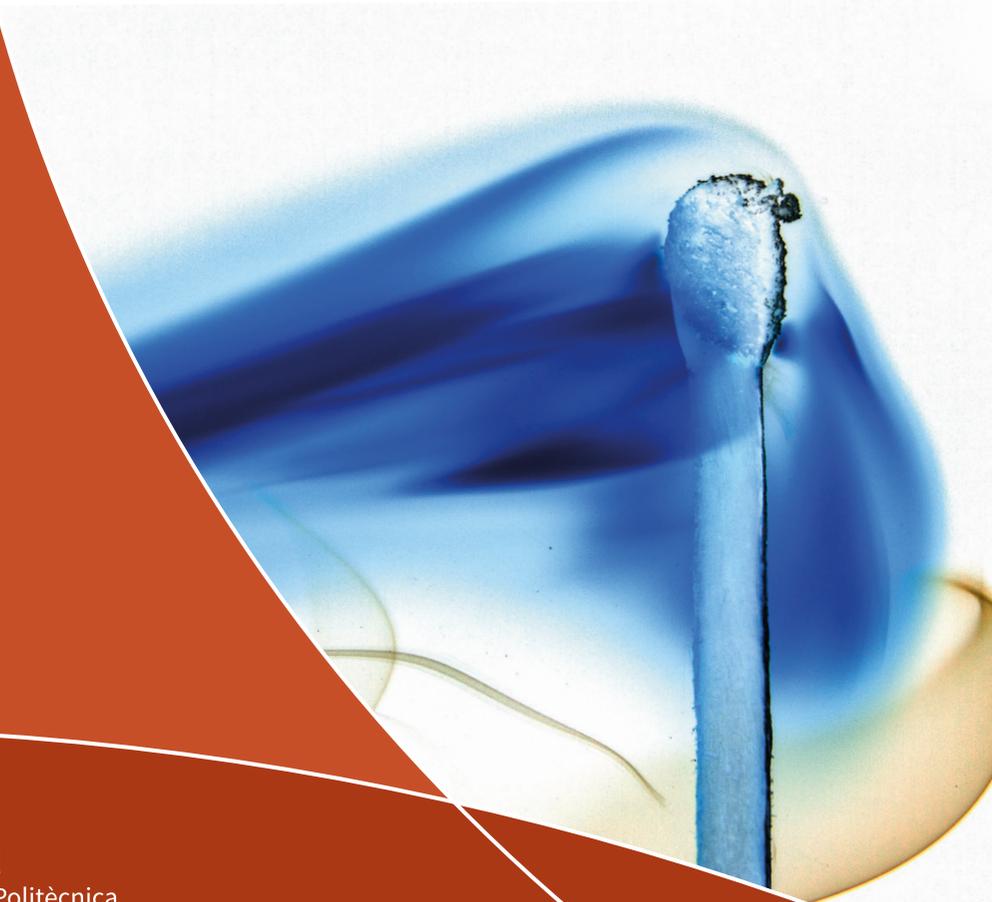




Problemas resueltos de combustión

José María García Oliver | Antonio García Martínez
Joaquín de la Morena Borja | Javier Monsalve Serrano



Editorial

Universitat Politècnica
de València

José María García Oliver
Antonio García Martínez
Joaquín de la Morena Borja
Javier Monsalve Serrano

Problemas resueltos de combustión

Colección Académica

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: García Oliver, J. M.; García Martínez, A.; de la Morena Borja, J.; Monsalve Serrano, J. (2019). *Problemas resueltos de combustión*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

© José María García Oliver
Antonio García Martínez
Joaquín de la Morena Borja
Javier Monsalve Serrano

© 2019, Editorial Universitat Politècnica de València
Venta: www.lalibreria.upv.es / Ref.: 0990_02_01_01

Imprime: Byprint Percom, sl

ISBN: 978-84-9048-617-7
Impreso bajo demanda

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a edicion@editorial.upv.es

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

Impreso en España

Introducción

La combustión es una transformación energética que ha acompañado a la humanidad desde la prehistoria, y ha posibilitado una gran parte del progreso del que actualmente disfruta. Debido a su relevancia, el estudio de los fundamentos de la misma se incluye en un gran número de planes de estudio de titulaciones de ingeniería en nuestro país, como paso previo para el posterior análisis de soluciones tecnológicas que la emplean, como por ejemplo hornos, calderas o motores.

