



15. COMBUSTION PROCESSES: CHARACTERISTICS

- 15.1. Calcular la diferencia entre el poder calorífico del acetileno y el de una mezcla de polvo de grafito e hidrógeno en proporción molar 2:1.
- 15.2. Determinar el poder calorífico del n-butano, según se trate de su fase gaseosa o líquida, con y sin condensación del vapor de agua formado, y a $p=cte$ ó a $V=cte$.
- 15.3. Determinar el aire teórico necesario para la combustión del octano:
- En base molar.
 - En base másica.
- 15.4. Determinar el aire teórico, el poder calorífico y el límite de ignición pobre en la combustión completa de los siguientes combustibles:
- Metano.
 - Un gas natural conteniendo 85% de metano, 5% de etano, 5% de anhídrido carbónico y 5% de nitrógeno (en volumen).
 - Un gas ciudad compuesto de 50% de hidrógeno, 25% de monóxido de carbono, 15% de metano y 10% de nitrógeno (en volumen).
 - Un aire propanado sustitutivo del gas natural, de composición volumétrica 35% de propano, 10% de propileno y el resto de aire.
- 15.5. El análisis volumétrico en base seca de los productos de la combustión de metano en aire da: 10% de CO_2 , 0,8% de CO , 1,75% de O_2 y 87,45% de N_2 . Se pide calcular:
- La riqueza de la mezcla empleada
 - La temperatura de rocío de los gases de escape.
- 15.6. El análisis volumétrico en base seca de los gases de escape de un motor cuya gasolina tiene de fórmula empírica C_8H_{17} da: 9,2% de CO_2 , 8,3% de CO , 0,5% de O_2 , 3,4% de H_2 , 0,4% de CH_4 y 78,2% de N_2 . Calcular la relación aire/combustible y la riqueza.
- 15.7. Determinar la precisión de la siguiente aproximación para el cálculo de la riqueza usada:
- $$\phi \equiv \frac{A_0}{A} \approx \frac{x_{CO_2,seca}}{x_{CO_2,seca,esteq}}$$
- 15.8. El análisis volumétrico en base seca de los productos de combustión de una cierta mezcla de hidrocarburos da 10,5% de CO_2 , 5,3% de O_2 y 84,2% de N_2 . Se pide calcular:
- La composición gravimétrica del combustible.
 - El aire teórico y el realmente usado.
- 15.9. Se quema decano isobáricamente con 110% de aire teórico a 25 °C y 100 kPa, enfriándose los productos hasta la temperatura ambiente. Se pide:
- Aire teórico.
 - Calcular la cantidad de agua condensada suponiendo aire seco.

- c) Poder calorífico superior y calor realmente transferido.
- 15.10. Se quema benceno a 300 K con aire a 500 K, enfriándose los productos hasta 1400 K y midiéndose la siguiente composición volumétrica en base seca: 10,7% de CO₂, 3,6% de CO, 5,3% de O₂ y 80,4% de N₂. Se pide calcular:
- El aire teórico y el realmente usado.
 - La temperatura de combustión adiabática.
 - El calor intercambiado.
- 15.11 En la cámara de combustión de una turbina de gas se usa un combustible de composición C₈H₁₈, midiéndose los siguientes parámetros: $T_{entra,aire}=400$ K, $T_{entra,fuel}=50$ °C, $T_{sale,prod}=1100$ K, $v_{entra,aire}=100$ m/s, $v_{sale,prod}=150$ m/s, relación combustible/aire=0,021 kg_{fuel}/kg_{aire}. Se pide:
- Relación aire/combustible teórica.
 - Relación aire/combustible realmente usada.
 - Relación aire/combustible suponiendo combustión completa y adiabática.
 - Eficiencia térmica de la combustión.
- 15.12. En un hogar se quema en régimen estacionario 1 dm³/s de metano con su aire teórico, entrando todo a 300 K y 100 kPa y saliendo los gases a 2000 K. Se pide:
- Temperatura de combustión adiabática.
 - Flujo de calor.
- 15.13. Calcular la temperatura de combustión adiabática del octano con 400% de aire teórico.
- 15.14. En un hogar se quema en régimen estacionario a razón de 1 kg de antracita de composición ponderal 85% de carbono, 5% de hidrógeno, 5% de oxígeno y 5% de materia inerte, en 12 kg de aire. Se pide calcular:
- La riqueza.
 - La temperatura adiabática.
 - La irreversibilidad y el rendimiento exergético del proceso.
- 15.15. Se quema metano con un 20% de exceso de aire. Determinar:
- La temperatura adiabática.
 - La irreversibilidad.
 - El rendimiento exergético.
- 15.16. En un gasógeno se quema una madera de composición ponderal 50% de carbono, 5% de hidrógeno y 45% de oxígeno, con un tercio del aire teórico necesario, generándose gas pobre (una mezcla de CO, H₂, H₂O y N₂). Se desea calcular:
- Aire teórico que requeriría la madera.
 - Composición del gas pobre.
 - Poder calorífico desprendido por la madera en el gasógeno.
 - Poder calorífico del gas pobre.
 - Aire teórico necesario para el gas pobre.
- 15.17. En una turbina de gas se quema queroseno cuya fórmula química aproximada es C₁₀H₂₀. Se pide:

- a) Aire teórico necesario.
- b) Temperatura máxima de combustión.
- c) Exceso de aire necesario para que los productos salgan a 1200 K.

15.18. Se quema butano con un 80% de exceso aire ambiente que está a 20 °C y tiene una humedad del 75%. Se pide:

- a) Aire teórico suponiendo aire seco.
- b) Temperatura de rocío de los gases de escape habiendo supuesto aire seco.
- c) Aire teórico teniendo en cuenta la humedad.
- d) Temperatura de rocío real de los gases de escape.
- e) Poder calorífico inferior.
- f) Temperatura de combustión adiabática.

15.19. En un digester anaerobio de estiércol se quema 0,5 m³ de gas metanado de composición molar 60% de CH₄ y 40% de CO₂, por cada kilo de materia orgánica introducido. Se pide:

- a) Poder calorífico del gas metanado por kilo de materia orgánica.
- b) Aire teórico necesario.

