El Observatorio

PRIMER INFORME

ENERGÍA

¿Es posible un modelo energético sostenible al ritmo de crecimiento actual con las tecnologías conocidas y previsibles?

22 de Febrero de 2008

Primer Informe

Energía

Autores:

César J. Carmona Tapia
~
Daniel Carralero Ortiz
~
Diego Escobar Antón
~
Cristóbal J. Gallego Castillo
~
Marta Victoria Pérez

§

El Observatorio

Foro de Discusión Científico y Social

El Observatorio es constituido a comienzos de 2007 por un grupo interdisciplinar de jóvenes ingenieros movidos por el deseo de participar activamente en la sociedad como ciudadanos de pleno derecho y preocupados tanto por la dificultad de llevar a cabo ese deseo en el seno de un estado democrático como por la desinformación existente (incluso y especialmente entre la clase política) en lo referente a diversos temas de máxima importancia en los que la tecnología y la ciencia juegan un papel importante. Creado como una organización de carácter esencialmente progresista y crítico, *El Observatorio* es un foro de discusión y análisis en el que se trata de aprovechar la formación técnica de sus componentes para generar un discurso riguroso e informado que permita abordar la dimensión social de dichas cuestiones desde una postura que combine dentro de lo posible la solvencia del método científico con la conciencia política y social.

El Observatorio
C. Carmona, D. Carralero, D. Escobar, C. Gallego , M. Victoria

"Primer Informe Energía"

Madrid, 22 de Febrero de 2008
Número de S.Registro M-001523/2008

Quedan permitidas la libre distribución y la reproducción con cita

elcorreodelobservatorio@gmail.com

Portada y logo de "El Observatorio" diseñados por Pablo Carralero Ortiz

"La lucha por la mensurabilidad del cielo se ha ganado por medio de la duda; mientras que las madres romanas, por la fe, pierden todos los días la disputa por la leche. A la ciencia le interesan las dos luchas. Una humanidad tambaleante en ese milenario vaho nacarado, demasiado ignorante para desplegar sus propias fuerzas no será capaz de desplegar las fuerzas de la naturaleza que vosotros descubrís. ¿Para qué trabajáis? Mi opinión es que el único fin de la ciencia debe ser aliviar las fatigas de la existencia humana. Si los hombres de ciencia, atemorizados por los déspotas, se conforman solamente con acumular saber por el saber mismo, se corre el peligro de que la ciencia sea mutilada y que vuestras máquinas sólo signifiquen nuevas calamidades. Así vayáis descubriendo con el tiempo todo lo que hay que descubrir, vuestro progreso sólo será un alejamiento progresivo de la humanidad. El abismo entre vosotros y ella puede llegar a ser tan grande que vuestras exclamaciones de júbilo por un invento cualquiera recibirán como eco un aterrador griterío universal."

"Galileo Galilei"
Bertolt Brecht

Índice general

1. Introducción **13**

2. Descripción del modelo **17**

2.1. Aspectos generales 17

2.2. Rango de aplicación 19

2.3. Concretando 20

3. El Cambio Climático **23**

3.1. Gases de efecto invernadero 24

3.2. Sumideros y fuentes 25

3.3. Consecuencias 27

I Análisis Tecnológico **33**

4. Tecnologías convencionales **35**

4.1. Transporte 35

4.2. Generación de electricidad 37

5. Energías renovables **39**

5.1. Introducción 39

5.2. Descripición de las fuentes de energía renovables 43

5.2.1. Energía solar térmica 43

5.2.2. Energía solar fotovoltaica 45

5.2.3. Energía eólica 48

5.2.4. Energía hidráulica 50

5.2.5. Energía geotérmica 51

5.2.6. Energía mareomotriz y energía de las olas 52

5.2.7. Biomasa 53

6. Fisión **55**

6.1. Situación actual de la energía nuclear convencional . . . 56
6.2. Tendencias tecnológicas . . . 57
6.3. Ciclo del combustible . . . 61
6.4. Gestión de residuos . . . 65
6.5. Reservas de uranio . . . 67

7. Biocombustibles **71**

7.1. Generalidades . . . 71
7.2. Análisis . . . 73
7.3. Conclusiones . . . 76

8. Eficiencia **79**

8.1. Introducción . . . 79
8.2. Sector residencial . . . 79
8.2.1. Aislamiento . . . 80
8.2.2. Aire acondicionado . . . 80
8.2.3. Electrodomésticos . . . 81
8.2.4. Iluminación . . . 81
8.2.5. Electrónica . . . 82
8.3. Sector terciario . . . 82
8.4. Sector transportes . . . 83
8.4.1. Optimización del tráfico . . . 83
8.4.2. Transporte por carretera . . . 83
8.4.3. Aviación comercial . . . 84
8.4.4. Otros medios de transporte . . . 84
8.5. Sector industria . . . 85

9. La economía del Hidrógeno **87**

9.1. Introducción . . . 87
9.2. Tecnologías de producción de hidrógeno . . . 89
9.2.1. Tecnologías de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles y biomasa . . . 89
9.2.2. Tecnologías de producción de hidrógeno a partir de calor nuclear y fuentes alternativas de energía . . . 93

10. Técnicas de captación y almacenamiento de carbono **97**
10.1. Tecnología . . . 97
10.2. Potencial . . . 98
10.3. Consecuencias . . . 99
10.4. Conclusiones . . . 101

11. Fusión **103**
11.1. Descripción general de la fusión nuclear . . . 103
11.2. Revisión histórica . . . 104
11.3. El futuro de la fusión . . . 106
11.4. Comparativa con la energía nuclear convencional . . . 108

12. El consumo energético en Europa **111**
12.1. Introducción . . . 111
12.2. Estado actual del consumo energético en el primer mundo . . . 112
12.2.1. Consumo por tipo de combustible . . . 112
12.2.2. Consumo de energía primaria por sectores económicos . . . 113

13. Conclusiones preliminares **115**
13.1. Primeras conclusiones . . . 116
13.2. La energía nuclear: escenarios . . . 119

II Modelo Predictivo **125**

14. Evolución de la demanda energética **127**

15. Evolución de la producción energética **131**
15.1. La eficiencia . . . 131
15.2. Sector Eléctrico . . . 132
15.3. Sector Transportes . . . 136
15.4. Sector Industrial . . . 136
15.5. Sector Residencial . . . 137
15.6. Sector Hidrógeno . . . 137
15.7. Abastecimiento de energía primaria por fuentes . . . 139

16. Evolución de las emisiones **141**

III Conclusiones **145**

17. Conclusiones sobre el modelo básico **147**

17.1. Análisis de los resultados 148

17.2. Escenarios básicos 152

18. Variaciones sobre los escenarios básicos **161**

18.1. Escenario alternativo 1: consumo constante 161

18.2. Escenario alternativo 2: no hay transición al hidrógeno 164

18.3. Escenario alternativo 3: la producción de hidrógeno mediante fósiles es más contaminante de lo esperado 166

18.4. Escenario alternativo 4: el coeficiente de termólisis es mayor 169

18.5. Escenario alternativo 5: no se introducen medidas destinadas a aumentar la eficiencia 171

18.6. Escenario alternativo 6: no se producen cantidades significativas de energías renovables 173

19. Conclusiones finales **177**

A. Lista de abreviaturas **181**

B. Tabla de conversión de unidades energéticas **183**

Índice de figuras

3.1. *El efecto invernadero* . . . 23
3.2. *Fuentes de producción de los principales GEI* . . . 26
3.3. Concentración de CO_2 atmosférico (en p.p.m) . . . 28
3.4. *Temperatura media terrestre* . . . 28
3.5. *Comparación de los resultados predichos por el modelo y de las observaciones para el caso de tener en cuenta exclusivamente los fenómenos naturales (variaciones solares y actividad volcánica), exclusivamente los antropogénicos (GEI) y ambos* 29
3.6. *Incremento de la temperatura global en función de la concentración atmosférica de CO_2 [3]* . . . 30
3.7. *Aumento de la temperatura media terrestre en función de la concentración de CO_2 en la atmósfera* . . . 31
3.8. *Cambios climáticos irreversibles* . . . 31
3.9. *Consecuencias del aumento de la temperatura media terrestre* . . . 32

4.1. *Emisiones de CO_2 de las centrales térmicas en función de la eficiencia y del tipo de combustible por kWh final* . . . 37

5.1. *Datos previstos para la energía solar termoeléctrica* . . . 45
5.2. *Datos previstos para la energía solar fotovoltaica* . . . 48
5.3. *Datos previstos para la energía eólica* . . . 50
5.4. *Datos previstos para la energía hidroeléctrica* . . . 51
5.5. *Datos previstos para la energía geotérmica* . . . 52
5.6. *Población que basa su consumo energético en la biomasa* . . . 53

6.1. *Procesos del ciclo de extracción y enriquecimiento del uranio* . . . 63
6.2. *Balances energéticos y materiales del ciclo del uranio, [20]* . . . 64
6.3. *Emisiones de CO_2 durante la producción de combustible nuclear según la riqueza del mineral* . . . 65
6.4. *Previsiones de reservas de uranio en escenario a cuota constante* . . . 68

6.5. *Previsiones de reservas de uranio en escenario de consumo alto* 68
6.6. *Previsiones de reservas de uranio en escenario de sustitución de hidrocarburos* . . 68

7.1. *Balance energético de los principales cultivos dedicados a la producción de biocarburantes* 73

9.1. *Producción de H_2 mediante electrólisis y almacenamiento en pilas de combustible, según [38]* 89
9.2. *Obtención de H_2 mediante el Ciclo S-I* 95

10.1. *Emisiones de CO_2 según distintas actividades* 99

11.1. *Calendario del Programa Internacional de Fusión [48]* 106
11.2. *Esquema de una central de fusión* 107
11.3. *Comparativa de la radiotoxicidad de los residuos generados en distintos tipos de centrales eléctricas (PWR hace referencia a una central de fisión) [49]* 109

12.1. *Consumo de energía primaria por tipo de combustible en la OCDE en Mtep, según [25]* 112
12.2. *Consumo de energía primaria por sectores económicos en la OCDE en porcentaje en 2004, según [25]* 113

13.1. *Línea Cronotecnológica* 123

14.1. *Evolución de la demanda de energía primaria* 127
14.2. *Reparto porcentual de energía primaria por sectores en 2010* 128
14.3. *Transferencia porcentual de energía primaria al Hidrógeno por sectores* 129
14.4. *Reparto porcentual de energía primaria por sectores en varias décadas* 130
14.5. *Demanda de energía primaria por sectores* 130

15.1. *Mejora porcentual de la eficiencia por sectores* 132
15.2. *Efecto global de la eficiencia sobre la energía primaria* 132
15.3. *Energías renovables: potencia instalada* 133
15.4. *Energías renovables: energía producida* 133
15.5. *Potencia nuclear instalada por escenarios* 134
15.6. *Rendimiento estimado de las centrales térmicas* 134
15.7. *Energía primaria: Sector Eléctrico. Escenario Apagado* 135
15.8. *Energía primaria: Sector Eléctrico. Escenario Continuista* 135

15.9. *Energía primaria: Sector Eléctrico. Escenario Proliferación (punteado, el exceso de energía eléctrica).* . . . 136
15.10 *Distribución de energía primaria: Sector Transportes* . . . 136
15.11 *Distribución de energía primaria: Sector Industrial* . . . 137
15.12 *Distribución de energía primaria: Sector Residencial* . . . 137
15.13 *Distribución de energía primaria: Sector Hidrógeno. Escenario Apagado* . . . 139
15.14 *Distribución de energía primaria: Sector Hidrógeno. Escenario Continuista* . . . 139
15.15 *Distribución de energía primaria: Sector Hidrógeno. Escenario Proliferación* . . . 139
15.16 *Energía primaria por fuentes. Escenario Apagado* . . . 140
15.17 *Energía primaria por fuentes. Escenario Continuista* . . . 140
15.18 *Energía primaria por fuentes. Escenario Proliferación* . . . 140

16.1. *Emisiones de CO_2 en Tg por TW·h de energía primaria* . . . 142
16.2. *Evolución de las emisiones para los tres escenarios* . . . 142
16.3. *Distribución de emisiones por sectores* . . . 143
16.4. *Volumen total de emisiones acumuladas* . . . 144

17.1. *Evolución de las emisiones para los tres escenarios* . . . 153
17.2. *Emisiones acumuladas hasta 2050* . . . 153
17.3. *Abastecimiento de energía primaria según su fuente en el Escenario Apagado, por décadas* . . . 154
17.4. *Abastecimiento de energía primaria según su fuente en el Escenario Continuista, por décadas* . . . 154
17.5. *Abastecimiento de energía primaria según su fuente en el Escenario Proliferación, por décadas* . . . 154
17.6. *Reparto de la producción eléctrica por fuentes y décadas* . . . 156
17.7. *Evolución en el consumo de mineral de uranio en los tres escenarios (acumulado en cada década)* . . . 158
17.8. *Porcentaje de las reservas mundiales estimadas de mineral de uranio consumidas en cada uno de los escenarios hasta 2050 (sobre unas reservas totales estimadas de 45 MtU)* . . . 158

18.1. *Evolución de las emisiones por décadas (EA 1)* . . . 162
18.2. *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 1)* . . . 163
18.3. *Emisiones acumuladas (EA 1)* . . . 163
18.4. *Evolución de las emisiones por décadas (EA 2)* . . . 164
18.5. *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios(EA 2)* . . . 165

18.6. *Emisiones acumuladas (EA 2)* 166
18.7. *Evolución de las emisiones por décadas (EA 3)* 167
18.8. *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 3)* . . 168
18.9. *Emisiones acumuladas (EA 3)* 168
18.10. *Evolución de las emisiones por décadas (EA 4)* 169
18.11. *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 4)* . . 170
18.12. *Emisiones acumuladas (EA 4)* 170
18.13. *Evolución de las emisiones por décadas (EA 5)* 171
18.14. *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 5)* . . 172
18.15. *Emisiones acumuladas (EA 5)* 172
18.16. *Evolución de las emisiones por décadas (EA 6)* 173
18.17. *Emisiones acumuladas (EA 6)* 174
18.18. *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 6)* . . 175

Capítulo 1

Introducción

En su constitución, *El Observatorio* fue concebido como un foro de debate y estudio en el que profundizar desde una postura científica y rigurosa en aquellos temas de carácter técnico que tuvieran así mismo una proyección social. De este modo, se buscaba la creación de una herramienta de análisis que permitiera aplicar (al menos en la medida de lo posible) el poder del método científico a dichos temas, haciendo posible discutir su dimensión político-social desde una perspectiva lo más objetiva posible, empleando argumentos apoyados en información fiable y contrastada.

Una vez analizadas las distintas problemáticas, y sobre la base sólida que proporciona el conocimiento en profundidad de cada tema, *El Observatorio* puede ser empleado también como herramienta para plantear y analizar vías de resolución de dichos problemas. En este aspecto de su actividad, el grupo adoptará aquellas medidas que considere en mayor concordancia con su visión de la sociedad, aunque sin renunciar en absoluto a la consecución de la máxima objetividad técnica. De este modo, el grupo buscará aquellas soluciones que, manteniéndose dentro de lo técnicamente posible, conduzcan a sociedades más libres y justas socialmente en lo político, y al mismo tiempo, en lo medioambiental, resulten compatibles con una nueva forma de civilización verdaderamente sostenible y equilibrada, que detenga la degradación cada vez más acelerada de nuestro planeta.

Este planteamiento general deja una gran cantidad de temas de gran relevancia dentro del margen de actuación de *El Observatorio*, con componentes técnicas y sociales que los hacen aptos para el método de trabajo del grupo. Sin embargo, se ha considerado más productivo centrar los esfuerzos (que, evidentemente, son limitados) en un solo área de trabajo, con el fin de alcanzar una mayor profundidad en su análisis.

El tema elegido para este comienzo, es el de la sostenibilidad, en sentido amplio. El problema de cómo construir una sociedad capaz no ya de seguir creciendo, sino simplemente de seguir

existiendo sin basarse en recursos naturales próximos al agotamiento y sin desequilibrar el medio ambiente planetario hasta el punto de ponerse a sí misma en peligro, es probablemente uno de los más acuciantes a los que se enfrenta nuestra generación.

Sin embargo, es preciso recalcar que, si bien este problema tiene una importantísima componente técnica y científica, no puede ser reducido únicamente a ella: existen también una parte política y otra social que en ningún caso pueden ser ignoradas. El problema no podrá ser nunca resuelto exclusivamente mediante el desarrollo de nuevas tecnologías que traten de suplir las deficiencias de nuestro actual sistema socioeconómico: es necesario además (aunque, a su vez, sin desatender lo primero) definir qué tipo de sociedad queremos para que sea posible resolver el problema medioambiental sin que ello suponga agravar o consolidar las graves injusticias sociales que plantea el sistema actual.

Así pues, en el presente informe, *El Observatorio* plantea un primer acercamiento al problema de la sostenibilidad, atacando directamente uno de sus aspectos más centrales: el del consumo y la generación de energía.

Este primer informe, de acuerdo con lo ya explicado, tendrá una naturaleza principalmente técnica, de tal modo que se centrará en el estudio de los aspectos más tecnológicos del problema, dejando relativamente de lado su vertiente más social (que queda pendiente para próximos trabajos). Así pues, el análisis estará centrado en las tecnologías energéticas existentes, así como en aquellas que están siendo desarrolladas y harán aparición a lo largo de las próximas décadas, y tratará de evaluar su potencial de aplicación y su interés social y medioambiental, haciendo especial hincapié en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI, en lo sucesivo). Por el contrario, no se entrará a analizar aspectos sociales tales como los niveles de consumo y su continuo crecimiento, o las medidas sociales o políticas que serían necesarias para poner en práctica las medidas técnicas consideradas.

Aquí, no obstante, es preciso realizar una aclaración: si bien no se discutirá el camino político a seguir, las medidas técnicas a considerar son aquellas que, dentro de un posibilismo razonable, *El Observatorio* cree que deberían ser aplicadas y no necesariamente las que se derivan de la tendencia política actual. Así pues, es posible que algunas propuestas, aun siendo perfectamente posible su aplicación dentro de los parámetros actuales, requieran ciertas transformaciones sociopolíticas.

A modo de ejemplo, si la Comisión Europea propone aumentar la eficiencia en el consumo energético en un cierto porcentaje en los próximos 20 años, una vez estudiada dicha propuesta, se

tomará ese porcentaje como una cifra razonable (si es que la propuesta lo es), aun en el caso de que su aplicación requiera unas transformaciones económicas y sociales que no se entrará a analizar. En general, no se cuestionará por ahora el modelo socioeconómico que da origen al problema, limitándose el informe a describir la naturaleza del mismo.

En resumen, el planteamiento de este estudio puede ser condensado en una pregunta, en torno a la cual se construirá el informe:

¿Es posible un modelo energético sostenible al ritmo de crecimiento actual y con las tecnologías conocidas y previsibles?

Capítulo 2

Descripción del modelo

Antes de comenzar con el análisis propiamente dicho, será conveniente establecer las principales hipótesis de trabajo, y definir así a grandes rasgos los aspectos generales del modelo.

2.1. Aspectos generales

En primer lugar, el propósito del análisis a realizar es alcanzar conclusiones generales mediante cálculos cualitativos antes que cuantitativos. Esto significa que en el modelo se tratará de determinar los órdenes de magnitud de los distintos efectos a considerar para poder distinguir su importancia relativa, en lugar de tratar de hacer un cálculo preciso de las cantidades concretas.

Dadas las características del trabajo a realizar (y dados los medios disponibles) esta es la única manera viable de actuar. Además, resulta muy ventajoso el hacerlo, ya que al buscar información entre la bibliografía, permite manejar distintas fuentes de datos para estimar un orden de magnitud a partir de ellas, sin tener que elegir forzosamente el valor concreto de una de ellas. La utilidad de esto resulta mayor a medida que la dispersión de opiniones crece, o a medida que la cantidad disponible de datos acerca del tema en cuestión disminuye.

La otra gran ventaja de este planteamiento del modelo es su robustez: en efecto, dado el carácter general de las variables consideradas, pequeñas variaciones en ellas afectan en pequeña medida a los resultados globales, salvo en ciertos valores particularmente críticos (y que por serlo han sido determinados con especial cuidado). De este modo, se puede considerar que los resultados alcanzados son correctos mientras los datos se mantengan al menos en el mismo orden magnitud que el estimado. A su vez, al tratarse de estimaciones de los grandes números del problema energético, es difícil cometer un error tan grande, en particular tras contrastarlos en varias fuentes.

Así mismo, está fuera de los propósitos del presente informe el describir los medios (sociales, económicos o políticos) por los que cada una de las medidas propuestas puede o debe ser llevada a cabo, no por considerar que dicha cuestión carezca de importancia, sino porque en nuestra opinión el análisis técnico debe preceder al político, de tal manera que, una vez decididas qué medidas pueden resultar beneficiosas desde un punto de vista lo más objetivo posible, sea posible acometer la tarea (esta ya, sí, estrictamente política y social) de decidir los medios que permitan alcanzar de la manera más aproximada posible la solución obtenida como óptima. Esta separación de lo político y lo técnico debe aportar mayor claridad al análisis, al evitar que elementos ajenos a la naturaleza de un debate particular (ya sea el político, ya sea el técnico) enturbien los términos del análisis.

Respecto a este último postulado del modelo, parece preciso llevar a cabo algunas aclaraciones. En primer lugar, no tiene por qué acarrear una pérdida de posibilismo (y, en la medida en que contribuya a hacer el análisis más exacto, si que conllevará una ganancia), ya que el posibilismo político y el "posibilismo" técnico no son la misma cosa: la realidad nos demuestra cada día que la aparente imposibilidad política de cambiar el sistema socioeconómico (al menos hasta el punto en que sería deseable) no influye en el hecho científico de la necesidad cada vez más perentoria de hacerlo, causada por la degradación del medio ambiente y por el agotamiento de los recursos planetarios, que nada saben de nuestra capacidad como seres humanos de regularnos bien o mal. De hecho, de esa misma contradicción nace la necesidad de un informe como éste.

Por otra parte, tampoco se debe pensar que el análisis resulta desideologizado al ser planteado en estos términos: es cierto que la discusión técnica no abordará directamente cuestiones políticas, pero los motivos y los objetivos generales del informe (que ya han sido señalados) son anteriores al propio análisis, de tal manera que no las conclusiones, sino la valoración de las conclusiones dentro de su contexto político, social y económico se verán consecuentemente afectadas por sus líneas ideológicas generales. Así pues, si bien la búsqueda de datos y su posterior estudio se realizará con la mayor imparcialidad posible, el posterior juicio de valor respecto a la utilidad social de las medidas consideradas se hará no sólo teniendo en mente criterios puramente técnicos (aunque evidentemente estos estarán presentes en todo momento), sino también de acuerdo con nuestras propias ideas acerca de lo que es justo y de lo que puede o puede no ayudar a la sociedad en su conjunto.

De este modo, el análisis estará estructurado en dos partes principales:

- En primer lugar, se llevará a cabo un estudio técnico de los principales aspectos del problema

energético, especialmente aquellos métodos de producción o ahorro existentes o propuestos. Tras este estudio se decidirá qué potencial tiene cada uno de ellos de contribuir adecuadamente a resolverlo.

- En segundo lugar, se planteará un modelo predictivo en el que se asumirá la aplicación de la mejor combinación de medidas favorables a partir del momento actual (a comienzos de 2008), observando los efectos obtenidos.

Tras todo ello, por último, se tratará de esbozar las principales conclusiones obtenidas a la vista de los resultados.

2.2. Rango de aplicación

Una vez definido el carácter general del trabajo, conviene definir algunas de las principales hipótesis de partida, que delimitarán los aspectos del problema que será necesario considerar, y concretarán el tipo de medidas a tomar en cuenta.

El análisis tendrá un carácter local, puesto que estará limitado a Europa (entendiendo como tal la UE de los 25[1]. Esta elección viene determinada por la excesiva complejidad de un modelo global, pero también porque éste resultaría confuso bajo la óptica empleada: en efecto, las diversas regiones del mundo presentan problemáticas y niveles de desarrollo diferentes, de modo que resulta difícil ser generalista y cualitativo sobre un espacio tan heterogéneo.

