

ÍNDICE

<i>Prólogo</i>	11
----------------------	----

UNIDAD DIDÁCTICA I FUNDAMENTOS

<i>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN</i>	17
1. Introducción.....	18
2. Interés en el estudio de la combustión.....	18
3. Definición de combustión.....	25
4. Tipos de procesos de combustión.....	25
5. Conocimientos previos y desarrollo del curso	27

<i>Capítulo 2. ECUACIONES DE CONSERVACIÓN DE LOS SISTEMAS REACTIVOS</i>	31
1. Introducción.....	32
2. Ecuaciones de conservación.....	33
3. Caracterización de mezclas reactivas.....	35
4. Ecuación de estado y ecuación calórica de estado	40
5. Transferencia de masa. Velocidad de difusión	44
6. Ecuación de conservación de las especies químicas.....	48
7. Resumen de las ecuaciones de conservación en sistemas reactivos	62
Resumen.....	64
Nomenclatura.....	64
Ejercicios de autoevaluación	66
Soluciones a los ejercicios de autoevaluación.....	66

<i>Capítulo 3. COMBUSTIÓN Y TERMOQUÍMICA</i>	71
1. Introducción.....	72
2. Repaso del proceso de combustión	72
2.1. Estequiometría y dosado	73
2.2. Entalpía de formación	77
2.3. Entalpía de combustión. Poder calorífico superior e inferior.	79

3. Temperatura adiabática de la llama	81
4. Equilibrio químico	83
5. Cálculo de la composición de equilibrio.....	90
5.1. Reacciones simultáneas	94
6. Productos de un proceso de combustión en equilibrio.....	100
Resumen	104
Nomenclatura	104
Ejercicios de autoevaluación.....	106
Soluciones a los ejercicios de autoevaluación	107
 <i>Capítulo 4. CINÉTICA QUÍMICA</i>	 125
1. Introducción	126
2. Reacciones globales y elementales. Mecanismo de reacción	127
2.1. Reacciones bimoleculares. Dependencia de la constante de reacción con la temperatura	131
2.2. Relación entre la constante de reacción y la constante de equilibrio termodinámico	135
2.3. Reacciones unimoleculares y trimoleculares	137
3. Velocidades netas de producción de una especie dado un mecanismo de reacción	139
4. Hipótesis de estado estacionario.....	143
5. Dependencia de la constante de reacción con la presión. Reacciones unimoleculares y trimoleculares.....	150
6. Hipótesis del equilibrio parcial.....	157
Resumen	160
Nomenclatura	160
Ejercicios de autoevaluación.....	162
Soluciones a los ejercicios de autoevaluación	165

UNIDAD DIDÁCTICA II
PROCESOS DE COMBUSTIÓN

<i>Capítulo 5. COMBUSTIÓN EN SISTEMAS HOMOGÉNEOS</i>	177
1. Introducción	178
2. Ecuaciones de conservación en sistemas homogéneos.....	180
3. Combustión en un sistema cerrado a volumen constante	192
4. Combustión en un sistema abierto con mezcla perfecta. Soluciones estacionarias	209
5. Ignición espontánea en cámara de volumen variable	225

Resumen	234
Nomenclatura.....	236
Capítulo 6. DETONACIONES Y DEFLAGRACIONES.....	241
1. Introducción.....	243
2. Diferencias entre detonaciones y deflagraciones	244
3. Análisis unidimensional.....	248
4. Propiedades de la curva de Rankine-Hugoniot.....	262
5. Estructura real de las detonaciones	272
Resumen	276
Nomenclatura.....	277
Ejercicios de autoevaluación	279
Soluciones a los ejercicios de autoevaluación.....	280
Capítulo 7. LLAMAS DE PREMEZCLA	303
1. Introducción.....	305
2. Descripción física.....	307
3. Análisis simplificado de la estructura de la llama	312
4. Mejoras en el análisis simplificado de la estructura de la llama	319
5. Factores influyentes en la velocidad y el espesor de la llama.....	327
6. Ignición, apagado y límites de inflamabilidad	334
6.1. Ignición	334
6.2. Apagado de llamas	345
6.3. Límites de inflamabilidad.....	349
7. Estabilidad de la llama en quemadores	354
Resumen	363
Nomenclatura.....	365
Capítulo 8. LLAMAS DE DIFUSIÓN	369
1. Introducción.....	370
2. Estudio cualitativo simplificado de las llamas de difusión	371
3. Termoquímica de las llamas de difusión.....	378
4. Ecuaciones de conservación en llamas de difusión	382
5. Escalas características	388
6. Análisis de Burke-Schumann	395
6.1. Fracción de mezcla y exceso de entalpía.....	399
Resumen	407

