

ÍNDICE

<i>Prólogo</i>	13
----------------------	----

UNIDAD DIDÁCTICA I FUNDAMENTOS DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

<i>Capítulo 1. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL</i>	23
1. Objetivos	25
2. Introducción.....	26
3. Panorama energético mundial	27
4. Generación de energía eléctrica.....	38
5. Sector eléctrico en España.....	46
6. Resumen.....	56
7. Bibliografía.....	57

<i>Capítulo 2. FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS DE CICLO SIMPLE CON TURBINA DE VAPOR (I)</i>	59
1. Objetivos	61
2. Introducción.....	61
3. Ciclo de Rankine	63
3.1. Ciclo de Rankine con sobrecalentamiento del vapor	73
4. Influencia de las condiciones terminales del vapor sobre el rendimiento térmico del ciclo	81
4.1. Presión en el condensador.....	82
4.2. Presión inicial del vapor vivo.....	85
4.3. Temperatura inicial del vapor vivo	88
5. Ciclo real de Rankine: irreversibilidades.....	97
6. Resumen	108
7. Bibliografía.....	109
8. Cuestiones y problemas.....	110

9. Solución de los problemas propuestos	113
<i>Capítulo 3.</i> FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS DE CICLO SIMPLE CON TURBINA DE VAPOR (II)	125
1. Objetivos	127
2. Introducción.....	128
3. Ciclo de Rankine con recalentamiento intermedio del vapor.....	129
4. Ciclo de Rankine con calentamiento regenerativo del agua de alimentación..	142
5. Distribución del calentamiento regenerativo del agua de alimentación	165
6. Ciclos supercríticos	191
7. Resumen	200
8. Bibliografía.....	203
9. Cuestiones y problemas.....	204
10. Solución de los problemas propuestos	208
<i>Capítulo 4.</i> FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS DE CICLO COMBINADO	215
1. Objetivos	217
2. Introducción.....	218
3. Ciclo combinado y rendimiento térmico	219
4. Ciclo combinado con un solo nivel de presión.....	234
5. Parámetros principales e influencia sobre el funcionamiento del ciclo combinado	268
6. Ciclo combinado con dos niveles de presión.....	272
7. Ciclo combinado con tres niveles de presión	292
8. Ciclo combinado con post-combustión	297
9. Resumen	298
10. Bibliografía.....	299
11. Cuestiones y problemas.....	299
12. Solución de los problemas propuestos	302
<i>Capítulo 5.</i> ESQUEMAS TECNOLÓGICOS DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS ACTUALES	307
1. Objetivos	309
2. Introducción.....	309
3. Clasificación de las centrales de producción de energía eléctrica.....	311

4. Parámetros de funcionamiento del parque generador.....	318
5. Esquemas tecnológicos de las centrales de ciclo simple con turbina de vapor	324
5.1. Centrales termoeléctricas con combustible fósil. Características principales.....	324
5.2. Centrales termoeléctricas con combustible nuclear. Características principales.....	334
5.3. Centrales termosolares. Características principales.....	338
6. Esquemas tecnológicos de las centrales de ciclo combinado. Características principales.....	350
7. Balance térmico de una central termoeléctrica.....	358
8. Resumen.....	362
9. Bibliografía.....	367
10. Cuestiones.....	369

UNIDAD DIDÁCTICA II
SISTEMAS DE GENERACIÓN DE VAPOR

<i>Capítulo 6.</i> SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR CON COMBUSTIBLES FÓSILES (I)	375
1. Objetivos.....	377
2. Introducción.....	378
3. Generalidades sobre los generadores de vapor de las centrales termoeléctricas.....	380
4. Sistema de combustión.....	385
4.1. Combustibles.....	385
4.2. Combustión.....	391
4.3. Tratamiento del combustible.....	424
4.4. Quemadores.....	431
4.5. Cámaras de combustión.....	434
5. Sistema aire-gases.....	436
6. Resumen.....	442
7. Bibliografía.....	443
8. Cuestiones y problemas.....	445
9. Solución de los problemas propuestos.....	447
 <i>Capítulo 7.</i> SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR CON COMBUSTIBLES FÓSILES (II)	 449

1. Objetivos	451
2. Introducción.....	452
3. Sistema agua-vapor	453
3.1. Economizadores	458
3.2. Calderín.....	459
3.3. Haces tubulares vaporizadores.....	461
3.4. Sobrecalentadores y recalentadores	462
4. Otros componentes del generador de vapor	467
5. Sistema de extracción de cenizas y escorias.....	470
6. Rendimiento de un generador de vapor.....	477
7. Sistemas de control de un generador de vapor	480
7.1. Sistema de control de la temperatura de vapor sobrecalentado y recalentado	480
7.2. Sistema de control de combustión.....	482
8. Resumen	484
9. Bibliografía.....	485
10. Cuestiones	486
 <i>Capítulo 8. CALDERAS DE RECUPERACIÓN</i>	489
1. Objetivos	491
2. Introducción.....	492
3. Clasificación de las calderas de recuperación	493
4. Descripción de las calderas de recuperación.....	502
5. Quemadores y chimeneas	510
6. Parámetros de diseño y rendimiento.....	510
7. Diferencias entre las calderas convencionales y las calderas de recuperación	544
8. Resumen	545
9. Bibliografía.....	547
10. Cuestiones y problemas.....	548
11. Solución de los problemas propuestos	551

UNIDAD DIDÁCTICA III
SISTEMAS DE GENERACIÓN DE POTENCIA

<i>Capítulo 9. TURBINAS DE VAPOR</i>	557
1. Objetivos	559
2. Introducción.....	560

3. Transformación de energía térmica en mecánica	561
4. Configuraciones de las turbinas de vapor de las instalaciones de producción de energía eléctrica	568
5. Componentes estructurales	577
6. Entradas y salidas de vapor de la turbina	594
7. Equipos asociados a la turbina de vapor	601
8. Regulación de potencia en las turbinas de vapor	604
8.1. Regulación cualitativa o por estrangulación o a presión constante	605
8.2. Regulación cuantitativa o por admisión parcial	606
8.3. Regulación con presión deslizante	607
9. Resumen	609
10. Bibliografía	612
11. Cuestiones	613

