



TEMA 4

BALANCES DE MATERIA

INDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. LEY DE CONSERVACIÓN DE MATERIA
 - 2.1. BASES DE CÁLCULO
 - 2.2. CONSIDERACIONES ADICIONALES
3. EJEMPLOS RESUELTOS
4. RELACIÓN DE PROBLEMAS PROPUESTOS



1. INTRODUCCIÓN.

Las leyes o principios fundamentales de la Ingeniería Química son sencillos en su forma y enunciado, pero a veces su aplicación a situaciones prácticas no resulta fácil, requiriéndose mucha práctica y entrenamiento.

En este tema nos ocuparemos de la ley de conservación de la materia. Un balance de materia es el cómputo exacto de las materias que entran, salen, se acumulan, aparecen y desaparecen en una operación básica o en un proceso industrial.

Las principales aplicaciones de los balances son:

- Estudio de las Operaciones Básicas
- Proyecto de Plantas Químicas
- Comprobación de su funcionamiento (fugas)

2. LEY DE CONSERVACIÓN DE MATERIA

Supongamos un sistema abierto formado por una conducción de sección variable (Figura 4.1). En este sistema sólo existe intercambio de fluido con el exterior a través de las secciones S_1 y S_2 , pero puede intercambiar calor con el exterior e incluso se prevé la presencia de una máquina capaz de aportar o eliminar energía mecánica del sistema.

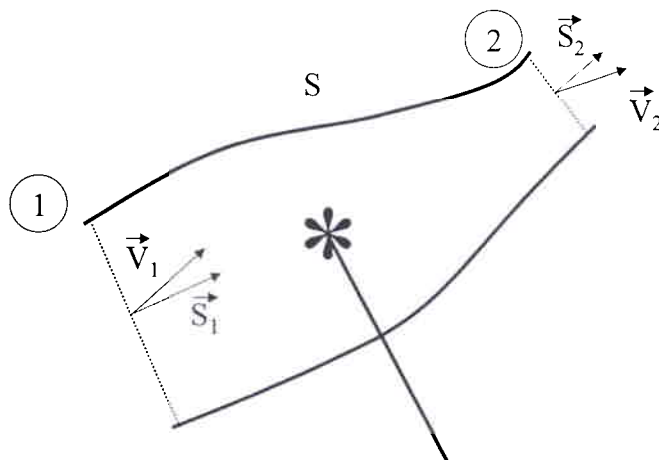


Figura 4.1. Sistema formado por una conducción de sección variable.

Sea φ_i la concentración másica del componente i (kg/m^3); m_{iT} , la masa total de i en el sistema (kg); n_{i1} y n_{i2} , los flujos medios del componente i a través de las superficies S_1 y S_2 debidos a diferencias de concentración ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) y r_{im} , la masa del componente i producida por unidad de volumen y de tiempo ($\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$).

Un balance de materia para el componente i en el sistema tendrá los siguientes términos:

$$[\text{ENTRADA}] + [\text{APARICIÓN POR REACCIÓN}] = [\text{SALIDA}] + [\text{ACUMULACIÓN}] \quad [1]$$

es decir, lo que entra al sistema del componente i unido a la masa de i que aparece por reacciones químicas en el interior del sistema, debe salir del mismo, o de lo contrario se está acumulando en su interior. Esta ecuación puede describirse como:

$$[\text{ACUMULACIÓN}] = [\text{ENTRADA} - \text{SALIDA}] + [\text{APARICIÓN POR REACCIÓN}] \quad [2]$$

sustituyendo los valores correspondientes al sistema considerado:

$$\frac{d}{dt}(m_{iT}) = \underbrace{[\rho_{i1}(V_1S_1) - \rho_{i2}(V_2S_2)]}_{\text{Convección Forzada}} + \underbrace{[n_{i1}S_1 + n_{is}S - n_{i2}S_2]}_{\text{Convección natural}} + r_{im}V \quad [3]$$