La presente publicación recoge la experiencia docente de los autores en cursos de fundamentos de combustión impartidos en diferentes titulaciones de los campos de la Ingeniería Aeroespacial, Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial de la Universitat Politècnica de València, si bien se ha redactado con la intención de que sea útil en cualquier otro curso introductorio sobre esta materia. En estas asignaturas se pretende que el estudiante adquiera los conceptos necesarios para describir la fenomenología de los procesos de combustión, y comprenda las herramientas teóricas y de cálculo necesarias para el dimensionado de llamas sencillas, como base de las que se emplean en los sistemas tecnológicos reales. En este sentido, el libro contiene una colección de problemas resueltos que permiten a los estudiantes afianzar los conceptos teóricos y tomar orden de magnitud de diferentes variables relevantes para el análisis de las llamas.

El libro ha sido dividido en tres grandes bloques, tal como se suele abordar la materia en estos cursos. En el primero, **Termoquímica y autoencendido**, se presentan problemas relacionados con la parte química del proceso de combustión. A través de diferentes ejercicios se presentan ejemplos del cálculo de la composición de los productos y la temperatura del proceso de combustión con diferentes grados de complejidad, desde la reacción de un solo paso al equilibrio químico. Se aborda también cálculos de cinética química, fundamental a la hora de determinar el tiempo de autoencendido de una mezcla o la formación de contaminantes.

El segundo bloque se dedica a la **Combustión premezclada**, que ocurre en las situaciones en que el combustible y el comburente llegan mezclados al frente de llama, como en quemadores domésticos o motores de encendido provocado. A lo largo del mismo se analizan los fenómenos de estabilización del frente de llama en un flujo, la velocidad de combustión laminar o procesos de encendido y apagado de llama.

Finalmente, el último bloque contiene los contenidos relacionados con la **Combustión por difusión**, situación en que combustible y comburente llegan separados al frente de llama, como ocurre en hornos industriales o motores de encendido por compresión. Se analizan casos de chorros inyectados en un ambiente quiescente, donde el combustible puede estar en fase líquida o gas.

En cada caso se ha intentado que quede claro el objetivo de cálculo, realizando una exposición detallada de los conceptos teóricos subyacentes y la argumentación necesaria para su resolución. Para abordar estos problemas, el estudiante ha de contar con conocimientos previos del ámbito de la Química, la Mecánica de Fluidos y la Termodinámica, alguno de ellos revisados en las indicaciones. Se ha intentado que la resolución de los problemas muestre su estructura secuencial para que el lector aprecie que muchos son susceptibles de ser resueltos con la ayuda de un ordenador, en entornos de hojas de cálculo o mediante lenguajes de programación. Si bien no se han incluido ficheros informáticos, se recomienda esta práctica. La experiencia de los autores impartiendo esta materia indica que al construir la resolución informática los alumnos mejoran su comprensión del problema. Además, pueden realizar variaciones sobre los datos de partida y profundizar en las relaciones causa-efecto cuantificadas con estos problemas.

En resumen, se pretende que este libro sirva de ayuda en primera instancia a estudiantes, pero también a cualquier otra persona interesada en conocer los fundamentos de la combustión, y que le permita fijar conceptos en este campo que le ayuden a entender la problemática a la que se enfrentan los sistemas reales en que se emplea.

Índice general

Nomenclatura	V
Bloque I. Termoquímica y autoencendido	1
P 1. Cálculo del dosado estequiométrico para combustible real.....	3
P 2. Cálculo de consumo medio de combustible a partir de las emisiones de CO ₂ ...	10
P 3. Cálculo de productos de la combustión: reacción a un solo paso.....	13
P 4. Temperatura adiabática a partir del poder calorífico.....	19
P 5. Temperatura adiabática a partir de las entalpías de formación.....	25
P 6. Disociación en equilibrio termodinámico	31
P 7. Temperatura adiabática con disociación	35
P 8. Balance en una caldera	44
P 9. Cinética Química: mecanismo de Zeldovich.....	47
P 10. Autoencendido del iso-octano	50
P 11. Autoencendido en un motor cohete.....	56
Bloque II. Combustión premezclada	59
P 12. Cálculo del frente de llama premezclada en un quemador con velocidad de salida uniforme.....	61
P 13. Cálculo del frente de llama premezclada en un quemador con velocidad de salida no uniforme	65
P 14. Velocidad de combustión laminar	70
P 15. Combustión premezclada turbulenta en un motor de encendido provocado	72
P 16. Energía mínima en un proceso de encendido	78
P 17. Límites de inflamabilidad.....	81
P 18. Diámetro crítico en quemadores de llama premezclada	84

Bloque III. Combustión por difusión	91
P 19. Difusión laminar: chorro isodenso	93
P 20. Difusión turbulenta: comparación inerte-reactivo	99
P 21. Difusión turbulenta: influencia del combustible	104
P 22. Difusión turbulenta: chorro líquido en motordiesel.....	109
P 23. Regímenes de atomización de chorros líquidos	116
P 24. Coalescencia.....	120
Bibliografía complementaria.....	125