Capítulo 10. TURBINAS DE GAS Y TURBINAS DE VAPOR EN CICLOS

COMBINADOS	615
1. Objetivos	617
2. Introducción	618
3. Generalidades sobre las instalaciones de turbinas de gas	619
4. Compresores	621
5. Cámaras de combustión	625
6. Turbina de gas	629
7. Mantenimiento de las turbinas de gas	635
8. Características usuales de los componentes de las turbinas de gas de los ciclos combinados	636
9. Turbinas de vapor de los ciclos combinados	638
10. Regulación de potencia en las centrales de ciclo combinado	642
11. Resumen	645
12. Bibliografía	648
13. Cuestiones	648

Capítulo 11. SISTEMA DE AGUA CONDENSADA Y DE AGUA DE ALIMENTACIÓN

ALIMENTACIÓN	651
1. Objetivos	653
2. Introducción	654
3. Condensador	655
4. Eyectores	660

5. Calentadores superficiales regenerativos.....	662
6. Desgasificador	670
7. Configuraciones del sistema de agua condensada y de alimentación.....	673
8. Bombas principales en una central termoeléctrica	678
8.1. Bomba de agua de alimentación.....	679
8.2. Bomba de agua condensada	681
8.3. Bomba de agua de circulación	683
9. Resumen	683
10. Bibliografía.....	685
11. Cuestiones	686

UNIDAD DIDÁCTICA IV OTROS TIPOS DE CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

<i>Capítulo 12. CENTRALES NUCLEARES</i>	691
1. Objetivos	693
2. Introducción.....	694
3. Energía nuclear de fisión	696
4. Tipos de reactores nucleares.....	701
4.1. Reactores refrigerados por agua ligera.....	701
4.2. Reactores refrigerados por agua pesada	704
4.3. Reactores refrigerados por gas	706
4.4. Reactores refrigerados por metal líquido	710
5. Reactores de agua a presión (PWR)	712
5.1. Vasija del reactor nuclear.....	714
5.2. Generador de vapor	720
5.3. Presionador.....	722
5.4. Sistemas auxiliares	725
5.5. Central nuclear con un reactor PWR.....	728
6. Reactores de agua en ebullición (BWR)	729
6.1. Vasija del reactor nuclear.....	734
6.2. Sistema de recirculación.....	741
6.3. Sistemas auxiliares	742
6.4. Central nuclear con un reactor (BWR).....	744
7. Resumen	749
8. Bibliografía.....	753
9. Cuestiones	754

<i>Capítulo 13. CENTRALES TERMOSOLARES</i>	759
1. Objetivos	761
2. Introducción.....	763
3. Recurso solar	765
3.1. Movimientos de la Tierra	769
3.2. Sistemas de referencia.....	770
3.3. Irradiación solar extraterrestre	775
3.4. Repercusión de la atmósfera terrestre sobre la radiación solar	777
4. Concentración de la radiación solar	780
5. Tecnologías para aprovechar la energía solar térmica en la producción de electricidad	783
6. Centrales termosolares con colectores cilindro-parabólico	789
6.1. Colector cilindro-parabólico	791
6.2. Campo solar	797
6.3. Pérdidas energéticas en el campo solar	799
7. Centrales termosolares con receptor central.....	804
7.1. Helióstatos.....	806
7.2. Torre y receptor.....	814
7.3. Pérdidas energéticas en el campo solar y en el receptor	821
8. Sistema de almacenamiento de energía.....	825
9. Bloque de potencia de las centrales termosolares	832
10. Resumen	842
11. Bibliografía.....	845
12. Cuestiones	847
<i>Capítulo 14. TECNOLOGÍAS PARA EL USO LIMPIO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA</i>	851
1. Objetivos	853
2. Introducción.....	854
3. Elementos contaminantes producidos en las centrales termoeléctricas que consumen combustible fósil	856
4. Técnicas para la reducción de las emisiones de productos contaminantes en las centrales termoeléctricas que consumen carbón.	861
4.1. Tratamiento antes del proceso de combustión	861
4.2. Tratamiento durante el proceso de combustión.....	863
4.3. Tratamientos después del proceso de combustión	865

5. Nuevas tecnologías en el uso limpio del carbón en la generación de energía eléctrica	867
5.1. Combustión en lecho fluido	869
5.2. Gasificación del carbón integrada en un ciclo combinado	879
5.3. Captura y almacenamiento de CO ₂	882
6. Resumen	886
7. Bibliografía	888
8. Cuestiones	892

Capítulo 1

Generación de energía eléctrica en el contexto energético actual

1. Objetivos.
2. Introducción.
3. Panorama energético mundial.
4. Generación de energía eléctrica.
5. Sector eléctrico en España.
6. Resumen.
7. Bibliografía.

CAPÍTULO 1

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL

1. OBJETIVOS

- Conocer la aportación de las diferentes fuentes de energía primaria en la producción mundial de energía primaria. Conocer las implicaciones y repercusiones de la situación energética actual.
- Conocer la aportación de las diferentes fuentes de energía en la producción mundial de energía final, así como, el consumo que realizan los diferentes grupos de consumidores de energía final.
- Entender que la *energía eléctrica* es energía final, conocer su aportación en la producción de energía final, y conocer el consumo de energía primaria para su producción, identificando las fuentes de energía primaria que se consumen en la producción de energía eléctrica y su contribución en la producción total de electricidad.
- Conocer las tecnologías de los diferentes tipos de *centrales de producción de energía eléctrica*, y saber relacionarlas con las fuentes de energía primaria que se consume en cada tipo de central. Conocer la aportación de las diferentes tecnologías en la producción mundial de energía eléctrica.
- Conocer el consumo de energía eléctrica de los diferentes sectores de la sociedad.
- Conocer las perspectivas a medio plazo y a nivel mundial del Sector Eléctrico.
- Conocer el *Sector Eléctrico Español*: producción anual de energía eléctrica, consumo de cada fuente de energía primaria, aportación de cada tipo de central, potencia total instalada (MW) para cubrir la demanda de energía eléctrica, potencia instalada de cada una de las tecnologías y de cada una de las fuentes de energía primaria, repercusión medioambiental de la producción de energía eléctrica.

2. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de este capítulo es poner de manifiesto el peso específico de la energía eléctrica en el panorama energético mundial, y también en el español, ubicando a la energía eléctrica en el conjunto de las fuentes de energía. También se ha de conocer el aporte de cada una de las fuentes de energía primaria en la producción de electricidad a nivel mundial y nacional, señalando las tecnologías desarrolladas para ello y su vinculación con dichas fuentes. Esta información, a su vez, permite justificar el contenido de la asignatura. Las centrales de producción de energía eléctrica que se van a estudiar en esta asignatura son aquellas en las que siempre interviene un proceso de transferencia de energía térmica, a las que se ha denominado de forma genérica *centrales termoeléctricas*. Estas centrales, las que se estudian en esta asignatura, corresponden a *centrales termoeléctricas de ciclo termodinámico simple con turbina de vapor*, consumidoras de combustible fósil, combustible nuclear, o energía solar, y a *centrales termoeléctricas de ciclo combinado (ciclo de Brayton y ciclo de Rankine)*.

Hay que indicar que también las centrales que consumen *biomasa y energía geotérmica*, según la definición establecida, son *centrales termoeléctricas*. Sin embargo, en esta asignatura, no se incluye su estudio. Por la extensión temporal de la asignatura, y por estar dirigida a la formación de *Ingenieros Eléctricos* (y no *Industriales o Energéticos*), se ha considerado que el estudio debía abarcar, sobre todo, el de las centrales termoeléctricas con mayor y con suficiente relevancia en la producción eléctrica española. Las consideradas han sido las mencionadas en el párrafo anterior.

El contenido del capítulo se comenta a continuación. En el apartado 3 se incluye datos e información vinculada a la situación energética a nivel *mundial*, proporcionando los consumos de energía primaria y de energía final, así como la contribución de todas y cada una de las fuentes de energía primaria. Con ello se mostrará la contribución de la energía eléctrica en el consumo de energía final y quedará patente el papel que realmente desempeña a nivel mundial. El apartado 4 detalla los tipos de tecnologías existentes para producir energía eléctrica, es decir, los diferentes tipos de *centrales eléctricas* que se utilizan hoy en día, y las fuentes de energía primaria utilizadas, facilitando datos que permiten conocer la aportación de todas y cada una de las tecnologías y de las fuentes de energía en la producción mundial de electricidad. Finalmente, en el apartado 5 se da a conocer la estructura del *sector eléctrico español*.

Se trata de un capítulo de carácter divulgativo e introductorio a la asignatura. Se recomienda al estudiante que consulte la bibliografía referenciada en este capítulo, ya que se especifican las fuentes bibliográficas que el alumno puede consultar para mantener los datos de este capítulo actualizados, y también se especifican aquellas fuentes bibliográficas que se consideran más interesantes como complemento del contenido de este capítulo.

3. PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL

Energía primaria

En el año 2016, el consumo mundial de energía primaria fue de 13.761 Mtep¹. En la figura 1 se ha representado la contribución de las diferentes fuentes de energía. Con los datos que se recogen en dicha figura se extraen dos conclusiones inmediatas e importantes. La primera, que las necesidades energéticas a nivel mundial son muy elevadas, y la segunda, que el 80 % de la energía que consumimos la proporcionan los combustibles fósiles. Se debe señalar que en 1948 el consumo energético fue de 1.700 Mtep, en 70 años, el consumo se ha multiplicado por un factor de 8,1. En este mismo período de tiempo, la hegemonía de los combustibles fósiles y la situación de cada uno de ellos se ha mantenido.

En la tabla 1 se presentan los valores de varios indicadores energéticos, económicos y medioambientales de los diferentes grupos de países del Mundo, siendo dichos indicadores los que utilizan los principales organismos internacionales en los estudios vinculados a temas energéticos y económicos. Como indicador de la situación económica de un país se proporciona el *Producto Interior Bruto (PIB)*. Cuanto mayor sea, mejor es la situación económica del país o de la región, y mayor será su consumo energético debido a un alto desarrollo industrial y a un alto nivel de vida. El indicador de la columna séptima, *Consumo/PIB*, se denomina *Intensidad Energética*, es un indicador de gran importancia a la hora de realizar previsiones energéticas a largo plazo, debido a la influencia que ejerce la situación económica de un país sobre el consumo de energía. Indica la energía consumida por unidad de riqueza producida, por lo tanto conviene que sea lo más bajo posible. Este indicador, junto con el *Consumo*

¹ tep: tonelada equivalente de petróleo

1 tep = 42.10⁶ kJ

1 tep = 0,16.10⁶ m³ de gas natural

Energético per Cápita (tep/capita), indicador de la columna cuarta, permite interpretar el grado de penetración de la tecnología en la sociedad. En la figura 2 se representa el reparto del consumo de energía primaria entre las diferentes regiones mundiales consideradas en la tabla 1.