15.20. Una regla muy utilizada para evaluar el exceso de aire, e , usado en un horno, en función de la composición de los productos secos es:

$$e = \frac{x_{O_2} - \frac{1}{2}x_{CO}}{0.266x_{N_2} - x_{O_2} + \frac{1}{2}x_{CO}}$$

Dedúzcase la expresión exacta y las aproximaciones que dan lugar a la regla anterior.

15.21. Se quema acetileno isobáricamente con 120% de aire teórico. Se pide:

- a) Aire teórico.
- b) Poder calorífico.
- c) Temperatura adiabática.

15.22. El análisis elemental de un carbón dio el siguiente resultado (porcentajes de masa): C, 78%; S, 0,6%; H, 4%; N, 2%; H₂O, 9% y 6,4% de ceniza. El poder calorífico bruto de este carbón es de 25 MJ/kg. Si la combustión completa se realiza con un 30% de exceso de aire a la presión de 100 kPa, calcular:

- a) Ecuación de la reacción de la combustión.
- b) La relación combustible/aire.
- c) El punto de rocío de los productos.
- d) Si los reactivos entran a la cámara de combustión a 25 °C y los productos se enfrían hasta 600 K, calcular el calor extraído si se desprecia el efecto del SO₂.

15.23. Se quema adiabáticamente propano con un 30% de exceso de aire atmosférico con un 60% de humedad relativa. Un análisis en seco de los productos de combustión revela un 5,2% de O₂ por volumen careciéndose de los datos restantes del análisis de los productos. Si el flujo es continuo, las condiciones atmosféricas 25 °C de temperatura y 100 kPa de presión y los reactivos entran separados y en las condiciones atmosféricas, se pide determinar:

- a) Punto de rocío de la mezcla gaseosa de los productos.
- b) Relación combustible/aire.

- c) Temperatura máxima teórica de la combustión.
 - d) Producción de entropía durante la combustión.
 - e) Capacidad relativa de producir trabajo con los gases calientes.
- 15.24. Se quema etano con un 20% de exceso de aire en un proceso estacionario. El etano y el aire se suministran, por separado a 25 °C y 100 kPa, y los productos salen a 2000 K. Considérese que además de los productos normales de la combustión, como consecuencia de la disociación, existen CO y H₂. Se pide calcular:
- a) Composición de equilibrio de los gases producto.
 - b) Calor intercambiado con el exterior.
 - c) Temperatura máxima teórica de combustión. ¿Es razonable la hipótesis anteriormente planteada?
- 15.25. Se quema propileno (C₃H₆) en régimen estacionario a 100 kPa con un 15% de exceso de aire en una cámara adiabática. El combustible y el aire entran por separado a temperatura y presión ambiente. Para limitar la temperatura de los gases de salida a 2000 K se inyecta agua líquida en la cámara. Suponiendo que en los productos se detecta únicamente la presencia de CO₂, CO, O₂, N₂ y H₂O y que el ambiente está a 25 °C y 1 atm, se pide:
- a) La masa de agua líquida que hay que inyectar por unidad de masa de combustible y composición de la mezcla a la salida.
 - b) Temperatura de rocío en la mezcla a la salida de la cámara.
 - c) Exergía de la reacción (trabajo máximo obtenible de la reacción).
 - d) Irreversibilidad del proceso. ¿Qué % representa respecto a la exergía de la reacción?
- 15.26. En un recipiente esférico totalmente aislado del exterior se va a quemar una gota de 2,5 gramos de benceno con un 20% de exceso de aire. Sabiendo que las condiciones iniciales son de 25 °C y 0,1 MPa, se pide:
- a) Calcular el aire teórico.
 - b) Determinar el volumen apropiado del recipiente.
 - c) Determinar el poder calorífico.
 - d) Calcular la temperatura máxima alcanzable.
 - e) Calcular la presión máxima alcanzable.
 - f) Determinar el nuevo estado de equilibrio termodinámico cuando el recipiente se atemperase.
- 15.27. Se va a realizar un experimento de combustión de una mezcla butano/aire en cámara esférica de radio $R=0,4$ m (a $V=cte$). Las condiciones iniciales son $p=100$ kPa, $T=20$ °C, $x_{but}=0,033$, y se produce una chispa en el centro. El proceso es tan rápido que se puede considerar adiabático. Se pide:
- a) Razonar por qué se mide la variación de la presión con el tiempo y no otras variables.
 - b) Calcular la masa, densidad y cantidad de sustancia iniciales.
 - c) Calcular el aire teórico y la riqueza de la mezcla, y establecer el balance de especies y de cantidad de sustancia.
 - d) Poder calorífico y temperatura de combustión adiabática, a $p=cte$ y a $V=cte$. ¿Cuál sería la presión final cuando se atemperase el recipiente?.
 - e) Presión al final de la combustión, y temperatura máxima en la región de gases frescos.
 - f) Demostrar que si se supone $c_v=cte$, durante la evolución se verifica $(p-p_1)/(p_2-p_1)=f$, siendo f la fracción de butano quemada.