Nomenclatura

\dot{m}	Gasto másico
$[C]$	Concentración molar de compuestos activos
$[P]$	Concentración molar de productos
$[R]$	Concentración molar de reactivos
a	Factor de escala de la intensidad turbulenta en un motor de encendido provocado
A	Área
A/F	Relación aire-combustible
a_i	Coefficientes de los polinomios del c_p en función de la temperatura
C	Concentración molar
C_D	Coefficiente aerodinámico
C_f	Consumo específico de combustible
c_m	Velocidad media del pistón en un motor de combustión interna alternativo
c_p	Calor específico a presión constante
d	Diámetro
D	Difusividad másica
Da	Número de Damköhler
d_e	Distancia o separación entre los electrodos de una bujía de encendido
d_{eq}	Diámetro equivalente
d_q	Distancia de apagado de una llama premezclada por cercanía a la pared o <i>quenching</i>
d_T	Diámetro crítico para el apagado de una llama premezclada al atravesar un orificio
E_{min}	Energía mínima a aportar en un proceso de encendido provocado
F	Dosado absoluto
f	Fracción de mezcla
F_r	Dosado relativo

Fr	Número de Froude
G	Energía libre de Gibbs
H	Entalpía
h	Entalpía específica
$H_{c,i}$	Poder calorífico inferior
$H_{c,s}$	Poder calorífico superior
H_f°	Entalpía de formación estándar
K	Constante de equilibrio químico
k	Coefficiente de velocidad específica de una reacción química
Ka	Número de Karlovitz
L	Longitud
L_{eg}	Distancia promedio intergota
L_{LL}	Longitud de llama
L_T	Macroescala de Taylor
m	Masa
m,n,p	Número de átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno de un hidrocarburo
n	Número de moles
N	Régimen de giro del motor
n_T	Número de moles total en una mezcla de gases
Oh	Número de Ohnesorge
P	Presión
p	Presión parcial
PA	Peso atómico
P_{choque}	Probabilidad de choque entre dos gotas
Pe	Número de Péclet
PM	Peso molecular
Pr	Número de Prandtl

Q	Calor
Q_{TC}	Pérdidas por transmisión de calor
Q_u	Calor útil
R	Constante de un gas ideal en J/kg·K
r	Radio o posición radial
Re	Número de Reynolds
R_u	Constante universal de los gases ideales en J/kmol·K
S	Carrera del motor
S	Parámetro de estequiometría en la correlación de Roper con aireación primaria
Sc	Número de Schmidt
S_e	Relación molar aire-combustible estequiométrica
T	Temperatura
U	Energía interna
u	Velocidad
u'	Componente pulsante de la velocidad
u_{esc}	Velocidad de escape de un motor cohete
u_{LO}	Velocidad de combustión laminar en condiciones estándar
u_{th}	Velocidad teórica de salida de un quemador de combustible líquido según la ecuación de Bernoulli
V	Volumen
X	Fracción molar
x	Posición axial
Y	Fracción másica
Y_{dil}	Fracción másica de diluyentes (quemados) recirculados
Z	Altura de la llama premezclada

Símbolos griegos

α	Difusividad térmica
α	Coefficiente de ramificación de cadena en el mecanismo simplificado de Glassman
α_l	Ángulo del frente de llama premezclada laminar
α_M	Coefficiente de influencia de la temperatura en la correlación de Metghalchi-Keck
β	Ángulo de apertura del chorro
β_l	Ángulo del frente de llama premezclada con el quemador
β_M	Coefficiente de influencia de la presión en la correlación de Metghalchi-Keck
γ	Coefficiente adiabático
δ	Espesor del frente de llama premezclada
ΔH_{vap}	Entalpía de vaporización
η	Concentración volumétrica media de gotas en un chorro
λ_k	Microescala de Kolmogorov
μ	Viscosidad dinámica
ρ	Densidad
σ	Tensión superficial
τ	Tiempo de retraso al autoencendido
τ_c	Tiempo de frenado de una gota
τ_f	Tiempo característico físico
τ_q	Tiempo característico químico
τ_r	Tiempo de rotura de una gota
ν	Viscosidad cinemática
ψ	Factor de aireación primaria
Ω	Volumen de interferencia entre dos gotas

