



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Principios Básicos de la Combustión

Apellidos, nombre	Barrera Puigdollers, Cristina ¹ (mcbapu@tal.upv.es) Betoret Valls, Noelia ¹ (noebevalal.upv.es) Castelló Gómez, Marisa ¹ (mcasgo@upvnet.upv.es) Pérez Esteve, Édgar ¹ (edpees@upv.es)
Departamento	¹ Departamento de Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se describe el proceso de combustión, los parámetros que la definen y las características de las diferentes formas de realizarla, con la finalidad de alcanzar la máxima eficacia y el menor impacto medioambiental posible.

2 Introducción

Muchos de los procesos industriales llevados a cabo en las empresas, especialmente del sector de alimentación y bebidas, requieren una demanda significativa de calor. En la mayoría de las operaciones de transformación y conservación de alimentos, así como en la limpieza de equipos o en la climatización de las instalaciones, son necesarias cantidades importantes de energía térmica [1], [2]. En los mataderos, las operaciones mayores consumidoras de energía térmica son el escaldado y depilado con vapor, en las que se consume aproximadamente 29 kWh/Tn de carne tratada. En el caso de los embutidos curados, la operación más importante desde el punto de vista del consumo energético es el secado, en la que el consumo de energía térmica oscila en torno a 693 kWh/Tn. Otro de los sectores agroalimentarios de mayor peso en el consumo energético es el lácteo quesero, en el que la producción de vapor y agua caliente supone hasta el 80% del consumo energético total del proceso y en torno al 3% del coste final del producto. Por operaciones, el secado en torres de atomización presenta el mayor consumo energético (836 kJ/kg agua evaporada), seguido de la concentración en evaporadores (502 kJ/kg agua evaporada), la esterilización (133,8 kJ/kg agua evaporada) y la pasteurización (102,8 kJ/kg agua evaporada).

Las instalaciones de combustión son aquellas que, aplicando el calor de algún combustible sólido, líquido o gaseoso, calientan y evaporan el agua para generar vapor a alta presión o agua sobrecalentada que se emplean directamente en los procesos productivos o indirectamente mediante el accionamiento de turbinas o el calentamiento de otros fluidos. En el caso de la industria de alimentación y bebidas, el combustible más utilizado es el gas natural, que representa el 44% del consumo total del sector y en torno al 10% del total de combustible empleado por la industria española [1]. Destaca también el sector en cuanto al consumo de biocombustibles renovables, fundamentalmente leña, pellets, hueso de aceituna, cáscara de almendra, etc. En cualquier caso, las instalaciones de combustión representan uno de los puntos de consumo energético y de emisión de gases contaminantes más elevados de un establecimiento industrial, por lo que resulta de gran importancia tomar medidas que permitan aumentar el ahorro energético y reducir el impacto medioambiental para mejorar la competitividad de la industria en cuestión [3]. Para tal fin, es imprescindible conocer las principales características y el funcionamiento que muestran este tipo de instalaciones industriales.

3 Objetivos

Una vez que el alumno lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Describir el proceso de combustión e identificar los elementos necesarios para que éste pueda llevarse a cabo.

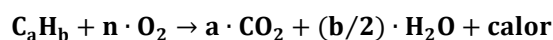


- Calcular el poder comburívoro o volumen de aire mínimo necesario para la combustión completa de un determinado combustible.
- Definir el coeficiente de exceso de aire y explicar su efecto sobre el tipo de combustión, su rendimiento y la composición de los humos generados.
- Describir las propiedades más relevantes y los aspectos a considerar del empleo de los combustibles más utilizados en la industria.
- Manejar el diagrama de combustión de un determinado combustible para estimar el exceso de aire a emplear en la combustión y la composición completa de los humos secos a partir de su contenido en O₂, CO₂ o CO.
- Identificar los factores de los que depende el rendimiento o eficiencia de la combustión y estimar su valor en función de la temperatura de salida de los gases generados y del exceso de aire empleado en el proceso.