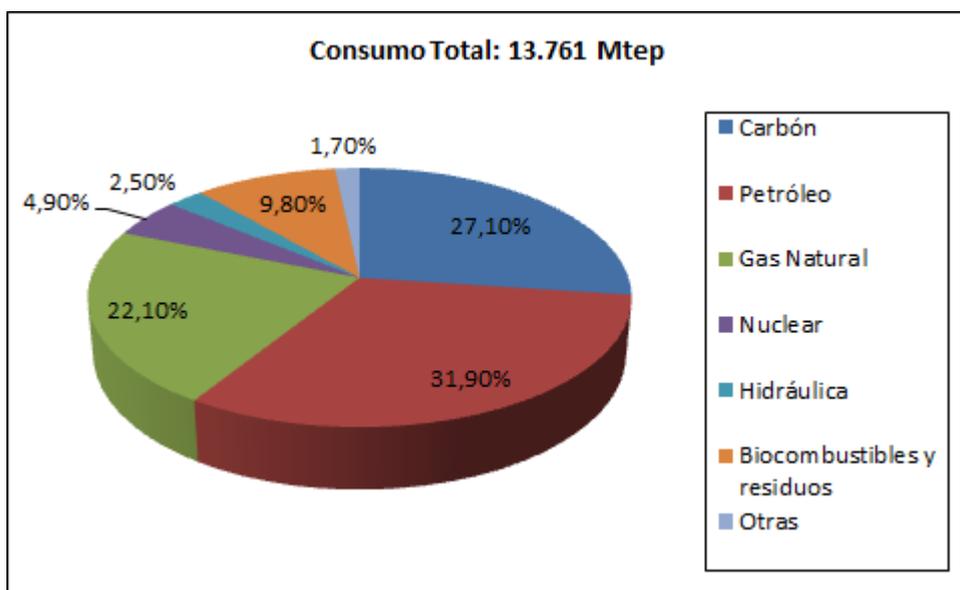


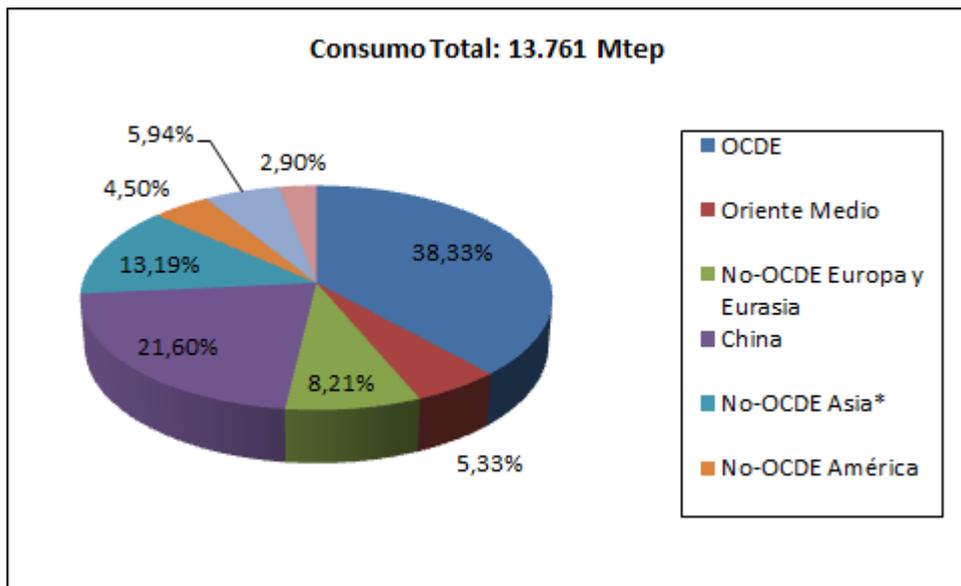
Figura 1. Consumo mundial de energía primaria en 2016. Contribución de las fuentes de energía primaria.

A la vista de los datos recogidos en dicha tabla se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- En torno al 17 % de la población mundial habita en países desarrollados y consume cerca del 39 % de la energía mundial. Una minoría consume mucho energía, por lo que las conclusiones que se establezcan al analizar los datos de la figura 1 estarán muy condicionadas por el patrón de consumo energético de los países desarrollados, los países de la OCDE (*Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico*), que son los que más consumen.

Tabla 1. Indicadores energéticos, económicos y medioambientales en el año 2016.

Región	Población (Millones)	Consumo Energía (Mtep)	PIB (10 ¹² \$-2010)	Emisiones (Mt CO ₂)	Consumo/ Población (tep/Capita)	Consumo/PIB (tep/10 ³ \$-2000)	CO ₂ /Consumo (t CO ₂ /tep)	CO ₂ /Población (t CO ₂ /Capita)	CO ₂ /PIB (t CO ₂ /10 ³ \$-2000)
MUNDO	7.429	13.761	77.362	32.316	2	0,18	2,0	4,0	0,42
OCDE	1.284	5.275	49.787	11.591	4	0,11	2,0	9,0	0,23
OCDE Europa	568,0	1.723	20.166	3.464	3	0,09	2,0	6,0	0,17
EEUU	323,0	2.167	16.920	4.833	7	0,13	2,0	15,0	0,29
ORIENTE MEDIO	233,0	734	2.294	1.767	3	0,32	2,0	8,0	0,77
No-OCDE Europa/Eurasia	342,0	1.130	2.701	2.373	3	0,42	2,0	7,0	0,88
China	1.379	2.958	9.505	9.057	2	0,31	3,0	7,0	0,95
Federación Rusa	144,0	732	1.628	1.439	5	0,45	2,0	10,0	0,88
No-OCDE Asia excluida China	2470	1.816	6.254	3.987	0.74	0,29	2,0	2,0	0,64
No-OCDE América	489,0	617,0	4.206	1.099	1	0,15	2,0	2,0	0,26
África	1.225	818,0	2.345	1.158	0,67	0,35	1,0	0,95	0,49



*Excluye China

Figura 2. Consumo mundial de energía primaria en 2016 por regiones.

- Los países con mayor consumo energético y con mayor PIB son los países con mayor consumo per capita y menor intensidad energética. Son los países de la OCDE, países desarrollados con *economías de mercado maduras*, con un alto grado de penetración de la tecnología en la sociedad y con un alto nivel de vida. Su situación económica les permite reemplazar sistemas y dispositivos antiguos por nuevos, de mayor eficiencia, menor consumo y menos contaminantes. Por el alto consumo energético, estos países son los que más contaminan en términos absolutos. En contraste con éstos se encuentran los países en vías de desarrollo o con *economías emergentes*, países de Asia, África o América Latina. No disponen de la tecnología más adecuada, ni de la más eficiente y menos contaminante, y su situación económica sólo les permite el uso de la que en cada momento les es más asequible. Son países con bajo consumo per capita, alta intensidad energética y altas emisiones por unidad de energía consumida. China o India son dos ejemplos de países que se ajustan muy bien a todo lo comentado. Finalmente, hay que hacer mención a otros países, que con un desarrollo tecnológico e industrial considerable, han atravesado crisis económicas que les han abocado al uso de lo más económico como criterio de elección, países con *economías de transición*,

con consumo energético per capita relativamente alto e intensidad energética también alta. Son los países del antiguo bloque soviético.

