

TIM 46 - Tecnólogos Mecánicos
Instalaciones de Gases Combustibles
Curso 2024 – Práctico I

Ejercicio 1

Se considera una fuga de 1 gramo por minuto de supergas, en un recinto cerrado de 20 m³ de volumen. Estimar en cuánto tiempo se formará una atmósfera explosiva.

Resp.: 918 min = 15.3 hr

Ejercicio 2

Se considera la mezcla gaseosa de vapor de propano, hidrógeno molecular y aire atmosférico, con la siguiente composición volumétrica: [C₃H₈] = 38 %, [H₂] = 53 %, [aire] = 9 %

Determinar los siguientes parámetros de la mezcla:

- a) Masa molecular y densidad relativa al aire.
- b) Poder calorífico superior, a presión y temperatura estándar (T₀ = 15 °C = 288 K y P₀ = 1 atm = 1.01325 bara)
- c) Densidad y volumen específico a:
 - i. P = P₀, T = T₀
 - ii. P = P₀, T = 150 °C
 - iii. P = 4 barg, T = T₀
- d) ¿Es posible intercambiar la mezcla directamente con algún gas combustible de uso común en gasodomésticos? ¿Por qué?

Resp.: 20.38 g/mol; 0.71
42018 kJ/m³
0.862 kg/m³; 1.160 m³/kg 0.587 kg/m³; 1.703 m³/kg 3.404 kg/m³; 0.294 m³/kg
W_s = 49989 kJ/m³ ≈ W_{s|GN}

Ejercicio 3

Se requiere modificar un equipo diseñado originalmente para funcionar con gas manufacturado (poder calorífico superior Q_{PS} = 4700 kcal/m³ y densidad relativa al aire G = 0.75), de modo que pueda ser alimentado con gas natural (Q_{PS} = 9300 kcal/m³, G = 0.60), manteniendo un porcentaje de aireación primaria adecuado y conservando constante la potencia nominal del equipo.

Para ello, se decide sustituir el inyector del quemador, cuyo orificio original tiene un diámetro de 2.2 mm

Calcular el diámetro del nuevo inyector.

Resp.: 1.0 mm

Ejercicio 4

Se adaptará un equipo que funciona actualmente con supergas (SG) para ser alimentado con gas natural (GN) Las propiedades de los gases en cuestión son las siguientes:

SG: Q_{PS} = 26300 kcal/m³ G = 1.82

GN: Q_{PS} = 9300 kcal/m³ G = 0.60

Si la presión actual de suministro de supergas al equipo es de 35 mbarg, indicar cuál debería ser la presión de suministro de gas natural en la conexión del equipo, para mantener un porcentaje de aireación primaria adecuado en el quemador del equipo cuando funcione con este nuevo gas.

Resp.: 13 mbarg

Ejercicio 5

Se decide convertir una instalación de baja presión que funciona actualmente con gas natural (GN) para que pase a trabajar temporalmente con propano industrial (PI) manteniendo la misma presión de suministro y sin modificar los equipos conectados. Los poderes caloríficos superiores y las densidades relativas al aire y de dichos gases son:

$$\text{GN: } Q_{\text{PS}} = 9300 \text{ kcal/m}^3 \quad G = 0.60$$

$$\text{PI: } Q_{\text{PS}} = 23700 \text{ kcal/m}^3 \quad G = 1.62$$

Para ello, se mezcla el PI con aire atmosférico, a fin de obtener un gas diluido que resulte intercambiable con el GN. Indicar cuál debería ser la densidad relativa al aire de dicha mezcla, su composición volumétrica y su poder calorífico superior.

$$\text{Resp.: } 1.367 \quad [PI] / [\text{aire}] = 59.24 / 40.76 \quad 14039 \text{ kcal/m}^3$$

Ejercicio 6

Un equipo que funciona con supergas suministrado a 29 mbarg debe ser convertido a gas natural.

El quemador del equipo funciona con 20 inyectores de 1.4 mm de diámetro, cuyo coeficiente de descarga es 0.95.

El rendimiento térmico del equipo es 60 %

- Calcular el diámetro de los inyectores para gas natural.
- Calcular el tiempo necesario para que el equipo eleve 50 °C la temperatura de un volumen de 1000 litros de agua.

$$\text{Resp.: } 2.3 \text{ mm} \\ 21 \text{ min}$$

Ejercicio 7

Se considera la combustión completa de gas natural (asumido 100 % metano) en aire, con 30 % de exceso.