4 Combustión y combustibles

4.1 Principio de la combustión

La combustión es el conjunto de procesos físico-químicos en los que un combustible (C_aH_b) se oxida en presencia de un elemento comburente (generalmente O₂ atmosférico), desprendiendo luz y calor en forma de llama, junto a otros productos químicos resultantes de la reacción (ecuación 1).



Ecuación 1. Reacción de combustión.

Como se observa en la ecuación 1, la oxidación del carbono resulta en la formación de CO₂, conocido gas de efecto invernadero para el que existen límites de emisión a la atmósfera. Dado que la cantidad de CO₂ emitido aumenta con la concentración de carbono en el combustible, conviene evitar el empleo de combustibles ricos en carbono (carbón, propano, butano, gasóleo, etc.) en favor de otros más ricos en hidrocarburos sencillos (entre los que destaca el gas natural por su elevado contenido en metano).

La reacción de combustión tiene lugar en tres fases:

- **Fase de pre-reacción**, en la que el combustible se descompone dando lugar a la formación de radicales inestables y muy activos.
- **Fase de oxidación**, en la que se combinan los radicales con el oxígeno de modo exotérmico y se propaga la llama.
- **Fase de terminación**, en la que se forman los compuestos estables finales o gases de combustión.

Para que se produzca la combustión, el **combustible** y el **comburente** deben encontrarse en el espacio y en el tiempo en unas proporciones adecuadas. Adicionalmente, se precisa una fuente de energía (**fuelle de ignición**) que inicie y mantenga esta combustión. El conjunto de estos tres elementos es lo que se denomina **triángulo de combustión** o **triángulo de fueuo** (imagen 1).



Imagen 1. Triángulo de la combustión.

Además, para que se inicie la combustión, el combustible ha de encontrarse en estado gaseoso. Es por ello que los combustibles sólidos y líquidos deben calentarse primero hasta la **temperatura de gasificación**, a la cual desprenden vapores, y seguir calentándose hasta la **temperatura de ignición**, a la cual se inflaman espontáneamente. En el caso de una mezcla de gas natural y aire, el autoencendido tiene lugar a una temperatura del orden de 650-750 °C.

4.2 Tipos de combustión

De acuerdo con el nivel de combustión alcanzado y la cantidad de comburente aportado, se pueden dar los siguientes tipos de combustión [3]:

- **Combustión completa**, si se oxida todo el combustible y en los gases de combustión sólo aparece N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 . Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire igual o superior a la estrictamente necesaria según la estequiometría de la reacción.
- **Combustión incompleta**, si no se oxida todo el combustible y aparecen inquemados en los gases de combustión (CO , H_2 , C , H_2S y C_nH_m), sustancias contaminantes que pueden seguir oxidándose. Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire inferior a la necesaria según la estequiometría de la reacción.

Por lo general, se recomienda evitar las mezclas de aire-combustible cercanas a la estequiométrica puesto que pequeños cambios en los parámetros de operación (como pequeñas variaciones en el suministro de aire) pueden desbalancear la relación aire-combustible, produciendo un aumento de CO . Sin embargo, incorporar un exceso de aire a la combustión para evitar la producción de inquemados supone disminuir su rendimiento al tener que calentar un mayor volumen de aire. Por esto se define el **coeficiente de exceso de aire** como la relación entre la cantidad de aire introducida en el proceso de combustión (A_{real}) y la necesaria para una combustión estequiométrica (A_{min}). Se representa mediante un número adimensional (n) y su valor depende de la composición del combustible empleado: entre 1,4 y 2,5 (exceso de aire de 40 a 150%) para combustibles sólidos, entre 1,25 y 1,6 (exceso de aire de 25 a 60%) para combustibles líquidos y entre 1,1 y 1,4 (exceso de aire de 10 a 40%) para combustibles gaseosos [4]. El volumen mínimo de aire seco medido en condiciones normales ($P = 1 \text{ atm}$ y $T = 0 \text{ °C}$) necesario para la combustión estequiométrica de la unidad de combustible es el **poder comburívoro** del combustible y se calcula a partir de su composición (ecuaciones 2 a 4). Por otra parte, el volumen de gases producidos en la combustión estequiométrica de la unidad de combustible es el **poder fumígeno** del combustible.