Por el contrario, Europa resulta razonablemente homogénea (y puede además asumirse como hipótesis razonable que esa homogeneidad irá en aumento, y que existirán políticas comunes en la región), y puede tomarse como ejemplo de región desarrollada. Puesto que son las regiones desarrolladas del mundo las que producen la parte más importante de las emisiones de GEI, una solución que resultara viable localmente para Europa debería a priori ser extrapolable al resto del mundo (combinada con políticas de desarrollo allá donde fueran necesarias), convirtiéndose así en una solución global. Por último, también se debe mencionar la consistencia que puede proporcionar al informe la gran cantidad de datos disponible sobre esta región (en particular cuando se com-

[1]Cuando sea necesario, emplearemos también datos relativos a la zona europea de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, formada por los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, España, Estados Unidos, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza, Turquía, Japón, Finlandia, Australia, Nueva Zelanda, México, República Checa, Corea del Sur, Hungría, Polonia y Eslovaquia), que incluye cuatro países no pertenecientes a la UE-25 (Turquía Finlandia, Suiza y Suecia), y excluye por el contrario algunas de las últimas incorporaciones a ésta (Chipre, Repúblicas Bálticas, Eslovenia y Malta).

para con los disponibles acerca de otras), que por lo general es tratada en ellos una manera unitaria.

Puesto que se desea analizar las consecuencias de un conjunto de cambios introducidos en las estructuras sociales y económicas europeas, el modelo se proyectará hacia el futuro adoptando así el formato de una predicción. No obstante, a pesar de este formato, no debe ser interpretado como una predicción precisa acerca de cuál va a ser realmente la situación en las próximas décadas sino más bien como la deducción de las consecuencias que puede tener previsiblemente la adopción de una serie de medidas concretas y bien determinadas.

Se tomará arbitrariamente el año 2050 como límite, por diversas razones: en primer lugar por considerar que realizar predicciones de carácter tecnológico con más de medio siglo de diferencia resulta demasiado aventurado, ya que los resultados serían demasiado imprecisos. Por otra parte, la mitad del presente siglo podría así mismo verse como un punto clave, a partir del cual el cambio decisivo debe haber sido realizado. La mayoría de las fuentes consultadas coinciden en que, de alcanzarse dicha fecha sin introducir cambios significativos en la tendencia actual, las consecuencias medioambientales (y probablemente políticas) serían irreversibles y extremadamente graves. Por último, al margen del problema del Cambio Climático, esta fecha también puede ser vista como un límite para la reconversión energética-industrial que impone necesariamente el inminente agotamiento de los combustibles fósiles. De acuerdo con muchas previsiones, en el 2050 la producción de petróleo habrá llegado ya a su pico histórico y el gas estaría aproximándose al suyo (esperable aproximadamente dos décadas más tarde). Así, en caso de no haberse reducido drásticamente la dependencia de las economías europeas con respecto a los hidrocarburos frente a los niveles actuales, la economía de la región se verá en serio peligro.

De acuerdo con la hipótesis central del informe, no se influirá sobre el consumo de energía y se asumirá que éste sigue con la tendencia actual. Así pues, el escenario predictivo a desarrollar consistirá en buena medida en un intento de responder a una demanda siempre creciente de energía, de tal manera que su impacto medioambiental sea lo menor posible.

2.3. Concretando

Así pues, si la pregunta última que motiva el presente análisis es *¿Es posible un modelo energético sostenible al ritmo de crecimiento actual y con las tecnologías conocidas y previsibles?*, en cuanto se comience el análisis y se vaya profundizando en aspectos más concretos irán apareciendo un conjunto de preguntas "secundarias", que pueden considerarse como concreciones

parciales de la primera. Algunas de las que hemos ido encontrando hasta el momento podrían ser:

- *¿Es simplemente posible atender la demanda energética previsible en las condiciones tecnológicas actuales?*
- *Si es así, ¿Es posible hacerlo sin que ello conduzca a la destrucción del medio ambiente, al incremento peligroso del calentamiento global y al agotamiento de los recursos no renovables?*
- *¿Qué tecnologías son las más adecuadas globalmente para atender esta demanda?*

El objetivo del informe podría ser así resumido en encontrar respuestas razonadas para cada una de estas preguntas, así como a otras que vayan apareciendo a lo largo del análisis.

Capítulo 3

El Cambio Climático

La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el *Cambio Climático* como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

El *efecto invernadero* es un efecto natural que se produce en la Tierra y consiste en la reflexión por parte de la atmósfera de la radiación de la superficie terrestre lo que conlleva un aumento de la temperatura hasta valores que permiten la vida en la Tierra.

Figura 3.1: *El efecto invernadero*

La energía que nos llega del Sol es prácticamente luz visible (43 %) e infrarroja (48 %) con algo de ultravioleta (9 %). De toda la energía procedente del Sol un 30 % es reflejada directamente de nuevo hacia el espacio por las nubes, el aire absorbe un 20 % y el otro 50 % llega a la superfice terrestre. Esta superfice reemite un 105 % de la energía que le llega en forma de calor infrarrojo (la Tierra es un planeta cálido que irradia calor). De este calor reemitido por la superficie el 35 % es absorbido por el aire o rebotado de nuevo hacia el suelo y el resto se escapa hacia el exterior junto con el 30 % reflejado directamente por las nubes.

Como consecuencia de este equilibrio entre la energía que entra y que sale se alcanza una temperatura estable en la Tierra. El efecto invernadero eleva la temperatura media de la Tierra 33 grados respecto a un planeta que no tuviese atmósfera dejándola en 15^oC de media y permitiendo la vida en ella.

Pero si el efecto invernadero aumenta se rompe el equilibrio expuesto anteriormente y para restaurar el balance entre la energía que entra y la que sale, el clima deberá adaptarse de alguna manera. Este ajuste incluirá un calentamiento global de la superficie de la Tierra y de las capas bajas de la atmósfera que implicará cambios en otras variables: las precipitaciones globales, la cobertura de nubes, y todos los demás elementos de nuestro sistema atmosférico. A todos estos efectos hace referencia el término Cambio Climático.

3.1. Gases de efecto invernadero

Además del dióxido de carbono y el vapor de agua también producen efecto invernadero los siguientes gases: metano, dióxido de nitrógeno, óxido nitroso y CFCs.

- El metano posee un efecto acumulador 58 veces mayor que el CO_2 pero está en menor cantidad en la atmósfera. Este gas se produce mediante procesos geológicos (emisión de los volcanes) o biológicos (descomposición de la materia en ausencia de oxígeno o digestión del ganado). Normalmente, el metano es absorbido en el suelo vegetal quedando congelado (en el permafrost), o en procesos marinos quedando atrapado en el subsuelo oceánico.

- Las concentraciones de ozono de las capas bajas atmosféricas y los óxidos de nitrógeno hacen que éstos no tengan una contribución determinante en el efecto invernadero pero son muy nocivos para los seres vivos. El ozono es el causante de una contaminación muy corrosiva conocida como *smog oxidante*. Los óxidos de nitrógeno junto al dióxido de azufre son los responsables del *smog ácido*.

- Los Cluorofluorocarbonados (CFC), creados artificialmente por el hombre, tienen una capacidad para almacenar calor miles de veces mayor que la del CO_2. Estos gases no se fabrican desde la firma del Protocolo de Montreal de 1987 (su fabricación fue prohibida para evitar el deterioro de la capa de ozono). El problema es que previamente estos gases habían sido fabricados en grandes cantidades debido a una de sus principales ventajas (son inertes) pero ésta se traduce ahora en su principal problema: no reaccionan con nada y por lo tanto continúan en la atmósfera. Aun así, la concentración de CFC está estabilizada en varias milésimas de partes por millón.

  Como sustitución de los CFC se están empleando otros halocarbonos principalmente los hidrofluorocarbonos (HFC) y perfluorocarbonos (PFC) que también contribuyen al calentamiento global.

- Aparte de los gases anteriores, destaca el hexafluoruro de azufre (SF_6), usado como aislante de electricidad, conductor de calor, y agente refrigerante y cuyo potencial de efecto invernadero es 23900 veces superior al del CO_2.

Por simplicidad el efecto de todos estos gases se representa por "dióxido de carbono equivalente" (CO_{2eq}), aludiendo a la cantidad de CO_2 que produciría el mismo efecto que ellos.

Los procesos más importantes que hacen incrementar el porcentaje de CO_2 presente en la atmósfera son la combustión de carbón e hidrocarburos por la industria humana y la emisión de CO_2 por el suelo helado (permafrost) al deshelarse parcialmente debido a una subida de las temperaturas. En la tabla 3.2 se muestran los procesos que emiten los principales GEI y su contribución relativa.

En cuanto al vapor de agua se calcula que es el responsable de casi dos tercios del efecto invernadero total pero su concentración es prácticamente imposible de calcular debido a sus cambios de fase continuos. Además, cuando está en forma de gotas en las nubes actúa en contra del efecto invernadero apantallando la radiación solar de día por un lado y a favor del efecto invernadero impidiendo que el calor escape de noche. La imposibilidad de cuantificar la cantidad de vapor de agua en la atmósfera y el hecho de que la actividad humana no influye directamente en esta cantidad hacen que este gas no se tenga en cuenta normalmente a la hora de hablar de Cambio Climático.

3.2. Sumideros y fuentes

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es la existencia de sumideros (absorben CO_2 de la atmósfera) y fuentes (emiten CO_2 a la atmósfera). Los principales sumideros son los bosques

GEI, SUS ORÍGENES Y SU CONTRIBUCIÓN AL CALENTAMIENTO DE LA ATMÓSFERA		
GAS	**FUENTE PRINCIPAL**	**CONTRIBUCIÓN AL CALENTAMIENTO (%)**
Dióxido de carbono (CO_2)	• Quema de combustibles fósiles (77%). • Deforestación (23%).	55
Clorofluorocarbonados (CFC) y gases afines (HFC y HCFC)	• Diversos usos industriales: refrigeradoras, aerosoles de espuma, solventes. • Agricultura intensiva.	24
Metano (CH_4)	• Minería de carbón. • Fugas de gas. • Deforestación. • Respiración de plantas y suelo por efectos del calentamiento global. • Fermentación entérica.	15
Óxido nitroso (NO_2)	• Agricultura y forestería intensiva. • Quema de biomasa. • Uso de fertilizantes. • Quema de combustibles fósiles.	6

Fuente: Oficina Española de Cambio Climático.

Figura 3.2: *Fuentes de producción de los principales GEI*

y océanos. Los bosques absorben CO_2 a medida que se produce el crecimiento de la vegetación y éste queda acumulado en plantas y árboles. Sin embargo, actúan como fuentes cuando la materia vegetal se descompone emitiendo metano; aun así el balance final es positivo y se considera a las zonas de bosques sumideros.

El plancton y la disolución de CO_2 en agua son los mayores reponsables de la absorción de CO_2 en los océanos y las corrientes termohalinas de su desplazamiento desde la superficie hasta las profundidades de los océanos en ciclos que duran miles de años.

Aunque no se conocen con precisión todos los mecanismos mediante los cuales absorben el CO_2 de la atmósfera todos los sumideros, de los 7.5 Pg (10^{15} gr) de Carbono que se emiten anualmente, se ha observado un aumento atmosférico de 3 Pg según el IPCC, con lo que podemos suponer que estos sumideros absorben 4.5 Pg anualmente. Cuando comenzaron a realizarse cálculos sobre emisiones y absorciones se contempló la posibilidad de que estos sumideros estuvieran aumentando progresivamente su eficacia a la hora de absorber CO_2. Lo cierto es que ahora no está tan claro ya que, si bien el aumento de concentración de CO_2 en la atmósfera conlleva esta mejora, el posterior aumento de temperatura lo deteriora, pudiendo llegar a invertirse el balance de su actividad de modo que dichos sumideros pasan a ser fuentes que expulsan de nuevo a la atmósfera el CO_2 acumulado.

Por ejemplo, al aumentar la temperatura aumenta la velocidad de descomposición de la materia orgánica, es decir, la expulsión de CO_2 a la atmosfera por parte de los bosques. El aumento de temperatura también ocasiona una disminución de la solubilidad del CO_2 en el agua, es decir, disminuye el poder de los océanos como sumideros[1]. Además, dicho aumento también puede desestabilizar y variar notablemente las corrientes termohalinas. Por último, grandes masas de suelo congelado (permafrost) se derretirían y liberarían enormes cantidades de CO_2 acumuladas en él.

3.3. Consecuencias

Es bien cierto que los modelos matématicos utilizados para modelar el clima y predecir su desarrollo futuro no son completos. El problema es complejo ya que se trata de modelar un sistema como la Tierra con el número suficiente de nodos (puntos representativos sobre toda la superficie y para diferentes alturas) para obtener una precisión aceptable. En cada uno de estos nodos deben aplicarse las ecuaciones de Navier-Stokes adaptadas para el caso atmosférico u oceánico.

Pero también es cierto que existen datos aceptados por la comunidad científica internacional que demuestran, sin lugar a dudas, la existencia de un cambio climático de causas antropogénicas.

En poco más de medio siglo la concentración de CO_2 ha aumentado en más de un 30 % como muestra la figura 3.3. En este tiempo la temperatura media terrestre ha subido entre 0.6 y 0.7^{o}C como muestra la figura 3.4 (El aumento de temperatura en los últimos 10000 años ha sido de 1.5^{o}C)

Este aumento de temperatura está directamente relacionado con el aumento de la concentración de CO_2 atmosférico y este aumento está a su vez directamente relacionado con el uso de combustibles fósiles.

Del cuarto informe de evaluación IPCC publicado en Noviembre de 2007 se extraen varias consecuencias importantes: pese a la falta de precisión de los modelos climáticos la consecuencia clara que muestran las gráficas de la figura 3.7 es que las observaciones concuerdan fielmente con las predicciones teóricas cuando se tiene en cuenta tanto los fenómenos naturales que afectan al Cambio Climático como los de carácter antropogénico.

Para poder realizar previsiones futuras se suponen varios escenarios realizando en cada uno de ellos ciertas suposiciones a nivel macroeconómico sobre la evolución de la sociedad, la tecnología

[1]Según las predicciones realizadas por el Hadley Center para un escenario pasivo, es decir, en el que no se implementa ninguna medida contra el Cambio Climático esta inversión del papel de sumideros a fuentes podría tener lugar en la década de 2050.

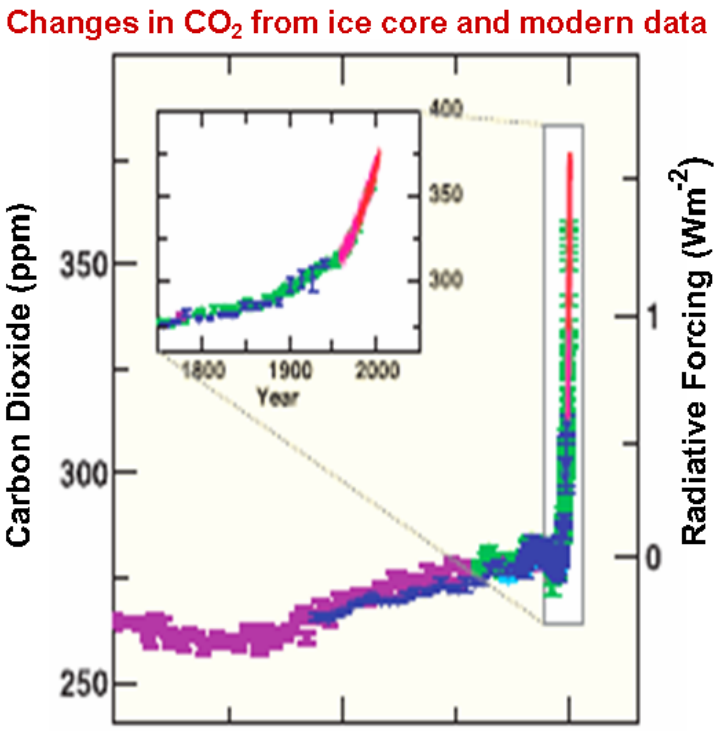


Figura 3.3: Concentración de CO_2 atmosférico (en p.p.m)

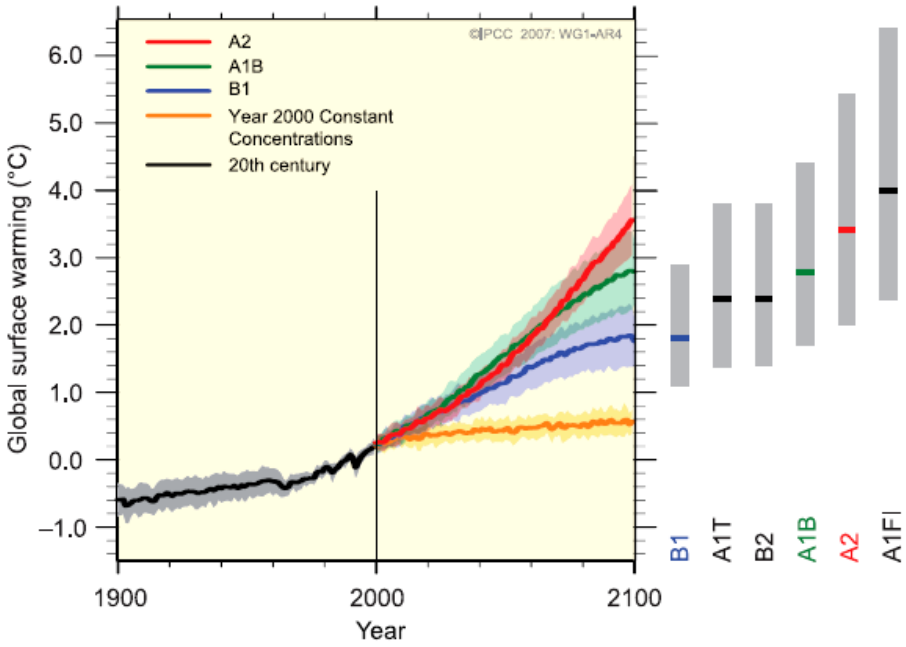


Figura 3.4: *Temperatura media terrestre*

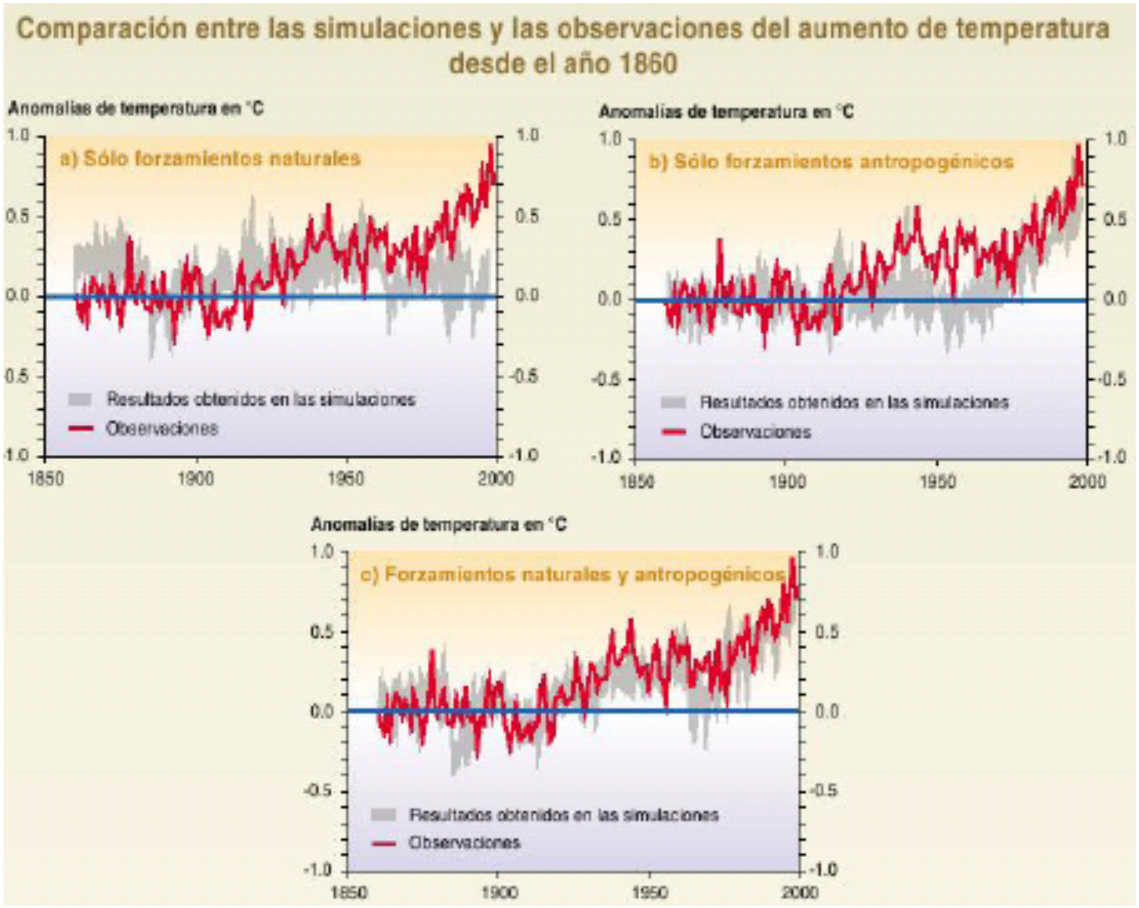


Figura 3.5: *Comparación de los resultados predichos por el modelo y de las observaciones para el caso de tener en cuenta exclusivamente los fenómenos naturales (variaciones solares y actividad volcánica), exclusivamente los antropogénicos (GEI) y ambos*

y las políticas. En función de estas hipótesis se puede obtener cómo varían las emisiones y a partir de ahí las concentraciones. La temperatura media del planeta sufrirá un aumento de entre 2 (en los escenarios más óptimistas) y 6.1^{o}C (en los escenarios más pesimistas) para el año 2100. El nivel del mar sufrirá un aumento de entre 10 y 90 cm para el año 2100.

En la tabla 3.3 se muestra el incremento de la temperatura terreste media, en función de la concentración atmosférica de CO_2 en la que se alcance un equilibrio, la década en la que se producirá la máxima concentración de CO_2 y el porcentaje de reducción de emisiones en 2050 respecto al año 2000 para conseguir estos valores.

Stabilization level (ppm CO_2-eq)	Global mean temp. increase at equilibrium (°C)	Year CO_2 needs to peak	Year CO_2 emissions back at 2000 level	Reduction in 2050 CO_2 emissions compared to 2000
445 – 490	2.0 – 2.4	2000 - 2015	2000- 2030	-85 to -50
490 – 535	2.4 – 2.8	2000 - 2020	2000- 2040	-60 to -30
535 – 590	2.8 – 3.2	2010 - 2030	2020- 2060	-30 to +5
590 – 710	3.2 – 4.0	2020 - 2060	2050- 2100	+10 to +60
710 – 855	4.0 – 4.9	2050 - 2080		+25 to +85
855 – 1130	4.9 – 6.1	2060 - 2090		+90 to +140

Figura 3.6: *Incremento de la temperatura global en función de la concentración atmosférica de CO_2 [3]*

Desde *El Observatorio* aceptamos, siguiendo el criterio expuesto por el IPCC [3], poner el límite en un aumento de temperatura media terrestre de 2°C puesto que cambios mayores conducirían a consecuencias del Cambio Climático extremadamente graves.

Este límite impone la necesidad de lograr una estabilización de CO_2 atmosférico en torno a las 450 ppm y como consecuencia desarrollar un modelo energético que permita reducir las emisiones de CO_2 de origen antropogénico, como mínimo, en un 50 % para el año 2050 respecto de las que existían en el año 2000.

Por último, se exponen algunos aspectos relevantes:

- Los cambios no se darán por igual en todas las zonas del planeta, existiendo regiones donde los cambios sean muy drásticos. Además, dichos cambios afectarán de manera desigual a los diferentes países, teniendo consecuecias mucho más graves sobre las poblaciones más pobres y como consecuencia, vulnerables de los países en vías en desarrollo. Es destacable que estos países no son los causantes del Cambio Climático.