Calcular los siguientes parámetros:

- Composición y masa molar de los productos de combustión.
- Consumo de aire de combustión, expresado en m³ de aire por m³ de gas, ambos en condiciones estándar.
- Densidad, masa y volumen de humos producidos, expresado en kg y m³ de humos (respectivamente) por m³ estándar de gas quemado, para una temperatura media de chimenea de 150 °C, a presión ambiente.
- Se considera un quemador industrial de gas natural con potencia térmica de 500 kW, el cual funciona de acuerdo con los parámetros indicados antes. Determinar:
 - El consumo horario de gas natural y de aire de combustión.
 - La emisión de gases de efecto invernadero, expresada en toneladas por año, asumiendo que el equipo trabaja ocho horas al día y 240 días al año.
 - El diámetro interior de la chimenea, de modo que la velocidad media de circulación de los humos sea 15 m/s.
- Repetir los cálculos para la combustión de propano industrial (composición másica: 80 % de propano y 20 % de butano)

$$\text{Resp.: } [\text{CO}_2]_{\text{hsh}} = 7.5 \% \quad [\text{H}_2\text{O}]_{\text{hsh}} = 14.9 \% \quad [\text{O}_2]_{\text{hsh}} = 4.5 \% \quad [\text{N}_2]_{\text{hsh}} = 73.1 \% \quad 27.880 \text{ g/mol} \\ 12.381 \text{ m}^3_{\text{air}}/\text{m}^3_{\text{g}} \\ 0.803 \text{ kg/m}^3 \quad 15.787 \text{ kg}_{\text{hsh}}/\text{m}^3_{\text{g}} \quad 19.653 \text{ m}^3_{\text{hsh}}/\text{m}^3_{\text{g}} \\ 46.2 \text{ m}^3/\text{h} \quad 165.3 \text{ ton}_{\text{CO}_2}/\text{año} \quad 14.6 \text{ cm}$$

Ejercicio N° 8

Un secadero de granos procesa 2 ton/hr de maíz, utilizando para ello un túnel de secado cuyos quemadores trabajan con propano industrial.

La humedad del maíz se reduce desde el valor inicial del 18 % en peso, con que ingresa al túnel, hasta un valor final del 12 %; en el proceso, la temperatura del grano se eleva desde la media ambiente de 15 °C hasta los 45 °C.

Asumir que el calor específico medio del maíz es $c_p = 0.1 \text{ kJ / kg.K}$

- a] Si el rendimiento térmico global del secadero es del 55 % referida al poder calorífico inferior del combustible, calcular el consumo horario requerido de propano industrial.
- b] Dimensionar un recipiente (tanque cilíndrico estacionario o “granel”) de almacenamiento de propano industrial para abastecer el proceso durante 15 días corridos sin reposición, con un nivel máximo permitido de llenado de 85 %, sabiendo que el secadero trabaja en dos turnos diarios de 8 horas cada uno, de lunes a sábado inclusive.

Resp.: 11.87 kg / h 5.175 m³

Ejercicio N° 9

Un proceso industrial requiere 5 ton/hr de vapor saturado, suministrado a una presión de 8 barg y generado a partir del condensado que se recupera a 80 °C y a presión atmosférica, complementado con un 20 % de agua de reposición a 15 °C, que compensa la inyección de vapor en una operación de calentamiento directo, las purgas de caldera y las pérdidas en el circuito.

A tales efectos, se plantea la utilización de una caldera de vapor que actualmente trabaja con fuel oil, produciendo vapor saturado a la presión requerida. Se asume un rendimiento global medio de la caldera del 90 %, referido al poder calorífico inferior del combustible.

- a] Calcular el consumo requerido de los siguientes combustibles:
 - i. Fuel-oil
 - ii. Leña de eucalipto con 30 % de humedad en peso.
 - iii. Propano Industrial
 - iii. Gas Natural
 - iv. Gas de gasógeno, constituido por 30 % de monóxido de carbono, 20 % de hidrógeno y 50 % de inertes (nitrógeno y anhídrido carbónico), en volumen.
- b] Calcular el costo de generación de vapor, expresado en \$/ton para cada uno de los combustibles indicados en [a], a partir de sus respectivos precios medios actuales.