Subíndices

<i>0</i>	Condiciones estándar (25°C, 1 atm)
∞	Ambiente
<i>a</i>	aire
<i>ad</i>	Adiabática
<i>b</i>	Descarga
<i>cl</i>	Línea central (eje) del chorro
<i>cr</i>	Crítico
<i>e</i>	Entrada
<i>est</i>	Estequiométrico
<i>f</i>	Combustible
<i>g</i>	Gota
<i>ge</i>	Gases de escape
<i>in</i>	Inyección
<i>L</i>	Laminar
<i>l</i>	Líquido
<i>LL</i>	Llama
<i>o</i>	Condiciones de salida del quemador
<i>P</i>	Productos
<i>q</i>	Gases quemados
<i>R</i>	Reactivos
<i>s</i>	Salida
<i>sq</i>	Gases sin quemar
<i>T</i>	Turbulento
<i>vap</i>	Vapor

Bloque I

Termoquímica y autoencendido

P 1.	Cálculo del dosado estequiométrico para combustible real	3
P 2.	Cálculo de consumo medio de combustible a partir de las emisiones de CO ₂ ..	10
P 3.	Cálculo de productos de la combustión: reacción a un solo paso	13
P 4.	Temperatura adiabática a partir del poder calorífico	19
P 5.	Temperatura adiabática a partir de las entalpías de formación.....	25
P 6.	Disociación en equilibrio termodinámico	31
P 7.	Temperatura adiabática con disociación.....	35
P 8.	Balance en una caldera	44
P 9.	Cinética Química: mecanismo de Zeldovich.....	47
P 10.	Autoencendido del iso-octano	50
P 11.	Autoencendido en un motor cohete	56

P1. Cálculo del dosado estequiométrico para combustible real

Los responsables de la operación de un horno cerámico están evaluando tres combustibles diferentes (líquidos/sólidos) para la operación del mismo:

- Fueloil 4 (exceso aire 10%)
- Carbón Almería (exceso aire 15%)
- Carbón Teruel (exceso aire 25%)

Las condiciones de contorno del problema son:

- Temperatura inicial (combustible + aire) = 50°C
- Temperatura de humos = 180°C
- Calor liberado en el secado cerámico (útil) = 200MW

CALCULAR

- 1) El dosado estequiométrico para cada uno de los combustibles
- 2) Los gastos en [kg/s] y [t/día] de:
 - Entrada: combustible y aire
 - Salida: humos, cenizas, CO₂, SO₂, H₂O, N₂ y O₂

DATOS

- $C_{p_{humos}} = 1.05 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$; $C_{p_{reactivos}} = 1.08 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$
- Pesos atómicos: C: 12 g/mol, H: 1 g/mol, O: 16 g/mol, N: 14 g/mol, S: 32 g/mol

% masa	Fueloil	Carbón importación	Carbón España
C	85.5	65.3	28.5
H	11.7	3.6	2.1
O+N	0	0	0
S	1.8	0.6	6.8
Agua	1.0	8.0	18.6
Cenizas	0.0	22.5	44.0
HCs [kJ/kg]	43380	26752	12113

SOLUCIÓN

1) Calcular el dosado estequiométrico para cada uno de los combustibles

Aplicando la definición de dosado estequiométrico se tiene:

$$F_{est} = \frac{m_f}{m_a} \Big|_{est} \quad (I)$$

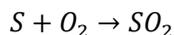
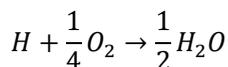
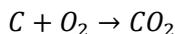
- Considerando que la masa de oxígeno necesaria para oxidar todo el combustible se puede expresar como:

$$m_{O_2} = m_a \cdot Y_{O_2} \quad (II)$$

- Teniendo en cuenta que la fracción másica de O_2 en aire es una constante ($Y_{O_2} = 0.23$), el dosado estequiométrico se puede escribir:

$$F_{est} = \frac{m_f}{m_a} \Big|_{est} = \frac{m_f}{m_{O_2}} \Big|_{est} \cdot Y_{O_2} \quad (III)$$

Por tanto, para obtener el dosado estequiométrico se tiene que calcular el factor $\frac{m_f}{m_{O_2}} \Big|_{est}$. En este caso, se calculará su inversa $\frac{m_{O_2}}{m_f} \Big|_{est}$, esto es, cuántos kg de O_2 son necesarios para oxidar una unidad de masa de combustible. El dato de partida es la composición elemental del combustible, esto es, las fracciones másicas de los elementos C, H y S que contiene cada combustible. Se va a considerar que estos tres elementos sufren las siguientes reacciones de oxidación:



De las reacciones químicas anteriores, se tiene la relación molar entre el oxígeno y cada uno de los tres elementos que se oxidan:

$$\frac{n_{O_2}}{n_C} = 1$$

$$\frac{n_{O_2}}{n_H} = 1/4$$

$$\frac{n_{O_2}}{n_S} = 1$$

Para seguir leyendo haga click aquí