Nomenclatura	408
--------------------	-----

UNIDAD DIDÁCTICA III
GENERACIÓN DE CONTAMINANTES

<i>Capítulo 9. GENERACIÓN DE CONTAMINANTES</i>	415
1. Introducción	416
2. Clasificación de los contaminantes.....	416
3. Efectos de los contaminantes.....	418
4. Formación de óxidos de nitrógeno	426
4.1. Mecanismos de formación de los óxidos de nitrógeno	426
4.2. Técnicas de control de las emisiones de los óxidos de nitrógeno.....	432
5. Emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos.....	438
6. Emisiones de hollín	442
7. Emisiones de óxidos de azufre.....	445
Resumen	447
Nomenclatura	447
Ejercicios de autoevaluación.....	448
Soluciones a los ejercicios de autoevaluación	449
<i>Apéndices</i>	459
<i>Bibliografía</i>	469

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es introducir al alumno en la materia de la asignatura. En primer lugar se pretende justificar la importancia y el interés de estudiar el proceso de combustión, mostrando el papel que juega actualmente en el mundo, y el que ha jugado a lo largo de los siglos. Para ello se proporcionan las cifras correspondientes al consumo de energía primaria y energía final en el mundo en la actualidad, indicando el reparto por fuentes de energía y por sectores de consumo, destacando las cifras que se vinculan al proceso de combustión. También se proporcionan las cifras de emisiones de CO₂ anuales en el mundo. El objetivo es que el alumno aprecie la importante dependencia que la humanidad tiene en este momento de dicho proceso, pero también aprecie el peligro que le ocasiona.

Se especifica qué es un proceso de combustión, los diferentes tipos de procesos que pueden existir y los principales campos de aplicación en los que se utiliza.

El capítulo finaliza con unas indicaciones al alumno sobre los conocimientos que debe tener antes de comenzar el estudio de la asignatura, así como el detalle de cómo se ha estructurado la asignatura a través de los temas de que consta.

2. INTERÉS EN EL ESTUDIO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

El desarrollo de la humanidad siempre ha estado vinculado y condicionado por el uso de las fuentes de energía. El hombre, a lo largo de la historia, siempre ha utilizado aquellas fuentes de energía que en cada momento le resultaban más atractivas tanto por su disponibilidad como por su facilidad en el manejo de las mismas. El hombre descubrió el fuego hace 400.000 años. Aprendió a utilizarlo para calentarse, iluminarse y preparar alimentos. Hacia el tercer milenio a. de J.C. descubrió nuevas aplicaciones, utilizándolo para fundir minerales y extraer metales, para la fabricación de cerámica, ladrillos y vidrio, entre otros usos y aplicaciones. Desde entonces hasta nuestros días, el hombre no ha dejado de aprender más y más sobre el proceso que permite transformar la energía química

que tienen algunas fuentes de energía primaria en energía térmica, *el proceso de combustión*, y no ha dejado de encontrar nuevas aplicaciones, desarrollar nuevas máquinas en las que llevar a cabo dicho proceso y perfeccionar las ya existentes. Ello ha sido posible por lo indicado inicialmente, por la disponibilidad de las fuentes de energía y por el conocimiento y manejo de las mismas, habiendo conseguido dominio y seguridad en su uso. Pero, quizá, lo que realmente ha fomentado el desarrollo y conocimiento sobre el uso, diversificación y aprovechamiento de las fuentes de energía, es el hecho de que el hombre, desde sus orígenes hasta nuestros días, no ha dejado de aumentar su necesidad de consumir energía para el desarrollo de su vida. La situación actual es la de una sociedad con unas necesidades energéticas muy elevadas, con un ritmo de crecimiento energético anual alto, y con un aporte de casi el 90 % de la energía que consume, procedente de fuentes de energía que precisan de un proceso de combustión para transformar y aprovechar la energía de sus enlaces químicos.

Con esta brevísima introducción histórica, y con los datos que a continuación se proporcionan sobre el panorama energético mundial y actual, se quiere hacer notar la importancia que el conocimiento y control del proceso de combustión ha tenido y sigue teniendo en el desarrollo y bienestar de nuestra sociedad.