Resp.: Fuel Oil: 345 kg/h; 1509 \$/ton

Leña: 1169 kg/h x 1.5 = 1753 kg/h; 1332 \$/ton

Propano industrial: 278 kg/h; 2466 \$/ton

Gas Natural: 408 m³/h; 2179 \$/ton

Gas de gasógeno: 2462 m³/h

[*] Precios a enero 2016. Fuente: <http://www.segingenieria.com/admin/uploaded/indicadores/ie201601.pdf>

Notas, observaciones y comentarios para la resolución de los ejercicios

Ejercicio N°1:

En una mezcla de gases ideales, es válida la Ley de Dalton, o de las presiones parciales: cada uno de los gases componentes de la mezcla verifica la ecuación de los gases ideales, $P_p v = R_g T$, siendo P_p es la presión parcial del gas en cuestión (que es proporcional a la concentración o participación molar, es decir, volumétrica, de dicho gas en la mezcla), y la suma de las presiones parciales de todos los gases componentes de la mezcla es igual a la presión de la mezcla: $\sum P_p = P_{mezcla}$

En el caso del ejercicio, se tienen dos gases, asumidos ideales, que se mezclan hasta alcanzar la proporción correspondiente al LEL: Vapor de Supergas (vsg) y Aire (air)

La mezcla (potencialmente explosiva) de estos dos gases se encuentra a presión atmosférica: $P_{vsg} + P_{air} = 1 \text{ atm} = 1.01325 \text{ bara}$.

La concentración de cada gas (vapor de supergas y aire) en la mezcla viene dada por el valor del límite inferior de explosividad ("lower explosión limite", o "LEL"), que se puede calcular como un promedio ponderado entre los valores correspondientes a butano (LEL = 1.85 %) y propano (LEL = 2.40 %), con coeficientes de ponderación del 60 % y 40 % respectivamente, pues tal es la composición típica del supergas (60 % butano y 40 % propano): $LEL_{vsg} = 0.6 \times 1.85 + 0.4 \times 2.40 = 2.07 \%$ GEA (porcentaje volumétrico de gas inflamable en aire)

Por lo tanto, en la mezcla correspondiente al LEL, la concentración molar o volumétrica (que coinciden, por considerarse gases ideales) del aire y del vapor de propano serán, respectivamente, $(100 - 2.07) = 97.93 \%$ y 2.07%

Las presiones parciales del aire y del vapor de propano serán, entonces:

$$P_{air} = 1,01325 \text{ bara} \times 0.9793 = 0.99228 \text{ bara}$$

$$P_{vsg} = 1,01325 \text{ bara} \times 0.0207 = 0.02097 \text{ bara}$$

Con estos valores de presión parcial, aplicando la ecuación de gases ideales para cada componente, se obtienen los volúmenes específicos correspondientes, así como sus inversos, las densidades.

En particular, para el vapor de supergas, resulta: $v_{vsg} = 21.79 \text{ m}^3/\text{kg}$, es decir, una densidad $\rho = 0.0459 \text{ kg/m}^3$. Para obtener este valor, se ha utilizado la constante específica R_g del supergas, calculada a partir de las masas moleculares de propano y del butano, y de la composición típica del supergas (40 % propano, 60 % butano)

Siendo que el volumen del recinto ocupado por la mezcla es de 20 m^3 , y cada componente de la mezcla ocupa la totalidad del volumen (ejerciendo sus respectivas presiones parciales: Ley de Dalton), la cantidad (másica) de vapor de supergas que se tendrá en la habitación cuando se alcance la concentración correspondiente al LEL será:

$$m_{vsg} = 20 \text{ m}^3 \times 0.0459 \text{ kg/m}^3 = 0.918 \text{ kg}$$

Esta cantidad de supergas se origina en la fuga del envase, a razón de 1 gramo por minuto. Por lo tanto, el tiempo que demandará la formación de una mezcla explosiva en el ambiente será de 918 minutos, esto es algo más de 15 horas.

Sobre la determinación de R_g :

El coeficiente R_g de un gas se define como el cociente entre la constante universal de los gases ideales ($R = 8.314 \times 10^{-2} \text{ bara.m}^3 / \text{kmol}$) y el peso molecular (P_M , expresado en g/mol, o en kg/kmol) del gas en cuestión, o sea: $R_g = R / P_M$

Obsérvese que, entonces, el R_g de una mezcla de gases (por ejemplo, del vapor de supergas, que es una mezcla de propano y butano) NO se puede calcular como la

media ponderada con los pesos moleculares de los R_g de cada gas de la mezcla, debido a que el R_g NO ES PROPORCIONAL a P_M , sino a la inversa de P_M .

Es decir, si bien el peso molecular P_M de una mezcla de gases se puede calcular como la media ponderada con los respectivos pesos moleculares de los diversos gases que participan en la mezcla (por ejemplo, $P_{Mvsg} = 0.4 \times P_{MC_3H_8} + 0.6 \times P_{MC_4H_{10}}$) porque, efectivamente, el peso molecular de una mezcla es combinación lineal de los pesos moleculares de sus componentes y - por ende - es válida la proporcionalidad), NO ES CORRECTO, en cambio, que R_{gvsg} sea igual a $0.4 \times R_{gC_3H_8} + 0.6 \times R_{gC_4H_{10}}$

Las "reglas de tres" (simples, compuestas o ponderadas) sólo son válidas cuando las magnitudes que intervienen son directamente (es decir, linealmente) proporcionales entre sí, pero NO cuando tenemos otro tipo de relación no-lineal entre ellas (por ejemplo, como en este caso, en que R_g y P_M son inversamente proporcionales entre sí) Algo que debemos tener siempre en cuenta, y que trasciende muchísimo a este simple ejercicio...

