



TEMA 4: BALANCES TÉRMICOS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN

ACTIVIDADES PRÁCTICAS (ENUNCIADOS)

Blanca M^a Caballero Iglesias
Maite de Blas Martín

Escuela de Ingeniería de Bilbao
Ingeniería Química y del Medio Ambiente

BALANCES TÉRMICOS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN

ENUNCIADOS DE LAS ACTIVIDADES PRÁCTICAS

I) Problemas numéricos de balances térmicos:

Problemas 4.1 y 4.2

II) Problemas numéricos de balances térmicos:

Problemas 4.3.1 y 4.3.2



Imagen publicada en Pixabay bajo dominio público [\[1\]](#)

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. *Para calentar un horno en una refinería, se utiliza como combustible un fuel residual con la siguiente composición (% peso): 0,5 % H₂O, 87 % C, 10 % H, 1,5 % S, 1% sedimentos.*

a) *Determinar, en condiciones normales, el aire seco teóricamente necesario para lograr la combustión completa de 1 kg de este combustible, así como el volumen de los gases de combustión secos producidos.*

b) *Para analizar los gases de la combustión industrial del fuel anterior, se colocó un sensor de oxígeno en la salida del horno de la refinería, que indicó que el contenido de O₂ en los gases era del 4,4 %. Determinar el exceso de aire con el que trabaja la instalación (suponiendo que la combustión es completa) y los volúmenes de aire y gases producidos por kg de fuel.*

c) *Calcular el aire ambiental necesario para realizar la combustión de 1 kg de fuel en las condiciones señaladas en el apartado b) si las condiciones ambientales son $P = 750 \text{ mm Hg}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, una humedad relativa del aire del 50 %. Dato: $P_{v, \text{H}_2\text{O}, 25^\circ\text{C}} = 23,78 \text{ mm Hg}$.*

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. (continuación)

d) Calcular el volumen de gases producidos en la combustión industrial en las condiciones señaladas, si se inyectan 0,4 kg vapor/kg fuel quemado para la pulverización del combustible.

- Calcular la composición de los gases de combustión.
- Indicar cuál sería el resultado del análisis de estos gases de combustión en un aparato Orsat.

e) Determinar el PCS del fuel estudiado, sabiendo que su densidad relativa a 25 °C es $d_r = 0,965$, y su PCI = $12925 - 3200 d_r - 70$ (%S). Suponer que el calor de condensación del vapor de agua asciende a 598,3 kcal/kg vapor.

f) Determinar la temperatura real de la llama en la combustión estudiada del fuel anterior, si el rendimiento pirométrico es del 70%.

Datos. Calor específico de los gases de combustión a la temperatura adiabática: $C_m = 0,390$ kcal/m³N °C, calor específico del combustible precalentado a 100 °C: $C_f = 0,440$ kcal/kg °C, calor específico del aire: $C_a = 0,310$ kcal/m³N °C, entalpía del vapor de pulverización: $H_v = 660$ kcal/kg.

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. (continuación) Considerar el calor aportado por el aire de combustión a temperatura ambiente.

g) Calcular el rendimiento térmico y el rendimiento de combustión del horno, si los gases abandonan la chimenea a 425 °C, y las pérdidas térmicas por los demás conceptos representan el 3 % del PCI del fuel quemado, estableciendo 100 kg de combustible quemado como base para el cálculo.

h) Realizar el balance térmico de la operación, refiriéndose a 100 kg de combustible y representarlo gráficamente por medio de un diagrama de Sankey.

Datos: Calor específico medio de los gases de combustión: $C_h=0,345$ kcal/m³N°C, calor específico del fuel quemado: $C_f=0,440$ kcal/kg °C, calor específico del aire de combustión: $C_a=0,310$ kcal/m³N°C. Se supondrá que el fuel se precalienta a 100 °C y el aire se insufla a temperatura ambiente.

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. *Se dispone de un gas combustible con la siguiente composición (% volumen): 45 % CO, 50 % H₂, 5 % CO₂.*

a) *Determinar, suponiendo una combustión teórica, el volumen de aire teórico y gases teóricos en condiciones normales, así como el volumen de CO₂ y de H₂O que se obtienen en las mismas condiciones.*

b) *Dicho gas se quema en un horno, y al analizar los gases de combustión secos se obtuvo la siguiente composición volumétrica: 15 % CO₂, 7 % O₂ (combustión completa). Determinar el exceso de aire con el que está trabajando la instalación, el aire empleado y el volumen de gases producidos, referido a 1 m³N de gas quemado.*

c) *Determinar el aire ambiental utilizado en la combustión anterior, suponiendo que las condiciones ambientales fueran: T = 25 °C, humedad relativa = 80 %, P = 755 mm Hg. Determinar asimismo el volumen total de gases de combustión producidos ($P_{v, H_2O, 25^\circ C} = 23,78 \text{ mm Hg}$).*

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. (continuación)

d) ¿Cuáles serán el PCS y el PCI del gas anterior, si los PCS del CO y del H₂ son 3.030 y 3.060 kcal/m³N respectivamente, y el calor de condensación del vapor de agua asciende a 598,3 kcal/kg?