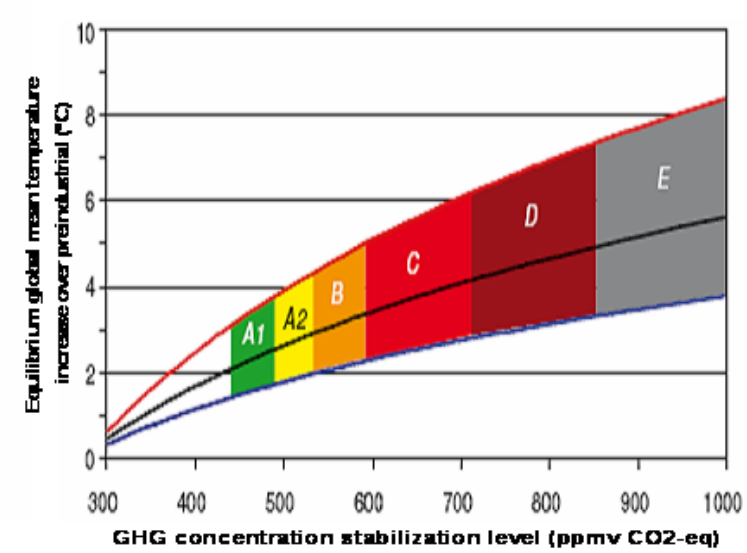


Figura 3.7: *Aumento de la temperatura media terrestre en función de la concentración de CO_2 en la atmósfera*

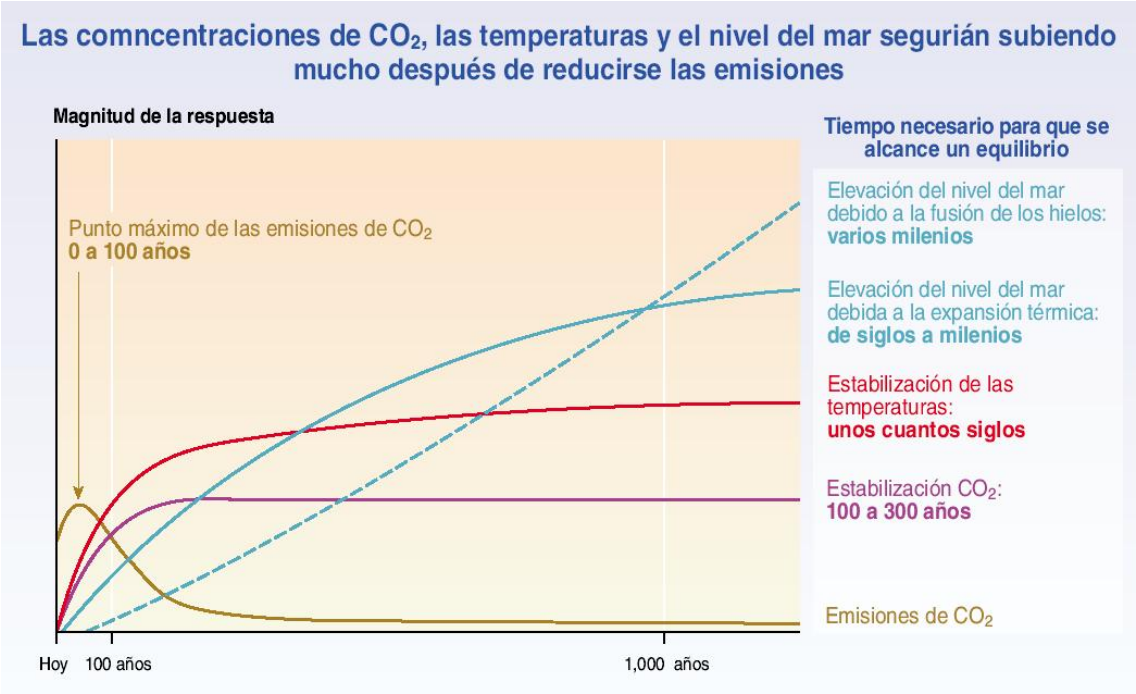


Figura 3.8: *Cambios climáticos irreversibles*

- El CO_2 tarda aproximadamente un siglo en absorberse de la atmósfera, luego, las medidas que se tomen hoy no se notarán hasta dentro de un siglo. De hecho, la figura 3.8 muestra

cómo evolucionarían diferentes aspectos climáticos si se dejara de emitir CO_2 inmediatamente. Es decir, los cambios que irreversiblemente ya han sido ocasionados.

- Entre los impactos que ocasionará el Cambio Climático cabe destacar: el aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos metereológicos extremos como inundaciones, sequías o tormentas, la reducción de la producción de alimentos en la mayor parte de las zonas tropicales, subtropicales y regiones de media latitud, el aumento de la propagación de enfermedades epidémicas, la extinción de plantas y animales y un incremento de la escasez de agua aproximadamente del 20 %. La gravedad de estos impactos dependerá, como ya ha sido expuesto anteriormente, de las concentraciones de CO_2 atmosféricas y como consecuencia de la reducción de emisiones de CO_2 y de las políticas que se implementen para lograr esta reducción de emisiones.

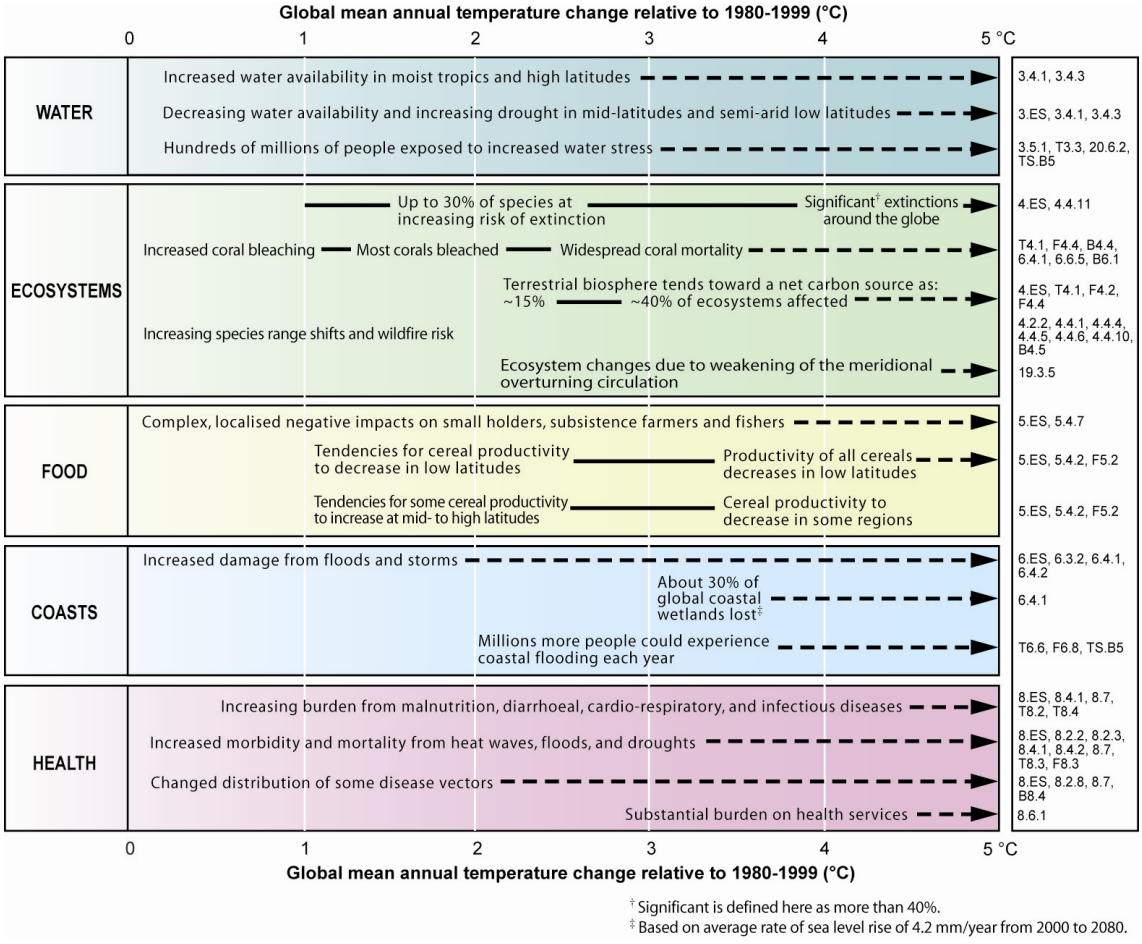


Figura 3.9: *Consecuencias del aumento de la temperatura media terrestre*

Parte I

Análisis Tecnológico

Capítulo 4

Tecnologías convencionales

En este capítulo se pretende describir de una manera breve la situación actual y los avances futuros de dos de los usos más extendidos en la actualidad de los combustibles fósiles: el transporte en vehículos propulsados por distintos derivados del petróleo y la generación de electricidad mediante la quema de distintos combustibles con liberación de importantes cantidades de CO_2 a la atmósfera. Estos dos usos, a pesar de ser causantes del efecto invernadero por la liberación de GEI, ni en las predicciones más optimistas se prevee que puedan ser sustituidos a corto plazo. Por lo contrario, en general se propone una transición progresiva a la economía del Hidrógeno y de las energías renovables. La razón para ello es que su ritmo de evolución tecnólogica y de crecimiento no permite realizar una transición rápida a los mismos. Por ello durante al menos un par de décadas más se continuará haciendo uso en mayor o menor medida tanto del transporte como de la generación de electricidad basada en combustibles fósiles. De ahí que sea muy interesante promover mejoras en estos dos tipos de usos, no con el objeto de alargar el tiempo de vida y uso de los mismos sino con el de reducir al máximo las consecuencias sobre el medio ambiente durante el tiempo que sea necesario hacer uso de ellos por la ausencia de una alternativa real.

4.1. Transporte

Este es uno de los mayores contribuyentes al efecto invernadero debido a la emisión de GEI de todos los vehículos propulsados con derivados del petróleo. Además, a diferencia de la generación de electricidad donde el uso de fuentes renovables ya es una realidad, hoy en día no existe en uso ninguna tecnología capaz de sustituir por completo al petróleo en aplicaciones de transporte. Por un lado, el uso de hidrógeno como combustible para el transporte todavía no se ha desarrollado por completo (solo existen ciertos prototipos) y por otro los vehículos completamente eléctricos tienen el grave problema de una reducida autonomía debido a la falta de baterías con gran capacidad de almacenamiento de energía, de reducido tamaño y con altos niveles de seguridad.

En la actualidad el parque automovilístico de la Unión Europea está compuesto fundamentalmente por vehículos de gasolina y diésel, en ambos casos propulsados con motores de combustión interna. Desde el punto de vista del consumo de combustible, los motores diésel son más eficientes que los de gasolina pues consumen en media un 30 % menos de combustible con lo que la cantidad de emisiones de GEI también se reduce. Sin embargo, el tipo de emisiones de los motores diésel son más perjudiciales que las de los motores de gasolina. Existen diversos programas de I+D con objeto de desarrollar filtros para motores diésel que acaben con ese problema. Hay que tener en cuenta que los motores diésel llevan en el mercado menos tiempo que los motores de gasolina y por ello la capacidad de mejora es mayor en los primeros que en los segundos al tratarse de una tecnología menos madura.

Por otro lado se están empezando a comercializar los motores híbridos que combinan motores de combustión interna con motores eléctricos. De esta forma se acaba con el problema de la falta de baterías de larga autonomía pues la energía generada en exceso por el motor de combustión interna así como el par de frenado, se utilizan para recargar la batería del motor eléctrico. Así, en trayectos urbanos con continuas paradas y arranques, periodos al ralentí y de baja velocidad es el motor eléctrico el que mueve al vehículo y en trayectos interurbanos es el motor de gasolina/diésel el que mueve el vehículo y genera electricidad para recaragar la batería del motor eléctrico. Con esta metodología se consigue reducir a 3 litros cada 100 km para un trayecto típico frente a los 5 litros cada 100 km de los mejores motores diésel. Además, tiene la ventaja añadida de reducir la contaminación tanto medioambiental como acústica en el interior de las ciudades. El ejemplo típico de este tipo de vehículos es el modelo Prius de Toyota aunque otras marcas están desarrollando modelos de similares características debido a su gran éxito. Por su parte los gobiernos empiezan a ser conscientes del problema del calentamiento global y para cumplir con los compromisos de Kyoto están favoreciendo la comercialización de estos vehículos mediante ventajas fiscales para las personas que adquieran este tipo de vehículos (reducción importante del impuesto de matriculación para los vehículos que menos contaminan y aumento del mismo para los vehículos que más lo hacen).

En el campo de los vehículos completamente eléctricos exite el problema ya mencionado de las baterías. Las empresas automovilísticas están desarrollando nuevas tecnologías de baterías para vehículos. Las baterías de ión-litio usadas en la actualidad en los teléfonos móviles y los ordenadores portátiles parecen las más prometedoras pero aún deben resolverse ciertos problemas de sobrecalentamiento de las mismas. En poco tiempo se espera tener baterías que permitan una autonomía de unos 70 km, que permitiría cubrir el trayecto medio diario de una persona. La idea sería que las baterías se conectarían a la red para recargarse cada noche que es precisamente cuando el consumo eléctrico es menor.

4.2. Generación de electricidad

En el ámbito de la generación de electricidad la combustión de carbón, petróleo o gas natural en centrales térmicas es el método comúnmente empleado en la actualidad. Hoy en día existe la tecnología de centrales térmicas de cuarta generación de ciclo combinado en las que se combinan el ciclo Brayton y el ciclo Rankine llegándose a alcanzar eficiencias de hasta el 60 % frente al 40 % de media de las centrales de ciclo simple de la primera y segunda generación. Incrementos adicionales en la eficiencia pueden alcanzarse mediante la mejora de la tecnología de turbinas, incremento de las relaciones de compresión de los ciclos y uso de materiales que puedan soportar mayores temperaturas.

Por otro lado, el uso de combustibles de menor contenido de carbón permite reducir la emisión de CO_2 tal y como se observa en la figura 4.1. De esta forma el carbón es el peor combustible que se puede usar en las centrales térmicas desde el punto de vista de las emisiones frente al petróleo o el gas natural. Sin embargo, el mayor precio del petróleo y del gas natural provoca que hoy en día todavía sigan construyéndose centrales térmicas de carbón, lo cual es un grave problema desde el punto de vista medioambiental. De hecho, en China, una de las actuales potencias emergentes, éste es el combustible mayormente utilizado en las centrales térmicas.

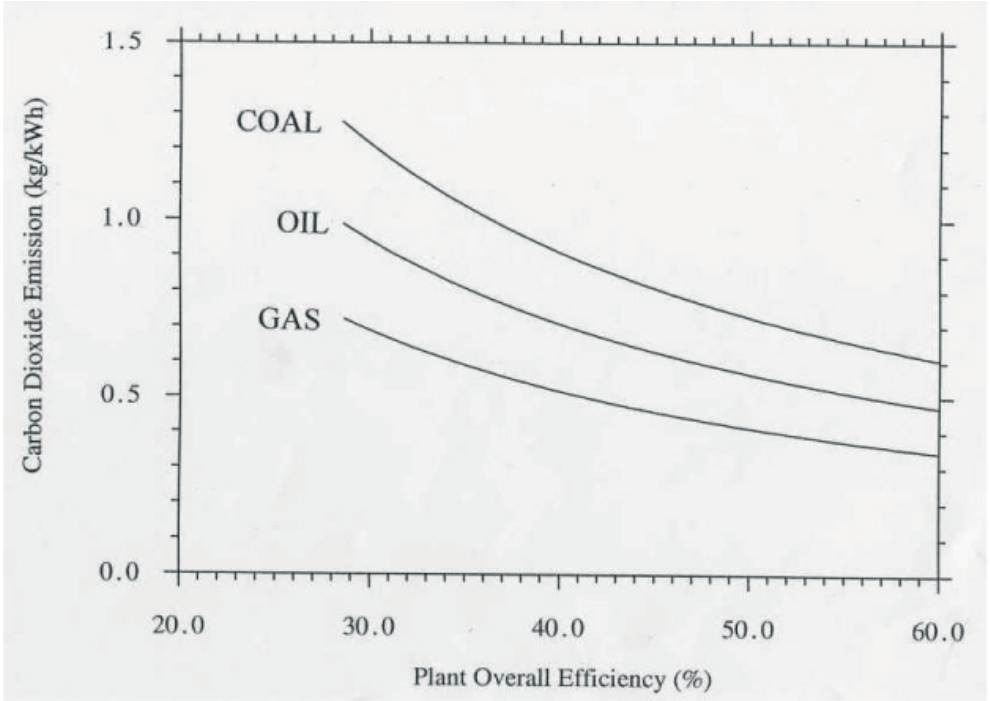


Figura 4.1: *Emisiones de CO_2 de las centrales térmicas en función de la eficiencia y del tipo de combustible por kWh final*

En la Unión Europea existen importantes reservas de carbón mientras que para el suministro de petróleo y de gas natural se depende de terceros países; por ello es muy posible que en un

futuro se utilicen estas reservas de carbón. De ahí que sea necesario hacerlo de la manera más eficiente posible pues como se ve en la figura cuanto mayor es la eficiencia de la central térmica menor es la diferencia en emisiones de GEI entre los distintos combustibles.

Capítulo 5

Energías renovables

5.1. Introducción

La definición de energías renovables a menudo es bastante generalista, emplea términos no bien delimitados y en ocasiones se añaden, según la fuente consultada, una serie de matices adicionales. Así, se pueden encontrar definiciones tales como "energías que se renuevan constantemente", "que provienen de fuentes inagotables", "que están siempre a nuestro alcance", "disponibles en reservas ilimitadas" o "que tienen un potencial inagotable". La definición que engloba todas las anteriores es aquella que las identifica como energías que se renuevan en escalas de tiempo pequeñas. Sin embargo, a continuación vamos a dar una definición que, sin perder generalidad, trata de ser más exacta y se basa en un concepto simple: aquellas cuyo consumo, por muy exhaustivo que sea, no influye en la disponibilidad de los recursos que las generan[1]. Dicho de otro modo, es imposible consumirlas a mayor ritmo del que su fuente las proporciona.

La mayor parte de ellas tienen, de una forma u otra, su origen en el Sol, aunque hay otros mecanismos naturales causantes de este tipo de energías. Así, cualquier aprovechamiento de la radiación solar (energía solar térmica y fotovoltaica) supone el uso de una fuente de energía renovable, ya que dicha radiación no está influida, por ejemplo, por el número de paneles instalados. Si bien el Sol no es un recurso que posea una disponibilidad infinita en el tiempo[2], su aprovechamiento no acorta su vida.

La energía eólica supone otra forma de energía renovable en tanto en cuanto su principal origen es de nuevo la radiación solar; entre el 1 % y el 2 % de la radiación que recibe la Tierra

[1] En este capítulo se hablará de "generación de energía" como la transformación de cierto tipo de energía en otro aprovechable por el hombre; generación de energía útil a costa de un consumo de las fuentes de energía.

[2] Se le estima una vida de más de 5 000 millones de años.

[5] provoca gradientes de temperatura y de presión que originan desplazamientos de las masas de aire. Hay otros hechos que contribuyen a la formación del viento, como la rotación de la Tierra, cuya influencia es relevante a elevadas alturas (vientos geostróficos) donde no existe el aprovechamiento de la energía eólica. En cualquier caso se trata sin lugar a dudas de otra fuente de energía renovable.

El caso de la energía hidráulica es similar. La energía potencial que posee el agua es constantemente renovada por la evaporación que se produce a nivel superficial de los océanos principalmente; nuevamente es la radiación solar la principal causa de ésta. El ciclo del agua establece unos flujos o caudales que determinan un tope teórico en cuanto al aprovechamiento de este recurso, cuya disponibilidad no se ve comprometida con su uso.

La energía mareomotriz es un ejemplo de fuente de energía renovable cuya causa no se encuentra en el Sol. Las mareas, provocadas por la influencia gravitatoria de la Luna, son causa del desplazamiento de grandes masas de agua, cuya energía cinética puede aprovecharse para la generación de energía.

Por otro lado, la energía contenida en las olas también es otro recurso renovable. Hay varios mecanismos por los cuales se generan olas de diferente tipo. Por ejemplo, las llamadas olas planetarias tienen su origen en la rotación de la tierra y poseen un periodo del orden de los cien días. Las olas de viento (y por tanto indirectamente resultantes de la radiación solar) son las que, por su periodo (varios segundos) se revisten de interés en cuanto a la obtención de energía. Otro tipo de olas, como las olas capilares cuyo mecanismo es la tensión superficial, carecen de potencial para tal fin.

La energía geotérmica proveniente del interior de la Tierra y que *aflora* (es decir, no se encuentra demasiado profunda) en zonas puntuales de la corteza también puede aprovecharse de diversas maneras, por lo que constituye otra forma de energía renovable no basada en el Sol.

El caso de la biomasa es algo más delicado. El concepto de biomasa engloba toda sustancia orgánica de la que se puede obtener un aprovechamiento energético. Generalmente se comete el error de considerarla una energía renovable por ciertas características que posee, como mantener equilibrado el balance entre emisión y absorción de CO_2 que conlleva su uso (según un análisis superficial; sin embargo, su uso excesivo influye negativamente en dicho balance, como se menciona en el capítulo 7). Si se hace uso estricto de las definiciones dadas al principio de este capítulo,

la biomasa no supone una fuente de energía renovable[3]. Solamente su uso sería "sostenible" (duradero en el tiempo) si se tuviera la certeza de no consumir más biomasa de la que se genera de forma global. Por el mismo motivo, tanto el petróleo, como el gas y el carbón[4] no se pueden considerar energías renovables aún cuando exista la posibilidad (ficticia) de consumirlos al mismo ritmo que se producen[5]. Es la capacidad de consumirlos a mayor ritmo, y por tanto, de agotarlos irreversiblemente, lo que les confiere el título de energías no renovables.

Volviendo al caso de la biomasa, ésta tiene su origen primigenio en las masas vegetales, ya que la materia animal y sus residuos orgánicos proceden de también de estas. Estas masas vegetales crecen gracias a la luz solar y al dióxido de carbono de la atmósfera, pero también al humus resultante de la descomposición de la propia biomasa mediante la actividad de bacterias y hongos. Dicho de otro modo, la biomasa precisa de sí misma para mantener su ciclo. Por tanto un uso excesivo de este recurso puede conllevar potencialmente una disminución drástica de su capacidad para regenerarse e incluso al agotamiento local de ecosistemas enteros. Como ejemplo se puede citar la deforestación masiva de un área determinada: esta irrupción en el ciclo de la nutrición del suelo a partir de restos orgánicos merma la capacidad de regeneración de la masa forestal. Si habitualmente se tiende a definir la biomasa como recurso renovable es porque la diferencia entre lo que se consume y lo que se genera (y por tanto lo que disminuyen las reservas) es aún pequeña frente a la totalidad existente; de la misma manera, si existiesen reservas de petróleo para miles de años, quizá se cometería el error de calificarlo como renovable.

La energía nuclear de fisión tampoco es una fuente de energía renovable aunque su uso no conlleve la emisión de GEI. El motivo es que en nuestro planeta existen unas reservas de material fisionable (principalmente uranio) que fueron originadas antes de la formación del sistema solar y que no se renuevan mediante ningún mecanismo natural[6]; por tanto durarán más o menos dependiendo de la velocidad a la que se consuman.

La energía de fusión tampoco puede considerarse renovable dentro del marco de la definición dada, ya que, como se explicará en el capítulo 11 está basada en la utilización del Deuterio, que no es un recurso renovable. No obstante, a diferencia de lo que sucede con la fisión, las grandes reservas de este elemento permitirían su uso intensivo durante escalas de tiempo muy superiores a las consideradas en este informe.

[3]Sí lo es si se considera otra definición de energía renovable: "Aquella que se obtiene y se *renueva* en períodos de tiempo de escala humana".

[4]Formas particulares de la biomasa, ya que provienen de restos orgánicos ancestrales: masas forestales y plancton marino.

[5]Debido a las eras geológicas que precisa, este consumo tendría que ser ínfimo.

[6]En el capítulo 6 se comentarán los ciclos de material fisionable más pormenorizadamente, haciendo hincapié en los métodos de reciclado y sus implicaciones.

