Y si ha de condensar agua,  $h_r$  debe ser igual a 100%. A la T final,  $P_i = P^{sat} = X_i \cdot P$

Además:  $X_i = \frac{29 \cdot h}{18 + 29 \cdot h}$

Donde  $h$  es la humedad (absoluta) del aire. En el caso de que se haya retirado suficiente agua como para llegar al 70% de la humedad original:  $0.7 \cdot 0.014 = 0.0098$ .

Luego:  $X_i = \frac{29 \cdot 0.0098}{18 + 29 \cdot 0.0098} = 0.0155$

Y entonces:  $P_{sat} = 0.0155 \cdot 10 = 0.155(\text{atm})$

En tablas de vapor de agua, se busca la temperatura para la cual 0.155 (atm) es su presión de vapor. Se encuentra que  $T_{sat} = 328 \text{ K}$ , es decir, 55°C.

La alternativa correcta es la (c), 55°C.

### Sicrometría: cálculo de la cantidad de aire de secado

Se seca 1 tonelada de manzanas que contienen 60% en peso de agua, hasta que tengan 20% en peso de agua. Si se usa aire a 25°C y 50% de  $h_r$ , el aire requerido es:

a) 38 tons.	d) 15 tons.
b) 167 tons.	e) No se puede calcular.
c) 53 tons.	f) Ninguna de las anteriores.

### Solución

Si el 60% de las manzanas es agua (en peso), entonces 600 kilogramos es agua y 400 kilogramos manzanas secas. Luego del secado, la cantidad de manzana sólida permanece constante (400 kg), que ahora constituye el 80 % del peso total. Así:

$$m_{H_2O} = m_t \cdot \%_{\text{agua}} \rightarrow m_t = \frac{m_{H_2O}}{\%_{\text{agua}}} = \frac{400}{0.8} = 500$$

La masa total final es 500 kg, por lo que quedan 100 kg de agua. Es decir, durante el secado se extrajeron 500 kg de agua. Si se utiliza aire a las condiciones indicadas (25°C y 50%  $h_r$ ), en el diagrama sicrométrico podemos determinar que su humedad absoluta es  $h=0.010$  (gr.agua/gr. aire seco). A esa misma temperatura, la humedad de saturación a  $T_w$  constante es 0.013 (gr.agua/gr. aire seco).

Es decir, la máxima cantidad de agua que dicho aire puede remover si ha de utilizarse en un proceso de secado (capacidad de secado) es:

$$C.S. = h_{sat} - h = 0.013 - 0.010 = 0.003(\text{gr.agua} / \text{gr.aire})$$

Luego, mediante una simple “regla de 3”, calculamos la masa de aire necesaria para extraer los 500 kilogramos de agua:

$$\frac{0.003(\text{kg.agua})}{1(\text{kg.aire.seco})} = \frac{500(\text{kg.agua})}{X(\text{kg.aire.seco})}$$

Despejando X, se obtiene  $X=167000$  (kg).

Por lo tanto, la alternativa correcta es la (b), 167 toneladas.



### Sicrometría: secado de un aire

Se tiene 100 litros de aire a 1 atm., con una temperatura húmeda de 21°C y una temperatura seca de 25°C. Si me piden secar completamente este aire, debo retirar aprox...

a) 1.62 gr. de agua.	d) Es imposible secarlo.
b) 16.2 gr. de agua	e) Falta información.
c) 3.24 gr. de agua	f) Ninguna de las anteriores.

### Solución

Primero buscamos en un diagrama sicrométrico el contenido de agua (humedad) del aire que se va a secar.

$$h = 0.014 \left( \frac{\text{gr. agua}}{\text{gr. aire. seco}} \right)$$

Puesto que el dato entregado es el volumen (y no la masa) de aire húmedo, para encontrar la cantidad de agua en el aire puede utilizarse la ecuación de gas ideal:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{1 \cdot 100}{0.08 \cdot 298} = 4.0293$$

Es decir, hay 4.0293 moles en los 100 litros de mezcla aire-agua (aire húmedo). Luego

$$n = \frac{m}{M}$$

$$\text{Para 1 gramo de aire: } n = \frac{1}{29} = 0.034483 (\text{moles. aire})$$