$$[O]_{\min} = 2,67[C] + 8[H] + [S] - [O] \text{ en kg O}_2/\text{kg combustible}$$

Ecuación 2. Cantidad de O₂ mínima necesaria para la combustión completa.

$$A_{\min} = [O]_{\min}/0,23 \text{ en kg aire/kg combustible}$$

Ecuación 3. Cantidad de aire mínima necesaria para la combustión completa.

$$V_{\min} = A_{\min}/1,293 \text{ en Nm}^3 \text{ aire/kg combustible}$$

Ecuación 4. Volumen de aire mínimo necesaria para la combustión completa.

siendo [C], [H], [S] y [O] las fracciones másicas de carbono, hidrógeno, azufre y oxígeno en el combustible, respectivamente.

En el caso del gas propano (81,81% en peso de carbono y 18,18% en peso de hidrógeno) serían necesarios 3,64 kg de O₂ para la combustión completa de 1 kg de combustible o 15,82 kg de aire, lo que equivale a un poder comburívoro de 12,23 Nm³ aire/kg combustible.

4.3 Tipos de combustibles

Combustible es cualquier material capaz de liberar energía en forma de calor cuando reacciona con el oxígeno. Se componen fundamentalmente de carbono e hidrógeno, pero también pueden contener pequeñas cantidades de azufre (cuya combustión produce SO₂ que hidroliza y forma ácido sulfúrico, responsable de la denominada "lluvia ácida"), oxígeno e inertes, tales como humedad, cenizas, CO₂ y nitrógeno (cuya combustión produce óxidos de nitrógeno con efecto invernadero) [3][5].

De acuerdo con su estado de agregación, los combustibles se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos (tabla 1):

- **Combustibles sólidos**, son los que mantienen una forma y volumen definidos debido a que las fuerzas de atracción molecular son superiores a las que originan los movimientos moleculares. Pueden ser de procedencia natural u obtenerse artificialmente mediante técnicas de descomposición térmica o como residuos de otros procesos químicos. Precisan de una zona de almacenamiento en la instalación y emiten contaminantes locales (cenizas). A este grupo pertenece el **carbón**, mayor emisor de CO₂ por kWh.
- **Combustibles líquidos**, son los que no poseen una forma definida pero mantienen un volumen determinado debido a que las fuerzas que originan los movimientos moleculares son elevadas frente a las fuerzas de atracción como para permitir el movimiento de las moléculas entre sí. Al igual que los combustibles sólidos, precisan de una zona de almacenamiento en la instalación. A este grupo pertenecen las **gasolinas, gasóleos y fuelóleos**, importantes emisores de óxidos de azufre y nitrógeno.
- **Combustibles gaseosos**, de forma y volumen variables, ejercen presión sobre las paredes del recipiente que los contiene debido a que las fuerzas que originan los movimientos moleculares son muy



superiores a las fuerzas de atracción entre moléculas. No requieren depósitos de almacenamiento, su precio es bastante estable y competitivo y, a diferencia de los combustibles líquidos derivados del petróleo, su suministro está garantizado. A este grupo pertenece el **gas natural**, uno de los combustibles menos contaminantes que, además de carecer de azufre en su composición, produce un 57% menos de CO₂ que el carbón y un 34% menos que el gasóleo. Por el contrario, la producción de H₂O es máxima en el gas natural lo que, como comentaremos a continuación, disminuye notablemente la cantidad de energía desprendida por unidad de combustible en comparación con que se obtiene a partir de los **gases licuados del petróleo** (en los que propano y butano son dominantes).