- 15.28. En un local de $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ se tiene un cartucho de camping-gas (supóngase n-butano puro) conteniendo 0,19 kg de combustible. Las condiciones atmosféricas son de 93 kPa, 25 °C y 40% de humedad. Se pide:
- Calcular las proporciones en que quedaría la mezcla en equilibrio, suponiendo el local herméticamente cerrado, si se escapara todo el combustible del cartucho.
 - Enumerar sucintamente las posibilidades de que se produzcan mezclas inflamables y el tipo de llama a que daría lugar.
 - Suponiendo que ardiese rápidamente todo el combustible, determinar la temperatura, presión y composición final.
 - Condiciones que se alcanzarían al cabo de mucho tiempo tras arder todo el combustible.
- 15.29. En la cámara de combustión de una turbina se queman 0,05 kg/s de n-octano con aire en proporción estequiométrica, añadiéndose 0,5 kg/s más de aire para enfriar los gases dentro de la misma cámara. Se pide:
- Relación aire/combustible (molar y másica).
 - Poder calorífico y potencia térmica.
 - Temperatura de salida.
 - Composición de los gases de escape.
 - Temperatura de rocío de los gases de escape.
 - Indicar qué variación sobre los resultados anteriores supondría la formación de óxido de nitrógeno en la mezcla.
- 15.30. El análisis volumétrico de los productos secos de la combustión de un hidrocarburo da 13,6% de CO_2 , 0,4% de O_2 , 0,8% de CO , 0,4% de CH_4 y el resto de nitrógeno, obteniéndose 13,6 moles de CO_2 por mol de combustible quemado. Se pide:
- Determinar la fórmula molecular del combustible.
 - Relación aire/combustible y riqueza.
 - Poder calorífico y temperatura de combustión adiabática.
- 15.31. A la boca de un mechero de 1 cm de diámetro llega una mezcla de 0,015 l/s de acetileno y 0,2 l/s de aire, todo ello a 92 kPa y 20 °C. Se pide:
- Exceso de aire teórico.
 - Incremento molar debido a la reacción.
 - Número de Reynolds a la salida.
 - Sabiendo que la velocidad de deflagración laminar es de 1,5 m/s, determinar la geometría de la llama.
 - Temperatura de la llama.
 - Calor generado.
- 15.32. Se quema n-dodecano ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$) en régimen estacionario a presión atmosférica con un 10% de exceso de aire en una cámara adiabática. El combustible y el aire entran por separado a temperatura y presión ambiente. Para limitar la temperatura de los gases de salida se inyecta agua líquida en la cámara a razón de 1 kg de agua por kilogramo de combustible. Suponiendo que en los productos se detecta únicamente la presencia de CO_2 , CO , O_2 , N_2 y H_2O y que el ambiente está a 25 °C y 100 kPa, se pide:
- Relación molar aire/combustible.
 - Poder calorífico, temperatura y composición a la salida suponiendo combustión completa.
 - Efecto de los inquemados.

- d) Temperatura de rocío en la mezcla a la salida de la cámara.
- 15.33. En un combustor a presión ambiente se quema octano con un exceso de aire del 25%, añadiéndose también un flujo de agua de 1 mol por cada mol de combustible, saliendo los productos a 1000 K. Se pide:
- Indicar los productos esperados y determinar la varianza del sistema.
 - Calcular la composición de equilibrio.
 - Calcular el calor intercambiado con el exterior.
- 15.34. Se trata de calentar un local de $30 \cdot 30 \cdot 5 \text{ m}^3$ con una estufa donde se quema un combustible de fórmula aproximada C_9H_{18} para mantenerlo a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ en un ambiente a $5 \text{ }^\circ\text{C}$, compensando las pérdidas por las paredes y el techo (despreciar la contribución del suelo) y el efecto de la renovación del aire interior. Los valores aplicables son $h_{\text{exterior}}=15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $h_{\text{interior}}=5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $k_{\text{pared}}=0,3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $L_{\text{pared}}=0,3 \text{ m}$, $R_{\text{techo}}=1,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ y renovación total del aire cada 3 horas. Se pide:
- Calcular el poder calorífico del combustible y el gasto másico necesario.
 - Calcular la concentración media de CO_2 en el local.
 - Calcular la humedad del aire a la salida, sabiendo que a la entrada es de un 80%, y comparar con el valor que se obtendría sin tener en cuenta la combustión.
- 15.35. En una turbina de gas se quema queroseno, cuya fórmula química aproximada es $\text{C}_{10}\text{H}_{20}$ y su entalpía de formación -247 kJ/mol , estequiométricamente con aire proveniente de un compresor de relación de presiones 10. Se pide:
- Temperatura y composición de salida, suponiendo combustión completa.
 - Temperatura y composición de salida, suponiendo que aparece CO en equilibrio.
 - Concentraciones previsibles de NO, NO_2 , OH, H y O en equilibrio.
 - Exceso de aire necesario para que los productos salgan a 1300 K.
- 15.36. Se quema 1 litro por segundo de etano, que entra a temperatura ambiente, con 100% de aire, que entra a $500 \text{ }^\circ\text{C}$, extrayéndose 15 kW de potencia térmica. Se pide:
- Aire teórico y límite de ignición pobre.
 - Poder calorífico y temperaturas de combustión adiabática máxima.
 - Temperatura de salida y de rocío en el escape.
- 15.37. Se desea estimar los flujos de combustible y aire para alimentar una caldera que ha de suministrar 300 MW al agua de trabajo, quemando gas natural con un 20% de exceso de aire, sabiendo que la temperatura de salida de los humos ha de ser al menos $100 \text{ }^\circ\text{C}$ superior su temperatura de rocío.
- 15.38. Una turbina de gas de 50 MW tiene una relación de presiones de 15, una temperatura de entrada a la turbina de $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, unos rendimientos isentrópicos del 85% y utiliza un combustible asimilable a $\text{C}_{12}\text{H}_{24}$. Se pide:
- Esquema de la instalación y temperatura a la salida del compresor.
 - Relación aire/combustible necesaria.
 - Gastos másicos de combustible y aire.
 - Temperatura de salida y de rocío en el escape.