Despreciando la convección natural frente a la convección forzada y suponiendo que el componente i no puede incorporarse o eliminarse a través de las paredes del sistema ($n_{is}S=0$):

$$\frac{d}{dt}(m_{iT}) = [\rho_{i1}(V_1S_1) - \rho_{i2}(V_2S_2)] + r_{im}V \quad [4]$$

y para régimen estacionario (las propiedades no varían con el tiempo, $d/dt = 0$):

$$\rho_{i1}(V_1S_1) + r_{im}V = \rho_{i2}(V_2S_2) \quad [5]$$

Sumando las ecuaciones [4] o [5] para todos los componentes de la mezcla, se llega al balance de materia total, teniendo antes en cuenta que:

$$\sum_{i=1}^c m_{iT} = M_T \quad \sum_{i=1}^c \varphi_{iT} = \varphi \quad \sum_{i=1}^c r_{im} = 0 \quad [6]$$

Así, de la ecuación [4] se deduce:

$$\frac{d}{dt}(m_T) = [\rho_1(V_1S_1) - \rho_2(V_2S_2)] \quad [7]$$

y para régimen estacionario:

$$\rho_1(V_1S_1) = \rho_2(V_2S_2) = m = \text{caudal másico} \quad [8]$$

ecuaciones representativas de los balances de materia totales para régimen estacionario y no estacionario respectivamente.

Todas estas ecuaciones podrían ser expresadas en unidades molares. Los resultados finales serían muy parecidos, con la salvedad de que el sumatorio $\sum_{i=1}^c R_{im}$ no tiene por qué ser cero al estar trabajando en unidades molares.

2.1. BASE DE CÁLCULO.

Para plantear correctamente un balance de materia, es necesario elegir una base de cálculo y referir a ella todos los términos del balance. Del mayor o menor acierto de su elección dependerá la menor o mayor complejidad de los cálculos posteriores. En orden de preferencia decreciente, debe elegirse como norma general como base de cálculo:

- Una determinada cantidad de uno de los componentes de la mezcla que no sufra reacción química y que entre y salga del sistema con el mismo caudal y formando parte de la misma corriente.
- Una determinada cantidad de uno de las corrientes de entrada o salida del sistema: puede elegirse aquella de la que se conocen el mayor número de datos.
- Un determinado espacio de tiempo.

2.2. CONSIDERACIONES ADICIONALES.

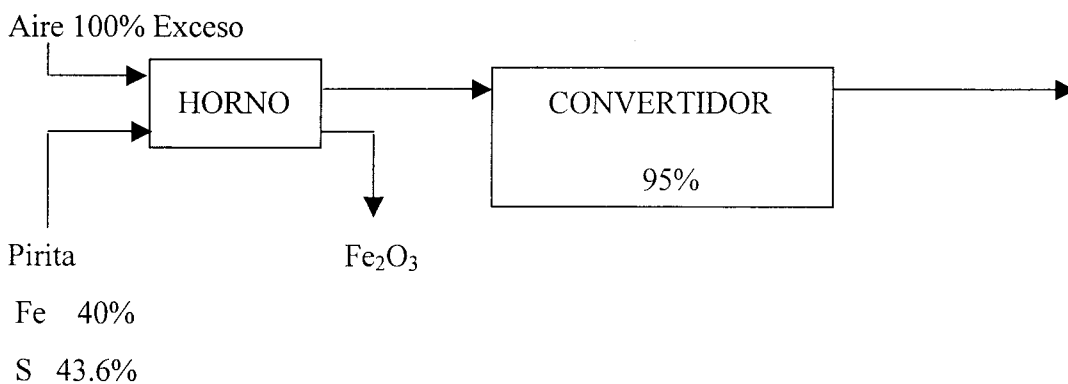
Los balances de materia no son sólo aplicables a la materia total de un sistema y a sus distintos componentes, sino también a los distintos elementos químicos que integran estos, proporcionando por tanto numerosas ecuaciones. Debe tenerse en cuenta pues que las ecuaciones que se utilicen sean independientes, para poder evaluar las distintas incógnitas.

3. EJEMPLOS DE INTERÉS.

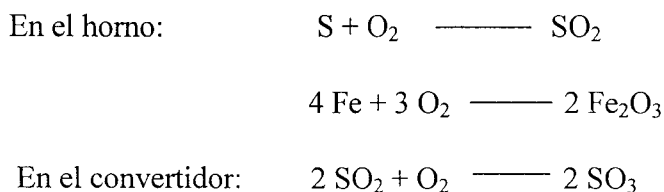
PROBLEMA 3.1

Una pirita de hierro tiene la siguiente composición en peso: Fe 40.0%; S 43.6%; 16.4% material mineral inerte. Esta pirita se quema con un 100% de exceso de aire sobre la cantidad requerida para quemar todo el hierro a Fe_2O_3 y todo el azufre a SO_2 . Supóngase que no se forma nada de SO_3 en el horno. Los gases formados pasan al convertidor, donde se oxida el 95% de SO_2 a SO_3 . Calcular la composición de los gases que entraron y que abandonaron el convertidor.