En el año 2003, el consumo mundial de energía fue de 10.723 Mtep (millones de toneladas equivalente de petróleo)¹. Desde 1928 (año desde el que existen datos oficiales al respecto), en el que el consumo de energía a nivel mundial fue de 1.166 Mtep, el consumo se ha multiplicado casi por 10. A la vista de estas cifras, la conclusión inmediata es que *la sociedad necesita*, para mantener el modo de vida que parece que desea tener, *consumir una gran cantidad de energía*. En la figura 1 se recoge el reparto por fuentes de energía primaria en el suministro de energía total, en ella se pone de manifiesto que el 91,1 % de la energía que consumimos la aportan los combustibles fósiles (80,5 %) y la biomasa (10,6 %), siendo el proceso de combustión el que se utiliza para transformar la energía química que tienen dichas fuentes en energía térmica, que es como la sociedad la necesita mayoritariamente. Este dato, *la aportación del 91 % de la energía que consume la sociedad hoy en día la realizan los combustibles fósiles y la*

¹ 1 Mtep = 10¹³ kcal = 4,18·10¹³ kJ

biomasa, siendo el proceso de combustión el que se utiliza para transformar su energía química en térmica, confirma la necesidad de conocer en profundidad como se desarrollan y se controlan los procesos de combustión, tanto para mejorar el proceso, como para saber como se originan y como evitar los inconvenientes.

La energía térmica que se obtiene en el proceso de combustión de los combustible fósiles y de la biomasa se utiliza en los campos de aplicación que se indican a continuación:

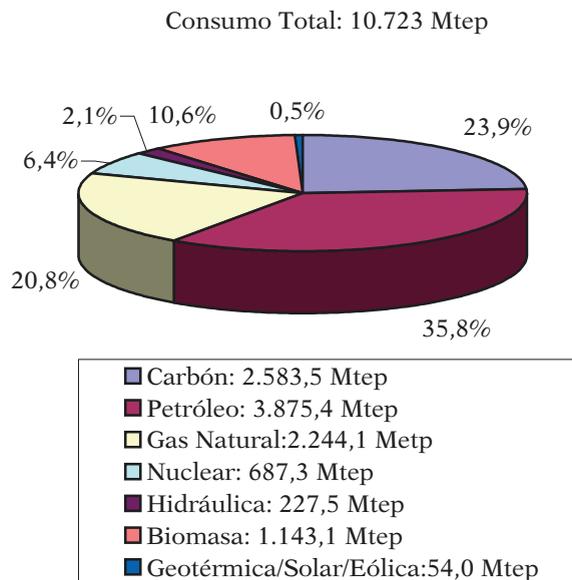


Figura 1. Consumo mundial de energía primaria en 2003

- Sector eléctrico.

La producción de energía eléctrica en el año 2003 fue de 16.741,88 TWh, siendo la aportación de los combustibles fósiles de un 66 % del total de la energía primaria que se necesitó. En la figura 2 se recoge la contribución de las diferentes fuentes de energía primaria en la producción de energía eléctrica. Se observa que sólo el 32,8 % se produce mediante centrales nucleares e hidroeléctricas, mientras que con centrales termoeléctricas consumidoras de carbón y gas natural se produce el 39 y 19,1 % del total. Lo previsible es que esta situación, no sólo no se mantenga, sino que pueda incluso existir un aumento como

consecuencia del incremento continuado en la producción de energía eléctrica. Es previsible que siga aumentando el consumo de gas natural, como lleva ocurriendo desde hace una década, por el uso de esta fuente en instalaciones de ciclo combinado, y el aumento del uso de carbón mediante tecnologías más limpias que las actuales, como ciclos con combustión en lecho fluido y ciclos combinados con gasificación del carbón, que en la actualidad se encuentran en diferente nivel de desarrollo, respectivamente.

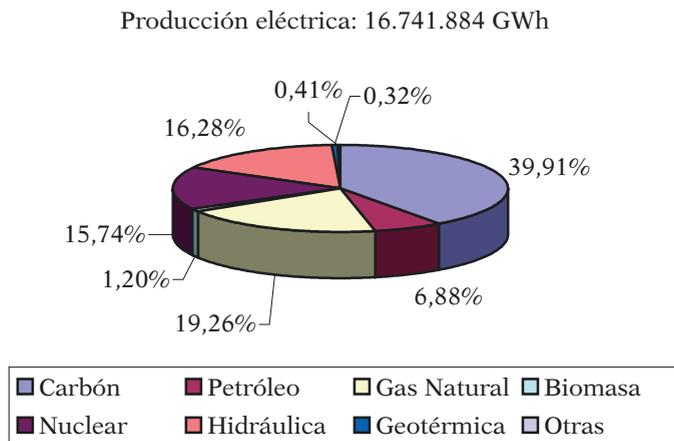


Figura 2. Producción mundial de electricidad en 2003.

- Sector del transporte.