- 15.39. Se desea contrastar los siguientes valores referentes a la actividad metabólica de una persona adulta: ciclo respiratorio de 5 s, inspiraciones de 0,5 litros de aire ambiente a 100 kPa, 15 °C y 70% de humedad, temperatura media del aire espirado de 32 °C, disipación metabólica de 100 W. Se pide:
- Considérese la combustión (en realidad, oxidación lenta catalizada) de la glucosa ($C_6H_{12}O_6$) con aire y calcular el consumo relativo de oxígeno, la relación aire/combustible teórica y el poder calorífico superior.
 - ¿Están ligados los valores dados por alguna relación, o son independientes?
 - Calcular la composición de entrada y de salida en la respiración.
 - Calcular la temperatura de rocío a la entrada y a la salida. ¿Se forma vaho?
 - Calcular el consumo diario de alimento necesario (suponiendo un poder calorífico medio igual a la mitad del de la glucosa).
- 15.40. En un combustor a presión atmosférica se queman 10 litros por minuto de etileno a 20 °C con un 150% de aire teórico a 400 °C, saliendo los productos a 1200 °C. Se pide:
- Aire teórico y límite de ignición pobre.
 - Poder calorífico y temperaturas de combustión adiabática.
 - Composición a la salida.
 - Calor intercambiado.
 - Temperatura de rocío a la salida.
- 15.41. El 19/2/1997 en Badalona (E) falleció un niño y otros cuatro hermanos hubieron de ser hospitalizados por intoxicación gaseosa atribuida a una combustión deficiente, al haber reemplazado el padre el suministro de gas natural canalizado por el de una bombona de butano. Se pide:
- Para uno de los combustibles (p.e. para el butano), calcular la entalpía estándar de la reacción de combustión, así como la función de Gibbs y la entropía correspondientes. ¿Qué relación hay entre estos 3 valores? Indicar la diferencia entre esta última y la entropía absoluta estándar del butano, por una parte, y la entropía absoluta estándar de la reacción de formación del butano a partir de sus elementos, por otra parte, dando los 3 valores numéricos.
 - Calcular el aire teórico demandado por ambos tipos de combustible, en base molar y másica, y el poder calorífico de cada combustible.
 - Suponiendo que los inyectores de los quemadores estuvieran diseñados para conseguir una combustión estequiométrica con 60% de aire primario (de aspiración por efecto venturi) y un 40% de aire secundario (de convección natural), calcular el porcentaje estequiométrico de aire primario que sería aspirado por el butano, y sus consecuencias.
- 15.42. Una caldera ha de suministrar 10 MW a un sistema de calefacción por agua caliente, quemando gas natural con un 10% de exceso de aire, saliendo los gases a 50 °C por encima de su temperatura de rocío. Se pide:
- Composición esperada de los gases de escape.
 - Temperatura adiabática de combustión y temperatura de rocío.
 - Caudales necesarios de gases de alimentación.
- 15.43. En un artículo sobre pilas de combustible se dice que, para conseguir una autonomía típica de 500 km (supongamos que a 100 km/h de velocidad media), en un coche de 50 kW, bastarían 3 kg de hidrógeno. Se pide:

- a) Poder calorífico másico del hidrógeno a 25 °C y 100 kPa, a alta presión (20 MPa) y temperatura ambiente, y a presión ambiente y estado líquido.
 - b) Exergía másica del hidrógeno a 25 °C y 100 kPa, a alta presión (20 MPa) y temperatura ambiente, y a presión ambiente y estado líquido.
 - c) Poder calorífico de la gasolina, sabiendo que su composición ponderal es de 85% de carbono y 15% de hidrógeno.
 - d) Sabiendo que el depósito de gasolina ($\rho=750 \text{ kg/m}^3$) de un coche típico es de unos 40 litros, comparar la potencia calorífica media suministrable por el hidrógeno y por la gasolina durante el recorrido descrito, y con los 50 kW.
- 15.44 En una industria maderera se necesita secar 5000 toneladas/año de madera desde un contenido de humedad (masa de agua / masa de madera seca) del 40% hasta un 20%. Con el fin de satisfacer esta demanda y además generar electricidad con un motor térmico, se piensa usar un gasógeno en el que se quema, con un 30% del aire teórico, un residuo leñoso de composición ponderal 40% H₂O, 30% C, 25,5% O₂, 4% H₂ y 0,5% de cenizas. Se pide:
- a) Aire teórico y poder calorífico de la combustión completa del residuo leñoso.
 - b) Composición del gas producido, suponiendo que es una mezcla de CO, H₂, H₂O y N₂.
 - c) Estimar el consumo necesario de residuo leñoso.
- 15.45. Se desea realizar la combustión de un mol de hidrógeno con su aire teórico, inicialmente a presión y temperatura ambiente, en un depósito esférico de acero de 5 mm de espesor. Se pide
- a) Volumen del recipiente e incremento máximo de temperatura del acero en el proceso.
 - b) Temperatura máxima esperada en el interior.
 - c) Estado termodinámico final tras el atemperamiento.
- 15.46. Un cierto motor de combustión interna es alimentado con 9 litros/hora de n-octano. Sabiendo que el rendimiento energético del motor es del 30%, y que los gases salen a 900 K con una composición en base seca de 13% CO₂, 3% CO y 1% H₂, se pide:
- a) Balances másicos, gasto de aire y de gases de escape.
 - b) Balance energético y potencia mecánica desarrollada.
 - c) Pérdidas de energía térmica y química por el escape.
- 15.47. Para un estudio de contaminantes de un motor de gasolina, se desea calcular la composición de salida cuando se quema una mezcla aire / combustible (supóngase n-octano) de riqueza 1,2. En particular, para una temperatura de salida de 700 °C, se pide:
- a) Relación aire/combustible estequiométrica, en bases másica y molar.
 - b) Fracciones molares a la salida suponiendo que aparece CO.
 - c) Fracciones molares a la salida suponiendo que aparece también H₂.
 - d) Temperatura de rocío a la salida.
- 15.48. Para un estudio de contaminantes de un quemador, se desea calcular la composición de salida cuando se quema una mezcla rica de gas natural (supóngase metano), de riqueza 1,25. En particular, para una temperatura de salida de 1800 K, se pide:
- a) Relación aire/combustible estequiométrica, en bases másica y molar.
 - b) Fracciones molares a la salida sabiendo que aparece CO.
 - c) Fracciones molares a la salida sabiendo que aparece también H₂.
 - d) Temperatura de rocío a la salida.

- 15.49. En una publicación se dice que los gases producto de la combustión del gas natural son más pesados que el aire. Se pide:
- Determinar la composición y la densidad respecto al aire, de los productos de la combustión teórica del metano a 100 kPa y 298 K.
 - Determinar la composición y la densidad respecto al aire, de los producto de la combustión teórica del metano en un recipiente cerrado y rígido, una vez atemperado, sabiendo que inicialmente estaba a 100 kPa y 298 K.
 - Calor evacuado en ambos casos, y temperaturas máximas.
- 15.50. La figura representa un esquema idealizado de un calorímetro de flujo para la medida del poder calorífico de combustibles gaseosos. Por 1 se alimenta un mechero bunsen con 170 L/h de un hidrocarburo gaseoso con exceso de aire, a 20 °C, saliendo el escape por 2 a 40 °C. Por 3 se alimenta el agua de refrigeración a 15 °C, 75 L/h, saliendo por 4 a 35 °C. Por 5 sale el agua condensada en las paredes, 14 cm³ en 5 minutos. Se pide.
- Poder calorífico del gas.
 - Deducir de qué gas puede tratarse.
 - Cantidad de agua que sale con los gases de escape.
 - Relación aire/combustible.
 - Composición de los gases a la salida.