Entonces, es necesario calcular primero el peso molecular de la mezcla (que sí es proporcional al de sus componentes, ponderados con sus respectivas concentraciones molares o volumétricas), y luego utilizar la definición para determinar R_g a partir de dicho peso molecular y de la constante universal R .

Sobre el cálculo y expresión de la temperatura absoluta:

Debe tenerse en cuenta que el cero térmico absoluto, expresado en grados Celsius, es $-273,15$ °C, equivalente a 0 K.

Por lo tanto, la conversión entre grados Celsius y grados Rankine es:

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$$

Si en una planilla de cálculo, las celdas están configuradas con una cifra después de la coma, se mostrará .15 como .2.

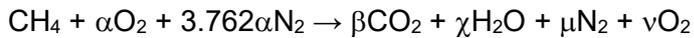
Por ejemplo, 15 °C = $(15 + 273,15)$ K = $288,15$ K ($288,2$ K, si lo expresamos con una cifra decimal, o directamente 288 K)

En general, los valores finales de temperatura se expresarán aproximados a la unidad (sin dígitos después de la coma, salvo en los resultados de laboratorio), pero los cálculos intermedios se pueden realizar con todas las cifras decimales.

Por último, se recuerda que el símbolo de grados Kelvin NO lleva °. Se escribe, directamente, la letra K, NUNCA °K.

Ejercicio N°7:

La combustión completa del metano (CH_4) en aire atmosférico estándar y seco (79 % N_2 y 21 % O_2), responde a la siguiente ecuación de balance:



Debe observarse que la ecuación está referida a la combustión de un mol de metano.

La relación entre los coeficientes con que participan el O_2 y el N_2 vienen dados directamente por la composición asumida para el aire atmosférico; en efecto, la cantidad de moles de N_2 (inerte, desde el punto de vista químico) por cada mol de O_2 consumido (comburente, propiamente dicho) será:

$$[\text{N}_2] / [\text{O}_2] = 0.79 \text{ (mol } \text{N}_2 \text{ / mol aire)} / 0.21 \text{ (mol } \text{O}_2 \text{ / mol aire)} = 3.762 \text{ mol } \text{N}_2 \text{ / mol } \text{O}_2$$

Por lo tanto, si en la reacción participan α moles de O_2 por cada mol de CH_4 quemado, la cantidad de N_2 que ingresará junto con el oxígeno en la cámara de combustión será 3.762α moles N_2

El balance atómico de los elementos intervinientes, entre ambos términos de la ecuación, implica:

- i. $\beta = 1$ (balance de C)
- ii. $\chi = 2$ (balance de H)
- iii. $2\alpha = 2\beta + \chi + 2\nu$ (balance de O)
- iv. $3.762\alpha = \mu$ (balance de N)

La cantidad de moles de O_2 dependerá del exceso de aire de combustión.

En una combustión ideal, estequiométrica, con exceso nulo (es decir, donde se aporta estrictamente la cantidad de oxígeno necesario para quemar el CH_4 , sin que sobre nada de O_2 sin reaccionar en los productos de combustión), se tendría $\nu = 0$, y, para este caso, de la resolución del sistema de ecuaciones [i...iv] se obtiene:

$$\alpha_{\text{esteq}} = 2 \text{ mol } \text{O}_2 \text{ / mol } \text{CH}_4$$

Debe observarse que el consumo estequiométrico de O_2 , α_{esteq} , depende del combustible utilizado: debe calcularse, en cada caso, para el combustible específico que se emplee.

En la práctica, la combustión siempre debe realizarse con un cierto exceso de aire (dependiendo de la tecnología de la combustión, del tipo de combustible, etc.), si se desea consumir completamente el combustible en la cámara de combustión.