SOLUCION:



Reacciones



Base de cálculo: 100 Kg de piritita.

ENTRADAS AL HORNO

Fe que entra en el horno $40 \text{ Kg} = 40/55.85 \text{ Kmoles} = 0.715 \text{ Kmoles}$

S que entra en el horno $43.6 \text{ Kg} = 43.6/32 = 1.362 \text{ Kmoles}$

O₂ necesario (para la formación de Fe₂O₃) = $(0.715)(3)/4 = 0.536 \text{ Kmoles}$ (estequiométrico)

O₂ necesario (para la formación de SO₂) = 1.362 Kmoles

O₂ total necesario = $1.362 + 0.5363 = 1.898 \text{ Kmoles}$

O₂ que entra en el aire $(1.8983)(2) = 3.797 \text{ Kmoles}$

N₂ que entra en el aire $(3.7966)(79)/21 = 14.28 \text{ Kmoles}$

SALIDA DEL HORNO

SO₂ formado en el horno = 1.362 Kmoles

O₂ que sale del horno (sin reaccionar) = 1.8983 Kmoles

N₂ que sale del horno = 14.28 Kmoles

Total de gases que salen del horno = $1.362 + 1.898 + 14.28 = 17.54 \text{ Kmoles}$

COMPOSICIÓN DE LOS GASES QUE ENTRAN EN EL CONVERTIDOR:

$$\% \text{ SO}_2 = (1.362)(100)/17.54 = 7.77$$

$$\% \text{ O}_2 = (1.898)(100)/17.54 = 10.83$$

$$\% \text{ N}_2 = (14.28)(100)/17.54 = 81.40$$

CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DE LOS GASES QUE SALEN DEL CONVERTIDOR:

SO₃ formado en el convertidor $(0.95)(1.362) = 1.2939 \text{ Kmoles}$.

SO₂ sin reaccionar = $(0.05)(1.362) = 0.0681 \text{ Kmoles}$

O₂ consumido en el convertidor = $(1.362)(0.95)/2 = 0.64695 \text{ Kmoles}$

O₂ sin reaccionar = $1.898 - 0.6495 = 1.25105 \text{ Kmoles}$

N_2 que pasa por el convertidor sin reaccionar = 14.28 Kmoles

Total de gases que salen del convertidor: $1.2939+0.0681+1.25105+14.28 = 16.89305$ Kmoles

$$\% SO_3 = (1.2939)(100)/16.89305 = 7.66$$

$$\% SO_2 = (0.0681)(100)/16.89305 = 0.403$$

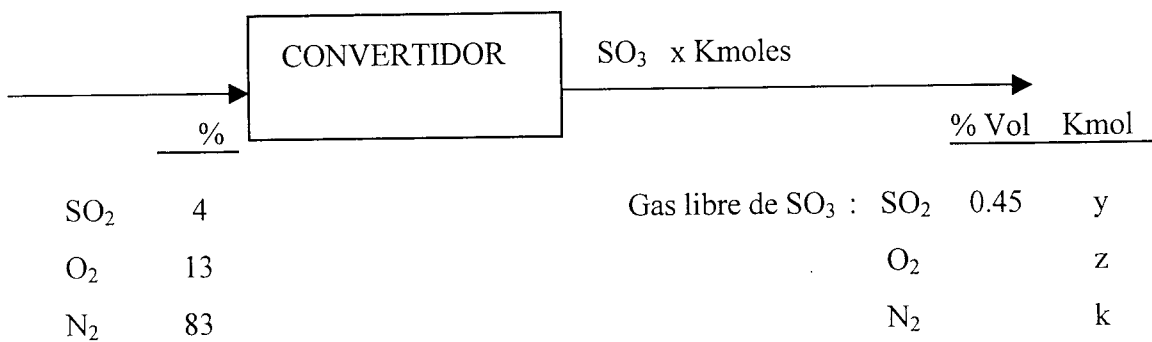
$$\% O_2 = (1.25105)(100)/16.89305 = 7.406$$

$$\% N_2 = (14.28)(100)/16.89305 = 84.53$$

PROBLEMA 3. 2

El análisis del gas que entra en el convertidor secundario de una planta de ácido sulfúrico de contacto es 4 % SO_2 , 13 % O_2 y 83 % N_2 (en volumen). El gas que sale del convertidor contiene 0.45 % SO_2 en base libre de SO_3 (en volumen). Calcular el porcentaje del SO_2 que se convierte en SO_3 .