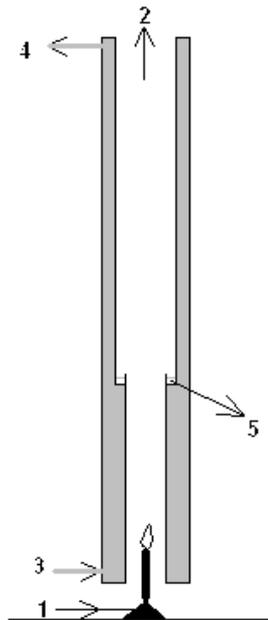


Fig. Calorímetro de flujo de combustión de gases.

- 15.51. Hacia 1780, Volta desarrolló un eudímetro (una especie de probeta de vidrio grueso) para determinar la concentración de oxígeno en aires viciados mediante la combustión con exceso de hidrógeno. El procedimiento era tal que así: se llenaba el eudímetro con mercurio y se colocaba invertido sobre un baño de mercurio (como en el experimento de Torricelli), luego se introducía por la boca (a través de un tubo acodado) el aire a analizar, e.g. hasta completar 100 cm³ en la probeta, y luego hidrógeno (obtenido por reacción de un metal con una disolución ácida) hasta completar 200 cm³ en total; finalmente se provocaba la combustión con una chispa en el extremo superior (entre electrodos previamente instalados al efecto), y al final quedaban e.g. 170 cm³ de gases ya atemperados. Las dimensiones del eudímetro eran: 50 cm de largo, 4 cm de diámetro interior, 1 cm de espesor, y se sumergía 1 cm en el baño. Se pide:
- Hacer un esquema de la configuración antes y después de la combustión.
 - Plantear la reacción de combustión para la mezcla, indicando las hipótesis necesarias.

- c) Determinar las cantidades molares de los gases descritos.
 - d) Determinar la concentración de oxígeno en el aire usado.
 - e) Determinar la cantidad de agua formada.
- 15.52. Se quiere obtener un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ (medidos a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ y 100 kPa) de gas inerte (gas con insuficiente oxígeno para la combustión de combustibles fósiles; $x_{\text{O}_2} < 5\%$ según las normas IMO) para un servicio en un buque, a partir de los gases de escape de la combustión de un fuel marino de fórmula empírica $\text{C}_{14}\text{H}_{26}$. Se pide:
- a) Calcular el aire teórico para ese combustible (en base molar y en base másica).
 - b) ¿Serviría usar los gases de escape (enfriándolos) del motor principal del buque, sabiendo que usa un 100% de exceso de aire?
 - c) Calcular el exceso de aire máximo para generar gas inerte en un combustor independiente.
 - d) Calcular los gastos másicos de combustible y de aire necesarios.
 - e) Calcular el calor a evacuar para suministrar el gas inerte a temperatura ambiente.
- 15.53. Se desea reducir el contenido de humedad de unos residuos de madera usando aire caliente. El aire ambiente está a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y tiene una humedad relativa del 70%, y se quieren procesar 10 toneladas diarias de residuo con un 60% de humedad (masa de agua relativa al producto seco), hasta el 5% de humedad. El aire se va a calentar hasta $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (no conviene más para no producir pirólisis) con un quemador de butano, y se prevé que salga a unos $40 \text{ }^\circ\text{C}$ y prácticamente saturado. Se pide:
- a) Hacer un esquema de la instalación y determinar la relación aire/combustible a usar.
 - b) Humedades absolutas de entrada y salida del quemador.
 - c) Cantidad de agua evaporada.
 - d) Número de bombonas de butano necesarias, sabiendo que el caudal máximo por bombona es de 1 kg/h .
 - e) Caudal de aire a impulsar.
- 15.54. Un quemador de gas natural debe dar 10 kW al circuito de calefacción por agua caliente de una vivienda. La composición del gas natural usado es de 90% de metano, 6% de etano y 4% de propano, y se quema en una cámara estanca con un 60% del aire teórico premezclado con el combustible, más un 80% del aire teórico añadido directamente en la cámara. Se pide:
- a) Aire teórico.
 - b) Poder calorífico (superior, inferior, molar y másico).
 - c) Gastos másicos y volumétricos de combustible y de aire.
 - d) Volumen y composición de los gases de escape.
 - e) Estimar el caudal de la bomba de agua.
- 15.55. Dentro de un recipiente rígido de 1 litro, se ha introducido propano y aire, siendo el estado inicial de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 100 kPa y una riqueza del 110%, produciéndose la combustión mediante una chispa. Al cabo de cierto tiempo, la temperatura interior es de 1800 K . Se pide:
- a) Cantidad de sustancia inicial y final, y composición
 - b) Poder calorífico del propano en las condiciones del problema, y comparación con su entalpía estándar de combustión.
 - c) Intercambio energético del sistema.
 - d) Presión en el instante dicho.