Si el quemador trabaja con exceso $E = 30 \%$, ello significa que la cantidad real de O_2 aportado será $\alpha = \alpha_{\text{esteq}} \times (1 + 0.3) = 2.6 \text{ mol } \text{O}_2 \text{ / mol } \text{CH}_4$

Resolviendo ahora el sistema [i...iv] con este valor real de α , se obtiene:

$$\alpha = 2.6 \text{ mol } \text{O}_2 \text{ / mol } \text{CH}_4$$

$$\beta = 1 \text{ mol } \text{CO}_2 \text{ / mol } \text{CH}_4$$

$$\chi = 2 \text{ mol } \text{H}_2\text{O} \text{ / mol } \text{CH}_4$$

$$\mu = 9.781 \text{ mol } \text{N}_2 \text{ / mol } \text{CH}_4$$

$$\nu = 0.6 \text{ mol } \text{O}_2 \text{ / mol } \text{CH}_4$$

La composición molar de los productos de combustión (que es tanto como decir volumétrica, por considerar que se trata de una mezcla de gases ideales) será, entonces:

$$[\text{CO}_2]_{\text{hsh}} = \beta / (\beta + \chi + \mu + \nu) = 7.473 \%$$

$$[\text{H}_2\text{O}]_{\text{hsh}} = \chi / (\beta + \chi + \mu + \nu) = 14.947 \%$$

$$[\text{N}_2]_{\text{hs}} = \mu / (\beta + \chi + \mu + \nu) = 73.096 \%$$

$$[\text{O}_2]_{\text{pp}} = \chi / (\beta + \chi + \mu + \nu) = 4.484 \%$$

El peso molar de estos productos de combustión se calcula de inmediato a partir del peso y la concentración molares de cada uno de sus componentes:

$$P_{\text{M-hsh}} = 44 \text{ g/mol}_{\text{CO}_2} \times [\text{CO}_2] + 18 \text{ g/mol}_{\text{H}_2\text{O}} \times [\text{H}_2\text{O}] + 28 \text{ g/mol}_{\text{N}_2} \times [\text{N}_2] + 32 \text{ g/mol}_{\text{O}_2} \times [\text{O}_2]$$

$$P_{\text{M-hsh}} = 27.880 \text{ g/mol}_{\text{hsh}}$$

El coeficiente R_g de los productos de combustión se determina a partir de su peso molar:

$$R_{g\text{-hsh}} = R / P_{\text{M-hsh}} = 2.982 \times 10^{-3} \text{ bara.m}^3 / (\text{K.kg}_{\text{hsh}})$$

Aclaración: El subíndice “hsh” refiere a “humos semi-húmedos”, utilizándose comúnmente esta expresión para designar a los productos de combustión que incluyen el agua generada durante la reacción (χ moles de H_2O , por cada mol de combustible quemado), pero no el agua que pudiera traer el propio combustible en su composición original (algo que no es frecuente en los gases combustibles de uso común, pero sí en otros combustibles, por ejemplo la leña), ni tampoco el agua que ingresa como humedad ambiente con el aire de combustión (el cual tampoco corresponde considerar, si hemos asumido que el aire es seco)

El valor del coeficiente $R_{g\text{-hsh}}$ nos permite determinar, utilizando la ecuación de gases ideales, el volumen específico y la densidad de los productos de combustión, si conocemos su temperatura y presión: $v_{\text{hsh}} = T \times R_{g\text{-hsh}} / P_{\text{hsh}}$, $\rho_{\text{hsh}} = 1 / v_{\text{hsh}}$

Si $T_{\text{hsh}} = 150 \text{ }^\circ\text{C} = 423 \text{ K}$, y $P_{\text{hsh}} = 1 \text{ atm} = 1.01325$, se tendrá:

$$v_{\text{hsh}} = 1.245 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$\rho_{\text{shs}} = 0.803 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Estos parámetros son relevantes, entre otras cosas, para el diseño de los ductos de evacuación y chimeneas, ventiladores de tiro inducido, etc.

A partir de los coeficientes de la ecuación de combustión, es posible determinar, asimismo, otros parámetros de gran relevancia.

Por ejemplo, el valor calculado $\alpha = 2.6 \text{ mol O}_2 / \text{mol CH}_4$, permite determinar rápidamente el consumo específico volumétrico de aire para la combustión de CH_4 con el exceso dado (30 %, en este caso)

En efecto, recordando que la relación molar es igual a la volumétrica cuando tratamos con gases ideales (debido, esencialmente, a que el volumen ocupado por un mol de moléculas de gas ideal, a presión y temperatura dadas, es siempre el mismo e independiente del gas en considerado), resulta:

$$GV_{\text{O}_2} = 2.6 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ CH}_4$$

$$GV_{\text{aire}} = (2.6 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ CH}_4) / (0.21 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ aire}) = 12.381 \text{ m}^3 \text{ aire} / \text{m}^3 \text{ CH}_4$$

$GV_{\text{aire}} = 12.381 \text{ m}^3 \text{ aire} / \text{m}^3 \text{ CH}_4$, asumiendo que el aire y el CH_4 ingresan aproximadamente a la misma temperatura y presión (por ejemplo, temperatura y presión ambiente), que es lo usual en el caso de quemadores atmosféricos o de baja presión.