Por cada gramo de aire, hay 0.014 gramos de agua, por lo tanto:

$$n = \frac{0.014}{18} = 0.000778$$

Es decir, una unidad de aire húmedo posee  $0.034483 + 0.000778 = 0.035261$  moles. Usando una "regla de tres simple":

$$\frac{0.035261 (\text{moles, a. húmedo})}{0.000778 (\text{moles, agua})} = \frac{4.0923 (\text{moles, total})}{X (\text{moles, agua})}$$

Se encuentra que hay 0.090193 moles de agua en los 100 litros de aire húmedo. Así:

$$m_{\text{agua}} = n_{\text{agua}} \cdot M_{\text{agua}} = 0.090193 \cdot 18 = 0.00162 (\text{kg})$$

Luego, la respuesta correcta es la alternativa (a), 1.62 gramos.

## Combustión: influencia de diversas variables

Temperatura del aire usado: Se quema carbón con aire estequiométrico que está a 25 °C. Si se aumenta la temperatura del aire usado, entonces...

a) Se produce más calor en la reacción.	d) Ambas a) y c)
b) Los gases quemados salen más calientes.	e) No se puede saber "a priori"
c) Los gases quemados salen más fríos	f) Ninguna de las anteriores.

### Solución

Si el único cambio en el proceso es aumentar la temperatura del aire inicial, los gases quemados salen más calientes. El calor producido por la reacción es el mismo, por lo que el efecto es que, al calentar los gases desde una temperatura más alta hasta la temperatura de salida, esta última sea mayor que si los gases hubiesen estado más fríos.

La alternativa correcta es la (b).

Cantidad de aire usado: Se quema carbón con aire estequiométrico que está a 25 °C. Si se aumentan los moles de aire de entrada, entonces...

a) Se produce menos calor en la reacción.	d) Ambas a) y c)
b) Los gases quemados salen más calientes.	e) No se puede saber "a priori"
c) Los gases quemados salen más fríos	f) Ninguna de las anteriores.

### Solución

Si entra más aire parte del calor generado se gastará en calentar el aire en exceso. Y como el calor producido por la reacción es el mismo, los gases quemados saldrán más fríos.

La alternativa correcta es la (c).

Combustión: uso de oxígeno puro: Se quema carbón con aire estequiométrico que está a 25 °C. Si en vez de aire, se usa la misma cantidad de moles de oxígeno también a 25 °C, entonces...

a) Se produce mas calor en la reacción.	d) Ambas a) y b)
b) Los gases quemados salen más calientes.	e) No se puede saber "a priori"
c) La temperatura de los gases quemados cambia muy poco	f) Ninguna de las anteriores.

### Solución

La única diferencia con el problema anterior, es que los moles en exceso son de oxígeno en vez de nitrógeno y como los Cp son similares, la temperatura no cambia mucho.

La alternativa correcta es la (c).

### Combustión: aumento de presión por combustión

Un tanque rígido contiene una mezcla de 16 kg de metano y 64 kg de oxígeno a 27°C y 4 atm. Luego de un rato, parte del contenido del tanque se quema (conversión del 75%). Si la temperatura en ese momento es de 627°C, la presión final en el tanque es aprox...:

a) 2 atm.	d) 12 atm.
b) 6 atm.	e) Falta información.
c) 23 atm.	f) Ninguna de las anteriores

### Solución

Se puede determinar la cantidad de moles de cada una de las sustancias que intervienen en la reacción dentro del estanque.

Para el metano, CH<sub>4</sub>, su peso molecular es 16 (12 para el carbono y 4x1 para el hidrógeno). Para el oxígeno, su peso molecular es 32 (2x16). De esta manera, se encuentra que en el estanque hay inicialmente:

$$n_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} = \frac{64(kg)}{32(kg/kmol)} = 2(kmol)$$

$$n_{CH_4} = \frac{16(kg)}{16(kg/kmol)} = 1(kmol)$$

La reacción que ocurre en el tanque al quemarse el metano es:  $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