- De los datos recogidos en la tabla se deduce que las necesidades energéticas de una persona en un país desarrollado son, en media, *cuatro veces* mayores que las de una persona en un país en vías de desarrollo.
- Las emisiones de CO₂ están ligadas al consumo de los combustibles fósiles mediante un proceso de combustión. En términos absolutos, los países desarrollados son los que más CO₂ emiten, aunque no los que más CO₂ emiten por unidad de energía consumida, ni por unidad de riqueza creada. Son los países en vías de desarrollo los que, al no tener una economía fuerte, no adquirieron la tecnología más eficiente y respetuosa con el medioambiente, ya que es la más cara, consumiendo en proporción más energía primaria y contaminando más que los países que sí pueden desarrollarla o adquirirla.

En la tabla 2 se recoge la contribución de las diferentes fuentes de energía primaria en las mismas regiones reflejadas en la tabla 1 correspondiente al año 2016.

El consumo de *combustibles fósiles* es muy importante en cada una de las regiones consideradas. En los países desarrollados, el peso específico de cada uno de los combustibles fósiles y del conjunto es muy semejante al que tienen a nivel mundial. Los combustibles fósiles aportan el 80 % de la energía que consumen anualmente los países desarrollados. En general, son países que no disponen de estos combustibles, pero sus economías son lo suficientemente fuertes como para poder adquirirlos, y esto hace que sean importadores netos de combustibles fósiles y de energía.

La situación de estos combustibles en las otras regiones depende notablemente de si disponen o no de yacimientos. En general, la disponibilidad de alguno de los tres combustibles fósiles en un país o región da lugar a un consumo alto del mismo, por ser la fuente de energía que le resulta más económica y fácil de utilizar. Tal es el caso de China e India con el carbón. Este combustible les aporta el 66,7 % y el 45,4 % de la energía consumida, respectivamente. En Oriente Medio, el petróleo y el gas natural aportan el 98,8 % de la energía total que consumen. En la Federación Rusa, el gas natural aporta el 51,3 % del total de la energía que consumen.

Tabla 2. Contribución de las fuentes de energía primaria en 2016.

	CARBÓN (%)	PETRÓLEO (%)	GAS NATURAL (%)	NUCLEAR (%)	HIDRÁULICA (%)	BIOMASA (%)	RESTO RENOVABLES (%)	TOTAL (Mtep)
MUNDO	27,1	31,9	22,1	4,9	2,5	9,8	1,7	13.761
OCDE	16,7	35,9	27,1	9,6	2,3	6,0	2,4	5.275
OCDE Europa	15,6	32,5	24,0	12,6	2,9	8,9	3,5	1.723
EEU	15,7	36,3	30,1	10,1	1,0	4,7	3,1	2.167
ORIENTE MEDIO	0,44	43,3	55,5	0,23	0,2	0,06	0,2	734
No-OCDE Europa/Eurasia	19,3	21,5	47,3	7,4	2,2	2,1	0,2	1.130
China	66,7	17,8	5,3	1,5	3,2	3,8	1,7	2.958
Federación Rusa	16,4	22,1	51,3	7,2	2,0	1,1	0,02	732
No-OCDE ASIA excluida China	31,5	29,0	13,9	1,2	1,6	20,8	2,0	1.816
No-OCDE América	4,3	42,4	22,5	0,9	8,9	19,9	1,1	489
África	13,2	23,1	13,4	0,4	1,3	47,8	0,8	818

Cifras de fuentes de energía en % sobre el consumo total

Este protagonismo de los combustibles fósiles se debe principalmente al conjunto de circunstancias que se indican a continuación: unos u otros son asequibles en todo el mundo; el hombre ha aprendido muy bien a utilizarlos y tiene mucha experiencia en utilizarlos con una eficiencia muy alta, suministrando toda la energía que se necesita; son fáciles de transportar; proporcionan una gran cantidad de energía y el oxígeno que se necesita en la combustión se encuentra en el aire, y, finalmente, no se dispone de otra fuente de energía que pueda sustituirlos de forma inmediata

En cuanto a la *biomasa*, la cuarta fuente de energía primaria a nivel mundial, tiene un consumo muy desigual a nivel regional, al igual que ocurre con el consumo de energía, aunque, en este caso, los países más pobres son los que mayor consumo hacen de ella. En África y Asia, la biomasa es la fuente de energía primaria con mayor contribución, pudiendo llegar a aportar entre el 80 % y el 90 % de la energía total que consumen los países más pobres de estos continentes. Utilizan la biomasa porque es la fuente de energía que disponen. Las técnicas que utilizan para su explotación son muy rudimentarias y de una eficiencia muy baja, ya que no tienen, y no pueden adquirir, la tecnología limpia y eficiente para su uso. Por el contrario, en los países desarrollados, la biomasa apenas supone el 6 % del consumo total. Sin embargo, por motivos medioambientales y por interés en disminuir la dependencia energética del exterior, los países industrializados están fomentando su uso.

La única aplicación energética de la *energía nuclear* es la generación de energía eléctrica. En los países en vías de desarrollo su contribución es muy baja, no superior al 1,2 %, apenas siendo utilizada en media docena de países como China, India, Pakistán, Corea del Sur, Taiwán, Argentina y Brasil. En los países desarrollados, la contribución media de esta fuente es casi del 10 %. Aunque, el uso de la energía nuclear ha experimentado un aumento muy importante pasando de los 49 Mtep en 1973 a 679,65 Mtep en 2016, la realidad es que no se han alcanzado las previsiones anunciadas por los planificadores energéticos a principios de los ochenta. La tecnología nuclear es complicada y cara, lo que supone una primera limitación para su uso, pero además, es una fuente de energía controvertida por varios motivos. Uno de ellos está vinculado al hecho de no disponer aún de una solución firme y definitiva al tratamiento de los residuos radiactivos que se obtienen en las centrales nucleares. Otro de ellos se debe al riesgo de proliferación de armas nucleares. Y un tercero, al miedo de las poblaciones a escapes radioactivos en las instalaciones actualmente en funcionamiento, como consecuencia de los accidentes de “Three Mile Island” (1983), “Chernóbil” (1986) y “Fukushima” (2011). Todo ello contribuye a que sólo en pocos países se pueda apostar abiertamente por esta fuente de energía, como es el caso de

Francia, por ejemplo, donde ocupa el primer lugar como fuente de energía primaria en el consumo total de energía primaria con una aportación del 43,0 % sobre el total. En general, en la mayoría de los países industrializados se es muy cauto al tomar decisiones sobre el uso de esta fuente de energía.