SÓLIDOS	NATURALES	<ul style="list-style-type: none"> • Vegetales (madera) • Fósiles (carbón)
	ARTIFICIALES	<ul style="list-style-type: none"> • Coques de carbón y petróleo • Aglomerados y briquetas • Carbón vegetal
LÍQUIDOS	ALCOHOLES	<ul style="list-style-type: none"> • Naturales • Artificiales
	RESIDUALES	<ul style="list-style-type: none"> • Lejías negras
	DERIVADOS DEL PETRÓLEO	<ul style="list-style-type: none"> • Gasóleos • Fuelóleos
GASEOSOS	RESIDUALES	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel-gas
	GAS NATURAL	<ul style="list-style-type: none"> • Diferentes familias
	LICUADOS DEL PETRÓLEO	<ul style="list-style-type: none"> • Propano • Butano
	ARTIFICIALES O ELABORADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Gas de horno alto • Gas de coquería • Gas pobre • Gas de agua • Gases de gasógeno • Gas ciudad
	BIOGAS	

Tabla 1. Tipos de combustibles de acuerdo a su estado de agregación [6].

El **poder calorífico** de un combustible, esto es, la cantidad de energía desprendida por la unidad de combustible en su combustión completa a presión atmosférica, depende de su composición [3]. En general, los combustibles sólidos son los que producen menor cantidad de vapor por unidad de masa, seguidos de los combustibles líquidos y de los gaseosos. Dependiendo del estado en que aparezca el agua en los humos, se distinguen dos tipos de poderes caloríficos (tabla 2):

- **Poder calorífico inferior (Hi)**, es el calor que se obtiene en la combustión completa de la unidad de combustible cuando en los productos de la combustión el agua está en forma de vapor. Esto implica que no se aprovecha todo el calor generado en las oxidaciones, ya que una parte se utiliza para evaporar el agua. Es el poder calorífico más comúnmente utilizado.



- **Poder calorífico superior (Hs)**, es el calor generado cuando en los productos de la combustión el agua aparece en forma líquida, es decir, que se aprovecha todo el calor debido a la oxidación de los componentes del combustible. Esto se consigue enfriando los gases quemados hasta la temperatura de rocío, lo que provoca la condensación del vapor de agua y la cesión de su calor latente de cambio de estado.

COMBUSTIBLE	PODER CALORÍFICO		Hi/Hs (%)
	INFERIOR (Hi)	SUPERIOR (Hs)	
Carbón	9,08 kWh/kg	9,43 kWh/kg	96,3
Gasóleo	10,28 kWh/l	10,89 kWh/l	94,4
Gas butano	12,73 kWh/kg	13,79 kWh/kg	92,3
Gas propano	12,86 kWh/kg	13,97 kWh/kg	92,1
Gas natural	10,83 kWh/Nm ³	11,98 kWh/Nm ³	90,4

Tabla 2. Poder calorífico de los combustibles más utilizados en la industria [3].

4.4 Diagramas de combustión

Según lo comentado en apartados anteriores, la composición de los gases de combustión será diferente en función de la naturaleza del combustible y, para un mismo combustible, en función de las condiciones de combustión, especialmente del valor que tome el coeficiente de exceso de aire. Los **diagramas de combustión** permiten, para un determinado combustible, calcular el exceso de aire del proceso, la composición de los humos y las proporciones de CO₂ y O₂ necesarios [7]:

- El **diagrama de Ostwald**, determina el exceso de aire mediante el porcentaje de los gases que intervienen en la combustión. En él podemos identificar la línea de combustión completa, en la que todo el carbono se transforma en CO₂; las rectas equivalentes en CO, paralelas a la línea de combustión completa, que determinan la cantidad de CO que se genera en una combustión incompleta; y las líneas paralelas de exceso o defecto de aire, que indican el coeficiente de exceso de aire en la combustión. Como limitación, el diagrama de Ostwald solo muestra las cantidades producidas de CO y no las del resto de posibles inquemados.
- El **diagrama de Keller** se emplea para combustiones incompletas y, además de aparecer la cantidad de CO producida, también recoge la cantidad de H₂ y, dependiendo del tipo de combustible, de algunos productos inquemados.
- El **diagrama de Kissel** se usa en combustiones incompletas de gases.
- El **diagrama de Bunte** se utiliza únicamente para procesos de combustión completa.