También es posible determinar el gasto másico específico de aire, calculando antes el peso molar del aire estándar seco:

$$P_{\text{M-aire}} = 0.79 P_{\text{M-N}_2} + 0.21 P_{\text{M-O}_2} = 0.79 \times 28 \text{ g/mol}_{\text{N}_2} + 0.21 \times 32 \text{ g/mol}_{\text{O}_2}$$

$$P_{\text{M-aire}} = 28.84 \text{ g} / \text{mol aire}$$

Entonces:

$$GM_{\text{aire}} = [(2.6 \text{ mol O}_2 / \text{mol CH}_4) / (0.21 \text{ mol O}_2 / \text{mol aire})] \times 28.84 \text{ g} / \text{mol aire}$$

$$GM_{\text{aire}} = 357 \text{ g aire} / \text{mol CH}_4$$

$$GM_{\text{aire}} = (357 \text{ g aire} / \text{mol CH}_4) / (16 \text{ g} / \text{mol CH}_4)$$

$$GM_{\text{aire}} = 22.313 \text{ g aire} / \text{g CH}_4$$

Este guarismo es correcto, independientemente de que el aire y el metano sean suministrados, o no, a la misma presión y temperatura: el gasto másico específico de aire, expresado en base másica del combustible, ya no depende de la temperatura y presión de los gases.

Análogamente, es posible determinar los caudales específicos volumétricos y másicos de los productos de combustión, utilizando su peso molar (ya calculado antes):

$$G_{hsh} = \beta + \chi + \mu + \nu$$

$$G_{hsh} = (1 \text{ mol}_{CO_2} / \text{mol}_{CH_4}) + (2 \text{ mol}_{H_2O} / \text{mol}_{CH_4}) + (9.781 \text{ mol}_{N_2} / \text{mol}_{CH_4}) + (0.6 \text{ mol}_{O_2} / \text{mol}_{CH_4})$$

$$G_{hsh} = 13.381 \text{ mol}_{hsh} / \text{mol}_{CH_4}$$

$$GM_{hsh} = (13.381 \text{ mol}_{hsh} / \text{mol}_{CH_4}) \times (27.880 \text{ g}_{hsh} / \text{mol}_{hsh}) = 373 \text{ g}_{hsh} / \text{mol}_{CH_4}$$

$$GM_{hsh} = (373 \text{ g}_{hsh} / \text{mol}_{CH_4}) / (16 \text{ g} / \text{mol}_{CH_4}) = 23.313 \text{ g}_{hsh} / \text{g}_{CH_4}$$

$$GM_{hsh} = 23.313 \text{ g}_{hsh} / \text{g}_{CH_4}$$

Este resultado es trivial: Ya se sabía que $GM_{aire} = 22.313 \text{ g aire} / \text{g}_{CH_4}$, es decir, ingresan 22.313 gramos de aire por cada gramo de metano quemado; obviamente, se obtendrá entonces $22.313 + 1 = 23.313$ gramos de productos de combustión, puesto que la masa se conserva en la cámara de combustión.

Si el metano ingresa al quemador en condiciones aproximadamente estándar (es decir, $15^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$ y $1 \text{ atm} = 1.01325 \text{ bara}$: tal el caso de los quemadores atmosféricos o de baja presión), resulta:

$$R_{CH_4} = R / P_{M-CH_4} = 5.196 \times 10^{-3} \text{ bara} \cdot \text{m}^3 / (\text{K} \cdot \text{kg}_{CH_4})$$

$$V_{CH_4} = T_{CH_4} \times R_{CH_4} / P_{CH_4} = 1.478 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$GM_{hsh} = (23.313 \text{ g}_{hsh} / \text{g}_{CH_4}) / (1.478 \times 10^{-3} \text{ m}^3_{CH_4} / \text{g}_{CH_4})$$

$$GM_{hsh} = 15.787 \text{ kg}_{hsh} / \text{m}^3_{CH_4}$$

Recurriendo nuevamente a la hipótesis de gases ideales (tanto para el metano, como para los productos de combustión), se tiene:

$$GV_{hsh}|_{T,P} = 13.381 \text{ mol}_{hsh} / \text{mol}_{CH_4} = 13.381 \text{ m}^3_{hsh} / \text{m}^3_{CH_4}$$

Esta relación sólo es correcta si ambos gases (metano y productos de combustión) se encuentran a la misma presión y temperatura. Pero, normalmente, ello no es así (el metano se suministra al quemador, en general, a temperatura ambiente, mientras que la temperatura de los productos de combustión será sensiblemente mayor)

Sin embargo, es muy sencillo corregir la relación anterior, si se conocen las temperaturas y presiones (absolutas) del metano que ingresa al quemador y de los productos de combustión que se evacúan por la chimenea.