Aunque, obviamente, la energía hidráulica es renovable, nunca ha tenido el mismo tratamiento que las demás fuentes de energía renovable. Se utiliza en la producción de energía eléctrica desde los primeros años del siglo XX, jugando un papel muy relevante en el panorama energético mundial. La tecnología para su uso está desarrollada, con un alto grado de perfeccionamiento en las máquinas y en las instalaciones. El uso de esta fuente está muy vinculado a la existencia de recursos y a su nivel de explotación. En la actualidad, los mejores y principales emplazamientos y cauces hidráulicos están utilizados. En América es donde se encuentran los mayores recursos hidráulicos, siendo Canadá el primer país productor de energía hidroeléctrica, seguido de Brasil y EEUU. En Europa, la Federación Rusa y Noruega son los países con mayor producción hidroeléctrica, verificándose que en Noruega esta fuente de energía ocupa el primer lugar con una contribución del 45,1 % del total. En Asia, China y Japón son los dos países con mayor uso de esta fuente de energía. Los países en vías de desarrollo hacen un mayor uso que los desarrollados, pero en este caso se debe a que hay más recursos en los primeros que en los segundos. Al igual que con la energía nuclear, su principal y único uso energético es para producción de energía eléctrica.

La contribución del resto de las fuentes de energía renovable, solar, eólica y geotérmica esencialmente, es testimonial, tanto a nivel mundial, como en cada una de las regiones. Algunas características de las fuentes de energía renovable pueden dificultar su uso, por ejemplo, la intermitencia de alguna de ellas o la baja densidad energética. También hay que considerar que en la actualidad aún presentan un alto coste. Sin embargo, por motivos medioambientales y por necesidades de diversificación en el uso de las fuentes de energía, y por el bajo o nulo coste de la fuente, en las últimas décadas los países industrializados han desarrollado políticas energéticas que fomentan, apoyan, e incluso, exigen el uso de estas fuentes de energía. Aunque a día de hoy, las cifras son muy bajas, sin embargo el crecimiento en el uso de algunas fuentes de energía renovable, como la energía solar y la energía eólica, ha sido muy importante en los últimos 20 años, en torno al 23 % anual, teniendo en cuenta que se partía de unos niveles muy bajos. En la actualidad, es en los países de la OCDE donde más se utilizan, con un porcentaje del 66,5 % del total de la energía renovable consumida a nivel mundial. El desarrollo y uso de estas fuentes va a depender mucho

de las políticas energéticas desarrollados por los gobiernos de los diferentes países. Es necesaria la existencia de incentivos económicos para que los inversores energéticos apuesten por estas fuentes de energía, y también el desarrollo de normativas que fomenten su uso. Son los países desarrollados los promotores de la investigación y el desarrollo de estas fuentes de energía renovable.

Energía final

La diferencia entre la cifra del consumo total de energía primaria y la del consumo total de energía final se debe, por un lado, a que el consumidor final de energía no consume siempre directamente la fuente de energía primaria, sino la energía que se obtiene de la primaria tras un proceso de transformación, y por otro lado, se producen pérdidas asociadas a los propios procesos de transformación, y también se produce un cierto consumo de energía en el propio proceso de transformación. Las cifras del consumo final de energía indican la energía que la sociedad necesita en la ejecución de las diferentes actividades que se desarrollan en el sector industrial, en el sector del transporte y en el sector terciario. En la tabla 3 se recogen los consumos de las fuentes de energía a nivel mundial en 2016, tanto el consumo de energía primaria, como el consumo de energía final.

Tabla 3. Consumo mundial de energía primaria y final en 2016.

	Energía primaria (Mtep)	Energía final (Mtep)
CARBÓN	3.730,9	1.035,5
PETRÓLEO	4.389,7	14,68
GAS	3.034,9	1.440,3
NUCLEAR	679,65	--
HIDRÁULICA	349,22	--
ELECTRICIDAD	--	1.796,3
BIOMASA	1.349,3	1.050,9
OTRAS*	227,2	324,8
PRODUCTOS PETROLÍFEROS	-	3.892,4
TOTAL	13.761	9.555

*Incluye geotérmica, solar, eólica y calor

Las fuentes de energía nuclear e hidráulica, como ya se ha comentado, se utilizan como energía primaria en la producción de energía eléctrica, no teniendo éstas ningún uso energético final en la sociedad. Alrededor del 50 % del carbón que se consume como fuente de energía primaria se emplea en la generación de energía eléctrica, mientras que en torno al 8 % se transforma en otro tipo de combustible, y alrededor del 28 % es consumido como energía final. El gas natural se utiliza casi por igual como fuente de energía primaria en la producción de energía eléctrica (39 %), o como fuente de energía final (47 %) en el sector industrial y en el sector terciario, utilizándose sobre todo para la producción de vapor o fluidos con alto nivel térmico. En el caso del petróleo, las cifras muestran que son los derivados del petróleo, obtenidos en las refinerías, los que son consumidos por la sociedad como energía final, siendo el consumo final de petróleo muy pequeño. La mayor parte de los derivados del petróleo son consumidos en el sector del transporte.

En la tabla 3, observando la columna de las fuentes de energía primaria y final, se pone de manifiesto la aparición de la energía eléctrica como fuente en el consumo final de energía. Esta aporta el 18,8 % de la energía final que se consume a nivel mundial. El gas natural aporta el 15,1 % del total de la energía final consumida. Ambas fuentes de energía se sitúan tras el petróleo y sus derivados que ocupan el primer lugar con gran diferencia (40,9 %).