e) ¿Cuál será la temperatura teórica alcanzada por la llama de este gas en la combustión realizada, suponiendo que el calor específico medio de los gases de combustión fuera $C_m = 0,40$ kcal/m³N °C?

f) El gas se quema en un horno en las condiciones establecidas. Los gases producidos abandonan el horno a 1000 °C y las pérdidas en el mismo son el 5% del calor aportado por el combustible. ¿Cuál es el rendimiento de la combustión? ¿Y el rendimiento térmico del proceso? (Tomar el calor específico medio de los gases de combustión como 0,38 kcal/m³N °C).

g) Determinar los kg de vapor de agua saturado a 10 kg/cm² ($H_v = 664$ kcal/kg) que podrían obtenerse por cada 1000 m³N de gas quemado, si se instala una caldera de recuperación a la salida del horno para aprovechar el calor de los gases de combustión, que saldrían de la misma 150 °C por encima de su temperatura de rocío.

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. (continuación)

El rendimiento de la caldera es del 95% (el 95% del calor cedido por los gases de combustión se aprovecha para producir vapor) ¿Cuál es el nuevo rendimiento térmico del proceso?

Dato: tomar $0,38 \text{ kcal/m}^3\text{N } ^\circ\text{C}$ como calor específico medio de los gases.

h) Realizar el balance térmico del proceso y representar el diagrama de Sankey (para $1 \text{ m}^3\text{N}$ de combustible y el apartado anterior).

**Nota: despreciar el calor aportado por las corrientes a temperatura ambiente.*

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1. (Combustión) En un horno de fundición de acero se quema gas natural, cuya composición (% en volumen) es la siguiente: $\text{CH}_4=87,2\%$, $\text{C}_2\text{H}_6=5,9\%$, $\text{C}_3\text{H}_8=3,0\%$, $\text{N}_2=2,7\%$, $\text{CO}_2=1,2\%$

a) Determinar, en condiciones normales, el volumen de aire necesario y de gases de combustión secos producidos en la combustión teórica de $1 \text{ m}^3\text{N}$ de dicho gas

b) Calcular, en condiciones normales, el exceso de aire con el que se lleva a cabo la combustión y el volumen de gases de combustión producidos, por $1 \text{ m}^3\text{N}$ de gas quemado, cuando el aparato Orsat indica la siguiente composición de gases (% en volumen): $\text{CO}_2=7,3 \%$, $\text{CO}=0,5 \%$ y $\text{O}_2=7,2 \%$

c) Hallar el volumen de aire ambiental utilizado en la combustión si las condiciones ambientales son: 70% de humedad relativa, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 745 mm Hg ($P_{v, \text{H}_2\text{O}}, 25^\circ\text{C} = 23,78 \text{ mm Hg}$)

d) Calcular el volumen de gases de combustión producidos en la combustión del apartado anterior. Hallar también la composición de dichos gases.

e) Calcular la temperatura de rocío de los gases de combustión.

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1. (continuación)

- f) Calcular el poder calorífico superior e inferior del gas natural quemado.*
- g) Determinar la temperatura adiabática de llama, si el calor específico de los gases de combustión varía con la temperatura según la siguiente expresión: $C_h = 0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T$ kcal/m³N·°C, donde T está expresada en °C*

Datos: calor latente de condensación del vapor del agua = 598,3 kcal/kg agua; $PCS_{CH_4} = 9530$ kcal/m³N; $PCS_{C_2H_6} = 16700$ kcal/m³N; $PCS_{C_3H_8} = 23770$ kcal/m³N.

PROBLEMA 4.3.2. (Balance térmico). Se quema el gas natural mencionado en las condiciones señaladas en el problema anterior para la fundición de 11 kg de acero a 1200 °C por cada m³N de gas natural quemado. Para incrementar la temperatura de llama se precalienta el aire de combustión, en condiciones normales, a 250 °C por intercambio de calor con los gases procedentes del horno de fundición en un intercambiador de calor (pérdidas de calor 2 % del PCI).

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.2. (continuación) El calor específico del acero es $0,175 \text{ kcal/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$, las pérdidas por radiación equivalen al 8% del poder calorífico inferior del gas quemado y el calor aportado por las corrientes a temperatura ambiente pueden considerarse despreciables:

- a) Calcular la temperatura de los gases a la salida del horno de fundición, el rendimiento de la combustión y el rendimiento térmico de la instalación.
- b) Se aprovecha el calor residual de los gases de combustión en una caldera, para producir vapor de agua saturado a 10 kg/cm^2 ($H_v = 664 \text{ kcal/kg}$). Los gases se enfrían hasta una temperatura 200°C superior a su punto de rocío. El rendimiento de la caldera es del 85 % respecto del calor intercambiado en el proceso.
- c) Calcular el rendimiento térmico de la instalación para el apartado b), realizar el balance térmico y representarlo mediante un diagrama de Sankey.

DATOS: Tablas: calores específicos de gases y propiedades termodinámicas del agua. Despreciar el calor aportado por las corrientes a temperatura ambiente. El calor específico de los gases de combustión en función de la temperatura: $C_m = 0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T \text{ kcal/m}^3\text{N}\cdot^{\circ}\text{C}$, donde T está expresada en $^{\circ}\text{C}$.