Las energías renovables que gozan de mayor prestigio son aquellas que dependen del Sol (solar, eólica e hidráulica). Para mostrar las bondades de éstas suele hacerse referencia a un dato que se analiza sin demasiado rigor: la Tierra recibe del Sol una energía de 48.5 TW·h cada segundo, por lo que al cabo del año la energía recibida es unas 12 000 veces mayor que la energía primaria que precisa la humanidad a día de hoy. Esto suele inducir a pensar que sería muy fácil abastecernos únicamente a partir de ellas; pero lo cierto es que esta avalancha energética que recibimos continuamente no es aprovechable en su totalidad. Una porción considerable es reflejada por la atmósfera y devuelta al espacio. Aproximadamente la mitad se transforma en calor al ser absorbida por la atmósfera[7], la aguas superficiales[8] y la tierra. Además las masas vegetales que realizan la fotosíntesis también precisan de una parte de la energía solar. En definitiva, todos los ciclos que ocurren en la tierra, los ciclos vitales, el ciclo hidrológico, las corrientes marinas y el clima, consumen buena parte de la energía solar. Es cierto que la energía sobrante es suficiente para abastecer las necesidades humanas, pero la realidad es que, en general, se encuentran de una forma muy dispersa o muy poco concentrada, al menos para las necesidades actuales.

En la exposición anterior subyacen dos conceptos clave:

- *Fuentes de energía renovables*, como aquellas cuyo uso no compromete su disponibilidad.

- *Sostenibilidad*, que conlleva una actitud con respecto al uso, y que supone no consumir energía a mayor ritmo del que se produce, o, en su defecto, hacerlo a un ritmo tal que permita disponer del tiempo suficiente para encontrar alternativas frente a la carencia que acabaría teniendo lugar; y todo esto sin necesidad de vernos obligados a alterar radicalmente la forma de vida en un momento dado, sea por su agotamiento como por las consecuencias de su empleo (Cambio Climático).

En este marco, las fuentes de energía renovables son, por su definición, inherentemente sostenibles. El uso de la biomasa puede ser sostenible siempre y cuando se haga un consumo responsable que no merme su propia capacidad de regeneración. El empleo de carbón, petróleo o gas sólo sería sostenible si su tasa de consumo fuera tal que las reservas perdurasen lo suficiente como para aprender a vivir sin ellos, a la par que dicho uso no contribuyese a alteraciones graves del clima[9].

Por tanto es preocupante pensar que hemos llevado nuestras necesidades energéticas más allá de lo que pueden proporcionarnos la combinación de las fuentes renovables[10] y el uso sostenible

[7] La mayor parte de los vientos son a tal altura que no son aprovechables.
[8] Suponen tres cuartas partes de la superficie terrestre.
[9] Se entiende por graves las alteraciones que repercuten seriamente en nuestra forma de vida.
[10] O mejor dicho, del uso que de ellas hacemos.

de las no renovables. Aunque este análisis se llevará a cabo con mayor detalle en el capítulo 15, aquí sólo se pretende hacer una reflexión acerca de la divergencia entre energías renovables y necesidades actuales; los detractores de las primeras argumentan su potencial insuficiente; en oposición se encuentra la crítica al modelo de desarrollo exponencial que ha tenido lugar en el primer mundo durante los últimos dos siglos.

5.2. Descripición de las fuentes de energía renovables

A continuación se expone cuál es el estado del arte actual de cada fuente de energía renovable y su potencial de crecimiento. Al final de cada apartado se muestra una tabla con la evolución de la potencia instalada [10] que según los principios del informe se consideran y que serán tenidos en cuenta en el capítulo 15. Igualmente se indica el número de *horas equivalentes* asociado a cada tecnología. Las horas equivalentes son el número de horas al año que un sistema debería funcionar a potencia nominal para producir la misma energía que realmente se obtiene de él a lo largo del año; matemáticamente se define como sigue:

$$Horas\ Equivalentes = \frac{Energia\ anual\ obtenida}{Potencia\ nominal\ instalada}$$

5.2.1. Energía solar térmica

Se denomina así a cualquier aprovechamiento de la radiación solar para transformarla en energía térmica. Existe una gran diversidad de aplicaciones, entre las que destacan:

- Generación de agua caliente mediante el uso de colectores solares:
    - Producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS)
    - Calefacción mediante suelo radiante
    - Climatización de piscinas
    - Refrigeración solar
- Aprovechamiento directo de la radiación solar:
    - Sistemas de secado solar, mediante el calentamiento de una corriente de aire, utilizados principalmente en agricultura.
    - Desalinización de agua
    - Calefacción mediante criterios de arquitectura bioclimática y elementos pasivos, como el muro Trombe[11].

[11] Cuya configuración permite por convección natural la entrada en un recinto de corrientes cálidas en invierno y la salida de éstas en verano.

- La generación de energía eléctrica en centrales solares termoeléctricas.

A continuación se desarrolla cada uno de estos tres apartados.

Colectores solares

El uso del colector de placa plana en la generación de ACS forma parte de un sistema desarrollado y maduro, que goza de una eficiencia y de una rentabilidad razonables. La física del proceso es sencilla y se basa en el efecto invernadero: la radiación solar traspasa una cubierta transparente para la mayor parte del espectro solar, e incide en el absorbedor del colector, que se calienta. Éste, en función de su temperatura, radia energía, pero siempre a una mayor longitud de onda, para la cual la cubierta del colector es opaca, de forma que la energía queda retenida. En su interior se hallan conductos por los que circula un fluido caloportador que evacua el calor que es utilizado para calentar el agua (cuando no es la misma agua la que hace el papel de fluido caloportador). Existen variaciones que optimizan el proceso según las condiciones del emplazamiento, como el uso de colectores con cubiertas de doble vidrio o los de tubo de vacío, que minimizan las pérdidas por convección en lugares fríos.

Mediante un buen diseño se logran ahorros energéticos de hasta el 80 % en la generación de ACS; su coste y su ciclo de vida (con un buen mantenimiento, ronda los 20-25 años) confieren a estas instalaciones una rentabilidad de entre el 10 % y el 20 % en la actualidad, que se incrementará con la progresiva subida de precios de los combustibles tradicionales.

En la actualidad se trata de un mercado floreciente, respaldado por el nuevo Código Técnico de Edificación que obliga a la cobertura con energías renovables de un porcentaje variable del consumo energético en edificios de nueva construcción o reformados.

En este informe, la incorporación de estos elementos se incluyen en la eficiencia energética de los sectores Industria y Residencial (mediante la energía ahorrada), por lo que no es necesario hacer una previsión de la potencia instalada, como en el caso de la generación eléctrica.

Aprovechamiento directo de la radiación solar

La mayoría de estas aplicaciones son en la actualidad casi anecdóticas, de pequeña repercusión a nivel global (secado, desalinización) o se encuentran en una fase de investigación nada próxima a su comercialización (caso de la refrigeración solar). Si acaso la aplicación de mayor difusión en un futuro a corto y medio plazo es el empleo de criterios de arquitectura bioclimática, cuyo

efecto también se encuentra englobado, como en el caso anterior, en el cómputo de la eficiencia energética de los sectores Industria y Residencial.

Centrales solares termoeléctricas

El uso de concentradores ópticos (cilindro-parabólicos, receptor central con helióstatos y de discos parabólicos) permite elevar la temperatura de un fluido caloportador a temperaturas muy elevadas (del orden de los 1000°C), que pueden ser aprovechadas en el ciclo térmico de las centrales tradicionales para la generación de electricidad con turbinas. Este tipo de centrales, por la elevada inversión que precisan, no está muy extendido; además su potencial únicamente es elevado en zonas cálidas altamente soleadas (desérticas), por lo que las previsiones de potencia instalada en Europa no son extraordinarias.

Con respecto al número de horas equivalentes, este se estima en torno a 2500; puede parecer aparentemente elevado, pero esto es debido a que, por ejemplo, los sistemas de receptor central con heliostatos poseen un sistema de almacenamiento de calor (en general tanques de sales fundidas) que acumula el exceso de radiación solar[12], y que permite posteriormente el funcionamiento en periodos nublados o incluso más allá de la puesta de sol.

	Año				
	2010	2020	2030	2040	2050
GW instalados	0,9	4	15	16,5	18
Horas equivalentes	2500				

Figura 5.1: *Datos previstos para la energía solar termoeléctrica*

5.2.2. Energía solar fotovoltaica

La energía fotovoltaica no está tan extendida como su fama. Si bien se suele pensar en ella como una solución inminente y clara al problema de la generación eléctrica, la realidad es que en la actualidad la potencia instalada es irrisoria con respecto a las necesidades demandadas.

Sus principales ventajas radican en las siguientes características:

- Modularidad.
- Simplicidad mecánica: ausencia de partes móviles[13], bajo mantenimiento y larga vida útil.
- El recurso solar posee variaciones regulares y su predicción es relativamente fiable.

[12] Entiéndase por exceso aquella que supera la necesaria para su funcionamiento a potencia nominal.
[13] Salvo en el caso del uso de trackers.

Sin embargo, sus inconvenientes son:

- El bajo rendimiento intrínseco al proceso físico de conversión de radiación solar en electricidad (efecto fotovoltaico), que posee limitaciones propias de la respuesta espectral del propio material empleado en la célula ante la radiación solar; así, por ejemplo, el silicio monocristalino sólo aprovecha el rango que va de los 350 a los 1100 nanómetros, por lo que su rendimiento teórico máximo según la termodinámica es de un 26 %. Esto conlleva bajas densidades de potencia de panel. Si el recurso solar es, en condiciones óptimas, de 1000 W/m^2, en la actualidad los paneles fotovoltaicos oscilan entre los 130-140 W/m^2.

- El número limitado de horas de sol disponibles. Éste ronda como media en Europa las 2000 horas de sol al año. Dado que los paneles no funcionan siempre en condiciones nominales (radiación de 1000 W/m^2 a una temperatura de 25^oC), el número de horas equivalentes con la tecnología actual ronda las 1000-1350 horas.

- De los dos puntos anteriores se deriva que la energía fotovoltaica adolece de una baja densidad energética, que en Europa ronda los 100-150 kWh/m^2 anuales.

Como consecuencia su principal aplicación ha radicado en el abastecimiento energético de sistemas aislados, con un atractivo económico en el caso de sistemas remotos de pequeña potencia (como por ejemplo antenas de comunicación o bombeo de agua) y un atractivo humanitario en caso de la subsanación de necesidades básicas en países subdesarrollados o en vías de desarrollo, carentes de una infraestructura energética adecuada y aún no contaminados por un modelo de desarrollo que tolera el despilfarro. El coste en estos casos del kilovatio-hora es, aproximadamente, 10 veces mayor que con los medios convencionales de generación eléctrica (0.30-0.40 euros/kWh) [7], [11].

Por otro lado, el concepto de huerta solar es relativamente nuevo. La posibilidad de instalar paneles fotovoltaicos en grandes superficies para inyectar energía a la red eléctrica cuenta en España con el respaldo de varios Reales Decretos[14]. La conexión directa a red posee ventajas que abaratan su coste con respecto a las aplicaciones en sistemas aislados: no precisan de otros elementos como acumuladores ni de sistemas auxiliares de generación, ya que toda la energía es directamente aprovechada y vertida a la red y no es necesario acoplar la generación y la demanda. Estas granjas y su hermano menor que es la producción distribuida integrada en edificios, junto a una política adecuada de subvenciones[15], y a la elaboración de normativas cada vez más exigentes

[14] *RD 2818/1998* para la producción eléctrica a partir de recursos naturales, *RD 1663/2000* para instalaciones fotovoltaicas de baja tensión, *RD 436/2004* que regula el precio de la venta de la energía producida, etc.

[15] En el caso particular de España, a día de hoy las subvenciones del IDAE son tales que el periodo de retorno económico no descienden de los 15 años.

de obligado cumplimiento con respecto a la incorporación de paneles en la construcción, son las verdaderas vías que permitirían un rápido incremento en la penetración de la energía fotovoltaica. La ciencia puede contribuir a acelerar este proceso mediante avances en el estado del arte de esta tecnología, siempre y cuando se encuentre apoyada por una correcta inversión en I+D.

Actualmente la mayor parte de las células fotovoltaicas se fabrican de silicio monocristalino y policristalino[16]. Otros materiales susceptibles de ser utilizados principalmente en láminas delgadas son las aleaciones CIGS (cobre, indio, galio, azufre y selenio), el CdTe (telururo de cadmio) y el a-Si (silicio amorfo). Las tecnologías fotovoltaicas en lámina delgada permiten en primer lugar un relativo ahorro en cuanto al material para la célula (se precisa de menos volumen de material para producir la misma energía) y en segundo lugar el uso como sustrato de vidrio o polímeros; el primero dota al panel de una relativa transparencia que aumenta el rendimiento al ser la superficie trasera también útil para la conversión fotovoltaica, y el segundo permite la fabricación de paneles flexibles y por tanto más versátiles para ciertos usos. El problema es que como contacto frontal, se precisa el uso de óxidos conductores transparentes (OCTs) que elevan considerablemente el precio del producto. En la actualidad se está comenzando su comercialización.

Otra dirección de avance de mayor repercusión es la tecnología de células de alto rendimiento y el uso de concentradores solares. Las células de alto rendimiento se basan en multiuniones (hasta cuatro) de diferentes compuestos (basados principalmente en Arseniuro de Galio) de forma que globalmente hay un mayor aprovechamiento del espectro de la radiación solar y por lo tanto se alcanzan rendimientos en torno al 40 % [12]. Por otro lado, los sistemas de concentración se basan en captar y concentrar (hasta miles de veces) la radiación solar mediante elementos ópticos sobre una pequeña superficie, de forma que se precisarían cantidades mucho menores de células fotovoltaicas, lo que es especialmente interesante en el caso de las mencionadas células multiuniones debido a su elevado coste. Aprovechan exclusivamente radiación directa, por lo que deben ser constantemente orientados mediante "trackers" con un sistema de control de cierta precisión. Esta tecnología hoy día se encuentra aún en fase de investigación y desarrollo aunque se han llevado a cabo numerosas experiencias que apuntan al inicio de su comercialización a corto-medio plazo.

Si bien la energía fotovoltaica no es competitiva en la actualidad frente a otros medios tradicionales de generación de energía eléctrica, lo cierto es está ya experimentando un progresivo descenso de costes que será aún más acusado conforme se inviertan más esfuerzos en desarrollarla,

[16]La producción de silicio de grado electrónico (de elevada pureza) ha llegado a ser limitante en la producción de paneles fotovoltaicos años atrás. Actualmente se intenta definir un silicio de grado solar, de menor pureza pero mayor rentabilidad que el electrónico.

mientras que el coste de todos aquellos medios basados en recursos no renovables aumentan irremisiblemente por la escasez de las respectivas materias primas. Con todo ello, globalmente no se espera que la energía fotovoltaica alcance precios competitivos hasta, como mínimo, una década [6].

Situación actual y potencial de crecimiento

Como se ha mencionado anteriormente, la potencia instalada parte de niveles muy bajos: en el año 2004 Europa rondaba 1 GW (de los cuales el 80 % en Alemania), lo que representaba aproximadamente un tercio de la potencia instalada mundial. Sin embargo dos años después esta cifra se triplica: en el año 2006 Europa supera los 3 GW frente a los 6.5 GW mundiales. Lo cierto es que cabe pensar en un desarrollo exponencial de la energía fotovoltaica durante las próximas décadas dada la poca madurez del sector que revelan las líneas de investigación. Las previsiones de potencia instalada a lo largo de los años se muestran en la figura 5.2.

Las horas equivalentes varían apreciablemente según se generalice una tecnología que permita a los sistemas funcionar más cerca de su potencia nominal [7]:

Para los paneles actuales en aplicaciones aisladas (sin trackers y con criterios de acoplamiento demanda-suministro) las horas equivalentes para latitudes europeas rondan la cifra de 1000.

En sistemas conectados a red (sin trackers y con criterios de maximización energética) asciende a 1250.

El uso de trackers permite aumentar esta cifra hasta las 1600 horas.

Con el uso de sistemas de concentración esta cifra aumenta[17].

Por lo tanto es preciso hacer evolucionar esta cifra según tenga lugar la obtención y la generalización de las diferentes tecnologías (ver Línea Cronotecnológica 13.1)

	Año				
	2010	2020	2030	2040	2050
GW instalados	10	60	180	250	300
Horas equivalentes	1300	1600	1800	1900	2000

Figura 5.2: *Datos previstos para la energía solar fotovoltaica*

5.2.3. Energía eólica

El aprovechamiento de la energía cinética del viento existe desde hace siglos (transporte marítimo, realización de labores mecánicas, etc.); sin embargo, es desde el siglo pasado que cobra una importancia vital, al contar con la posibilidad de la generación eléctrica a partir de dicho recurso.

[17] El *Plan de Energías Renovables en España 2005-2010* asigna a una instalación de baja concentración la cifra de 3142 horas equivalentes al año

Puede decirse que el desarrollo de la tecnología implicada en la conversión de energía eólica en energía eléctrica se encuentra bastante avanzado en la curva de aprendizaje, con el que se ha logrado que los costes de producción alcancen niveles competitivos con las formas tradicionales de generación eléctrica.

Si bien los aerogeneradores, al igual que los paneles fotovoltaicos, permiten un versátil abastecimiento eléctrico en sistemas aislados, su mayor contribución en valores absolutos radica en la instalación de grandes aerogeneradores en parques eólicos. La optimización del aprovechamiento de este recurso se encuentra madura tras el desarrollo de aerogeneradores de velocidad variable capaces de maximizar su rendimiento en función de la velocidad de viento y con la implantación de sistemas de control activos por control de paso y por pérdida activa. Los avances en otras disciplinas como los materiales compuestos permiten la construcción de máquinas cada vez de mayor diámetro que se caracterizan por tener una mayor potencia nominal y un mayor rendimiento aerodinámico (el aumento de escala se traduce en mayores números de Reynolds que implican mayores eficiencias aerodinámicas).

Sin embargo el recurso eólico es muy dependiente del emplazamiento y muy variable con en el tiempo. Es por ello que no todos los emplazamientos son aconsejables para parques eólicos. De hecho, la elección de una ubicación pasa por estudios previos y tomas de medidas de viento durante largos periodos de tiempo para caracterizar el recurso eólico lo mejor posible. Por otro lado las variaciones temporales que repercuten en la calidad de la energía eólica van desde ráfagas instantáneas hasta las variaciones estacionales o incluso anuales de la velocidad media, cuyo principal inconveniente es la dificultad de pensar en una red eléctrica basada principalmente en este recurso. Ante este desafío las líneas de investigación se centran en la predicción y la gestión de redes.

El principal avance que le queda por hacer a la energía eólica es la conquista del mar. La moderna implantación de parques eólicos *off-shore* es una solución al agotamiento que puede ir sucediendo progresivamente en Europa de los emplazamientos en tierra propicios para tal fin[18]. Además, existen otras ventajas, como una velocidad media mayor del viento, una variación más suave de éste y una menor turbulencia por la menor rugosidad de la superficie oceánica con respecto a la terrestre.

Otras ideas aún por cristalizar cuyas líneas de desarrollo no están todavía claras, al menos

[18]En España en particular, la saturación es casi una realidad; sin embargo existe la posibilidad de seguir sustituyendo las máquinas de un antiguo emplazamiento por otras más modernas aumentando la potencia instalada en estos emplazamientos ventajosos.

a niveles globales, son las del empleo de parques eólicos para la producción de hidrógeno y la generalización de la minieólica para producción eléctrica o de hidrógeno dentro del marco de la generación distribuida.

Situación actual y potencial de crecimiento

La implantación de la energía eólica es mayoritaria en Europa, donde se encuentran en torno a las 3/4 partes de la potencia mundial instalada. En el año 2006 Europa contaba con 48 GW instalados, el doble que tres años antes. Dentro de ella, los países que lideran el sector son Dinamarca, Alemania y España.

Las previsiones para la potencia instalada se muestran en la tabla 5.3.

Las horas equivalentes en los mejores emplazamientos de Europa son actualmente 2000 [8], donde conviven aerogeneradores de velocidad constante y variable. Sin embargo, la generalización de estos últimos y la implantación de parques off-shore permiten tomar como media un valor de 2500 horas equivalentes.

	Año				
	2010	2020	2030	2040	2050
GW instalados	80	230	267	296,5	297
Horas equivalentes	2500				

Figura 5.3: *Datos previstos para la energía eólica*

5.2.4. Energía hidráulica

La energía hidráulica es otra fuente energética utilizada por el hombre desde hace siglos. Sin embargo la producción de electricidad mediante energía hidráulica ha alcanzado durante el siglo pasado una sólida madurez en cuanto a lo tecnológico y estabilidad en cuanto a la potencia instalada.

Esta generación se lleva a cabo mediante la instalación de centrales hidroeléctricas de un amplio rango de potencias, desde los pocos kilovatios (minihidráulica) en ríos y similares, hasta las grandes presas y embalses que alcanzan los gigavatios.

Si bien esta forma de producción goza de relativa buena fama, el impacto ambiental que conllevan los citados grandes embalses son objeto de crítica, atenuada por el progresivo agotamiento de los lugares donde es potencialmente viable construirlos. Por otro lado las centrales minihidráulicas tienen un menor impacto sobre el medio, y pueden ser utilizadas en el caso de aplicaciones

particulares no conectadas a red.

Una de las principales ventajas de la energía hidroeléctrica es la capacidad de regular la potencia instantánea (en el caso de embalses), y por tanto la posibilidad de contribuir al ajuste entre la producción y la demanda, dando estabilidad a la red.

Como se ha dicho, si bien la energía hidráulica proporciona una parte no despreciable de electricidad, no se esperan grandes avances en cuanto a la tecnología implicada ni en cuanto a la potencia instalada, como muestra la figura 5.4.

Con respecto al número de horas equivalentes, existe una gran variabilidad. Por un lado las pequeñas presas y en general las centrales minihidráulicas funcionan de forma casi permanente (4000-7000 horas al año), de manera que su potencia instalada está limitada por el caudal del río. Por otro, las grandes presas que generan embalses instalan una potencia mayor que proporciona el caudal de la cuenca; el motivo es el de poder suministrar en un momento dado grandes cantidades de energía en periodos concretos, por lo que su número de horas se reduce al intervalo 1200-2000 horas [7], [9].

Como solución de compromiso, dado que en el presente informe la potencia instalada engloba las centrales hidráulicas de todos los tamaños, se opta por un número de horas equivalente de 3000, lo que respeta la proporción entre unas y otras.

	Año				
	2010	2020	2030	2040	2050
GW instalados	137	145	148	148	148
Horas equivalentes	3000				

Figura 5.4: *Datos previstos para la energía hidroeléctrica*

5.2.5. Energía geotérmica

La energía geotérmica consiste en el aprovechamiento energético del calor acumulado en el interior de la Tierra, que, por circunstancias geológicas, se encuentra en capas relativamente superficiales. Puede clasificarse en 3 tipos, en función de la temperatura del yacimiento geotérmico:

- De alta temperatura (150-400°C)

- De media temperatura (70-150°C)

- De baja temperatura (menores de 70°C)

Los yacimientos de menor temperatura son más accesibles y frecuentes, pero su aprovechamiento se orienta por cuestiones de eficiencia a la obtención de energía término (calefacción); como en el caso de los colectores térmicos solares, este empleo es tenido en cuenta en este informe en términos de eficiencia. Por otro lado, los de alta temperatura sí pueden emplearse en la generación de energía eléctrica. Las previsiones de potencia instalada se muestran en la tabla 5.5, y las horas equivalentes se estiman en 6000.

	Año				
	2010	2020	2030	2040	2050
GW instalados	2,5	6	12	21,5	28,5
Horas equivalentes	6000				

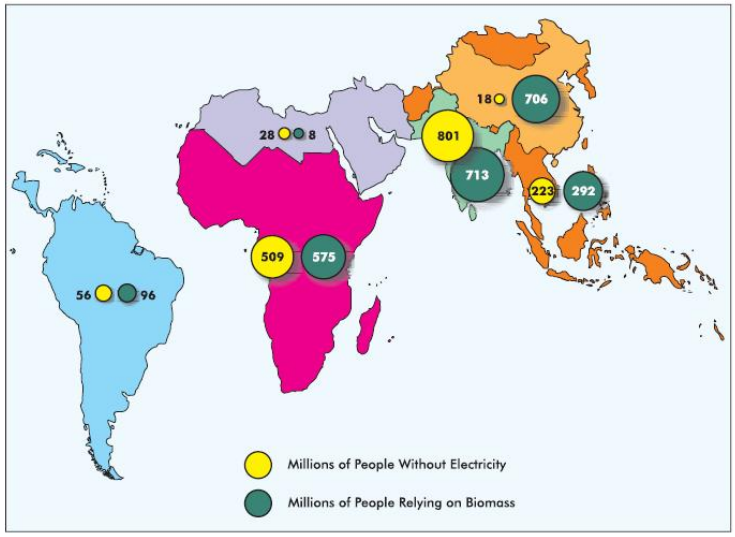
Figura 5.5: *Datos previstos para la energía geotérmica*

5.2.6. Energía mareomotriz y energía de las olas

La energía mareomotriz aprovecha el movimiento de grandes masas de agua provocada por las mareas para la generación de electricidad. Si bien la tecnología requerida es la misma que en el caso de la energía hidroeléctrica, hay motivos que han impedido una expansión que la dotara de relevancia. Principalmente la ubicación de la central no puede ser aleatoria, sino que precisa de una orografía con ciertas características, como una bahía o un estuario. Otro motivo es el impacto ambiental que conlleva, ya que altera las zonas húmedas y en general los ecosistemas locales y circundantes, hecho que puede repercutir en otras actividades económicas como la pesca. Y, por último, cabe destacar el hecho de que la magnitud de la infraestructura que es preciso construir no se ve compensada con la energía producida, o lo hace a muy largo plazo.