En torno al 28 % de la energía primaria consumida se destina a la producción de energía eléctrica. En 2016, con el consumo de energía primaria que se ha indicado, el 28,34 % (3.899,5 Mtep) fue consumido en las centrales de producción de energía eléctrica para producir los 24.973 TWh (2.140,54 Mtep) de energía eléctrica. Sin embargo, en 1973, el consumo de energía primaria fue de 6.101,05 Mtep, utilizándose prácticamente el 20 % (1.222,08 Mtep) para producir los 6.131 TWh (525,51 Mtep) de energía eléctrica. En 43 años, la energía primaria utilizada para producir energía eléctrica ha aumentado en más de 8 puntos, habiendo multiplicado la producción de electricidad por un factor de 4. Como se ha indicado previamente, la energía final consumida en 2016 fue de 9.555 Mtep, de los cuales el 18,8 % fue en energía eléctrica. Sin embargo, en 1973, la energía final consumida fue 4.661 Mtep, de los cuales el 9,4 % fue en energía eléctrica. El consumo final de electricidad en los últimos 43 años ha aumentado un 310 %.

Todas estas cifras permiten valorar la importancia de la *energía eléctrica* en el panorama energético mundial, ya que indican, por un lado, el peso específico que tiene el *sector eléctrico* como consumidor de energía, y por otro, la importante dependencia

de la energía eléctrica por parte de los consumidores de energía final. En el próximo apartado se detallará la infraestructura del sector eléctrico en relación a las diferentes fuentes de energía primaria de las que se abastece, a los diferentes tipos de instalaciones que producen toda la energía eléctrica que se consume a nivel mundial, y al reparto del consumo de la energía eléctrica producida entre los diferentes sectores consumidores de energía.

La distribución de la energía final por sectores consumidores se recoge en la figura 3.

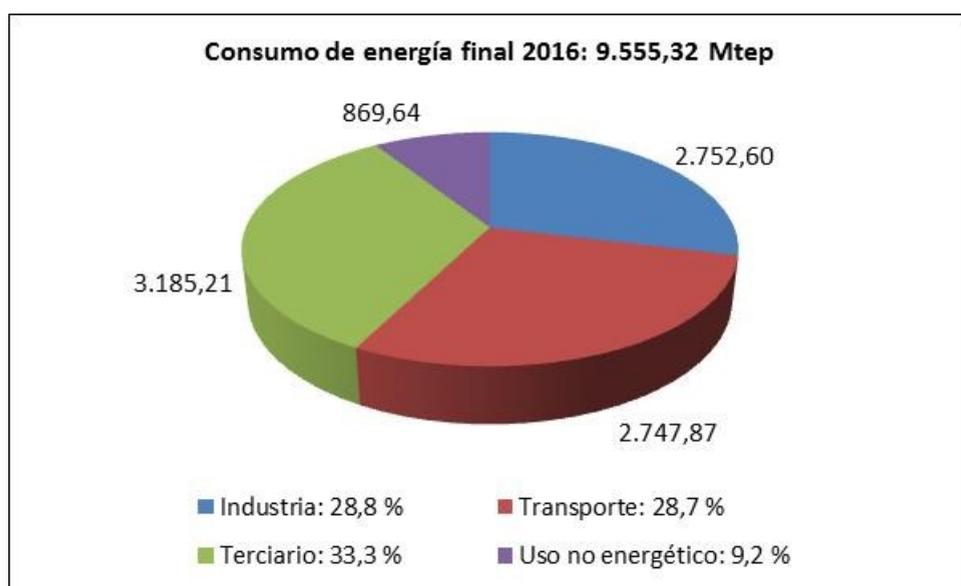


Figura 3. Reparto del consumo de energía final por sectores.

La situación en cuanto al reparto regional del consumo de energía final es semejante a la que existe con la energía primaria. Los países de la OCDE, los países desarrollados, con economías de mercado maduras, consumen el 38,3 % de la energía total. Respecto al reparto por sectores hay que señalar que, en dichos países, el consumo se reparte casi a partes iguales entre los tres grandes sectores, siendo el del transporte, con poca diferencia, el que ocupa el primer lugar. En el caso de los países en vías de desarrollo, el sector del transporte consume prácticamente la mitad de lo

que consumen los sectores industrial y terciario, siendo éste último el de mayor consumo energético.

Las emisiones de CO₂, y su repercusión negativa en el medioambiente, van a estar muy presentes en gobernantes y estrategias energéticos y políticos cuando tengan que decidir sobre la construcción o no de nuevas centrales nucleares. También el medioambiente va a repercutir en la situación de la energía hidráulica y del resto de las fuentes de energía renovable. Se espera un incremento medio anual en la producción eléctrica con dichas fuentes de energía de 1,9 % hasta el 2025, lo que va a suponer un incremento total del 54 % respecto a la producción de 2002, aunque su contribución estará en torno al 18 %.

4. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Una *Central de Producción de Energía Eléctrica* es una instalación en la que se produce energía eléctrica a partir del consumo de una fuente de energía primaria. Para ello, y dependiendo de la fuente de energía que se utilice, puede requerirse una o más transformaciones energéticas diferentes, lo que determina el menor o mayor grado de complejidad de la instalación. Esta asignatura se va a dedicar a aquellas instalaciones en las que, para producir energía eléctrica, se requiere entre sus transformaciones energéticas, al menos, la producción de energía térmica y la transformación de ésta en energía mecánica, a las que se designa como *centrales termoeléctricas*.