El número de moles resultante no cambia, pues es independiente de la conversión que se efectúe en la reacción, por cada 3 moles que se consumen, se forman 3 moles de producto (CO<sub>2</sub>+2H<sub>2</sub>O). Si las presiones final e inicial no son muy altas, los estados pueden representarse mediante la ecuación de gas ideal:

$$P_1 \cdot V_1 = n_1 \cdot R \cdot T_1$$

$$P_2 \cdot V_2 = n_2 \cdot R \cdot T_2$$

Dividiendo ambas ecuaciones entre sí, con  $V_1=V_2$  y  $n_1=n_2$  se obtiene:  $\frac{P_1 \cdot V_1}{P_2 \cdot V_2} = \frac{n_1 \cdot R \cdot T_1}{n_2 \cdot R \cdot T_2}$

Simplificando V, n y R, de igual valor en ambos estados, se obtiene la siguiente expresión para la presión final (P<sub>2</sub>) (temperaturas en Kelvin):

$$P_2 = P_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right) = 4 \cdot \left( \frac{900}{300} \right) = 12(atm)$$

La alternativa (d) es la correcta.

Presión final en el tanque = 12 atm.

## Combustión: balance de materia en la combustión de dos combustibles

Carbón impregnado con un combustible ( $C_5H_{12}$ ) es quemado con aire, produciéndose gases quemados que contienen  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $N_2$  solamente. El carbón impregnado contiene  $C_5H_{12}$  en una proporción en peso de 75 gr de  $C_5H_{12}$  por cada 360 gr de carbón puro "seco".

Determine la concentración "global" y la concentración en "base seca" de los gases quemados. Realice ordenadamente la "tabla del balance de materia".

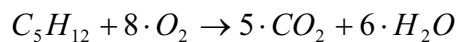
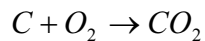
### Solución

Se determina la cantidad de moles que entra de cada sustancia, de acuerdo con  $n=m/M$  ( $n$ : nº de moles,  $m$ =masa y  $M$ =peso molecular).

Para el carbono,  $M_C=12$ ,  $n=360/12=30$  moles.

Para el combustible,  $M_C=12$ ,  $M_H=1$ ,  $n=5 \cdot 12 + 12 \cdot 1=72$

Las reacciones que ocurren en la combustión son las siguientes:



La cantidad de oxígeno requerido se obtiene de la reacción para el carbono: por cada mol de carbono se requiere 1 mol de  $O_2$ ; como ingresan 30 moles de carbono, se requieren 30 moles de oxígeno en la entrada para producir el  $CO_2$  en la salida. Al mismo tiempo, del balance del combustible, se determina que se necesitan 8 moles de  $O_2$  para producir los cinco moles de  $CO_2$  y los 6 moles de agua. Por lo tanto, se requieren 38 moles de oxígeno en la entrada. El aire necesario para obtener esos 38 moles está compuesto por aproximadamente un 80% de nitrógeno, por lo que ingresan  $38 \cdot (80/20)=152$  moles de nitrógeno. Los 152 moles de nitrógeno salen sin reaccionar. La concentración en base seca se calcula "ignorando" el agua que sale en los productos. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Sustancia	Entra	Consumo Reacción 1	Consumo Reacción 2	Forma	Forma	Salen	% global	% en base seca
C	30	30	-	-	-	0	0	-
$C_5H_{12}$	1	-	1	-	-	0	0	-
$O_2$	30+8	30	8	-	-	0	0	-
$N_2$	38(80/20)	-	-	-	-	152	78.8	81.3
$CO_2$	-	-	-	30	5	35	18.1	18.7
$H_2O$	-	-	-	-	6	6	3.1	-
					Total	197	100	100
					Total sin agua	187		

Concentración global: 78.8% de  $N_2$ , 18.1% de  $CO_2$  y 3.1% de  $H_2O$ .