A modo de ejemplo (gráfico 1), suponiendo que el análisis de los humos secos resultantes de la combustión del gas natural revelara un contenido



del 8% en CO₂ y del 5,7% en O₂, el punto representativo (A) se encontraría en la zona de combustión con exceso de aire y el valor del coeficiente de exceso de aire sería 0,3 (es decir, 30%). Por otra parte, la relación CO/CO₂ y H₂/CO₂ tomaría los valores 0,1 y 0,08, respectivamente, de manera que el porcentaje de inquemados sería del 0,08% en CO y del 0,64% en H y el N₂ representaría el 84,86% restante.

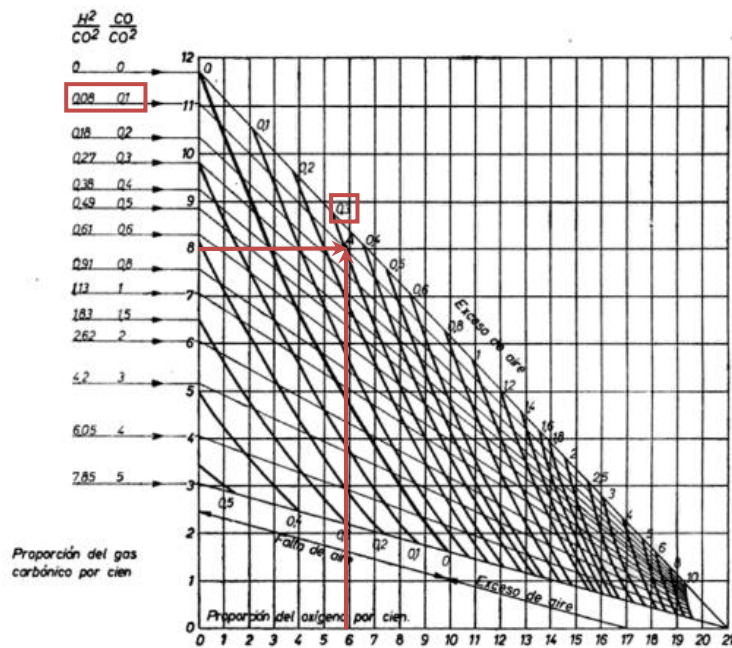


Gráfico 1. Diagrama de Keller del gas natural [4].

4.5 Rendimiento de la combustión

Para un buen aprovechamiento energético es necesario que la transformación de la energía química del combustible en calor y la transmisión de calor a la carga sean máximas o, dicho en otros términos, que las pérdidas de calor sean mínimas. El rendimiento o eficiencia de la combustión (η) se define como la relación entre el **calor útil** obtenido ($Q_{\text{útil}}$) y el **calor total** (Q_{total}) que aporta el combustible [3].

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{pérdidas}} = m_{\text{comb}} \cdot H_i$$

Ecuación 5. Pérdidas de calor totales asociadas al proceso de combustión.

donde m_{comb} es el caudal de combustible y H_i su poder calorífico inferior.

La diferencia entre el calor total y el calor útil será el calor perdido en el proceso de combustión (ecuación 5), que será debido a:

- **Pérdidas de calor por radiación** entre las paredes calientes del quemador y el entorno.
- **Pérdidas de calor latente** (q_L), debidas a que el vapor de agua formado ($m_{\text{H}_2\text{O}}$) se evacúa sin recuperar el calor latente de vaporización (H_v) necesario para su generación (ecuación 6).



$$q_L = m_{\text{humo}} \cdot H_v$$

Ecuación 6. Pérdidas de calor latente asociadas al proceso de combustión.

- **Pérdidas de calor sensible** (q_s), debidas a que los productos generados en la combustión y los gases inertes que no reaccionan se evacúan a una temperatura superior (T_{humo}) a la de entrada de combustible y comburente (T_{aire}). Representan casi la totalidad de las pérdidas de calor y su valor dependerá de la temperatura y el caudal de los gases de escape generados (m_{humo}), a su vez dependientes del exceso de aire empleado (ecuación 7).

$$q_s = m_{\text{humo}} \cdot c_{p_{\text{humo}}} \cdot (T_{\text{humo}} - T_{\text{aire}})$$

Ecuación 7. Pérdidas de calor sensible asociadas al proceso de combustión.