SOLUCION:



Base de cálculo: 100 Kmoles de gas que entra en el convertidor.

x = Kmoles de SO_3

y = Kmoles de SO_2 en gas que sale del convertidor

z = Kmoles de O_2 en gas que sale del convertidor

k = Kmoles de N_2 en gas que sale del convertidor

Balance de N₂

Entra 83 Kmoles

Sale k Kmoles

$$83 = k \quad (1)$$

Balance de S.

Entra 4 en gas que entra al convertidor

Sale x en el SO₃

y en el SO₂ que sale del convertidor.

$$4 = x + y \quad (2)$$

Balance de O

Entra (2)(4)+(2)(13) en gas que entra

Sale (3)(x) en el SO₃

(2)(y) en SO₂ que sale

(2)(z) en O₂ que sale.

$$34 = 3x+2y+2z \quad (3)$$

% del SO₂ en el gas que sale libre de SO₃

SO₂ y

O₂ z

N₂ k

Total y + z + k

$$\% \text{SO}_2 = (y) 100/(y + z + k)$$

Sustituyendo % SO₂ = 0.45%

$$0.45 = (y)100/(y+ z+ k) \quad (4)$$

Resolviendo (1) , (2), (3) y (4).

$$x = 3.574, y = 0.426, z = 11.213, k = 83.000$$

Conversión del SO_2 :

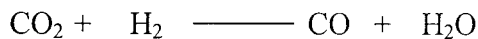
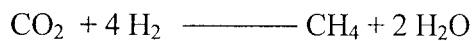
$$\text{SO}_2 \text{ convertido} = \text{SO}_3 \text{ formado} = 3.574 \text{ Kmoles}$$

$$\text{SO}_2 \text{ que entra en el reactor} = 4 \text{ Kmoles}$$

$$\% \text{ conversión del } \text{SO}_2 = (3.574)100/(4) = 89.35\%$$

PROBLEMA 3.3

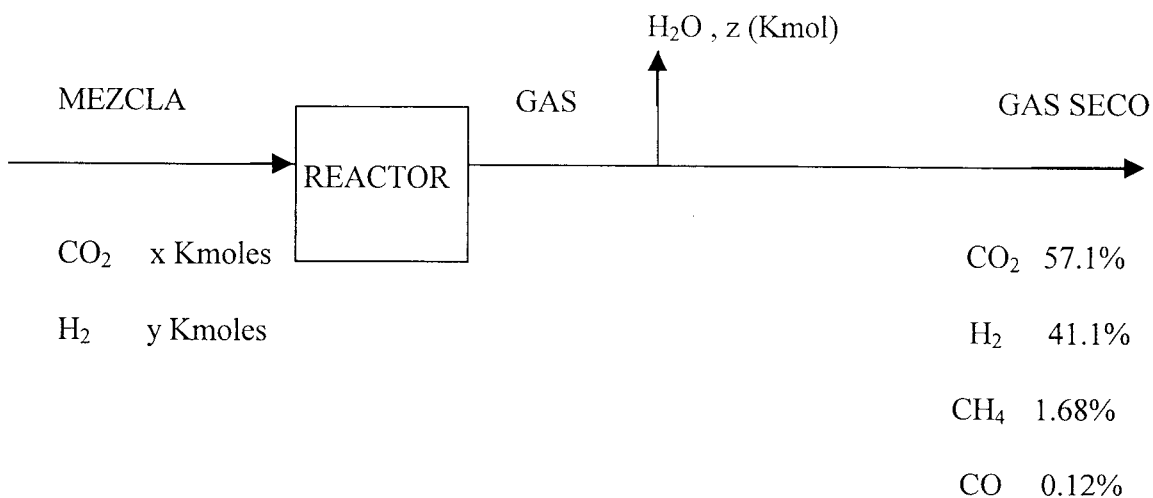
Una mezcla de dióxido de carbono puro e hidrógeno se pasa por un catalizador de níquel. La temperatura del catalizador es 315°C y la presión del reactor 20.1 Atm . El análisis de los gases que salen del reactor es CO_2 57.1%, H_2 41.1%, CH_4 1.68% y CO 0.12% (en volumen) en base seca. Las reacciones que tienen lugar en el reactor son:



Determinar:

- la conversión de CO_2
- la selectividad hacia CH_4
- la composición de la alimentación.