La energía de las olas es otra forma de producción eléctrica poco extendida. Se basa en la diferencia de alturas que producen las olas de viento en la superficie marina, las cuales inducen en un sistema de boyas un movimiento relativo que se transmite en última instancia a un generador eléctrico. Nuevamente la infraestructura que precisa el sistema frente a la energía producida suscita poco interés.

Estas dos formas de energías renovables están lejos de ser una realidad generalizada. Dado que su contribución al abastecimiento eléctrico europeo es insignificante, no se van a tener en cuenta en los cálculos del modelo predictivo.



Source: IEA analysis.

Figura 5.6: *Población que basa su consumo energético en la biomasa*

5.2.7. Biomasa

Se define como biomasa cualquier tipo de materia orgánica cuyo origen inmediato sea un proceso biológico, vegetal o animal.

Como fuentes de biomasa vegetal se pueden citar los bosques, los cultivos energéticos y los excedentes agrícolas. Los residuos orgánicos en explotaciones agrícolas, forestales, ganaderas o residuos de industrias o ciudades también son fuentes de biomasa de origen vegetal y animal.

Aunque no existe un acuerdo internacional, la biomasa puede separarse según su estado a temperatura ambiente; de este modo se tiene la biomasa sólida (por ejemplo, residuos orgánicos), líquida (en general llamados biocombustibles dentro de los cuales se denomina biocarburantes a aquellos susceptibles de ser usados en motores de combustión) y gaseoso (biogás).

Además, también se suelen distinguir tres posibles usos de la biomasa. El uso tradicional (combustión directa de madera o residuos para iluminar, cocinar o calentar), el uso mejorado (en el que la combustión se realiza en cocinas más eficientes) y el uso moderno (se refiere a la conversión de la energía a combustibles más avanzados, gas o incluso electricidad).

El uso tradicional de la biomasa en estado sólido es prácticamente despreciable en Europa. Sin embargo, no es así en el resto del mundo: según la IEA y como puede verse en la figura 5.6, la biomasa es la principal fuente energética para 2400 millones de personas y suple cerca del 40 % de la demanda energética de los países en desarrollo con todas las consecuencias de insostenibilidad, problemas medioambientales o de salud que de ello se derivan.

El biogás se produce de forma espontánea en los vertederos de residuos urbanos por fermentación de la materia orgánica que contienen. Se puede llevar a cabo este proceso en reactores

controlados (más o menos sofisticados) llamados biodigestores. El biogás (energía final) se almacena y se puede utilizar en lámparas, estufas o motores de gas. Éstos, acoplados a un generador eléctrico dan lugar a electricidad. La producción de biogás tanto en Europa como a nivel mundial es nuevamente despreciable.

La función principal de los biocarburantes es sustituir a los carburantes derivados del petróleo, principalmente utilizados en el transporte rodado. Este tema se desarrolla con más profundidad en el capítulo 7.

La contribución que puede llegar a aportar centrales eléctricas basadas en biomasa tampoco se tendrán en cuenta por considerarse despreciable frente a la de las anteriores tecnologías.

Capítulo 6

Fisión

La energía nuclear convencional[1] comenzó a ser utilizada por las principales naciones industrializadas del planeta a partir de la segunda mitad de la década de los cincuenta. En un principio fue considerada por muchos como la fuente de energía definitiva, capaz de satisfacer todas las necesidades energéticas de la humanidad de una manera moderna, barata e incluso segura. De esta época de euforia inicial datan los reactores de primera generación (GI).

Desgraciadamente, pronto se hizo patente que los problemas tecnológicos de la energía nuclear habían sido subestimados ya que los planes iniciales de construir reactores que operaran con plutonio tuvieron que ser rápidamente abandonados al comprobarse la complejidad de dichos sistemas. Así pues, en los 60 y 70 la industria electronuclear experimentó un proceso de crecimiento moderado, más marcado por maduración de las tecnologías dando lugar a la segunda generación de reactores nucleares (GII).

Sin embargo, a los problemas estrictamente técnicos pronto hubo que sumar los derivados de la creciente oposición popular al uso de esta forma de energía a causa de su alto coste social y ecológico. Esta oposición, trágicamente reforzada por los accidentes nucleares de los 80 (particularmente el desastre de Chernobyl) junto con un reabaratamiento de los hidrocarburos tras la crisis de los 70, detuvieron el crecimiento de la energía nuclear en todo el mundo, llevando incluso a varios países europeos a establecer moratorias o planes de eliminación de todas sus centrales.

A pesar de ello, en la última década, con el nuevo repunte del precio del petróleo, unido a nuevos problemas como el calentamiento global, o la nueva situación geopolítica en la que la de-

[1] En lo sucesivo, se entenderá por energía nuclear convencional aquella basada en la fisión atómica de elementos actínidos, en contraste con la basada en la fusión de elementos ligeros, que será tratada en detalle más adelante.

pendencia exterior de suministradores de hidrocarburos supone un grave problema para la Unión Europea, la industria electronuclear vive un momento de relativa reactivación (con la construcción de la tercera generación de reactores) mientras diversos sectores políticos y económicos la presentan como la única vía para combatir el Cambio Climático por su bajo nivel de emisiones de CO_2.

6.1. Situación actual de la energía nuclear convencional

En el momento actual las centrales nucleares mundiales tienen una edad media de 14 años, aunque en Europa la construcción de nuevas centrales se detuvo en varios países a partir de la década de los 80 (Alemania, Bélgica, Italia, España, etc.), algunos de los cuales (con Alemania a la cabeza) han anunciado su intención de prescindir completamente de la energía nuclear a medio plazo.

Sin embargo, la política de los países europeos respecto a la energía nuclear no es en absoluto uniforme, y otros países como Francia o Finlandia siguen apostando por ella como medio de lograr una independencia energética o de reducir sus emisiones de CO_2.

A pesar de ello, la última central recientemente aprobada por el gobierno finlandés será la primera en ser construida en Europa occidental en más de una década, por lo que puede asegurarse que la mayoría de las centrales nucleares europeas tienen como mínimo entre 15 y 20 años de antigüedad [13],[14],[15].

De este modo, en términos generales, la tecnología instalada en las centrales en funcionamiento resulta claramente obsoleta, lo que se traduce en una capacidad de generación por central y un consumo de combustible nuclear por MW generado (y consecuentemente, una producción de residuos de alta actividad) por debajo de los estándares actuales. Además, existe una gran dispersión a nivel continental en lo relativo a la potencia, actualización y modernización de los reactores, debido a la ausencia de una política nuclear común europea (que sólo ahora, con la relativa consolidación de la UE empieza a esbozarse), y más recientemente, a la incorporación en la UE de países con reactores de diseño soviético. De acuerdo con la IAEA [15] Gran Bretaña cuenta con 35 reactores que generan unos 13 GW_e (a una media de 370 MW_e por reactor) frente a los 63 GW_e que generan los 59 reactores franceses (a una media de más de 1000 MW_e por central).

Así pues, considerando la tecnología nuclear disponible a día de hoy como GIII+, se puede concluir que la flota nuclear europea está compuesta por una mezcla heterogénea de reactores GII y GIII. En conjunto, de acuerdo con EURATOM, [16], en 2005, los 145 reactores de la Europa de

los 25 consumieron unas 2750 tU de combustible nuclear (el equivalente al consumo de 23000 tU de uranio natural y el refinado de unas 13000 tU al año) para generar unos 133 GW_e·año [17]. Estos datos dejan una potencia media por reactor de 917 MW_e y un consumo medio de 20.7 tU por GW_e·año producido.

La práctica totalidad del mineral de uranio empleado para la producción de combustible nuclear fue importado, siendo los principales exportadores Canadá, Australia y Nigeria (por este orden). En contraste, el 77 % del refinado fue realizado en la UE.

6.2. Tendencias tecnológicas

En el momento actual, aparecen principalmente los siguientes caminos de desarrollo tecnológico para la energía nuclear convencional:

- En primer lugar, el perfeccionamiento general de las técnicas y sistemas empleados en los reactores de GIII conducirá al desarrollo de una nueva generación de reactores, los denominados GIV. Esta tecnología, que se espera para el entorno de la década de 2030, no supone ningún cambio conceptual en el funcionamiento general de los reactores, sino un perfeccionamiento de su diseño que aumente su eficiencia y su seguridad. De esta tecnología se espera un mayor aprovechamiento del combustible nuclear (que conduciría a una menor generación de residuos para una potencia dada), mejoras en los sistemas y procedimientos de seguridad que implementen los avances y la experiencia acumulados en las últimas décadas, y que reduzcan sensiblemente los riesgos de accidente o de escapes durante la operación de la central, y por último un diseño que haga frente expresamente a los peligros de atentado y proliferación (sistemas redundantes antisabotaje, control estricto del material nuclear, instalaciones subterráneas capaces de soportar el impacto de un avión de pasajeros moderno, etc.).

  Quizá uno de los aspectos más prometedores de la GIV se halle no obstante en la termólisis: estos reactores podrían, paralelamente a sus generadores eléctricos, incorporar sistemas que aprovecharan las altas temperaturas nucleares para producir hidrógeno a partir de agua mediante un ciclo de S-I (u otros análogos) sin emitir GEI en el proceso, tal y como se verá más en detalle en el capítulo 9. De este modo se obtendría un aprovechamiento mucho mayor de la potencia térmica de los reactores, y se contribuiría a la sostenibilidad de la economía del Hidrógeno, extrayendo a través de este vector energético parte de la energía del ciclo de

producción de energía atómica, que de otra manera se perdería.

Estos sistemas serán incorporados al diseño de la GIV sólo si en el momento de su diseño y construcción, la transición energética y económica al hidrógeno se encuentra en un estadio suficientemente avanzado como para justificarlo. Además, como veremos, en un escenario en que el máximo potencial de las energías renovables no fuera suficiente para cubrir la demanda de producción de energía eléctrica, la termólisis podría ser la única fuente de hidrógeno no basada en hidrocarburos, y por lo tanto, la única vía sostenible a largo plazo (ya sea basada en centrales nucleares convencionales o de fusión) para mantener la economía del Hidrógeno.

- En segundo lugar, el ciclo de vida del combustible nuclear es todavía técnicamente muy imperfecto, dejando todavía un gran margen para el desarrollo tecnológico potencial [18]: la tecnología de reprocesado de combustible utilizado dista de ser madura y su uso no ha podido ser extendido (con la relativa excepción de Francia) debido a diversos accidentes y problemas de diseño que han revelado estos procesos como altamente peligrosos. Además, aun cuando las técnicas de reprocesado estuvieran dominadas y existiera una infraestructura sólida para llevar a cabo los procesos, el combustible que producirían no podría ser utilizado debido a que tampoco los reactores alimentados por plutonio (FBR[2]) son una tecnología disponible: efectivamente, incluso en aquellos países que han desarrollado programas de investigación al respecto (como Francia o Alemania) sus reactores FBR operan muy por debajo de su capacidad o están siendo cancelados debido a problemas técnicos, económicos o políticos.

  En un reactor FBR se utilizan neutrones rápidos, a diferencia de lo que sucede en las centrales convencionales, en las que se emplean neutrones térmicos. Estos neutrones rápidos, más energéticos, cumplen la doble misión de hacer reaccionar el plutonio y de reproducir el combustible, produciendo más plutonio (hasta 60 veces más que en un reactor convencional) a partir de isótopos uránicos no fisionables. Para ello, se debe controlar la alta temperatura de un núcleo de alta densidad sin utilizar moderadores de la actividad neutrónica, con el fin de evitar su fusión (que podría llegar a producir una explosión). De ese modo es preciso utilizar metales como líquidos refrigerantes, lo que complica extremadamente el diseño y la operación.

  A modo de ejemplo, el reactor FBR experimental francés, el Superphénix (el mayor construi-

[2]Fast Breeder Reactor.

do en el momento actual), utiliza un ciclo de Sodio para refrigerar su núcleo. Esto produjo diversos incidentes y escapes (el Sodio es extremadamente corrosivo, y reacciona explosivamente en contacto con el aire o el agua). Desde mediados de los 80 hasta 1998, cuando el gobierno francés decidió la desconexión definitiva del Superphénix, éste sólo operó durante 174 días a su potencia nominal de 1250 MW. Otras experiencias con FBR en otros países arrojan resultados similares e incluso peores, por lo que, a pesar de los 40 años de investigación, se puede afirmar que esta tecnología sigue sin estar madura.

Así pues, como objetivo técnico-científico a medio plazo, aparece el desarrollo de un ciclo completo de combustible nuclear que permita no sólo producir energía una vez los limitados recursos uránicos del planeta hayan sido agotados, sino también eliminar las crecientes cantidades de plutonio generado por la operación de los reactores actuales y que desbordan con mucho la capacidad de absorción de la industria civil en el momento actual.

Una aproximación intermedia al problema es la utilización de combustible Mixed Oxides (MOX), en el cual se introducen pequeñas cantidades de plutonio en las barras de combustible de uranio enriquecido utilizado habitualmente en las centrales convencionales, permitiendo un consumo limitado de plutonio para producción de energía eléctrica con la tecnología actual (aunque es necesario reacondicionar las plantas para emplear MOX). Este combustible se fabrica a partir del reprocesado de las barras consumidas en los reactores, extrayendo el plutonio y mezclándolo con Óxido de Uranio enriquecido del combustible normal. El MOX creado para su consumo en plantas convencionales contiene un 4-8 % de plutonio (aunque un MOX para FBR podría llegar a contener hasta un 30 %). Así, en 2000 se fabricaron en el mundo unas 350 toneladas de MOX, con un reciclado de unas 21 toneladas de plutonio procedentes de residuos reprocesados (de las 33.4 toneladas producidas en los centros de reprocesado).

El uso del MOX se propone como una manera de reducir el consumo de uranio, tratar los residuos radiactivos, consumir el plutonio producido para evitar los riesgos de proliferación e incluso como una manera de abaratar todo el ciclo. Sin embargo, como apunta la organización WISE, [19], estas afirmaciones son, cuando menos, aventuradas:

En efecto, los reactores que emplean MOX, sólo lo hacen de manera complementaria (el 70-80 % del combustible de una planta MOX sigue siendo uranio enriquecido). Incluso en el caso de una operación en la que el 100 % del combustible fuera MOX, la mayor parte de

éste seguiría siendo combustible convencional. Así pues, aunque se "queme" una pequeña cantidad de plutonio, se siguen produciendo nuevas cantidades al mismo tiempo, debido a la transmutación del Uranio, de la misma manera en que se produjo el plutonio con el que se fabricó el MOX, creando un círculo vicioso: para quemar plutonio hay que producir más plutonio. Esto se ve agravado por el hecho de que el reciclado del MOX es mucho más caro y complicado que el del uranio, siendo técnica o económicamente inviable llevarlo a cabo más de una vez. Como es lógico, esta dependencia del MOX respecto del uranio limita tremendamente su potencial como elemento de ahorro: en 2000, las mencionadas 350 toneladas de MOX supusieron sólo un 5 % del combustible utilizado en las centrales mundiales, a lo que hay que añadir que sólo un 6 % de dicho MOX estaba compuesto de plutonio.

Por otra parte, la utilización de MOX supone la justificación comercial para el reprocesado masivo de desechos, y la producción de plutonio, así como su almacenamiento, transporte y consumo. Un sistema energético basado en la llamada "Economía del Plutonio" requiere un uso mucho más deslocalizado (y por tanto difícil de controlar) de este material, facilitando su diversión a usos peligrosos o ilícitos. De no ser reutilizado el plutonio para MOX, el combustible gastado no sería reprocesado (evitando una actividad costosa y ecológicamente arriesgada), por lo que el plutonio permanecería mezclado con el uranio de baja gradación. Además, el almacenamiento a largo plazo supone la mejor opción desde el punto de vista de la proliferación, ya que en él los residuos son vitrificados en mezclas borosilicatadas (lo que complica tremendamente cualquier intento de recuperación), y almacenados en lugares fuertemente vigilados, dificultando así tremendamente su utilización con fines bélicos. Desde el punto de vista económico, si se tienen en cuenta lo costes asociados a la vigilancia y control del plutonio en una situación en la que éste sea reprocesado y utilizado a gran escala, así como el coste de todo el ciclo de producción de éste (ya que en muchos cálculos de costes de MOX, el plutonio tiende a ser considerado gratis), se hace patente que esta opción tampoco es competitiva.

- Por último, otro de los posibles caminos de desarrollo de la tecnología de fisión es la utilización de sistemas de transmutación. Estos sistemas emplean radiación de neutrones (típicamente generada mediante algún tipo de reactor nuclear) para, mediante reacciones nucleares controladas, transmutar núcleos atómicos de ciertos elementos a otros elementos. De este modo, sería posible eliminar las reservas mundiales de plutonio, transformándolo en otros actínidos sin aplicación militar (y eliminando así el riesgo de proliferación), o bien convertir actínidos con gran vida media en otros más inestables y que dejaran de ser radiactivos en un tiempo menor, reduciendo así el tiempo de almacenaje de los residuos más peligrosos y

permanentes.

Desgraciadamente, en el momento actual la tecnología de transmutación se encuentra sólo en su primera etapa de desarrollo y existen fuertes dudas acerca de su verdadero potencial: en particular, las técnicas empleadas con cierto éxito hasta ahora sólo han sido probadas con los actínidos de menor vida media, dejando sin aclarar el grado de efectividad que puedan tener con materiales más peligrosos. Por otra parte, la transmutación lleva asociada todos los riesgos y problemas genéricos del reprocesado: es necesario separar todos los componentes del combustible gastado, así como su almacenamiento, transporte, etc. (con los correspondientes problemas ecológicos y de proliferación). Finalmente, la efectividad de estos procesos se basa en la posibilidad de disponer de una fuente de neutrones de alta energía para transformar los elementos conflictivos. Prácticamente todos los sistemas ideados para ello se basan por lo tanto en tecnología FBR que, como se ha visto, tampoco está desarrollada. Además, eso significa que la transmutación de materiales requiere la producción de nuevos residuos radiactivos como resultado de la operación de la fuente de neutrones, creándose así un nuevo círculo vicioso. A todo ello habría que añadir además que el proceso de transmutación sería tremendamente costoso y complicado, convirtiéndolo en un método económicamente inviable en muchos casos, o requiriendo una tremenda inversión a fondo perdido por parte de los gobiernos responsables[3].

6.3. Ciclo del combustible

Cuando en 1953 el presidente de los Estados Unidos Eisenhower hizo su célebre discurso en la ONU "Átomos por la Paz", en el que declaraba que la energía nuclear proporcionaría a las generaciones venideras una electricidad tan abundante y barata que no valdría la pena siquiera medir su precio, estaba reflejando la idea predominante en la época de que era posible establecer un ciclo cerrado de combustible nuclear que hiciera la energía nuclear de fisión prácticamente independiente del suministro de uranio (que paradójicamente por aquel entonces se estimaba mucho menor de lo que finalmente resultó ser) y al mismo tiempo reabsorbiera todos los residuos producidos, dando lugar a una fuente de energía eterna.

Este ciclo consistía en los siguientes pasos:

[3]Mención aparte merecen los métodos de transmutación basados en la utilización de reactores de fusión como fuentes de neutrones (Ver capítulo 11) o en la utilización de haces de iones o electrones obtenidos mediante aceleradores.

En primer lugar, una flota de centrales de primera generación (principalmente de agua ligera, LWR) producirían energía a partir del uranio enriquecido, dando lugar a ciertas cantidades de plutonio en el proceso. En segundo lugar, los residuos de las centrales LWR serían reprocesados y una segunda flota de reactores serían alimentados con el plutonio sobrante (mientras que el uranio no consumido sería reprocesado y enviado de vuelta a las plantas LWR). Esta segunda flota consistiría en reactores rápidos, que además, simultáneamente a la producción de energía eléctrica, tendrían la capacidad de producir cantidades adicionales de plutonio (muy superiores a las consumidas) a partir de uranio empobrecido.

Finalmente, tras una época en la que los reactores LWR y los FBR funcionaran simultáneamente, llegaría un momento en que toda la operación quedaría a cargo de los FBR, que producirían su propio plutonio a partir de los residuos producidos anteriormente. Como la cantidad real de materia realmente "consumida" en un reactor nuclear es muy pequeña, a través de un ciclo cerrado de combustible nuclear, la producción de energía podría continuar de ese modo durante miles de años prácticamente sin necesidad de consumir ninguna materia prima.

Por desgracia la realidad demostró que las cosas no eran ni mucho menos tan sencillas: la tecnología FBR nunca llegó a ser satisfactoriamente desarrollada, por lo que el plutonio prácticamente es inútil con fines civiles, aunque su producción sigue siendo inevitable en la operación de los reactores LWR[4] (que son la mayoría de los existentes en la actualidad), lo que supone un grave riesgo de proliferación nuclear. Como consecuencia, la industria electronuclear depende directamente de los suministros de uranio para operar (convirtiéndose así en una fuente de energía no renovable). Además, pronto se hizo patente que las complicaciones y los riesgos sanitarios y medioambientales del reprocesado de residuos radiactivos (y en general, de cualquier tipo de actividad relacionada con estos materiales) habían sido claramente subestimados, por lo que hoy en día ni siquiera el reenriquecimiento del uranio a partir de combustible consumido es una actividad muy extendida.

Así pues, el ciclo de los combustibles nucleares existente en la actualidad puede ser descrito de la siguiente manera:

En primer lugar, el combustible empleado en las centrales debe ser producido a partir del mineral de uranio. Para ello debe pasar por una serie de etapas sucesivas en las cuales es sucesivamente extraído de sus depósitos naturales, triturado para separarlo de tierra y rocas, sometido a un proceso de molienda para dar lugar al llamado "Yellow Cake" (U_3O_8), que es a su vez convertido en Hexafluoruro de Uranio (UF_6) y posteriormente en Dióxido de Uranio (UO_2), ya apto para su

[4]Light Water Reactor.

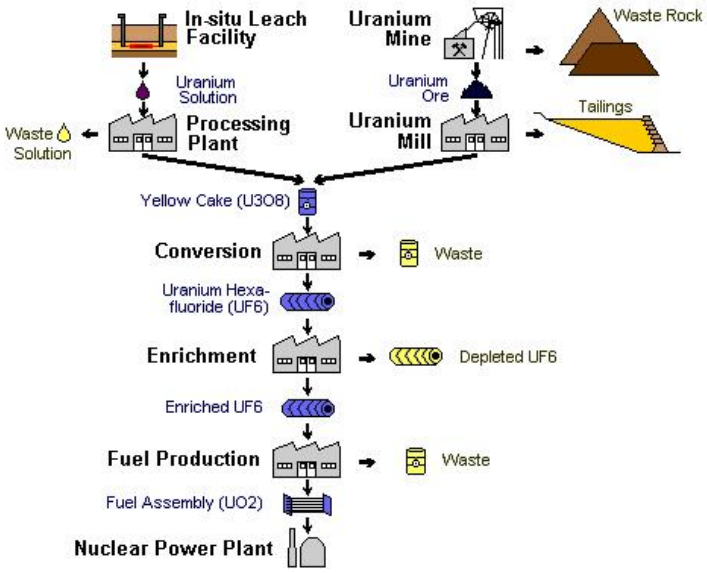


Figura 6.1: *Procesos del ciclo de extracción y enriquecimiento del uranio*

utilización en reactores. (Ver figura 6.1).