El sector del transporte es el campo de aplicación menos diversificado en cuanto al uso de fuentes de energía primaria. Prácticamente, son los derivados del petróleo los que se utilizan en este sector. En el año 2002, el consumo de energía fue de 1.837,03 Mtep, de los cuales 1.745,66 Mtep (95 %) fueron suministrados por derivados del petróleo. Hay que ser consciente de que los grandes consumidores de derivados del petróleo son los países desarrollados, los cuales mayoritariamente no disponen de yacimientos petrolíferos. En estos países, del total de petróleo importado puede que en torno a dos tercios del total se utilice en el sector del transporte, lo que pone de manifiesto la dependencia brutal que estos países tienen de esta fuente de energía, que es utilizada en este sector mediante diferentes procesos de combustión (transporte en carretera: motores de combustión interna alternativos gasolina y

diesel, transporte ferroviario y marítimo: grandes motores diesel, transporte aéreo: turbinas de gas de aviación). Finalmente, hay que indicar, aunque es bien conocidos por todos, que en este sector, un cambio apreciable en la fuente de energía suministradora es algo todavía muy lejano.

- Sector industrial.

Este campo de aplicación es también muy dependiente de los combustibles fósiles a través de un proceso de combustión, aunque hay que señalar que en este sector el uso de estas fuentes de energía como materia prima es también importante. El consumo de energía de este sector en el año 2002 fue de 2.242,13 Mtep, de los cuales 1.510,55 Mtep lo aportaron los combustibles fósiles y 159, 64 Mtep el uso de biomasa y combustibles residuales. El sector de la siderurgia (producción de acero y hierro) es quizá el mayor consumidor de estas fuentes, sobretodo de carbón, siendo utilizadas como fuentes de energía y como materia prima en los altos hornos. El sector farmacéutico, de cosmética, refinerías, fabricas de cemento, son algunas de las principales industrias que se citan como necesarias de energía térmica y usuarias de los combustibles fósiles y de la biomasa para obtenerla.

- Sector terciario.

En este sector se incluye el sector residencial, comercial, hospitales, edificios oficiales, alumbrado público,.... El consumo de este sector en el año 2002 fue de 2.814,42 Mtep, de los cuales 1191,26 Mtep fueron aportados por combustibles fósiles, 831,65 por biomasa y combustibles residuales y 791,51 Mtep por el resto de las fuentes entre las que se incluye la energía eléctrica obtenida de las anteriores. También en este sector, las cifras ponen de manifiesto la relevancia del proceso de combustión.

La visión detallada del uso de las fuentes de energía primaria por nuestra sociedad en la actualidad, muestra los beneficios que produce en ella el uso de los combustibles fósiles y de la biomasa, sin embargo hay que señalar que ese beneficio está ineludiblemente vinculado al detrimento del medio ambiente. El uso de las mencionadas fuentes de energía, y más concretamente, su uso a través de un proceso de

combustión produce la formación y emisión de contaminantes al medio ambiente produciendo su deterioro.

Los productos contaminantes que se producen en el proceso de combustión son los que se indican a continuación:

- hidrocarburos inquemados o parcialmente quemados, cuya existencia es responsable del ensuciamiento de la atmósfera, siendo perjudiciales, igualmente para la salud,
- óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x) responsables de la lluvia ácida, de la reducción de visibilidad, de la aparición de nieblas, de la destrucción de la clorofila, del efecto invernadero, destrucción del ozono y deterioro de la salud,
- partículas, esencialmente cenizas y hollín, que reducen la visibilidad, producen suciedad y corrosión,
- monóxido de carbono que afecta a la salud, pudiendo ser mortal
- dióxido de carbono que es el producto natural del proceso de combustión y que hasta hace quizá unos 30 años no se le consideraba contaminante, sin embargo, durante la década de los noventa en el siglo XX quedo patente su contribución en el efecto invernadero y en el cambio climático que se está produciendo en nuestro planeta.

En la figura 3 se recogen las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera en 1973 y en 2003, así como las fuentes de energía responsables en las mismas. Los datos que en ella se recogen muestran el importante aumento que se ha producido en las emisiones de CO_2 en tan sólo 30 años.

Bien por el beneficio que aporta a la sociedad el uso de los combustibles fósiles y biomasa por medio de un proceso de combustión, bien por los inconvenientes que ocasiona su uso, es de suma importancia que haya científicos y tecnólogos dedicados al estudio y conocimiento de los diferentes procesos de combustión. El estudio de los procesos que dan lugar a la formación de los productos contaminantes, el diseño de dispositivos y máquinas en los que se produzca el proceso de combustión con un mayor rendimiento y con una menor formación de contaminantes, y el desarrollo de tecnologías o mejora de las ya existentes que contribuyan a un uso de los combustibles fósiles mediante un proceso de combustión más eficiente y limpio, son todos temas de un gran interés y relevancia