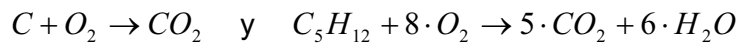
Concentración en base seca: 81.3% de  $N_2$  y 18.7% de  $CO_2$

## Combustión: balance de energía en la combustión de dos combustibles

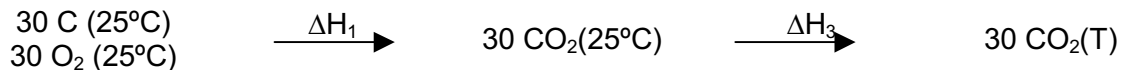
Carbón impregnado con un combustible ( $C_5H_{12}$ ) es quemado con aire, produciéndose gases quemados que contienen  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $N_2$  solamente. El carbón impregnado contiene  $C_5H_{12}$  en una proporción en peso de 72 gr de  $C_5H_{12}$  por cada 360 gr de carbón puro "seco". El carbón impregnado y el aire están inicialmente a  $25^\circ C$ . Determine la temperatura teórica de llama en los gases quemados. Tome los siguientes valores para  $C_p$ , constantes, en (cal/mol K)  $C_p(CO_2)=6$ ,  $C_p(H_2O)=10$  y  $C_p(N_2)=8$ .

### Solución

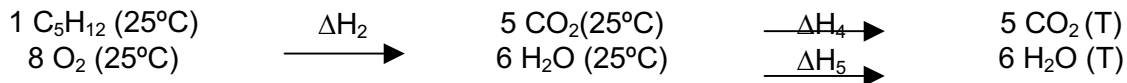
La 1ª Ley, considerando un proceso adiabático (ya que se pregunta por la temperatura teórica de llama), queda:  $\Delta H_{total} = 0$ . El peso molecular del  $C_5H_{12}$  es 72 y por lo tanto entra un mol. El peso molecular del C es 12 por lo que entran 360 moles. Las reacciones son:



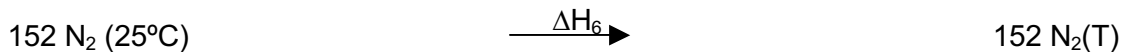
Para calcular  $\Delta H$  total, conviene representar el proceso de combustión de la siguiente manera. Para el carbono, primero se considera su reacción a  $25^\circ C$  y luego el calentamiento a la temperatura final T.



Para el combustible se realiza un procedimiento similar:



El nitrógeno ( $nN_2=38(80/20)=152$  moles) experimenta solo cambio físico:



Para cada uno de los procesos se tiene:

$$\Delta H_1=30 \cdot \Delta H^\circ_{\text{comb}}(C_{\text{sólido}})=30 \cdot 94(\text{Kcal/mol})=30 \cdot 94000 \text{ (cal/mol)}$$

$$\Delta H_2=1 \cdot \Delta H^\circ_{\text{comb}}(C_5H_{12, \text{ líquido}})=845(\text{Kcal/mol})=845000 \text{ (cal/mol)}$$

$$\Delta H_3=30 \cdot 10 \cdot (T-298) \text{ (cal/mol)}$$

$$\Delta H_4=5 \cdot 10 \cdot (T-298) \text{ (cal/mol)}$$

$$\Delta H_5=6 \cdot 10 \cdot (T-298) \text{ (cal/mol)}$$

$$\Delta H_6=152 \cdot 8 \cdot (T-298) \text{ (cal/mol)}$$

$$\text{Por lo tanto: } \Delta H_{\text{corrientes}}=0 \quad \text{y} \quad \Delta H_1+\Delta H_2+\Delta H_3+\Delta H_4+\Delta H_5+\Delta H_6=0$$

$$\text{Reemplazando: } (T-298)(300+50+60+1216)=30 \cdot 94000+845000 \cdot 1 \text{ y } T=2552 \text{ K}$$

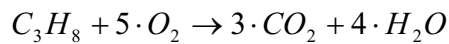
Temperatura teórica de llama = 2552 K

## Combustión: temperatura de rocío de gases de combustión

Se quema propano ( $C_3H_8$ ) con 100% de exceso de aire. La combustión es completa y la conversión es del 100%. El aire y el propano ingresan a  $25^\circ C$  y 1 atm. y los gases quemados son enfriados con un enfriador. ¿Cuál es la temperatura  $T_3$  más baja, en  $^\circ C$ , a la que se pueden enfriar los gases para que no condense agua (es decir, que no salga  $H_2O$  líquida del enfriador)?