Como puede verse en las figuras 6.2 y 6.3, esta actividad genera una gran cantidad de residuos a lo largo de sus distintas etapas y supone el consumo de una importante cantidad de energía (bien eléctrica, bien procedente del consumo de hidrocarburos). No obstante, partiendo de un yacimiento mineral con una concentración de uranio suficientemente elevada, la alta generación de potencia por kg de combustible nuclear garantiza que las emisiones de CO_2 por kWh producido se mantienen todavía muy por debajo de los valores alcanzados por las fuentes de energía convencionales (aunque a medida que la riqueza del mineral desciende, esa diferencia se acorta rápidamente).

Las emisiones de CO_2 producidas para generar $1GW_e$·año son de unas 8 millones de toneladas para una central de carbón y aproximadamente la mitad para una de ciclo combinado de gas (todavía un orden de magnitud por encima de la nuclear, incluso con minerales de poca riqueza).

Los residuos producidos a lo largo de estos procesos van siendo sucesivamente más peligrosos a medida que se avanza por el ciclo (y las concentraciones de uranio son progresivamente mayores) pero en cualquier caso se mantienen dentro de la categoría de residuos de bajo nivel (LW) o, en una fracción pequeña, de nivel intermedio (ILW). Esto es debido a que no se realiza ningún tratamiento nuclear sobre los materiales, limitándose a procesos físicos o químicos que separan los isótopos aprovechables para la operación de los reactores y aumentan su concentración hasta los niveles necesarios. Así pues, estos residuos producidos a lo largo de la fabricación del combustible

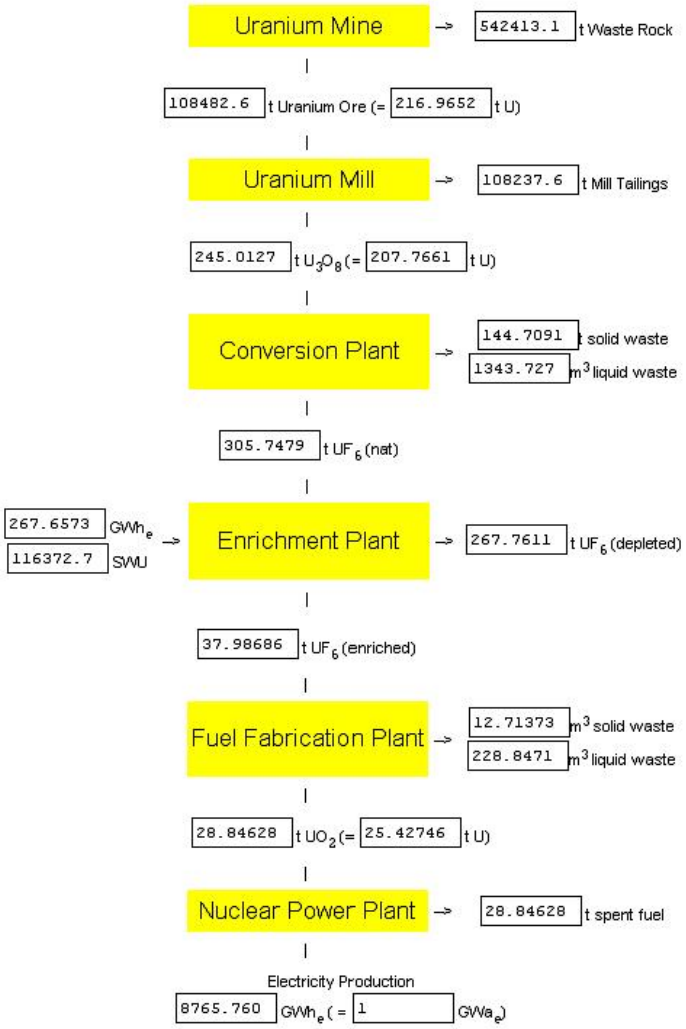


Figura 6.2: *Balances energéticos y materiales del ciclo del uranio, [20]*

a partir de uranio natural son comparables por su nivel de radiotoxidicidad a aquellos producidos por otras actividades industriales o médicas, residiendo el problema más en el volumen producido que en su peligrosidad específica (todo esto se refiere sólo a la radiotoxicidad: la toxicidad "convencional" del uranio o de los productos químicos empleados a lo largo del ciclo, como el Fluor, son los asociados al procesado de cualquier metal pesado y no deben ser desestimados).

Una vez obtenido el combustible nuclear, éste es empleado en las centrales para producir energía. Una central tipo de tecnología GIII consume unas 20-25 toneladas de combustible al año para generar 1 GW_e de potencia. Sin embargo, el aprovechamiento del combustible es muy limitado, ya que la mayor parte del uranio seguirá sin consumirse al cabo de ese tiempo. Durante

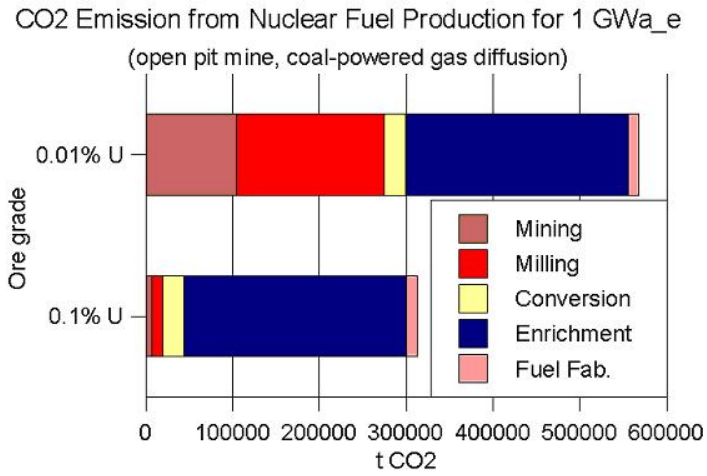


Figura 6.3: *Emisiones de CO_2 durante la producción de combustible nuclear según la riqueza del mineral*

la operación, las radiaciones neutrónicas a las que está sometido el núcleo producen la transmutación del Uranio, creando diversos elementos actínidos, incluyendo pequeñas cantidades de plutonio (aproximadamente un 1 % de las 25 toneladas) y cantidades mucho menores de diversos elementos (Americio, Curio, Fermio, etc.) de gran radiotoxicidad. Por supuesto, la disminución de la cantidad de material debida a la conversión materia-energía o a las pérdidas por radiación alfa es despreciable, por lo que se puede considerar que las 25 toneladas de combustible nuclear se convierten al cabo de un periodo de 1-2 años en la misma cantidad de residuos radiactivos de alto nivel (la operación en reactores nucleares, de producción eléctrica o de otro tipo, es la única manera de generar este tipo de residuos).

6.4. Gestión de residuos

Tras ser extraídos del núcleo del reactor, los residuos deben pasar cierto tiempo en condiciones muy controladas y sometidos a una fuerte refrigeración dado que los niveles de radiactividad de sus componentes los mantienen muy calientes. Típicamente, son mantenidos en piscinas enfriadas mediante ciclos estancos de intercambio de calor.

Una vez enfriados, los residuos de alta actividad pueden ser reciclados (del modo en que ya se ha explicado) o almacenados. Puesto que los periodos que se deben esperar hasta alcanzar niveles de radiotoxicidad suficientemente bajos como para permitir que estos materiales entren en contacto con el medio ambiente son del orden de los miles o las decenas de miles de años, se plantea el problema del almacenamiento a largo plazo.

En la actualidad, la totalidad de los residuos radiactivos almacenados se encuentran en depósitos más o menos temporales instalados frecuentemente en las propias centrales nucleares en que fueron producidos. En estos almacenes, las barras de combustible consumidas son encerradas en depósitos de acero y hormigón y mantenidas a poca profundidad o incluso directamente sobre la superficie. Sin embargo, es evidente que estas instalaciones no están preparadas para garantizar el adecuado aislamiento de los residuos durante los plazos necesarios, y su mantenimiento es caro y peligroso (tanto medioambiental como políticamente, por el riesgo de robo y proliferación).

De este modo, en el presente, la única solución a este grave problema que se considera factible es la del enterramiento geológico profundo: la instalación a gran escala de estos residuos en yacimientos geológicos de gran profundidad (del orden de los 2 km bajo la superficie) cuyas características sísmicas y químicas garanticen el confinamiento de los elementos radiactivos durante los tiempos necesarios. No obstante, aunque en teoría este sistema podría resolver el problema de los residuos de alta actividad, se encuentra en la actualidad en las primeras etapas de experimentación y no existen evidencias directas de su potencial real para contener la radiactividad durante periodos del orden del milenio (en los cuales, el nivel de degradación de materiales como el acero o el hormigón, o los procesos de circulación gaseosa a través de la corteza terrestre son desconocidos). En particular, el único centro de investigación que está probando estas tecnologías en la actualidad (y que en ningún caso servirá de almacén) es el centro de pruebas de Grimsel, en Suiza [21]. Así mismo, el Departamento de Energía de EEUU comenzó la construcción de un depósito profundo en Yucca Mountain, Nevada, pero el proyecto se encuentra bloqueado en la actualidad por motivos políticos.

El ejemplo del proyecto de Yucca Mountain, sobre la mesa desde hace casi treinta años, pero sin llegar nunca a materializarse [22], resulta particularmente interesante porque resume la principal problemática de los depósitos profundos: la dificultad para encontrar un emplazamiento y el alto coste político que suponen, debido al limitado número de formaciones geológicas adecuadas y a la gran oposición pública que suscita una tecnología a la vez tan potencialmente peligrosa y con un grado de incertidumbre tan alto acerca de su seguridad a largo plazo. De hecho, aun en el caso de que esta tecnología estuviera disponible en la actualidad y resultara suficientemente segura, resulta bastante improbable que se pudieran establecer cementerios profundos al ritmo necesario para almacenar los residuos producidos por la industria electronuclear.

La otra opción planteada por algunos sectores como solución a medio plazo para el problema de los residuos de alta actividad sería el desarrollo y utilización de tecnologías de transmutación

que permitieran reducir drásticamente la radiotoxicidad y tiempos de almacenamiento necesarios. Sin embargo, como ya se ha mencionado, esta solución dista mucho de ser perfecta, y las tecnologías necesarias están apenas comenzando a ser desarrolladas.

Por último, si bien el problema más grave que plantea la energía de fisión en materia de contaminación es el de los residuos de alta actividad, no hay que olvidar que se producen cantidades muy superiores de residuos de media y baja actividad (no sólo a causa de la operación de los reactores nucleares, sino también a lo largo de todo el ciclo electronuclear e incluso desde otros sectores de la industria, actividades biomédicas y diversos campos de investigación científica) que, si bien presentan semiperiodos y niveles de radiotoxicidad sensiblemente menores, también pueden requerir almacenamientos controlados durante cientos de años.

6.5. Reservas de uranio

La energía nuclear de fisión no es una fuente de energía renovable: se basa en la utilización de un recurso mineral relativamente escaso en la corteza terrestre, el Uranio. Puesto que el ciclo completo del combustible nuclear es tecnológicamente inalcanzable en la actualidad y los sistemas de reciclado MOX no reducen significativamente los niveles de consumo de uranio necesarios, la producción de energía electronuclear de fisión está inevitablemente limitada por los recursos disponibles de uranio.

Las reservas estimadas en la actualidad son de unos 45 millones de toneladas de uranio, suficientes para mantener los niveles de consumo actuales durante unas cinco décadas. Evidentemente, en caso de aumentar el número de centrales nucleares sustancialmente, la duración de las reservas se reducirá en consecuencia.

Por otra parte, a la necesidad de producción de mineral de uranio, hay que añadir la de una industria de refinado que transforme el mineral puro extraído de las minas en combustible útil. Esta industria se encuentra en la actualidad al borde de su capacidad y debería ser sustancialmente ampliada en caso de aumentar la utilización de la energía de fisión. Esto resulta particularmente cierto en lo relativo a las instalaciones de reciclaje y separación de residuos (en el caso probable de que se deseara aumentar la capacidad de reciclaje actual).

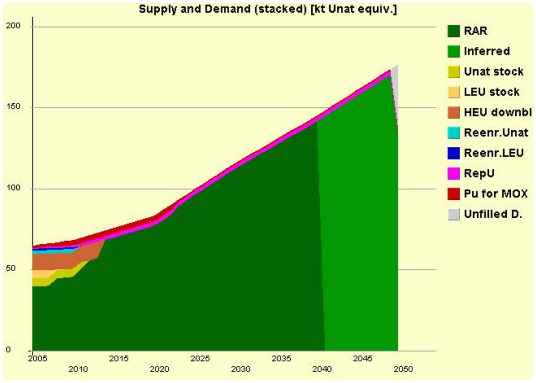


Figura 6.4: *Previsiones de reservas de uranio en escenario a cuota constante*

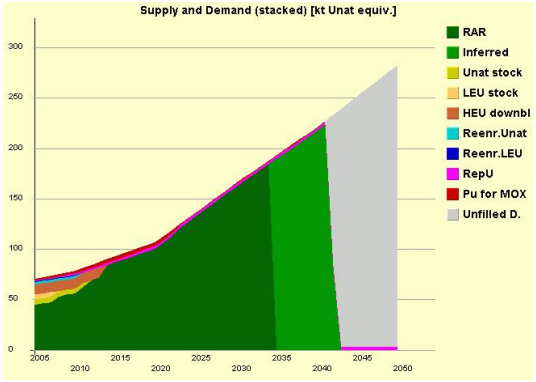


Figura 6.5: *Previsiones de reservas de uranio en escenario de consumo alto*

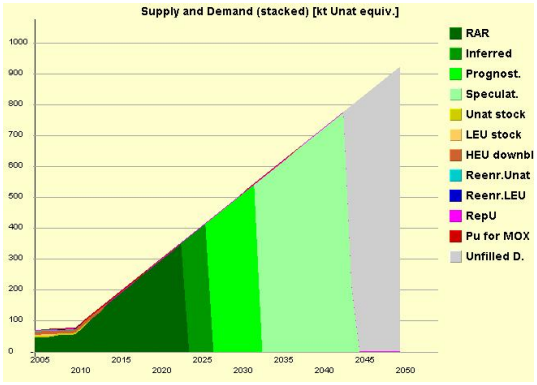


Figura 6.6: *Previsiones de reservas de uranio en escenario de sustitución de hidrocarburos*

Por último se exponen tres escenarios de consumo y demanda propuestos por la organización WISE [23]. En ellas se consideran respectivamente un escenario en el que la energía nuclear mantiene su cuota actual a nivel mundial (figura 6.4), otro considerado como de alto consumo por la IAEA (y que requeriría la construcción de una nueva central nuclear cada semana como muestra

la figura 6.5), y por último un escenario extremo en el que la energía nuclear convencional trata de sustituir completamente a los hidrocarburos y en el que se emplean todas las reservas disponibles, o hipotéticas de uranio independientemente de su coste (figura 6.6).

En cualquiera de los casos, se hace evidente que, considerando la cuestión del suministro de combustible, la energía de fisión no podrá ser una fuente de energía relevante en la segunda mitad de este siglo.

Capítulo 7

Biocombustibles

7.1. Generalidades

La necesidad de encontrar alternativas a los combustibles tradicionales derivados del petróleo va en aumento según se estrecha el margen entre la capacidad de extracción de crudo y la demanda de éste[1]. Una de las opciones orientada a abastecer el sector del transporte rodado es el desarrollo de los biocarburantes: combustibles alternativos elaborados a partir de biomasa, que poseen el aliciente de no aumentar las emisiones de CO_2 a lo largo de su ciclo de vida, ya que aquel que emiten en su combustión es el mismo que el almacenado por la sustancia orgánica de la que provienen. Por tanto se piensa que los biocarburantes pueden ser parte de la solución de dos problemas a la vez, la dependencia del petróleo y las emisiones de GEI.

La casuística de los biocombustibles es muy amplia y se pueden clasificar de diferentes maneras, atendiendo en cada caso a determinados criterios. Sin embargo, a continuación se expone la clasificación adoptada actualmente por la UE:

- A: Bioetanol
- B: Biodiésel
- C: Biogás
- D: Biometanol
- E: Biodimetileter
- F: BioETBE

[1] Se hace notar que lo crítico no es el agotamiento de un determinado recurso, sino la incapacidad de extraer de los yacimientos las cantidades exigidas por una demanda natural (no condicionada), acontecimiento que es previo –tanto más cuanto mayor es la demanda– a dicho agotamiento.

- G: BioMTBE

- H: Biocarburantes sintéticos

- I: Biohidrógeno

- J: Aceite vegetal puro

Esta clasificación merece los siguientes comentarios:

El mayor volumen de biocombustibles en la actualidad queda recogido en los tipo A y B (bioetanol y biodiésel).

El bioetanol, junto con otros como el tipo D (biometanol) provienen del alcohol obtenido durante la fermentación de plantas azucaradas (remolacha) o con almidón (trigo). Se pueden usar directamente mezclándolos con gasolina hasta una proporción del 10 % sin modificaciones en los motores actuales; a partir de esta cifra el motor requiere modificaciones para ser capaz de variar la cantidad de aire inyectado en función de la proporción de bioetanol utilizado. También, mediante un tratamiento químico con un producto petrolífero, pueden obtenerse los biocombustibles tipo F y G: el ETBE (etil-ter-butil-eter) y el MTBE (metil-ter-butil-eter), que son a su vez utilizados como aditivo de la gasolina. Una determinada mezcla da lugar a los biocarburantes denominados por E10, E85, etc. donde el número indica el porcentaje de bioetanol.

El biodiésel se obtiene introduciendo en el diésel tradicional un porcentaje de éster metílico; este porcentaje da nombre al biodiésel, pudiendo ser B2, B10, B100, etc. para concentraciones del 2 %, 10 %, 100 %, etc. respectivamente. El éster metílico proviene de tratar químicamente el aceite obtenido a partir de semillas de cultivos oleaginosos (colza, girasol, oliva, palma, soja, etc.). Dicho aceite (tipo J) también puede ser introducido directamente en pequeñas proporciones en motores diésel.

El C (biogás) se obtiene por descomposición anaerobia de residuos orgánicos, que mediante un aprovechamiento de residuos da lugar a metano, desplazando el consumo de gas natural.

Como en parte se ha comentado, los de tipo D, E, F y G no se obtienen directamente y son básicamente aditivos.

Los de tipo H forman parte de los llamados "biocarburantes de segunda generación", obtenidos a partir de lignocelulosa (restos de biomasa procedentes, por ejemplo, de la producción agrícola): los procedimientos implicados se encuentran aún en fase de desarrollo, por lo que su importancia es simbólica.

Por tanto son los biocarburantes de 1ª generación los que a día de hoy ofrecen la posibilidad de obtener sustancias capaces de sustituir (parcial o totalmente) los combustibles dedicados al transporte rodado derivados del petróleo a partir de cultivos específicos. La cuestión, por tanto, es analizar el potencial de esta vía y las consecuencias que se derivarían de su uso extendido, tanto como factor orientado a disminuir el consumo de petróleo como posible sustituto del mismo a medio-largo plazo.

7.2. Análisis

Son dos los criterios a tener en cuenta: primeramente el que se refiere al potencial, esto es, contemplar el balance energético para saber cuánto *se gana* y *a costa de qué* se obtiene esta ganancia. El segundo hace referencia al ahorro de emisiones de GEI que conlleva.

A continuación nos centraremos en el primero ya que un mal resultado en éste hace innecesario un estudio en profundidad del segundo. Sin embargo, no se dejarán de dar reseñas y comentarios al respecto del ahorro de GEI.

La siguiente tabla muestra el balance energético de los principales cultivos dedicados a la producción de biocarburantes de 1ª generación llevado a cabo en Francia en el 2003 [24]:

Cultivo	Biocombustible	Tonelada/hectárea	Tep/tonelada	Energía bruta (tep/hectárea)	Energía consumida en la producción (tep/hectárea)	Energía neta (tep/hectárea)
Colza	Biodiésel	1,37	1	1,37	0,5	0,87
Girasol	Biodiésel	1,06	1	1,06	0,29	0,77
Remolacha	Etanol	5,78	0,69	3,98	3,22	0,76
Trigo	Etanol	2,55	0,69	1,76	1,72	0,04

Figura 7.1: *Balance energético de los principales cultivos dedicados a la producción de biocarburantes*

La tercera columna indica las toneladas netas de biocombustible obtenido por hectárea de cultivo.La cuarta hace referencia a la relación entre el poder calorífico contenido en una tonelada de biocombustible y una tonelada equivalente de petróleo. La quinta es el producto de las dos anteriores. La sexta indica la energía consumida en el proceso productivo (cosecha, maquinaria agrícola, abonos, destilación, etc.) en cada caso; dado que de los cultivos dedicados a biocombustibles se obtienen otros subproductos útiles, la energía sustraída debida al proceso productivo es sólo la fracción correspondiente a la obtención del propio biocombustible.

Con todo ello obtenemos una cifra de energía neta en toneladas equivalentes de petróleo por

hectárea de cultivo para cada cultivo considerado. La primera conclusión es la siguiente: se observa que, salvo en el caso del etanol obtenido a partir de trigo, esta cifra ronda los 0.8 tep/ha. Puesto que se trata de una media de los cultivos más utilizados (y por tanto los que se consideran mejores para tal fin), puede tomarse esta cifra como representativa.

Pero este número en sí no permite sacar conclusiones más allá de la anterior; es preciso aplicarlo en su ámbito para ver el orden de magnitud de las repercusiones que tendría su uso, que es en este caso la sustitución de productos derivados del petróleo en el sector transportes. En el año 2004 la demanda de productos petrolíferos para dicho sector (supone alrededor del 50 % del empleo de petróleo) ascendió a 1245 Mtep para la OCDE [25], del cual la OCDE europea es responsable de un tercio, esto es, de 415 millones de tep.

Por otro lado en 1994 la superficie europea dedicada al cultivo era de 204 millones de hectáreas, aunque el potencial (contando la superficie que es susceptible de ser cultivada pero que aún no se le ha dado ese uso) asciende a 324 millones [26].

Si se supone, a fin de hacer un cálculo aproximado, por un lado que el número de millones de hectáreas cultivadas en Europa no ha aumentado apreciablemente en 10 años, y por otro se toma un valor optimista de energía neta obtenida del cultivo de biocombustibles de 1 tep/ha (lo que se conseguiría tal vez mediante una mejora notable del rendimiento de todos los procesos implicados en la producción), se observa que, dedicando todas las tierras cultivables de Europa a la producción de biocombustibles[2], se cubriría apenas el 50 % de la demanda energética responsable del transporte, cifra que asciende al 78 % si además se cultivan todos los terrenos potencialmente susceptibles de ser utilizados para la agricultura que aún no lo están.

Sin embargo Europa no tiene por qué ser autosuficiente en este sentido, por lo que puede plantearse el problema en términos globales donde fuese posible la importación de biocombustibles desde zonas del globo con mayores superficies arables y menor demanda de energía. Nuevamente, la demanda mundial de productos derivados del petróleo dedicados al sector transporte fue en 2004 de 1900 millones de tep [25]. Las tierras del globo dedicadas al cultivo rondan los 1500 millones de hectáreas, cuyo potencial total eleva la cifra a 3800 millones de hectáreas [26].

Podría pensarse en la influencia positiva de cultivar en zonas de climatología y suelos más favorables para la agricultura, y que por tanto es posible obtener rendimientos mayores en cuanto a la energía neta por hectárea dedicada al cultivo; pero lo cierto es que la energía consumida en las exportaciones de biocombustible también aumentaría considerablemente, por lo que manteniendo la cifra, aún optimista, de 1 tep/ha, se tiene que el empleo de todas las tierras cultivables del

[2]Y por tanto ninguna a cultivos alimenticios, si es que esto es posible; se están ignorando además los serios problemas ambientales relacionados con los recursos hídricos, la erosión de suelos, etc.

globo en la obtención de biocombustibles (y aquí no hay duda sobre la inviabilidad de no cultivar alimentos), no se llegaría a cubrir el 80 % de la demanda energética del sector transportes. Sólo llevando al extremo el potencial agrícola de la Tierra, esto es, cultivando todas y cada una de las hectáreas cultivables, sí se lograría una cobertura del 100 % de la demanda *actual* del sector transportes sin disminuir la superficie dedicada a cultivos alimenticios.