- 15.56. Se quiere estudiar la combustión de gas natural (supóngase metano puro) con un 80% del aire teórico. Se pide:
- Aire teórico, poder calorífico superior y temperatura adiabática correspondientes al aire teórico.
 - Suponiendo que sólo aparece CO como inquemado, calcular la relación aire/combustible real, y el poder calorífico superior y temperatura adiabática correspondientes al aire realmente usado.
 - Sabiendo que, además de CO, aparece H₂ como inquemado, calcular el poder calorífico superior y temperatura adiabática correspondientes al aire realmente usado.
- 15.57. El análisis en base seca de los gases de salida de una caldera de gas natural (supóngase metano puro), es de un 10% de dióxido de carbono y un 3% de oxígeno (el resto nitrógeno). La salida tiene lugar a 90 °C por un conducto de 10 cm de diámetro, con una velocidad media de 1 m/s. Se pide:
- Aire usado en la combustión, relativo al teórico.
 - Consumo de combustible.
 - Potencia térmica comunicada al agua.
- 15.58. Se quiere producir un flujo de 0,1 kg/s de hidrógeno a partir de gas natural (supóngase metano). En lugar de hacerlo mediante reformado con vapor como es habitual, se quiere estudiar la posibilidad de hacerlo mediante oxidación parcial con oxígeno puro en una cámara de combustión a 1 MPa, según la reacción $\text{CH}_4 + (1/2)\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$, pretendiéndose además generar electricidad por expansión de los gases producto en una turbina que movería un alternador y los compresores de gas natural y de oxígeno. Se pide:
- Poder calorífico de dicha reacción, y gastos de gases reactivos.
 - Temperatura de entrada a la cámara de los gases reactivos, y temperatura de salida de los gases producto.
 - Electricidad que se generaría.
- 15.59. En un experimento de laboratorio, un tubo horizontal de plástico transparente de 25 mm de diámetro se alimenta con una mezcla de $0,5 \cdot 10^{-3}$ m³/s de aire y $0,03 \cdot 10^{-3}$ m³/s de n-butano, ambos medidos a presión y temperatura ambiente de 94 kPa y 20 °C. Se pide:
- Hacer un esquema de tubo semi-infinito y razonar en qué regiones sería inflamable la mezcla, el tipo de llama que se desarrollaría, su movimiento, geometría, color, etc.
 - Velocidad de salida y riqueza de la mezcla.
 - Productos esperados en la combustión de premezcla, y su concentración.
 - Temperatura de la llama de premezcla y potencia térmica total
- 15.60. Se alimenta con gas natural (supóngase metano puro), oxígeno en proporción estequiométrica, y dióxido de carbono, la cámara de combustión de una turbina de gas, entrando todo a 500 K y 1 MPa. Se pide:
- Plantear la ecuación estequiométrica, la de mezcla, y el balance energético de la cámara.
 - Determinar la concentración de dióxido de carbono a la entrada para que la temperatura de salida sea de 1500 K.
 - Determinar la composición cuantitativa a la salida de la cámara.
- 15.61. En la cámara de combustión de una turbina de gas de 15 MW, $T_{\text{max}}=1200$ K y relación de presiones de 10, se quema queroseno (puede aproximarse por dodecano). Suponiendo rendimientos isentrópicos del 85%, se pide:
- Temperaturas de salida del compresor y de la turbina.

- b) Flujo másico de aire necesario.
 - c) Poder calorífico y aire teórico del fuel (en base másica).
 - d) Flujo másico de fuel necesario.
- 15.62. Para la propulsión de un cierto buque se usan 4 motores que generan 8 MW en total y consumen 150 L/s en total de gas natural a 20 °C y 500 kPa (además de una pequeña cantidad de fuelóleo para la ignición de la mezcla combustible/aire). El gas se toma de un depósito de 220 m³ conteniendo gas natural licuado a 1 MPa. Se pide:
- a) Gasto másico de combustible y de aire necesario, suponiendo una relación aire/combustible relativa a la teórica de $\lambda=2$.
 - b) Rendimiento motor.
 - c) Composición de los gases de escape.
- 15.63. Considérese una pila de combustible que, mediante la reacción global $H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$, genera 100 kW de electricidad. Se desea calcular:
- a) Gasto másico de hidrógeno necesario suponiendo rendimiento máximo.
 - b) Gasto de aire necesario para suministrar el oxígeno requerido.
 - c) Gasto de agua que se obtendría si se desecase totalmente esa corriente de aire, suponiendo que se parte de aire ambiente a 95 kPa, 20 °C y 70% HR.
 - d) Gasto de agua necesario para que la corriente de hidrógeno puro entre a la pila a 300 kPa y 300 K y saturada de vapor.
 - e) Flujo de calor a evacuar de la pila (suponiendo rendimiento máximo).
- 15.64. Calcula el consumo de queroseno (supóngase $C_{13}H_{26}$), y la relación aire/combustible relativa a la estequiométrica, en una turbina de gas que toma 20 kg/s de aire, el cual entra a la cámara de combustión a 600 K y 1 MPa, y sale a 1400 K.
- 15.65. Un motor diésel de 250 kW y rendimiento energético 0,4 quema un combustible asimilable al n-dodecano, con un 80% de exceso de aire. Se pide:
- a) Calcular los poderes caloríficos inferior y superior del combustible.
 - b) Consumos de combustible y aire.
 - c) Composición en el escape.
 - d) Emisión de CO₂ en kg/h y en kg/kWh.
 - e) Temperatura de rocío de los gases de escape.
- 15.66. Un motor diésel de 200 kW y rendimiento energético 0,36 quema un combustible asimilable al n-decano, con un 50% de exceso de aire. Se pide:
- a) Calcular los poderes caloríficos inferior y superior del combustible.
 - b) Consumos de combustible y aire.
 - c) Composición en el escape.
 - d) Emisión de CO₂ en kg/h y en kg/kWh.
 - e) Temperatura de rocío de los gases de escape.
- 15.67. En un recipiente cerrado y rígido de 10 litros, conteniendo inicialmente aire a 25 °C y 100 kPa, se inyecta rápidamente 1 g de metanol. Se pide:
- a) Relación molar aire/combustible que se ha inyectado, y comparación con la estequiométrica.
 - b) Analizar si la mezcla formada sería inflamable por chispa.
 - c) Fracción molar de vapor de metanol que saturaría el aire a 250 K y a 300 K.

d) Presión y temperatura tras la inyección, suponiendo vaporización instantánea.

15.68. En una bomba calorimétrica de 0,3 L de capacidad se dispone una muestra de 0,6 g de naftaleno ($C_{10}H_8$), se tapa, y se inyecta lentamente oxígeno puro hasta una presión manométrica de 3 MPa. Sabiendo que el ambiente está a 25 °C y 100 kPa, se pide:

- Cantidad de nitrógeno atrapado.
- Cantidad de oxígeno total (el atrapado más el introducido).
- Relación oxígeno/combustible y comparación con la estequiométrica.
- Temperatura que hubiera alcanzado el gas interior si la inyección de oxígeno hubiera sido muy rápida.
- Temperatura a la que quedaría el gas interior si, una vez atemperado, se abre la válvula y se despresuriza rápidamente.
- Presión que alcanzaría al atemperarse el gas interior, si tras la despresurización rápida se cierra el escape.

15.69. En una cámara de combustión se quema propano con un 60% de exceso de aire a 100 °C y 100 kPa. Se pide:

- Relación aire/combustible en base másica y en base molar.
- Composición de los productos.
- Masa de CO_2 producida por unidad de masa de combustible.
- Temperatura de combustión adiabática.
- Temperatura de rocío de los gases de escape.