Si, por ejemplo, $T_{CH_4} = 15^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$, y $T_{hsh} = 150^\circ\text{C} = 423 \text{ K}$ (y ambos se encuentran aproximadamente a la misma presión, la ambiente), se tendrá:

$$GV_{hsh} = 13.381 \times (423 / 288) = 19.653 \text{ m}^3_{hsh} / \text{m}^3_{CH_4}$$

Obviamente, si conocemos el consumo horario de metano (determinado, por ejemplo, a partir de la potencia del quemador), los caudales específicos arriba calculados permiten conocer el gasto horario de aire, y el caudal horario de productos de combustión generados.

Además de permitir el diseño de ductos, chimeneas, sopladores y ventiladores de tiro inducido, los parámetros anteriores son de gran utilidad para evaluar los aspectos medioambientales y energéticos de la combustión analizada.

Por ejemplo, la producción específica de gases de efecto invernadero, en este caso dióxido de carbono, viene dado por:

$$\beta = 1 \text{ mol}_{CO_2} / \text{mol}_{CH_4}$$

$$G_{CO_2} = (1 \text{ mol}_{CO_2} / \text{mol}_{CH_4}) \times (44 \text{ g}_{CO_2} / \text{mol}_{CO_2}) / (16 \text{ g}_{CH_4} / \text{mol}_{CH_4})$$

$$G_{CO_2} = 2.75 \text{ g}_{CO_2} / \text{g}_{CH_4}$$

La combustión de mezclas de gases puede plantearse de forma análoga a la de un gas puro. Por ejemplo, si se considera la combustión en aire del vapor de propano industrial, de composición volumétrica asumida como $[C_3H_8] = 80 \%$ y $[C_4H_{10}] = 20 \%$, se tendrá:



Resolviendo la combustión estequiométrica completa ($\nu = 0$) se obtiene:

$$\alpha_{\text{esteq}} = 5.300 \text{ mol } O_2 / \text{mol prop. ind.} = 25.238 \text{ mol aire} / \text{mol prop. ind.}$$

Si el propano industrial se quema con un exceso de aire de, por ejemplo, 30 %, el coeficiente α real (para esta combustión en particular) será:

$$\alpha = 6.890 \text{ mol } O_2 / \text{mol prop. ind.} = 32.810 \text{ mol aire} / \text{mol prop. ind.}$$

Tratándose de un combustible que se comercializa y almacena en fase líquida, y cuyo precio se expresa normalmente en base másica (es decir, por kilogramo de propano industrial suministrado), es razonable expresar el coeficiente anterior también en base másica.

Para ello, se recurre a los pesos molares del combustible y del aire:

$$\alpha = (32.810 \text{ mol aire} / \text{mol prop. ind.}) / (46.800 \text{ g prop. ind.} / \text{mol prop. ind.}) \times (28.840 \text{ g aire} / \text{mol aire})$$

$$\alpha = 20.219 \text{ g aire} / \text{g prop. ind.}$$

Si el caudal de aire de combustión se suministra (o se mide) a presión y temperatura normales (1 atm y 15 °C), el consumo específico de aire puede expresarse en base volumétrica.

En efecto, aplicando la ecuación de los gases ideales al aire, se obtiene que el volumen ocupado por un mol de aire (o de cualquier gas asumido ideal), a presión y temperatura normales, será 23.644 lt, por lo cual:

$$\alpha = (32.810 \text{ mol aire} / \text{mol prop. ind.}) \times (23.644 \text{ lt aire} / \text{mol aire}) / (46.800 \text{ g prop. ind.} / \text{mol prop. ind.})$$

$$\alpha = 16.576 \text{ lt aire} / \text{g prop. ind.}$$

Al mismo resultado se llegaría utilizando la densidad del aire atmosférico estándar, a presión y temperatura normales: $\rho = 1.220 \text{ kg aire} / \text{m}^3 \text{ aire}$

$$\alpha = (20.219 \text{ g aire} / \text{g prop. ind.}) / (1220 \text{ g aire} / \text{m}^3 \text{ aire})$$

$$\alpha = 16.573 \text{ lt aire} / \text{g prop. ind.} \text{ (la diferencia se debe a los errores de aproximación)}$$

Considerando el poder calorífico inferior del propano industrial ($Q_{PI} = 45809 \text{ kJ} / \text{kg}$), se puede asimismo expresar el consumo específico de aire, para esta combustión, en base energética (es decir, por unidad de energía liberada en el quemador, referida al poder calorífico inferior del combustible):

$$\alpha = (16.573 \text{ lt aire} / \text{g prop. ind.}) / (45.809 \text{ kJ}_{QPI} / \text{g prop. ind.})$$

$$\alpha = 0.362 \text{ lt aire} / \text{kJ}_{QPI}$$

Este coeficiente podría utilizarse para determinar el consumo volumétrico de aire, si se conoce la potencia y el rendimiento térmico del proceso.