Es importante añadir dos comentarios:

- Se ha remarcado la palabra *actual* porque esta demanda ha tendido siempre a crecer.

- Conviene no olvidar que únicamente se ha conseguido suplir una porción de la demanda de petróleo (la del sector transportes).

La conclusión de este análisis es contundente: los biocombustibles, por sí mismos, no tienen el potencial de abastecer la demanda de petróleo requerida a día de hoy por el sector transportes.

Se puede discutir sin embargo sobre los beneficios de una incorporación parcial de los biocombustibles, esto es, no orientada a la sustitución a largo plazo del petróleo sino exclusivamente a una disminución de su consumo, permitiendo reducir las emisiones de GEI debidas a él. Suponiendo el objetivo planteado en la por la Unión Europea [27] que supone un abastecimiento del 10 % del sector transportes en Europa (lo que a su vez supone un desplazamiento del 5 % del consumo europeo de petróleo), es preciso emplear más del 20 % de las superficies de cultivo actuales. Y es que, en cualquier caso, para tener un efecto apreciable de desplazamiento de petróleo por biocombustibles, la producción de estos últimos debe ser del mismo orden de magnitud, lo que conlleva, dado el bajo rendimiento energético del que adolecen los biocarburantes, el uso de grandes extensiones de tierras de cultivo. Otra alternativa es la importación de materia prima, lo que convierte el planteamiento en dependiente del exterior, y por tanto no válido para considerar este modelo exportable, una de las premisas del informe.

Por otro lado, hay consideraciones que hasta ahora no se han hecho y que merecen ser tenidas en cuenta:

- La producción actual de biocarburantes en Europa durante el 2004 fue de 0.49 y 1.9 millones de toneladas de bioetanol y biodiésel respectivamente (unos 2.2 millones de tep) [27], cantidad despreciable frente a la demanda.

- El aumento del volumen de producción de biocombustibles puede acarrear dos consecuencias:

· Un aumento significativo de superficie de cultivo: la sustitución de suelo forestal por suelo agrícola disminuye su capacidad de retención de carbono entre 5 y 10 veces [29], disminuyendo la eficacia de los pozos naturales de carbono terrestres. En consecuencia, este cambio de uso de suelos llevaría consigo la liberación de carbono a la atmósfera en forma de CO_2, atenuando la supuesta ventaja que los biocarburantes presentaban en la lucha contra el Cambio Climático.

· La sustitución significativa de cultivos alimenticios por cultivos de materia prima para biocombustibles derivada de someter el uso del suelo agrícola a una concurrencia de mercado con una demanda de cultivos para biocombustibles creciente puede llegar a suponer un aumento del precio de los productos agrícolas alimenticios, con repercusiones no tanto en la Unión Europea como en los países en vías de desarrollo con economías más débiles, pudiendo llegar a perjudicar la soberanía alimentaria de sus habitantes.

Se quiere remarcar que algunos de los argumentos utilizados en favor de los biocombustibles[28], en especial aquellos que hacen referencia al ahorro de emisiones de GEI, la ausencia de impacto ambiental significativo y la ausencia de impacto en los precios de los productos agrícolas alimenticios, son sólo válidos para un volumen de producción limitado.

- En cuanto al segundo criterio mencionado al principio (las emisiones de GEI), si bien es cierto que el ciclo de vida de los biocombustibles no aporta CO_2 a la atmósfera, es preciso tener el cuenta las emisiones que se producen en su proceso productivo: CO_2, CH_4, NO_2 por el uso de maquinaria agrícola, fertilizantes, etc., a parte de las mencionadas que se derivan de la sustitución del uso del suelos. Esto hace necesario establecer unos "rendimientos" basados en un análisis de sus emisiones teniendo en cuenta el ciclo de vida completo (incluyendo todos los factores mencionados) para determinar las reducciones potenciales en emisiones de GEI derivadas de la sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles.

- Incluso sin cambio de uso de suelo, hay que recordar que el empleo agrícola de la tierra (en especial dadas las técnicas modernas de agricultura intensiva) tiene siempre asociado un impacto ecológico sobre el entorno (erosión y empobrecimiento del suelo, uso de herbicidas e insecticidas, impacto sobre los recursos hídricos, etc.). Esto significa que el suelo agrícola debe considerarse como un recurso que debe ser gestionado responsablemente.

7.3. Conclusiones

El caso de Europa resulta algo excepcional debido a la existencia de grandes extensiones de tierras cultivables actualmente desaprovechadas y susceptibles de ser cultivadas sin necesidad de

producir un cambio de suelo. De este modo, y siempre haciendo un uso responsable del suelo (que evitara las consecuencias negativas antes mencionadas), se podría plantear la posibilidad de alcanzar niveles moderados pero significativos de utilización de biocombustibles que permitan reducir las emisiones de GEI. Este uso de biocombustibles no debería sin embargo obstaculizar la transferencia de la parte del modelo energético basado en combustibles fósiles a otras fuentes de energía, y debería verse a corto plazo como un intento de reducir las emisiones prodecentes del uso de energías convencionales y a largo plazo, teniendo en cuenta el próximo agotamiento de los recursos fósiles, como medio de abastecimiento de aquellas necesidades que no hayan transferidas a otras fuentes.

Como conclusión, desde *El Observatorio* no consideramos una buena opción fomentar el desarrollo a gran escala de los biocombustibles como medida eficaz en la lucha contra el Cambio Climático. Sin embargo, dada la peculiar situación de Europa, consideramos también que la producción de un volumen de biocombustibles lo bastante reducido como para mantenerse dentro de los límites de lo sostenible (incluyendo todas las externalidades asociadas) podría ser aceptable.

Capítulo 8

Eficiencia

8.1. Introducción

El término *eficiencia en el consumo* (más conocido por su acepción en inglés "end use efficiency") se refiere a la utilización de una menor cantidad de energía para realizar el mismo trabajo o función por parte de cualquier persona o máquina. Este concepto engloba casos tan dispares como la reducción de la energía consumida por un televisor en *stand-by* o la reducción en el consumo de combustible de un vehículo gracias a una conducción más suave.

El potencial de la eficiencia en el consumo en Europa es reconocido por muy diversas instituciones y grupos: la Comisión Europea[30], expertos europeos[31, 32] o incluso Greenpeace[10]. De hecho hoy en día es posiblemente una de las claves en la lucha contra el Cambio Climático. La Comisión Europea ha establecido como objetivo a largo plazo alcanzar una reducción del 20 % en la energía consumida con respecto al escenario normal simplemente por la aplicación de medidas que tienden a incrementar la eficiencia en el consumo y que son rentables desde el punto de vista económico. Es más, varios grupos de expertos[31, 32] aconsejan que ese objetivo debería extenderse a muy largo plazo hasta el 50 % para el año 2050. Una cifra similar propone Greenpeace en un estudio reciente [10].

A continuación se presentan las principales medidas que se pueden adoptar a diferentes escalas para la consecución de los objetivos anteriormente descritos. Estas medidas se separan en 4 de los sectores principales consumidores de energía: residencial, terciario, transportes e industria.

8.2. Sector residencial

Este es posiblemente el sector con más potencial en lo que se refiere a eficiencia en el consumo. Expertos europeos estiman que entre un 60 % y un 90 % de mejora en la eficiencia en el consumo se puede llegar a conseguir en los edificios de nueva construcción. Además, en las casas

ya construidas existe un potencial también muy importante que es estimado entre un 30 % y un 50 % por Greenpeace[10].

En lo que se refiere al consumo eléctrico los principales consumidores de energía en la UE son los frigoríficos, congeladores, lavadoras y lámparas. De ahí se entiende que se puedan lograr importantes reducciones en el consumo de energía mediante la introducción de nuevas tecnologías. De hecho estas tecnologías ya se encuentran disponibles en el mercado pero la larga vida útil de estos aparatos hace que el proceso de sustitución de los mismos sea bastante lento.

A continuación se presentan las medidas más importantes que se pueden introducir en este sector para reducir el consumo en el sector residencial.

8.2.1. Aislamiento

Se estima que una reducción del 20 % en el consumo eléctrico debido a equipos de calefacción o aire acondicionado de una casa media puede conseguirse mediante el sellado de fugas de calor o frío, la introducción de ventanas con mejores aislamientos, etc. Reducciones mucho mayores pueden conseguirse en casas de nueva construcción mediante el uso de nuevas técnicas y materiales de construcción cuyas cualidades como aislantes son muchos mejores que los usados hoy en día.

8.2.2. Aire acondicionado

En los países del sur de Europa los aparatos de aire acondicionado suponen una parte importante del consumo eléctrico durante los meses de verano. De hecho, en estos países el máximo anual de consumo de electricidad se da en estos meses precisamente debido a la utilización masiva de estos aparatos. Sin embargo el grado de penetración de estos equipos en el sector residencial es todavía bajo, en torno al 20 % en países como Italia y España y del 4 % en la Unión Europea. Por ello el potencial de crecimiento del uso de estos aparatos es elevado y conviene promover que desde el principio se utilicen aparatos de bajo consumo.

La eficiencia de estos aparatos se suele medir con el índice EER (Energy Efficiency Ratio). En 2000 los valores mínimo y máximo de los equipos disponibles en el mercado eran de 2 y 4 respectivamente[31]. La evolución tecnológica ha permitido que el valor máximo sea de 5.5 en 2006 mientras que el mínimo no ha aumentado considerablemente[31]. Una manera muy común de clasificar a estos aparatos consiste en darles una etiqueta (A, B, C, D, etc.) en función del índice EER del aparato. En el caso de los aparatos de aire acondicionado la clase A, la más alta, comienza a partir de un índice EER de 3.2.

8.2.3. Electrodomésticos

Los principales electrodomésticos en los hogares europeos son frigoríficos, lavadoras, lavavajillas y secadoras. El grado de penetración de los mismos varía de un tipo de electrodoméstico a otro siendo de casi 100 % para los frigoríficos, 80 % para las lavadoras y mucho menor para lavavajillas y secadoras. Puesto que la vida media útil de estos electrodomésticos es mayor de 10 o incluso en ocasiones de 20 años es complicado establecer estadísticas acerca del tipo medio presente en las casas. Por ello normalmente se analiza el tipo y consumo de los electrodomésticos vendidos en año y en base a ese dato se analiza la influencia de las distintas políticas llevadas a cabo. El valor resultante de dicho análisis es el llamado EEI (Energy Efficiency Index) definido como el cociente entre el consumo medio ponderado de los electrodomésticos vendidos en un año de un cierto tipo (lavadoras, frigoríficos, etc.) y un consumo de referencia establecido para ese determinado tipo de electrodoméstico. Este índice permite conocer la evolución del consumo medio de los electrodomésticos vendidos a lo largo del tiempo y así conocer cómo evoluciona el proceso de sustitución de los electrodomésticos más antiguos y menos eficientes.

En el caso de los frigoríficos desde 1992 hasta 2005 se ha conseguido una mejora del 40 % en el índice EEI, mientras que para el caso de las lavadoras este incremento ha sido ligeramente superior al 25 %[31]. Mejoras similares se han conseguido para otros tipos de electrodomésticos. Debemos notar que estas mejoras representan solo un valor medio de los electrodomésticos vendidos y por ello no representan el máximo potencial que se puede conseguir con la tecnología actual.

8.2.4. Iluminación

Las nuevas bombillas CFL ("Compact Fluorescent Lamp") permiten ahorrar más de un 60 % de energía con respecto a las tradicionales bombillas incandescentes[36] y tienen la ventaja añadida de ser entre 10 y 12 veces más duraderas. El alto coste inicial de las bombillas CFL provocó un cierto rechazo por parte de los consumidores pero hoy en día el precio se ha reducido enormemente provocando que esta nueva tecnología sea mucho más competitiva que la solución tradicional. El único incoveniente que tiene actualmente la tecnología CFL es la de dar una intensidad de luz menor por lo que los usuarios en ocasiones vuelven a las bombillas tradicionales. Este hecho se ha conseguido revertir recientemente mediante campañas de información y de apoyo al uso de CFL's. Por otro lado, según la referencia [31] la mayor parte de países de la UE-25 están muy por debajo del 15 % en grado de penetración de las CLF's mientras que se estima que el grado de penetración máximo que se puede alcanzar de una manera rentable es del 25 %. Por tanto se deduce que todavía hay un amplio margen para la reducción del consumo eléctrico causado por la iluminación.

8.2.5. Electrónica

Este es uno de los sectores de mayor crecimiento en la actualidad debido a la aparición de nuevos aparatos continuamente (DVD, LCD, MP3, TDT, teléfonos móviles, etc.). Uno de los principales problemas de todos estos equipos es el consumo en modo de stand-by. Cabe señalar que la política de la Unión Europea en este sentido es la de favorecer la creación de acuerdos voluntarios por parte de las empresas para la reducción del consumo en este modo.

Una cantidad importante de los aparatos que hoy en día se encuentran en las casas disponen del llamado modo en *stand-by*. En este estado, a pesar de que el aparato no realiza la función para la que fue concebido, éste puede llegar a consumir entre un 5 % y un 10 % de la energía en funcionamiento normal. A pesar de que la potencia consumida debido a esto es relativamente baja, se hace uso de ella sin interrupciones. De ahí se entiende que se estime[35] que entre un 5 % y un 10 % del consumo eléctrico total de una vivienda se deba precisamente a este tipo de consumo. Actualmente existen tecnologías que permiten reducirlo de forma importante, pero, por un lado, la industria es reacia a introducir dichas tecnologías (aunque existe ciertos programas de adhesión voluntaria promovidos por la Unión Europea), y por otro, la progresiva sustitución de todos los equipos puede llevar un tiempo de entre 10 y 15 años.

8.3. Sector terciario

En el sector terciario el mayor consumo de energía se debe a la iluminación, al aire acondicionado y calefacción y a los equipos de oficina (ordenadores y monitores fundamentalmente). Mediante el empleo de nuevas tecnologías (fluorescentes, equipos, aislamientos, etc.) y hábitos es posible reducir el consumo de este tipo de los edificios de oficinas de forma considerable. Así un edificio antiguo tendría un consumo total anual de energía primaria de casi 600 kWh/m^2 frente a los 400 kWh/m^2 que se consiguen en uno de nueva construcción y a los 100 kWh/m^2 de un edificio en el que se empleasen las mejores técnicas disponibles en la actualidad[31].

Cabe destacar el caso de la iluminación. Este es con diferencia el mayor consumidor de electricidad en el sector terciario suponiendo aproximadamente un 26 % del total. Hoy en día el tipo de fluorescente normalmente utilizado es el T12, pero existen modelos más avanzados (T8 y T5) con unos consumos menores. Como ejemplo se pueden mencionar reducciones superiores al 25 % para el T8 respecto al T12 mediante una sustitución directa de los fluorescentes o incluso del 40 % si se utilizan soportes más modernos. Mejores eficiencias se pueden conseguir con el fluorescente T5, pero en este caso es necesario sustituir también el soporte completo.

Sin embargo, hay también otros factores a tener en cuenta que pueden reducir el consumo de forma considerable. Dos ejemplos típicos serían la instalación de sensores de ocupación para apagar las fluorescentes en caso de que no haya nadie en la zona o la instalación de sensores de

luz natural que regulen la intensidad de luz suministrada por los fluorescentes en función de la cantidad de luz natural que llega al espacio en cuestión.

Todas estas medidas de forma conjunta permiten obtener resultados interesantes. Si en un edificio de oficinas medio se puede llegar a consumir anualmente 27.5 kWh/m^2, en edificios construidos siguiendo las recomendaciones del programa 'GreenLight' de la UE se consiguen consumos anuales de 19 kWh/m^2.

8.4. Sector transportes

En el sector transportes, aparte de la introducción en una primera fase de motores híbridos y motores diesel avanzados y en una segunda fase de los motores de hidrógeno, existen multitud de medidas que se pueden tomar para reducir el consumo de los vehículos. Estas medidas van desde modificar los hábitos de conducción de las personas hasta una mejor gestión del tráfico a todos los niveles. A continuación se presentan algunas de las medidas más interesantes desde este punto de vista aunque la lista no es ni mucho menos exhaustiva.

8.4.1. Optimización del tráfico

Una manera muy eficiente de minimizar el consumo de combustible es reducir el nivel de congestión de las distintas vías de transporte. A este respecto el futuro sistema europeo de navegación por satélite, Galileo, jugará un papel fundamental a la hora de facilitar la gestión y optimización del tráfico.

8.4.2. Transporte por carretera

Existen diversas maneras de reducir el consumo de combustible de una forma rentable desde el punto de vista económico:

- Límites en consumo de combustible: la Comisión Europea mantiene continuo contacto con los fabricantes de automóviles con objeto de favorecer la adhesión a programas voluntarios de reducción de emisiones de GEI. Como ejemplo cabe señalar el reciente acuerdo entre BMW y Mercedes para la fabricación de vehículos pequeños de muy bajo consumo en contraposición con la tendencia actual de los consumidores hacia vehículos cada vez de mayor tamaño. Este acuerdo parece ser debido a la decisión firme de la Unión Europea de incrementar los impuestos a los vehículos que más contaminen y primar aquellos cuyas emisiones sean menores como por ejemplo los vehículos híbridos.

- Conducción ecológica: la forma de conducción afecta de una forma sustancial el consumo de un vehículo. Así, una conducción agresiva con fuertes aceleraciones y frenadas conlleva

un consumo mayor de lo necesario. La Agencia Internacional de la Energía estimó en 2005 que un conductor medio podía llegar a ahorrar 100 euros al año mediante una conducción más ecológica y al mismo tiempo reducir las emisiones de GEI. Con la subida actual del precio del petróleo este ahorro puede ser aún superior.

- Ruedas: éste es un ejemplo típico de cómo simplemente una utilización más adecuada de los recursos disponibles puede permitir mejoras no despreciables en la eficiencia en el consumo. Así se estima que un 5 % de energía del 20 % que se pierde por la fricción de las ruedas con el asfalto puede llegar a evitarse simplemente manteniendo una presión adecuada del neumático. Ello se debe a que más del 50 % de los conductores circulan con al menos una rueda a una presión inadecuada lo que supone un consumo adicional del 5 %.

- Sistemas de pago por uso: cada vez más ciudades están optando por sistemas que obliguen a pagar a los usuarios que contaminan de forma innecesaria. De esta forma se consigue modificar la conducta de los conductores reduciendo el uso excesivo de los vehículos. Se pueden llegar a alcanzar descensos de hasta el 20 % en las emisiones de GEI como en el caso de la ciudad de Londres.

- Transporte público: otra medida para aumentar la eficiencia en los transportes es la de favorecer el transporte público de una forma más intensa. A menor escala también se puede favorecer el compartir vehículos para ir a trabajar. Hoy en día existen diversas páginas web que ponen en contacto a personas que no se conocen entre sí pero que comparten una ruta diaria similar.

8.4.3. Aviación comercial

En el ámbito de la aviación comercial existe el proyecto conocido como "Cielo Único Europeo" que pretende optimizar la gestión del tráfico aéreo en Europa controlándolo de una forma única y global. Como consecuencia de esta optimización se estima que se puede obtener una disminución en el consumo de combustible de entre el 6 % y el 12 % por la reducción de la congestión de los aeropuertos y por el uso de rutas más eficientes.

8.4.4. Otros medios de transporte

El uso de otros medios de transporte más eficientes y que dependan en menor medida de los combustibles fósiles es uno de los objetivos actuales de la Unión Europea. Así se entiende que se tienda a favorecer el transporte por ferrocarril, por mar y por ríos.

8.5. Sector industria

En el sector de la industria las cosas son bastante diferentes a los sectores analizados hasta ahora. Por lo general, la propia industria tiende a la utilización de las tecnologías más eficientes disponibles por meros criterios económicos. Sin embargo, existe el problema de la lenta entrada en la industria de las mejores tecnologías por lo que en ocasiones es necesario el uso de distintos incentivos por parte de los gobiernos.

El caso más importante dentro de la industria lo constituyen los motores eléctricos (compresores, bombas, ventiladores, cintas transportadoras, etc.) causantes de casi el 70 % del consumo eléctrico del sector industrial en Europa[37]. En este sector se pueden alcanzar importantes reducciones en el consumo mediante medidas rentables económicamente: apagado del sistema cuando no está en uso, operaciones de mantenimiento frecuentes, reducción de desechos, etc.

Capítulo 9

La economía del Hidrógeno

9.1. Introducción

El hidrógeno viene siendo mencionado desde hace tiempo como medio para almacenar y administrar energía, en definitiva, como combustible alternativo a los derivados del petróleo. Su aprovechamiento mediante pilas de combustible sería capaz de proporcionar energía a multitud de sectores, tales como el transporte o la industria. Además, podría servir de medio de almacenamiento para las redes de generación y transporte de energía eléctrica, puesto que los excedentes se almacenarían en ellas para su posterior uso en horas punta.

Es importante, por consiguiente, destacar que el hidrógeno no representa en sí mismo una fuente de energía, sino un medio de almacenamiento a largo plazo de energía. El hidrógeno almacenado puede ser empleado en máquinas que lo procesen para producir la energía que necesiten.

La importancia del hidrógeno se basa en que es uno de los materiales que mayor poder calorífico posee, mayor incluso que el de los combustibles convencionales. Esto se puede ver en la tabla 9.1:

Propiedad	**H_2**	**Metano**	**Propano**	**Gasolina**
Poder Calorifico Inferior (MJ/Kg)	120	50	46.3	44.5
Densidad (kg/m^3)	0.0899	0.72	1.87	0.73 (kg/L)
Poder Calorifico Inferior (MJ/m^3)	10.79	35.9	86.54	31.67 (MJ/L)

Tabla 9.1: *Comparativa de las propiedades energéticas de combustibles*

La relevancia energética del hidrógeno radica en la siguiente ecuación:

$$H_2 + O_2 \rightarrow Electricidad + H_2O \tag{9.1}$$

Como se puede observar, el uso de Hidrógeno combinado con Oxígeno, en un procedimiento denominado electrólisis, produce electricidad y agua. Este es un proceso de obtención de energía

eléctrica totalmente limpio que no produce ningún tipo de GEI[1]. Sin embargo, esta es una afirmación engañosa, puesto que, si bien el oxígeno se puede obtener sin problemas del aire atmosférico en cantidades ingentes, el hidrógeno libre no se encuentra sino en pequeñísimas proporciones en la atmósfera. Es decir, es necesario obtenerlo mediante un proceso industrial. Estos procesos son precisamente los que se analizarán en este capítulo, estudiando sus pros y sus contras y, sobre todo, la incidencia medioambiental de cada uno de ellos.

Actualmente se produce hidrógeno por medios principalmente basados en la utilización de hidrocarburos, y sus aplicaciones son, en una gran medida, para la industria química. Sin embargo, la producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos presenta el inconveniente de que produce GEI, principalmente CO_2, pero también compuestos peligrosos como los óxidos de nitrógeno, los NO_X.

La visión de la llamada *economía del* H_2 se basa en la expectativa de que pueda producirse a partir de recursos medioambientalmente aceptables y económicos y en que las tecnologías de uso final del hidrógeno ganen una cuota de mercado significativa, sustituyendo paulatinamente al petróleo. En la medida que se alcancen estas expectativas, una economía del Hidrógeno proporcionaría al planeta una mayor seguridad energética y una mayor calidad medioambiental. No obstante, parece casi inmediato pensar que alcanzar este objetivo requiere superar muchos desafíos técnicos, sociales y políticos, siendo quizás los últimos de más difícil solución que el primero.

Las dos motivaciones principales que deberían conducir las políticas actuales energéticas y medioambientales son la reducción de las emisiones de CO_2 y asegurar el abastecimiento energético. En este contexto se sitúa la utilización del hidrógeno como nuevo portador de energía.

En cuanto a la reducción de emisiones de CO_2 , si el tipo de generación de energía es centralizada, la economía de escala de las instalaciones tan solo favorecería, en el mejor de los casos, la incorporación de técnicas para limitar emisiones (usos limpios, filtrado de gases, captura de CO_2, etc.). Sin embargo, en generación distribuida y móvil (por ejemplo, en vehículos), el tamaño de los dispositivos de generación y la falta de espacio disponible, actúan en contra de la aplicación de dichas técnicas. En estos casos, las soluciones vienen de la utilización de otros portadores de energía menos contaminantes. El hidrógeno y la electricidad pueden convertirse en dos portadores de energía complementarios e intercambiables que, en función del tipo de demanda energética y del lugar de suministro final de la energía, pueden ofrecer menores o nulas emisiones de contaminantes (en el supuesto de disponer de hidrógeno y electricidad renovables).