Como se muestra en el gráfico 2, la eficiencia de la combustión decrece al aumentar la temperatura de los gases de escape y el exceso de aire. A modo de ejemplo, si consideramos para el gas natural un 100% de exceso de aire ($n = 2$) y 550 °C de temperatura de los gases de combustión se tiene una eficiencia del 50% (punto B); para la misma temperatura y considerando un exceso de aire del 40% ($n = 1,4$), la eficiencia aumenta hasta el 61% (punto A).

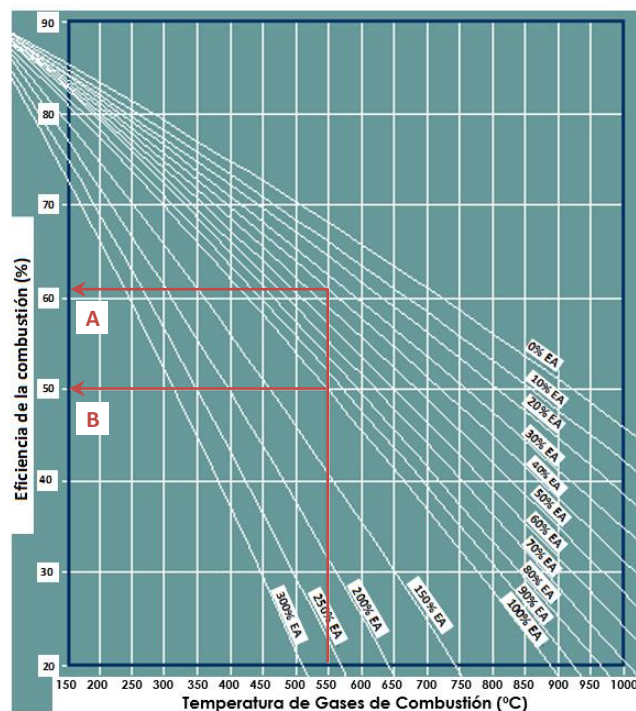


Gráfico 2. Eficiencia de la combustión en calderas y hornos que queman gas natural en función de la temperatura y el exceso de aire de la operación [8].



5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos descrito el proceso de combustión, los parámetros que la definen y cómo las diferentes formas de realizarla afectan a su rendimiento y a su impacto medioambiental.

6 Bibliografía

[1] Sánchez, P. (2012). "Presentación de las NECESIDADES ENERGÉTICAS del sector de la industria alimentaria". CONECTA BIOENERGIA 2012. Disponible en: <https://es.slideshare.net/AVEBIOM/la-industria-alimentaria-y-sus-necesidades-energeticas>

[2] Martínez Ruíz, P.M.; Cosme Moñino, J.M. (2014). Eficiencia Energética en Empresas del Sector Agroalimentario 2. Ed. Agencia Extremeña de la Energía. Disponible en: http://www.agenex.net/guias-altercexa/2_EF_ENERG_EN_EMPRESAS_DEL_SECTOR_AGROALIMENTARIO.pdf

[3] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (FENERCOM, 2013). Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>

[4] Borrás Brucart, E.: "Características de combustión de los gases", en Gas Natural: características, distribución y aplicaciones industriales, Ed. Técnicos Asociados, S.A., 1987, pág. 16-34.

[5] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2010). Guía técnica Diseño de centrales de calor eficientes. Disponible en: <http://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-diseno-de-centrales-de-calor-eficientes>

[6] García San José, R. (2001). Combustión y combustibles. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/313714495/Combustion-y-Combustibles>

[7] Entrena González, F. J.: "Combustión y combustibles", en Eficiencia Energética en las Instalaciones de Calefacción y ACS en los edificios. ENAC0108, IC Editorial, 2014.

[8] METROGAS, S.A. Combustión. Disponible en: http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1