15.70. Una turbina de gas de 40 MW toma aire ambiente a través de un compresor de relación de presiones $p_2/p_1=20$, usando un combustible asimilable al n-dodecano para alcanzar a la salida de la cámara de combustión una temperatura de entrada a la turbina de 1400 K. Suponiendo un rendimiento isentrópico del 85% para compresor y turbina y ciclo de aire estándar, se pide:

- Gasto de aire necesario.
- Poder calorífico y trabajo máximo obtenible del combustible.
- Gasto de combustible necesario y relación aire/combustible relativa a la estequiométrica
- Calcular la temperatura de combustión adiabática de la mezcla calculada anteriormente, teniendo ahora en cuenta la variación de las capacidades térmicas con la temperatura.

15.71. En una cámara de combustión se quema n-octano con aire ambiente a 25 °C, 100 kPa y 80% de humedad relativa. El análisis en base seca de los productos es: 10% de CO_2 , 6% de O_2 , 1% de CO , y el resto nitrógeno. Se pide:

- Relación aire/combustible usada.
- Porcentaje de aire teórico usado.
- Porcentaje de agua condensada si se atemperan los productos con el ambiente.
- Temperatura de combustión adiabática.

15.72. A una cámara de combustión entra 0,1 kg/s de gas natural (asimilable a metano) con un 100% de exceso de aire, todo ello a 25 °C y 100 kPa. Se pide:

- Potencia calorífica y potencia mecánica máximas obtenibles en el proceso reactivo.
- Temperatura de combustión adiabática.
- Trabajo máximo obtenible de los productos de la combustión adiabática isobara (despreciando el efecto de la dilución de gases en el ambiente).

- 15.73. Las propiedades del combustible de las turbinas de gas aeronáuticas, Jet A-1, se asimilan frecuentemente a las del n-dodecano, $C_{12}H_{26}$. Determinar la diferencia entre el poder calorífico del n-dodecano, y el que se obtendría en base a su análisis último, i.e. sin contabilizar la entalpía de formación de combustible: 26 átomos de hidrógeno (13 moléculas de H_2) por cada 12 átomos de carbono.
- 15.74. En una cámara de combustión estacionaria se quema adiabáticamente 1 kg/s de fuel, asimilable a $C_{10}H_{22}$, con un 3% de exceso de aire. Sabiendo que el aire entra a 200 °C y 100 kPa, se pide:
- Composición de salida suponiendo combustión completa.
 - Temperatura de salida en el caso anterior.
 - Suponiendo que se forma algo de CO y de NO, determinar las concentraciones de equilibrio.
 - Suponiendo que solo se forma CO, determinar la nueva composición de equilibrio.
- 15.75. Se han tomado los datos siguientes del sistema de propulsión del transbordador espacial (Shuttle). Los dos cohetes de propulsante sólido de 3,7 m de diámetro consumen cada uno las 500 t de propulsante en los 120 s que dura su funcionamiento (hasta alcanzar unos 45 km de altitud); el propulsante está formado principalmente por perclorato de amonio (70% en masa), con polvo de aluminio y un compuesto orgánico aglomerante. El tanque externo que alimenta los tres motores principales del Shuttle mide 8,4 m de diámetro y consta de un depósito inferior de hidrógeno líquido, de 30 m de largo, y otro superior de oxígeno líquido, de 12 m de largo (con los demás equipos y la ojiva completan 47 m de largo); estos líquidos criogénicos se consumen en los 8,5 minutos de funcionamiento (hasta alcanzar unos 120 km de altitud). Se pide:
- Estimar la masa de criogénicos (H_2 y O_2), los gastos máxicos, y la proporción respecto a la estequiometría.
 - Potencia térmica desarrollada durante la combustión en los motores principales del Shuttle.
 - Potencia térmica desarrollada durante la combustión en los motores de combustible sólido, suponiendo que basta considerar la oxi-reducción del perclorato de amonio: $2NH_4ClO_4=4H_2O+2O_2+Cl_2+N_2$. Datos del NH_4ClO_4 : $M=0,1175$ kg/mol, $\rho=1950$ kg/m³, entalpía de formación estándar $h_f=-295$ kJ/mol.
- 15.76. A un combustor entra un flujo de keroseno (tómese como dodeceno) a 300 K, y se quema con aire a 400 K, enfriándose los productos hasta 1000 K. La composición volumétrica de salida, en base seca, tiene 10% de CO_2 y 3% de CO. Se pide:
- Relación entre la cantidad de aire usado y la teórica.
 - Temperatura de combustión adiabática.
 - Calor intercambiado.
- 15.77. En un combustor entran gastos máxicos iguales de H_2 y O_2 a 1 MPa y 150 K, que reaccionan formando agua. Determinar:
- Los valores de las funciones termoquímicas estándar de la reacción, pero con el agua en estado de vapor, indicando el significado del signo de cada una.
 - La composición a la salida del combustor, y el poder calorífico inferior de la reacción, por unidad de masa de H_2 introducida.
 - La temperatura de combustión adiabática.
 - La proporción de moléculas de OH correspondientes al equilibrio químico a esa temperatura.
- 15.78. Considérese la combustión de n-octano con 80% de aire teórico. Se pide:

- a) Relación aire/combustible teórica y la realmente usada, y poder calorífico de la combustión completa y de la real.
- b) Temperatura adiabática de la combustión teórica y de la realmente usada.
- c) Considerando que a esa temperatura aparece también H_2 en los productos, estimar su fracción molar a partir del equilibrio químico $CO+H_2O=CO_2+H_2$, y de los resultados anteriores.
- 15.79. En los datos de un motor de automóvil diésel, figura una potencia de 51 kW, un consumo, 3,9 L cada 100 km, y unas emisiones de CO_2 de 108 g/km y 0,3 g/km de NO_x . Aproximando las propiedades del diésel por las del dodecano, y el NO_x por NO, se pide:
- a) Calcular las emisiones de CO_2 correspondientes a dicho consumo de fuel.
- b) Rendimiento motor que correspondería al consumo y la potencia dados, suponiendo una velocidad de 90 km/h.
- c) Para disminuir las emisiones de NO_x en los motores modernos suele inyectarse una pequeña cantidad de urea ($CO(NH_2)_2$) en disolución acuosa. Si el proceso se aproxima por una etapa de generación de amoníaco, $CH_4N_2O+H_2O=2NH_3+CO_2$, seguida de la reducción de NO, $2NO+2NH_3+\frac{1}{2}O_2=2N_2+3H_2O$, ¿cuánta urea sería necesaria para eliminar 0.3 g de NO por km?
- d) Calcular las entalpías y entropías de reacción estándar de ambas reacciones, interpretando el signo obtenido.
- 15.80. Un motor de 100 kW usa gasolina (supóngase isooctano) con 25% de etanol en masa. Se pide:
- a) Composición del combustible en fracciones molares, y estequiometría de la combustión con aire teórico.
- b) Poder calorífico inferior del combustible, en base molar y en base másica, y comparación con los de la gasolina sin etanol.
- c) Temperatura de combustión adiabática estequiométrica en condiciones estándar.
- d) Consumo de combustible del motor, suponiendo que el rendimiento térmico es del 30 %.
- e) Emisión de CO_2 por kilogramo de combustible, y comparación con el que se emitiría usando sólo gasolina.
- 15.81. Se trata de aprovechar un flujo de 0,1 kg/s de biogás, cuya composición se va a aproximar por 2/3 de CH_4 y 1/3 de CO_2 en volumen, para calentar una corriente de agua hasta 75 °C desde la temperatura ambiente de 20 °C. Se pide:
- a) Caudal de agua caliente obtenible quemando el gas en una caldera de condensación.
- b) Relación molar aire/combustible teórica, y su temperatura de combustión adiabática.
- c) Se piensa que se podría quemar ese gas en una micro-turbina, y así generar algo de electricidad, usando los gases de escape para calentar el agua. Supóngase que se van a usar dos compresores de relación de presiones 2,5 y rendimiento isoentrópico del 75 %, uno para comprimir el biogás, y otro para comprimir el aire, y que se va a usar el triple del aire teórico, para que no sea demasiado elevada la temperatura de entrada a la turbina. Calcular el consumo energético de las compresiones.
- d) Temperatura de entrada a la turbina en el caso anterior.
- 15.82. Considérese la combustión de gas natural (supóngase metano puro) con aire. Se pide:
- a) Relación aire/combustible usada, y composición a la salida, cuando las fracciones de CO_2 y de O_2 a la salida sean iguales (mezcla pobre).
- b) Poder calorífico inferior (másico y molar) y temperatura de combustión adiabática en el caso anterior.

- c) Relación aire/combustible usada, y composición a la salida, si las fracciones de CO_2 y de CO a la salida fuesen iguales (mezcla rica).
- d) Poder calorífico inferior (másico y molar) y temperatura de combustión adiabática en el caso anterior.
- e) Comparar las dos temperaturas adiabáticas obtenidas, justificando la diferencia.
- 15.83. Se quiere estudiar una turbina de gas cuyo combustible es una mezcla de hidrógeno y vapor de agua en proporción másica 1:40, generada en un reactor donde tiene lugar la reacción $a\text{Al(s)}+b\text{H}_2\text{O(l)}=c\text{Al(OH)}_3\text{(s)}+d\text{H}_2\text{(g)}+e\text{H}_2\text{O(v)}$, entrando una suspensión acuosa con 10 g/s de polvo de aluminio a 15 MPa y saliendo los gases a esa presión y 600 K. Esta mezcla gaseosa combustible se expande hasta 1 MPa en una turbina de 85 % de rendimiento isoentrópico, antes de entrar en la cámara de combustión de la turbina principal, cuyo compresor toma aire ambiente en proporción estequiométrica, y lo comprime hasta esa misma presión con un rendimiento isoentrópico del 80 %. Los gases de salida de la cámara de combustión se expanden en una turbina de 85 % de rendimiento isoentrópico hasta la presión ambiente de 100 kPa. Se pide:
- a) Esquema de componentes y diagrama T - s esquemático de los procesos.
- b) Gasto másico de gases que salen del reactor.
- c) Temperatura de salida de la mezcla combustible del reactor si este fuese adiabático.
- d) Temperatura de entrada de la mezcla combustible a la cámara de combustión.
- e) Gasto de aire, temperatura de entrada a la cámara de combustión, y trabajo demandado.
- 15.84. Se quiere capturar el CO_2 que se forma en la combustión de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ de gas natural con aire, mediante el siguiente proceso de combustión en reactores separados. El combustible gaseoso (supóngase metano puro) entra en un reactor (RC) donde se oxida con un sólido portador de oxígeno, que en este caso es óxido de hierro-III, Fe_2O_3 , en un lecho fluidizado (polvo en suspensión). Por otra parte, el aire entra en otro reactor (RA) donde oxida y regenera al portador de oxígeno (i.e. en otro lecho fluidizado, el aire oxida el polvo de Fe a Fe_2O_3). Las partículas sólidas se hacen recircular entre los dos reactores, todo en régimen estacionario. Se pide:
- a) Estequiometría del proceso en el reactor RC, y masa de CO_2 generada.
- b) Gasto mínimo de aire necesario en el reactor RA.
- c) Calcular la entalpía y la función de Gibbs, de la reacción en el reactor RC en condiciones estándar, interpretando el signo obtenido indicando si conviene trabajar a alta presión y/o alta temperatura.
- d) Lo mismo, pero para el RA.
- e) Comparación de este proceso con el de combustión directa de metano y aire.
- 15.85. Dentro de un recipiente rígido de 5 litros, se ha introducido una mezcla de butano y aire, siendo el estado inicial de 25 °C, 100 kPa y una riqueza del 110 %, produciéndose la combustión mediante una chispa. Al cabo de cierto tiempo, la temperatura interior es de 2000 K. Se pide:
- a) Composición del gas inicial, a los 2000 K, y tras el atemperamiento a 25 °C.
- b) Poder calorífico unitario para la mezcla dada, y comparación con la entalpía estándar de combustión del butano.
- c) Temperatura adiabática de combustión e intercambio energético con el exterior hasta llegar a los 2000 K.
- d) Temperatura de rocío, y presión tras el atemperamiento a 25 °C.