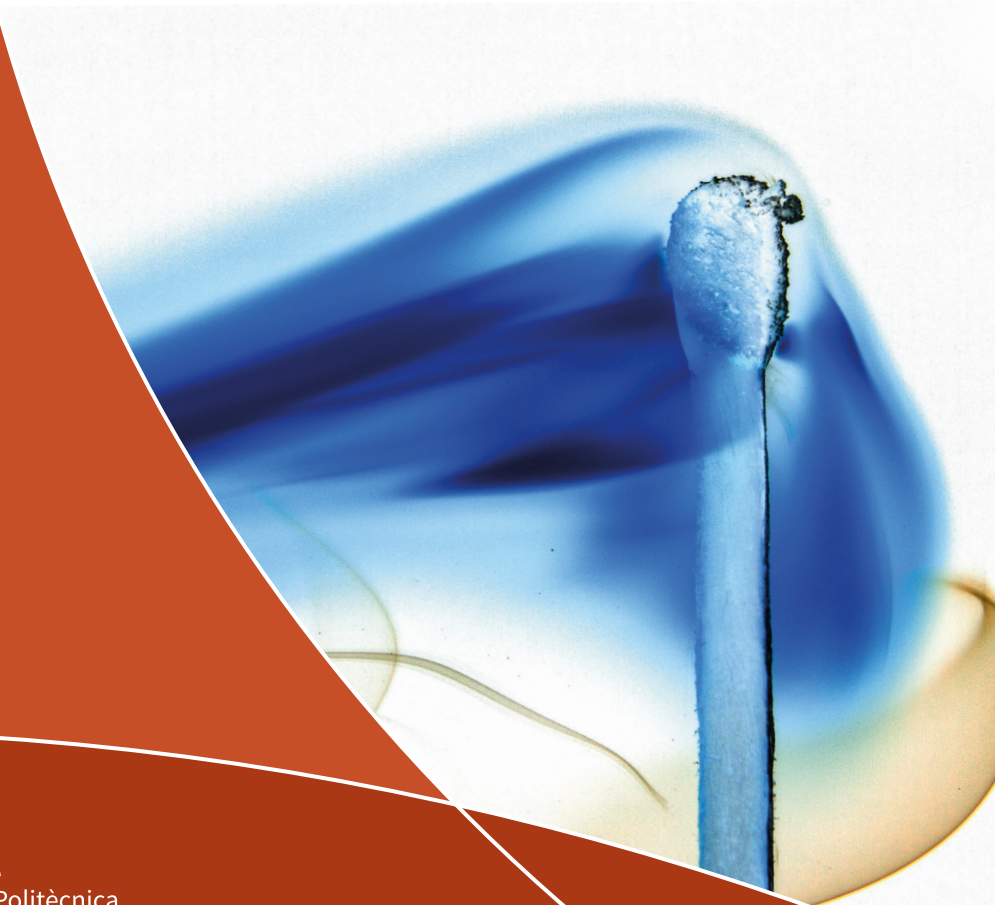




# Problemas resueltos de combustión

**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](http://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](mailto: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](mailto: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
<b>Bloque I. Termoquímica y autoencendido .....</b>	<b>1</b>
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 <sub>2</sub> ...	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
<b>Bloque II. Combustión premezclada .....</b>	<b>59</b>
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

<b>Bloque III. Combustión por difusión .....</b>	<b>91</b>
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
$H_f^\circ$	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*

$\alpha$	Difusividad térmica
$\alpha$	Coefficiente de ramificación de cadena en el mecanismo simplificado de Glassman
$\alpha_l$	Ángulo del frente de llama premezclada laminar
$\alpha_M$	Coefficiente de influencia de la temperatura en la correlación de Metghalchi-Keck
$\beta$	Ángulo de apertura del chorro
$\beta_l$	Ángulo del frente de llama premezclada con el quemador
$\beta_M$	Coefficiente de influencia de la presión en la correlación de Metghalchi-Keck
$\gamma$	Coefficiente adiabático
$\delta$	Espesor del frente de llama premezclada
$\Delta H_{vap}$	Entalpía de vaporización
$\eta$	Concentración volumétrica media de gotas en un chorro
$\lambda_k$	Microescala de Kolmogorov
$\mu$	Viscosidad dinámica
$\rho$	Densidad
$\sigma$	Tensión superficial
$\tau$	Tiempo de retraso al autoencendido
$\tau_c$	Tiempo de frenado de una gota
$\tau_f$	Tiempo característico físico
$\tau_q$	Tiempo característico químico
$\tau_r$	Tiempo de rotura de una gota
$\nu$	Viscosidad cinemática
$\psi$	Factor de aireación primaria
$\Omega$	Volumen de interferencia entre dos gotas

## Subíndices

<i>0</i>	Condiciones estándar (25°C, 1 atm)
$\infty$	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 <sub>2</sub> ..	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, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>

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:

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

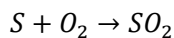
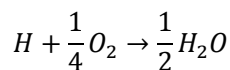
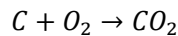
- Considerando que la masa de oxígeno necesaria para oxidar todo el combustible se puede expresar como:

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

- 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**