Si, por ejemplo, se debe abastecer una demanda térmica efectiva (esto es, neta, descontadas las pérdidas) de 1 MW, mediante un equipo o proceso cuyo rendimiento térmico es 85 %, referido al poder calorífico inferior del combustible (en este caso particular, propano industrial quemado con un 30 % de exceso de aire), el caudal volumétrico de aire (medido a presión y temperatura normales) que debe suministrarse al sistema de combustión será:

$$V_{\text{aire}}|_{1\text{MW}} = (1 \times 10^3 \text{ kJ/s}) \times (0.362 \text{ lt aire} / \text{kJ}_{QPI}) / (0.85_{QPI}) = 0.426 \text{ m}^3 \text{ aire} / \text{s}$$

Este valor constituye, evidentemente, un dato de partida elemental para el diseño y/o selección de los componentes del sistema de suministro de aire (ducto de admisión, filtro, ventilador centrífugo, etc.)

Ejercicio N°8:

El proceso de secado del grano implica un intercambio de calor latente (vaporización de una fracción importante del agua que trae el grano) y otro de calor sensible (elevación de la temperatura inicial del grano)

El primero es proporcional a la diferencia entre el contenido inicial y final de humedad en el grano, mientras que el segundo se calcula como el producto entre el calor específico del grano y el incremento de su temperatura.

En los procesos de secado industrial de granos, el calor sensible suele despreciarse, por ser mucho menor que el latente, tal como se comprueba al resolver el ejercicio:

$$\Delta Q_{\text{lat}} = \Delta W \times h_{\text{fg}} = (0.06 \text{ kg}_w / \text{kg}) \times 2.43 \text{ MJ} / \text{kg}_w = 146 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$\Delta Q_{\text{sen}} = C_p \times \Delta T = (0.1 \text{ kJ} / \text{kg.K}) \times (45 - 15) \text{K} = 3 \text{ kJ} / \text{kg}$$

Se ha considerado el calor latente del agua ($580 \text{ kcal} / \text{kg} = 2.43 \text{ MJ} / \text{kg}_w$) a la temperatura media del proceso de secado ($30 \text{ }^\circ\text{C}$)

Por lo tanto, el consumo energético del túnel de secado, teniendo en cuenta su rendimiento térmico global (55 %) y su producción horaria (2 ton /hr) será:

$$Q = (2 \times 10^3 \text{ kg} / \text{hr}) \times (149 \text{ kJ} / \text{kg}) / 0.55 / (3600 \text{ s} / \text{hr}) = 151 \text{ kW}$$

Puesto que el rendimiento térmico está referido, en este caso, al poder calorífico inferior del combustible (45800 kJ/kg , para el propano industrial), el consumo horario de combustible será:

$$C = 151 \text{ kW} / (45800 \text{ kJ} / \text{kg}) \times (3600 \text{ s} / \text{hr}) = 11.87 \text{ kg} / \text{hr}$$

Equivalente a un consumo volumétrico horario (de propano industrial en estado líquido y medido a $15 \text{ }^\circ\text{C}$) igual a:

$$V = (11.87 \text{ kg} / \text{hr}) / (518 \text{ kg} / \text{m}^3) = 22.91 \text{ lt} / \text{hr}$$

En un período de quince días corridos (una quincena), el secadero trabajará doce días (seis jornadas semanales), a razón de dos turnos de ocho horas por día. Por lo tanto, la cantidad de horas en servicio, por cada quince días corridos, será:

$$N = (12 \text{ días/quincena}) \times (8 \text{ horas} / \text{turno}) \times (2 \text{ turnos/día}) = 192 \text{ horas/quincena}$$

Entonces, el volumen mínimo requerido para un tanque estacionario que garantice una autonomía mínima quincenal (teniendo en cuenta que el porcentaje máximo admisible de llenado del tanque es 85 %) será:

$$V_{\text{TK}} = (22.91 \text{ lt} / \text{hr}) \times (192 \text{ horas/quincena}) / 0.85 = 5175 \text{ lt}$$