### Solución

La temperatura más baja posible es aquella en la cual la presión parcial del agua a la salida es igual a la presión de saturación del agua (leída en una tabla de vapor). Por lo tanto, se debe encontrar la presión parcial del agua en los gases de la combustión. La reacción del combustible (combustión completa) es:



De acuerdo a la reacción se necesitan 5 moles de oxígeno para quemar completamente cada mol de combustible; como el aire tiene un exceso del 100%, entra el doble de aire (10 moles). También se ve que por cada mol de combustible se producen 3 moles de  $CO_2$  y 4 moles de  $H_2O$ . El balance de materia se resume en la siguiente "tabla del balance de materia":

Sustancia	Entra	Reacciona	Forma	Sale
$C_3H_8$	1	1	-	0
$O_2$	5+5	5	-	5
$N_2$	10 (79/21)	-	-	37.6
$CO_2$	-	-	3	3
$H_2O$	-	-	4	4
			Total	49.6

La presión parcial del agua se calcula como  $P_i = x_i \cdot P$ ,  $x_i = 4/49.6$

Y como  $P = 1$  atm., se tiene:

$$P_{\text{agua(salida)}} = 4 / 49.6 = 0.0806$$

Se busca esta presión en una tabla de vapor, encontrando finalmente que la temperatura para la cual esta presión corresponde a la presión de saturación es de  $41.6^\circ C$ .

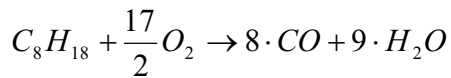
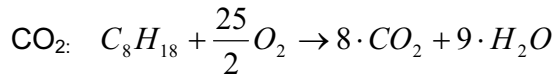
*T más baja a la que se pueden enfriar los gases para que no condense agua =  $41.6^\circ C$*

### Combustión: proceso de combustión incompleta (formación de CO)

En un motor en que se quema gasolina ( $C_8H_{18}$ ) se produce  $CO_2$  y  $CO$ . Dependiendo de la razón aire/combustible se formará mayor o menor cantidad de  $CO$  (que es un producto no deseado), pero la gasolina se combustiona en forma total. Determine la razón (moles aire/moles combustible) para que después de la combustión la razón (moles  $CO_2$ /moles  $CO$ ) sea 9.0 y la concentración de  $CO$  sea del 1%.

#### Solución

Se escriben las reacciones químicas que tienen lugar en el proceso:



No se conoce la cantidad de aire (que se designa por  $x$ ) que ingresa a la reacción. La cantidad de combustible es dividida en dos porciones, una que produce  $CO_2$  ("y") y otra,  $(1-y)$  que es la que produce  $CO$ . Así, la cantidad de oxígeno que sale de la reacción es igual a la que entra menos la que es consumida en ambas reacciones. En el caso del nitrógeno se supone que éste no reacciona con el combustible.

La tabla del balance de materia es:

Sustancia	Ingresa	Reacciona 1	Reacciona 2	Forma 1	Forma 2	Salen
$C_8H_{18}$	1	y	1-y	-	-	0
$O_2$	$0.21 \cdot x$	$12.5 \cdot y$	$8.5 \cdot y$	-	-	$0.21 \cdot x - 12.5 \cdot y - 8.5 \cdot (1-y)$
$N_2$	$0.79 \cdot x$		-	-	-	$0.79 \cdot x$
$CO_2$	-	-	-	$8 \cdot y$	-	$8 \cdot y$
$CO$	-	-	-	-	$8 \cdot (1-y)$	$8 \cdot (1-y)$
$H_2O$	-	-	-	$9 \cdot y$	$9 \cdot (1-y)$	9
					Total	$0.21 \cdot x - 12.5 \cdot y - 8.5 \cdot (1-y) + 8 + 9$

A continuación, del problema se sabe que:  $\frac{n_{CO_2}}{n_{tot}} = 0.01$  ,  $\frac{n_{CO_2}}{n_{CO}} = 9$

De la tabla se obtiene:  $\frac{n_{CO_2}}{n_{CO}} = \frac{8 \cdot y}{8 \cdot (1-y)} = 9$  y despejando  $y = 0.9$

Reemplazando y en la expresión:  $\frac{8(1-y)}{0.21x - 12.5y - 8.5y + 17} = 0.001$

se obtiene:  $x = 405.476$

Como los cálculos se efectuaron sobre una base de 1 mol de combustible...

razón aire/combustible =  $x = 405.5$