SOLUCION:



Base de cálculo: 100 Kmoles de gas seco

x = Kmoles de CO_2 en la mezcla

y = Kmoles de H_2 en la mezcla

z = Kmoles de H_2O en gas

Balance de C

Entra x en la mezcla

Sale $(57.1+1.68+0.12)$ en gas seco

$$\underline{x = 58.90 \text{ Kmoles. de } \text{CO}_2 \text{ en mezcla}} \quad (1)$$

Balance de H_2

Entra y en mezcla.

Sale $(41.1)+(2)(1.68)$ en gas seco.

z en H_2O

$$\underline{y = 44.46 + z} \quad (2)$$

Balance de O

Entra $2x$ en mezcla.

Sale $(2)(57.1)+(0.12)$ en gas seco

z en H_2O .

$$\underline{2x = 114.32 + z} \quad (3)$$

Resolviendo (1), (2) y (3) :

$$x = 58.90$$

$$y = 47.94$$

$$z = 3.48$$

Cálculo de la conversión del CO₂

% conversión = (Kmoles CO₂ que reacc)/100/(moles CO₂ que entran al reactor) =

$$(58.90-57.1)*100/(58.90) = 3.06 \%$$

a) % conversión de CO₂ = 3.06%

Cálculo de la selectividad hacia CH₄

% selec. CH₄ = (Kmoles CO₂ que pasan a CH₄)/100/(Kmoles CO₂ que reaccionan) =

$$(1.68)/100/(58.9-57.1) = 93.33 \%$$

b) % selectividad CH₄ = 93.33 %

Composición de la alimentación

CO ₂	58.90 Kmoles
H ₂	47.94 Kmoles
Total	106.84 Kmoles

Pasando a porcentaje,

$$\text{CO}_2 = (58.90)(100)/(106.84) = 55.13 \%$$

$$\text{H}_2 = (47.94)(100)/(106.84) = 44.87 \%$$

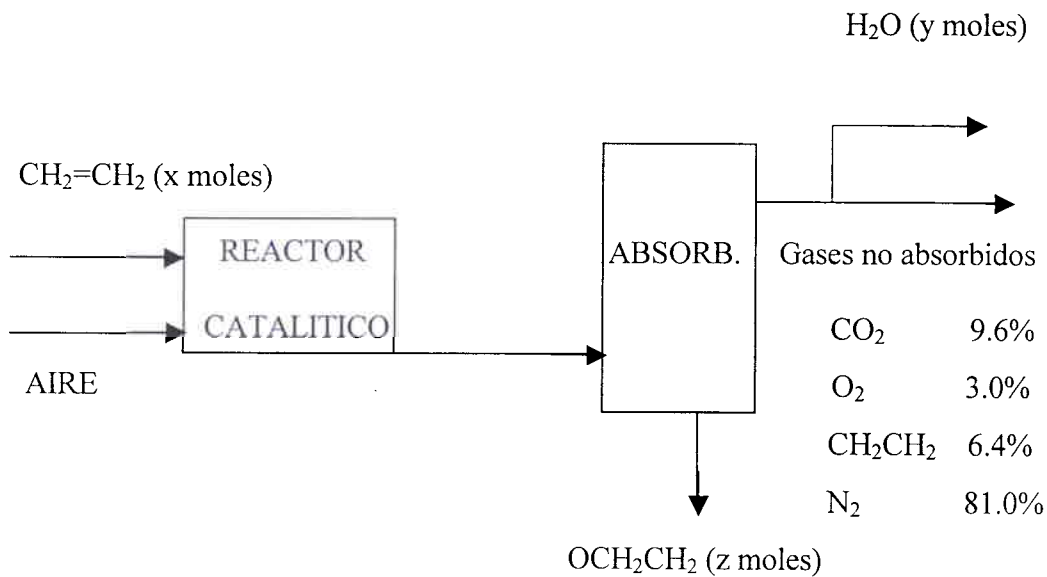
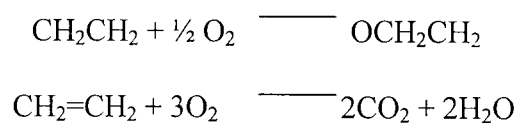
c) Composición de la alimentación:

CO₂	55.13%
H₂	44.87%

PROBLEMA 3.4

En una industria se produce óxido de etileno mediante oxidación del etileno con aire en presencia de un catalizador. Si las condiciones se controlan cuidadosamente, una fracción del etileno se convierte en óxido de etileno, mientras que parte de etileno queda sin reaccionar y otra parte sufre una oxidación total a CO_2 y H_2O . La formación de CO es despreciable. Los gases después de abandonar el reactor pasan a través de un absorbente en el que el óxido de etileno queda retenido. Un análisis de Orsat ordinario y de los gases que abandonan el absorbente da: 9.6% de CO_2 ; 3% O_2 ; y 6.4% $\text{CH}_2=\text{CH}_2$.

Del etileno que entra en el reactor, ¿qué porcentaje se convierte en óxido de etileno? Calcula también la selectividad de esta planta. El sistema reacciona en régimen continuo y estacionario.

SOLUCION:Reacciones:

Base de cálculo: 100 moles de gas no absorbido.

Balance de N₂:

N₂ que sale en los gases 81 moles

N₂ que entra en el aire 81 moles

O₂ que entra en el aire $(81)(21)/79 = 21.53$ moles.

Balance de O₂:

O₂ que entra en el aire = 21.53 moles.

O₂ en el gas no absorbido $(9.6+3.0)$ = 12.6 moles

O₂ en el agua = $y/2$ moles

O₂ en el óxido de acetileno formado = $z/2$ moles

$$21.53 = 12.6 + y/2 + z/2 \quad (1)$$

Balance de C:

C que entra en el etileno = $2x$

C que sale en el óxido de etileno formado = $2z$

C que sale en el gas no absorbido = $9.6+(6.4)(2) = 22.4$

$$2x = 2z + 22.4 \quad (2)$$

Balance de H:

H que entra en el etileno 4x

H que sale en el óxido de etileno 4z

H que sale en el agua 2y

H que sale en el gas no absorbido $(6.4)(4) = 25.6$

$$4x = 4z + 2y + 25.6 \quad (3)$$

Resolviendo (1), (2) y (3):

$$z = 8.26 \text{ moles}$$

$$x = 19.46 \text{ moles}$$

Etileno que entra en el reactor 19.46 moles

Etileno convertido en óxido de etileno 8.26 moles

% de etileno convertido en óxido de etileno: $(8.26)100/(19.46) = 42.4 \%$

Etileno convertido en óxido de etileno = 8.26 moles

Etileno convertido en otros productos $(9.6)/2 = 4.8$ moles

Etileno total reaccionado: = 13.06 moles

$$\% \text{ selectividad} = 8.26/13.06 = 63.2 \%$$

PROBLEMA 3.5

Un gas de combustión tiene la siguiente composición que se sabe que es correcta:

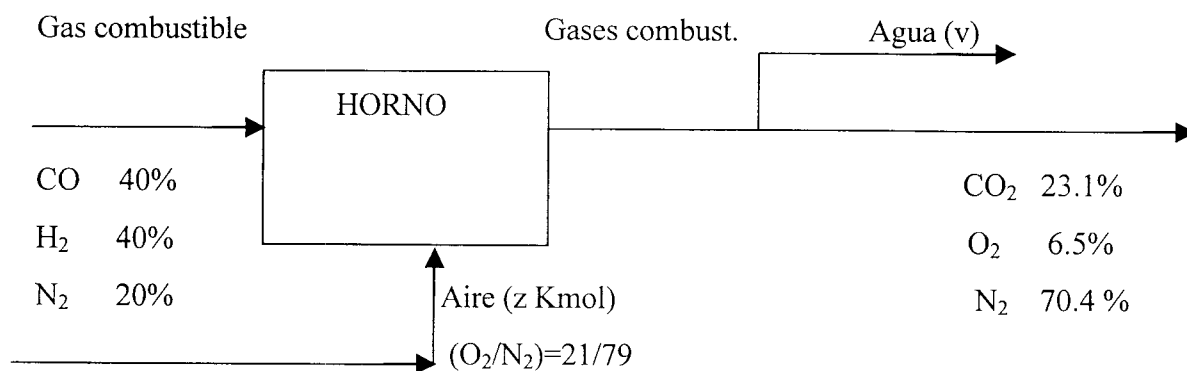
CO: 40.0%; H₂: 40.0%; N₂: 20.0%

Este gas se quema con exactamente 50 % de exceso de aire, produciendo una combustión completa. El análisis presentado de los gases de combustión (en base seca), da los siguientes valores:

CO₂ = 23.1%; O₂ = 6.5%; N₂ = 70.4%; CO = trazas

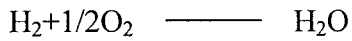
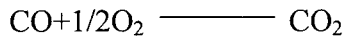
Se sospecha que este análisis es incorrecto. Determinarlo.

SOLUCION:



Base de cálculo: 100 Kmoles de gas combustible

Cálculo del aire teóricamente necesario:



$$\text{Kmoles de O}_2 \text{ para quemar el CO} = (40)(1/2) = 20 \text{ Kmol}$$

$$\text{Kmoles de O}_2 \text{ para quemar el H}_2 = (40)(1/2) = 20 \text{ Kmol}$$

$$\text{Total} = 40 \text{ Kmol}$$

$$\text{O}_2 \text{ que entra en aire con 50\% exceso} = (1.5)(40) = 60 \text{ Kmoles}$$

Análisis (en base seca) de los gases que salen del horno):

$$\text{CO}_2 = 40 \text{ Kmoles}$$

$$\text{O}_2 \text{ libre} = 60 - 40 = 20 \text{ Kmoles}$$

$$\text{N}_2 \text{ que entra en el gas} = 20 \text{ Kmoles}$$

$$\text{N}_2 \text{ que entra en el aire} = (60/21)(79) = 225.71 \text{ Kmoles}$$

$$\text{Total de gases} = 305.71 \text{ Kmoles}$$

$$\text{CO}_2 = (40/305.71)(100) = 13.08\%$$

$$\text{O}_2 = (20/305.71)(100) = 6.54 \%$$

$$\text{N}_2 = (245.71/305.71)(100) = 80.37\%$$

Como se sospechaba el análisis dado de los gases de combustión es incorrecto.

4. RELACIÓN DE PROBLEMAS DE BALANCES DE MATERIA PROPUESTOS.

PROBLEMA 4.1. En una planta de amoníaco se producen 800 Tm/día a partir de una mezcla de nitrógeno e hidrógeno en relación molar 1:3, que contiene 0.2 moles de argón por cada 100 moles de mezcla. En el reactor se alcanza una conversión del 25% para el nitrógeno. El amoníaco producido se condensa y los gases que no han reaccionado se recirculan al reactor. La concentración de argón a la entrada de éste, una vez mezcladas las corrientes de reciclo y alimento fresco, no debe ser superior al 4%.

Calcular:

- El caudal de alimento fresco
- El caudal de la corriente de recirculación.
- El caudal de la corriente de purga.

PROBLEMA 4.2. La composición de un propano industrial es:

- 1% de CH_4
- 75% de C_3H_8
- 22% de C_4H_{10}
- 2% de CO_2

Si se quema completamente con un exceso del 25% de aire, calcular:

- Cantidad de aire utilizada
- Composición de los gases de combustión en base húmeda y seca.
- La composición de los gases de salida si la combustión se realiza con oxígeno de tonelaje (15% N_2 , 85 % O_2)

PROBLEMA 4.3. Un tanque cilíndrico de 0.5 m de radio y 1.5 m de altura se encuentra inicialmente lleno de agua. En un instante dado se comienza a introducir agua en el tanque con un caudal constante de $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ y se abre un válvula en su base que deja salir un caudal proporcional a la altura de agua en el tanque:

$$Q = 2 \cdot 10^{-3} h$$

Estando Q expresado en metros cúbicos por segundo y h en metros.

- a) Determinar:
- i) la altura del tanque al cabo de 10 minutos
 - ii) la altura que alcanzará el líquido en el tanque si se alcanza el régimen estacionario.
- b) Repetir el apartado a) si para el caudal de descarga se cumple la ecuación:

$$Q = 3 \cdot 10^{-3} h^{0.5}$$

- c) Repetir el apartado b) suponiendo que no se introduce agua en el tanque.