Desde 1882, fecha en la que se puso en funcionamiento la primera central eléctrica, la producción de energía eléctrica ha aumentado de año en año, variando la tasa de crecimiento en este período de tiempo, pero habiendo sido siempre positiva con la única excepción, hasta ahora, del año 2009, consecuencia de la crisis económica sufrida a nivel mundial. Incluso en los años que siguieron a las crisis energéticas de 1973 y 1979, en los últimos años de la década de los setenta y primeros de los ochenta, la tasa de crecimiento anual descendió por debajo del 5 %, cuando con anterioridad se superaba dicho valor, pero nunca fue negativa. Al analizar los datos históricos sobre la producción anual de electricidad a nivel mundial, se observa que en el período de 1950 a 1970, ésta se multiplicó por cinco. De 1973, año de la primera crisis energética, con una producción mundial de energía eléctrica de 6.117 TWh², a 2005, con una producción de 18.378,3 TWh, se triplicó la producción de electricidad, con una tasa de crecimiento media anual de 6,26 %. En 2016, la producción mundial

² 1 TWh = 0,086 Mtep

de energía eléctrica fue de 25.081,6 TWh, siendo la tasa media de crecimiento anual en el período 2005-2016 de 3,31 %. Las previsiones apuntan a que en 2040, la producción de energía eléctrica a nivel mundial alcanzará los 36.000 TWh y el consumo de electricidad contribuirá en el 24 % del consumo final de energía. En los países de la OCDE, el crecimiento en la demanda de electricidad será modesto, pero en el caso de los países en vías de desarrollo la demanda de electricidad se duplicará.

En el apartado anterior se ha comentado qué actualmente, a nivel mundial, el 28 % de la energía primaria se consume en la producción de energía eléctrica, en la figura 4 se muestra la contribución de cada una de las fuentes de energía primaria en la producción de energía eléctrica en 2016. Como se puede observar, prácticamente, son los combustibles fósiles, el combustible nuclear y la energía hidráulica, las fuentes de energía primaria que producen casi los 24.973 TWh producidos en 2016, exactamente el 92,2 %. El 78 % de la energía eléctrica producida en el mundo se produce en *centrales termoeléctricas*, en las que se consumen como fuente de energía primaria combustibles fósiles, combustible nuclear, energía solar térmica, biomasa, energía geotérmica y residuos

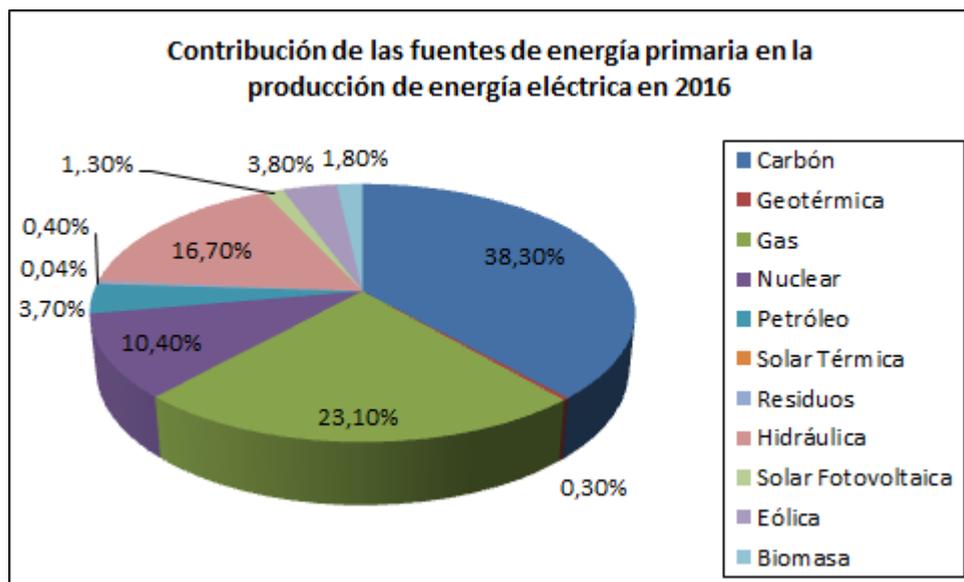


Figura 4. Reparto de las fuentes de energía primaria en la producción mundial de electricidad en 2016.

El carbón es la fuente con mayor contribución en la generación de energía eléctrica, el 38,3 % (9.594,34 TWh) de la electricidad producida a nivel mundial en 2016 se genera en centrales eléctricas que consumen carbón como fuente de energía primaria. Casi el 45 % (44,82 % en 2016) del carbón producido se utiliza en la generación de energía eléctrica. En 1973, el 38,3 % (2.348,17 TWh) del total de electricidad se producía con carbón, al igual que en 2016, y se utilizaba el 37,2 % de todo el carbón producido. Se puede decir que el carbón mantiene su hegemonía a nivel mundial en este campo de aplicación desde hace más de 40 años. Por el contrario, con el resto de las fuentes de energía se han producido en este período cambios muy significativos.

La segunda fuente de energía en relación a la contribución de la producción de energía eléctrica es el gas natural, con una diferencia de 15 puntos. Este ha ido ganando protagonismo en los últimos 20 años. Se ha pasado de una producción de 2.083,2 TWh en 1996 a una producción de 5.973,89 TWh. Se espera que el gas natural siga adquiriendo mayor protagonismo como consecuencia de su mejor comportamiento energético y medioambiental frente a otras fuentes de energía de origen fósil.

Conviene indicar que, aunque lo que reflejan los datos en el año 2016, es que el uso del petróleo en la generación de energía eléctrica es minoritario, antes de 1973, año de la primera crisis energética, la situación era bien distinta, ya que su contribución era de un 25 %. La vulnerabilidad de la estabilidad del precio del barril de petróleo, puesta de manifiesto a lo largo de la década de los setenta del siglo pasado ante acontecimientos de diversa índole, desplazó definitivamente al petróleo como fuente de energía en la generación de energía eléctrica. La realidad de aquel momento, 1973, era la de unos países con un elevadísimo consumo de productos derivados del petróleo, que tenían un coste muy bajo, pero que tenían que ser importados dado que no disponían de yacimientos de petróleo. El elevado aumento en el precio del barril de petróleo supuso un importante descalabro en la economía de muchos países, dada la fuerte dependencia que tenían del petróleo. A partir de aquel momento, las políticas energéticas de los países desarrollados cambiaron, incluyendo, entre otras directrices, la de reducir el consumo de petróleo en todas aquellas aplicaciones en que fuera posible sustituyéndolo por otras fuentes de energía. Esto es lo que ocurrió en la producción de energía eléctrica, ya que la tecnología desarrollada permitía poder realizar los cambios oportunos para sustituir el uso de los derivados del petróleo por otras fuentes de energía, como el carbón o el gas natural. Desde entonces, la producción de energía eléctrica con fueloil, que es el combustible derivado del