La complementariedad del hidrógeno y la electricidad se basa en la existencia de los electrolizadores, que consumiendo agua y electricidad producen hidrógeno y oxígeno, y de las pilas de combustible, que a partir de hidrógeno y el oxígeno del aire, producen electricidad y agua. De esta

[1]De los considerados antropogénicos: la concentración atmosférica de vapor de agua no se vería afectada por el uso de esta tecnología.

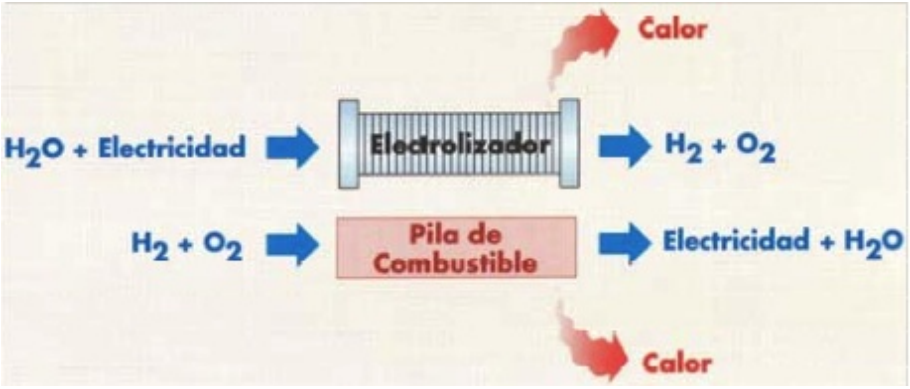


Figura 9.1: *Producción de H_2 mediante electrólisis y almacenamiento en pilas de combustible, según [38]*

manera, idealmente, el ciclo quedaría cerrado. Esto viene detallado en la figura 9.1.

En lo referente a asegurar el abastecimiento energético, es indudable la importancia de reducir la dependencia de fuentes de energía poco seguras. El Hidrógeno, como portador de energía que puede ser producido a partir de diferentes recursos, puede disminuir el grado de dependencia de los combustibles fósiles contribuyendo a destensar el equilibrio geopolítico-energético, haciendo uso de recursos autóctonos o, en cualquier caso, recursos que se presentan en la naturaleza con una distribución mundial más equilibrada.

Sin embargo, la realidad hoy en día es que más del 90 % de la producción de hidrógeno proviene actualmente de combustibles fósiles, y más concretamente, hidrocarburos. Por consiguiente, se impone una fuerte actividad de investigación e innovación para el desarrollo de tecnologías no contaminantes de producción de hidrógeno.

9.2. Tecnologías de producción de hidrógeno

Las tecnologías existentes y futuras de producción de hidrógeno se pueden clasificar atendiendo a la fuente de dicha producción, tal y como se define en [39]:

- Producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles y biomasa
- Producción de hidrógeno a partir de calor nuclear y fuentes alternativas de energía

9.2.1. Tecnologías de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles y biomasa

El hidrógeno puede proceder desde la propia fuente de combustible fósil, o bien puede ser separado del agua utilizando energía almacenada en dicho combustible.

Como los combustibles fósiles están basados en el carbono, mediante todas las tecnologías que se describen se produce CO_2. Sin embargo, al ser éstas las tecnologías más antiguas, tienden a ser las más baratas y también las más eficientes energéticamente, dado el estado de desarrollo de las mismas. Por tanto, la utilización de estas tecnologías contribuye precisamente a empeorar los problemas que la economía del hidrógeno intenta subsanar: emisiones y utilización de fuentes no renovables. Por esta razón, se hablará de ellas citando solamente sus correspondientes eficiencias y precios por unidad de energía producida y por unidad de masa de hidrógeno generada.

Reformado de vapor de metano (SMR)

Es un proceso en tres pasos:

- Reformado catalítico del metano a altas temperaturas y presiones (reacción endotérmica). Produce gas sintético (mezcla de H_2, CO y CO_2).
- Conversión del gas sintético en H_2 (reacción ligeramente exotérmica).
- Purificación.

El SMR sin captura de CO_2 es actualmente la técnica de producción de hidrógeno más barata, dada su alta eficiencia y el bajo coste de suministro del gas metano. Los datos económicos[2] vienen detallados en la tabla 9.2 .

Eficiencia	**$/MMBtu**	**$/kg**
83 %	5.54	0.75

Tabla 9.2: *Producción de hidrógeno a partir del método SMR, según [39]*

El método SMR es, a día de hoy, altamente eficiente, económicamente favorable y altamente probado. Además, existe infraestructura ampliamente desarrollada para la obtención del gas natural (metano), así como sistemas de distribución (gasoductos). En principio, el SMR parece apto para su distribución a gran escala y su producción centralizada.

No obstante, son muy importantes y numerosos los inconvenientes:

- En primer lugar, esta tecnología se basa en el uso de un recurso limitado, como es el gas natural, cuyas reservas se prevén que se agoten poco después que las del petróleo. Según las estimaciones proporcionadas en *2004 BP Statistical Review of World Energy*, las reservas durarán, a 2008, unos 63 años.
- En segudo lugar, este método produce CO_2, con lo que si se pretende que no se liberen gases de GEI a la atmósfera, será necesario al menos contar con tecnologías de captura y

[2] Asumiendo precio del metano a 3.15$/MMBtu.

secuestro de dicho gas. Esto aumentaría drásticamente los costes de desarrollo y despliegue, además de suponer en sí mismo un riesgo medioambiental altísimo, tal y como se describe en el capítulo 10, dedicado a la captura de CO_2.

- En tercer lugar, las tensiones geoestratégicas que se derivarían del empleo masivo de esta técnica como sustitutiva del uso del petróleo, no mejorarían sustancialmente con respecto a dicho recurso. Los principales países productores son: Rusia (26.7 %), Irán (15.2 %) y Qatar (14.7 %). Las reservas europeas son meramente testimoniales y no son operacionalmente rentables y las de Estados Unidos no llegan al 3 % mundial.

Por todas estas razones, desde *El Observatorio*, vemos la tecnología SMR como meramente transicional, y aplicable a muy pequeña escala. Es necesario, por tanto, un importante esfuerzo de investigación en técnicas más respetuosas con el medioambiente y que permitan una producción distribuida para facilitar una verdadera economía de escala.

Oxidación parcial/reformado autotérmico de metano (RATM)

Se trata de dos métodos alternativos a la SMR. La Oxidación Parcial oxida el metano en una reacción de un solo paso, mientras que el Reformado Autotérmico de Metano combina la oxidación parcial y la rección de reformado, reaccionando catalíticamente el metano con una mezcla de vapor y oxígeno (a diferencia de SMR, que trata el metano con vapor únicamente).

El proceso de oxidación parcial requiere un control preciso del mismo y el diseño de reactores especiales que faciliten intercambio de calor o disolución de los reactivos para prevenir escapes térmicos o posibles explosiones, dado que se trata de un proceso fuertemente exotérmico. Suele ser necesario instalara una planta de suministro de oxígeno puro, puesto que de usar aire atmosférico, se producirían óxidos de nitrógeno (NOX), que son altamente contaminantes.

La técnica del RATM es un híbrido entre el SMR y la oxidación parcial. Tanto las reacciones de oxidación como de reformado se producen en el interior de un reactor autotérmico. El calor procedente de la reacción de oxidación exotérmica proporciona una parte del calor necesario para la reacción endotérmica de reformado. Esto favorece que el diseño del reactor sea mucho más sencillo que el del SMR.

Es posible evitar el uso de plantas de suministro de oxígeno puro mediante el uso de catalizadores basados en membranas de transporte de iones construidas con cerámicas no porosas.

Los datos económicos para ambos procesos vienen detallados en la tabla 9.3

Es necesario resaltar que estos procesos siguen produciendo CO_2, con lo que para evitar la liberación de GEI a la atmósfera, volvería a ser necesario el uso de tecnologías de captura y almacenamiento de CO_2, cuyas graves consecuencias se detallan en el capítulo 10, dedicado a estas tecnologías.

Proceso	Eficiencia	$/MMBtu	$/kg
Oxidación Parcial	70-80 %	Sin datos	Sin datos
Reformado Autotérmico	71-74 %	16.88	1.93

Tabla 9.3: *Producción de hidrógeno a partir de los métodos de Oxidación Parcial y de Reformado Autotérmico de Metano, según [39]*

Gasificación del carbón

Al igual que en SMR, la gasificación del carbón se realiza en tres pasos:

- Tratamiento de las reservas de carbón con un vapor a alta temperatura para producir gas sintético.
- Conversión por desplazamiento catalítico .
- Purificación.

En el primer paso, el calor necesario viene de la adición de oxígeno (como antes, podría ser aire, pero eso produciría NO_X, por lo que se impone el uso de plantas de suministro de oxígeno puro). En el segundo paso, el gas sintético entra en un reactor de desplazamiento convirtiendo CO en CO_2. El tercer paso elimina impurezas obteniéndose H_2 puro al 99.999 %.

Los datos económicos vienen detallados en la tabla 9.4.

Eficiencia	$/MMBtu	$/kg
63 %	6.83	0.92

Tabla 9.4: *Producción de hidrógeno a partir del método de Gasificación de Carbón, según [39]*

Nuevamente, esta opción cuenta con dos importantes y evidentes inconvenientes:

- Emplea como materia prima un combustible fósil: el carbón. Si bien este combustible posee, a día de hoy, de abundantes reservas bien repartidas por el mundo, no deja de ser una fuente agotable de energía.
- En segundo lugar, y no menos importante, el proceso es un importante productor de residuos de CO_2. El problema de la liberación de GEI no está, por tanto, ni mucho menos resuelto con este método.

Pirólisis/gasificación de biomasa

La biomasa se puede utilizar para producir hidrógeno de dos maneras: mediante un proceso de gasificación directa o mediante una pirólisis (quema) para producir bio-aceites líquidos para su posterior reformado.

Los datos económicos vienen detallados en la tabla 9.5

Proceso	Eficiencia	$/MMBtu	$/kg
Reformado de vapor de bio-aceite producido por pirólisis	56 %	9.4	1.26-2.19
Gasificación directa de la biomasa	50 %	9-18	1.21-2.42

Tabla 9.5: *Producción de hidrógeno a partir de biomasa, según [39]*

Como en los métodos anteriormente citados, los basados en biomasa también expulsan, directa o indirectamente, grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera. Además, hay que sumar el hecho de que el proceso tiene una eficiencia relativamente baja, del orden del 50 %.

9.2.2. Tecnologías de producción de hidrógeno a partir de calor nuclear y fuentes alternativas de energía

Los procesos de producción de hidrógeno que usan calor nuclear o fuentes alternativas de energía son, todos ellos, procesos que separan moléculas de agua. Estas tecnologías son más modernas y tienden, todavía, a ser más caras que las basadas en combustibles fósiles, pero cuentan con dos importantísimas ventajas, que son las que llevan a *El Observatorio* a decantarse por éstas a la hora de convertirse en los métodos generalizados de producción de hidrógeno. Estas ventajas son:

- No producen emisiones perniciosas para el medio ambiente.

- No consumen grandes cantidades de materia prima no renovable.

Entre los procesos que se van a explicar a continuación, los fotocatalíticos y fotobiológicos emplean energía solar; el ciclo sulfuro-yodato emplea calor de las reacciones nucleares. En el caso de la electrólisis, la electricidad proporciona la energía necesaria.

Electrólisis

La electrólisis utiliza la electricidad para disociar moléculas de agua y producir hidrógeno y oxígeno. Se aplica una diferencia de potencial a lo largo de una célula con dos electrodos inertes que contiene un material conductor, generalmente un electrólito alcalino como una solución acuosa de hidróxido de potasio (KOH). Los electrones se absorben y se liberan en los electrodos, formando hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo. Bajo condiciones alcalinas, el proceso se describe según la siguiente reacción:

$$C\acute{a}todo : 2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$$
$$\acute{A}nodo : 2OH^- \rightarrow \tfrac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$$
$$TOTAL : H_2O \rightarrow H_2 + \tfrac{1}{2}O_2$$

Ciclo Azufre-Yodo

En el ciclo Azufre-Yodo una fuente de calor, posiblemente nuclear, proporciona el calor necesario para llevar a cabo tres reacciones termo-químicas acopladas. El sistema acoplado utiliza agua como reactivo y, a través de una serie de reacciones que precisan de azufre y yodo, produce hidrógeno y oxígeno a la salida. El proceso ha sido desarrollado empleando fuentes de calor en torno a los 850° C y 950° C.

La cadena de reacciones es la siguiente:

$$2H_2O + SO_2 + I_2 \rightarrow H_2SO_4 + 2HI(< 120^o \text{ C})$$

$$to$$

$$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + \frac{1}{2}O_2(> 800^o \text{ C}) \quad (9.3)$$

$$2HI \rightarrow H_2 + I_2(> 300^o \text{ C})$$

$$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$$

El efecto conjunto es el de producir hidrógeno y oxígeno a partir de agua, sin producir emisiones dañinas algunas ni productos intermedios que haya que desechar. El ciclo completo se ha desarrollado experimentalmente por el Departamento de Energía de los EE.UU. en el marco del Programa NERI, tal y como se muestra en la 9.2.

Los reactores nucleares son las fuentes más apropiadas para aportar el calor necesario con el fin de llevar a cabo estas reacciones. Las investigaciones más avanzadas, a día de hoy, corresponden a los reactores refrigerados por helio. Las centrales nucleares de IV generación permitirán producir hidrógeno utilizando hasta 50 MW de energía térmica, gracias a reactores de muy alta temperatura refrigerados mediante helio (los llamados VHTR).

El estado actual de este método es embrionario. No existen a día de hoy procesos a escala industrial, ni siquiera en fase piloto. No obstante, se están llevando a cabo desarrollos a escala pre-industrial por un consorcio formado por General Atomics, los Laboratorios Nacionales Sandía (EE.UU.) y el Comisariado de la Energía Atómica francés (CEA).

La estimación de datos económicos para un supuesto proceso industrial de ciclo de S-I viene detallada en la tabla 9.6 (considerándose una planta de 2400 MW):

Actualmente, es necesario un esfuerzo importante en investigación para conseguir que este

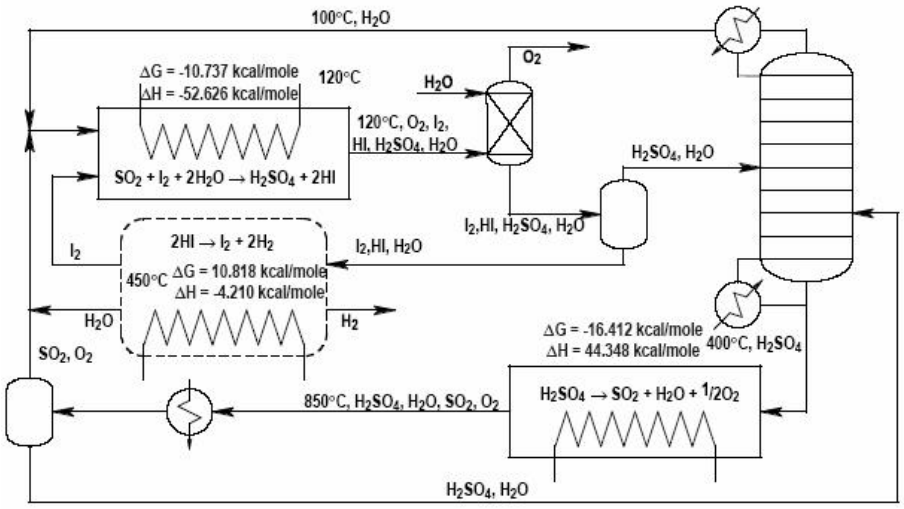


Figura 9.2: *Obtención de H_2 mediante el Ciclo S-I*

Temperatura (°C)	Eficiencia	Precio H_2 ($/kg)
850	42 %	2.01
950	52 %	1.87

Tabla 9.6: *Producción de hidrógeno a partir del ciclo S-I, según [39]*

proceso se desarrolle a escala industrial. En primer lugar, en él intervienen sustancias altamente corrosivas, como el H_2SO_4 y el HI. Por otro lado, la segunda reacción requiere una temperatura superior a 800° C. En la actualidad, los materiales capaces de soportar tales condiciones son muy costosos. Los experimentos en laboratorio se han llevado a cabo con equipamiento de cristal, pero este material no puede emplearse a escala industrial. Hasta que este escollo tecnológico, además de otros aspectos que deben ser mejorados, no se supere, no será posible desplegar este método de manera industrial. No obstante, este método resulta muy interesante para *El Observatorio*, puesto que no necesita absolutamente ninguna fuente de energía dedicada. En efecto, al utilizar la energía calorífica residual de las reacciones termonucleares, se estaría aprovechando una energía que, a día de hoy, es malgastada en su práctica totalidad.

Producción fotosintética de hidrógeno

En este tipo de producción se genera H_2 a partir de la reducción de iones H^+ en soluciones acuosas. Se emplean algas verdes (en concreto, enzimas hidrogenadas presentes en dichas algas) para que actúen como catalizador en la reacción de reducción, proporcionando una fuente de electrones. Estos electrones están disponibles gracias a la supresión del primer paso de la fotosíntesis que, en circunstancias normales, tomaría electrones del agua para generar oxígeno.

La cantidad de hidrógeno que puede generarse está limitada por la luz que pueda penetrar al

tanque donde tiene lugar la reacción. Además, el aumento de producción es lineal, hasta cierto punto, en donde las enzimas se saturan y decrece su producción.

Este método está todavía en una fase muy incipiente de investigación. Las eficiencias que se consiguen a día de hoy no alcanzan siquiera el 25 %. Aunque interesante, puesto que sólo emplea organismos vivos y luz como materia prima, *El Observatorio* no considerará esta opción en el modelo que se establezca para los próximos años. Además, su funcionamiento depende directamente de la cantidad de luz solar que incida, con lo que no puede funcionar continuamente a pleno rendimiento.

Separación fotocatalítica del agua

La Separación Fotocatalítica del Agua tiene lugar cuando un catalizador recibe luz en presencia de un donante y aceptador de electrones, oxidando iones OH^- y reduciendo los de H^+ a H_2. Los materiales que se emplean son de tipo semiconductor dopados con otro elemento. Por ejemplo: TaON, Ta_3N_5, $LaTiO_2N$ y sistemas CdS/NiS.

Este método está todavía en fases absolutamente incipientes de investigación. Por consiguiente, no es posible dar unas cifras fiables de rendimiento. Una estimación preliminar da unas cifras de rendimiento en torno al 15 %. Por esta razón, desde *El Observatorio* preferimos no tenerlo en cuenta en el escenario planteado para los próximos años. No obstante, encontramos interesante mencionarlo, porque en un futuro puede ser una técnica relevante de obtención a pequeña escala de hidrógeno.

Capítulo 10

Técnicas de captación y almacenamiento de carbono

Las técnicas de captación y almacenamiento de carbono (CCS) tienen como objeto la disminución del CO_2 emitido a la atmósfera por el uso de combustibles fósiles; para ello se lleva a cabo un proceso de secuestro del carbono con el fin de transportarlo y almacenarlo en un lugar donde quede impedido a largo plazo su paso a la atmósfera. El desarrollo y la aplicación masiva de las CCS se consideran como una posible herramienta destinada a estabilizar la concentración de CO_2 (principal GEI resultante de la actividad humana) dentro de unos límites tolerables, y por tanto útil para amortiguar las consecuencias del Cambio Climático.

En el presente capítulo se analizan la tecnología empleada, el potencial de desarrollo y las consecuencias que conlleva su aplicación a gran escala.

10.1. Tecnología

Las tecnologías empleadas son diversas y se encuentran en diferentes grados de madurez [41], [42]:

Captura: Se puede llevar a cabo en tres momentos diferentes:

- Captura previa a la combustión, mediante la descarbonización del combustible. Existen en la actualidad procesos similares, aplicados por ejemplo a la fabricación de fertilizantes y a la producción de hidrógeno.
- Captura durante la combustión, ya sea mediante combustión indirecta o por oxycombustión. Esta opción es la menos madura tecnológicamente.

- Captura posterior a la combustión, a partir de los gases producidos. Precisa de una tecnología similar a la empleada en el refinamiento de gas natural.

Transporte: Las opciones más viables son, para el transporte terrestre, utilizar gaseoductos (adaptados a la corrosión que produce el CO_2 en presencia de humedad) y, para el transporte marítimo, el uso de petroleros adaptados.

Almacenamiento: Este es el punto más crítico, dada la ausencia de experiencia que se tiene en este terreno. Se plantean opciones enmarcadas en dos contextos:

- Almacenamiento en formaciones geológicas terrestres, tales como yacimientos agotados de petróleo, acuíferos de aguas saladas y minas de sal o carbón. Su eficacia va ligada a la estabilidad sísmica de la zona durante todo el tiempo que el almacenamiento tenga lugar. Los mecanismos por los que el CO_2 quedaría confinado son diversos, pudiendo clasificarse como sigue:

  · Mecanismos físicos: el CO_2 se encuentra en estado de gas libre o de fluido supercrítico, y es confinado por entrampamiento estático (cámara sellada), entrampamiento residual del gas o entrampamiento hidromecánico.

  · Mecanismos químicos: El carbono queda disuelto o incluido en un mineral.

  También existe la posibilidad de combinar el almacenamiento de CO_2 con la recuperación mejorada de petróleo, de la cual en la actualidad sólo existe un proyecto en Weyburn (Canadá).

- Almacenamiento marino: Se encuentra en un estado tecnológico más inmaduro. Básicamente existen dos opciones:

  · Por inyección y disolución en estado gaseoso a profundidades intermedias (1-2 km).

  · Por la creación de lagos a gran profundidad (3-4 km), donde se espera que la presión mantenga el CO_2 en estado líquido.

10.2. Potencial

En la actualidad, en torno al 85 % de la energía consumida es de origen fósil (carbón, petróleo y gas) y por tanto conlleva la emisión de CO_2. Este consumo se emplea en el desarrollo de prácticamente todas las actividades humanas, en unas ocasiones causando emisiones muy distribuidas (por ejemplo las producidas por el transporte) y en otras muy concentradas (como en el caso de la

industria). Dado que las técnicas de CCS son aplicables a este último caso, su máximo potencial viene limitado por la cantidad de emisiones que de este tipo se producen.

En el siguiente gráfico se muestran las emisiones de CO_2 de origen fósil separadas según determinadas actividades [40]:

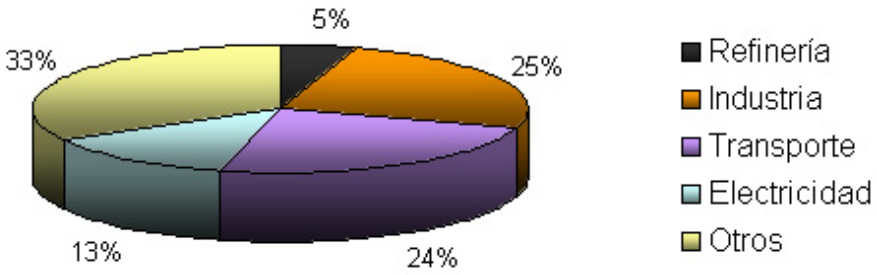


Figura 10.1: *Emisiones de CO_2 según distintas actividades*

Del total, casi un 60 % (el 80 % de la industria y la práctica totalidad de las emisiones causadas por refinería y por generación de electricidad) se trata de emisiones muy concentradas, y por tanto, susceptibles de ser tratadas por procesos de CCS. Teniendo en cuenta que su aplicación evita no la totalidad, pero sí una importante fracción de las emisiones (se estima no superior a un 85 %), el cómputo final es que si las técnicas de CCS se extendiesen a todos los puntos de emisiones concentradas del planeta, las emisiones de CO_2 globalmente se reducirían en torno a un 50 %.

10.3. Consecuencias

El uso de las CCS conlleva una serie de consecuencias que conviene tener en consideración a la hora de evaluar su posible empleo a gran escala [41]:

- **Eficiencia energética**: Las CCS suponen la incorporación de más eslabones en la cadena de la producción de energía, y por tanto la inclusión de más pérdidas:
    - El hecho de capturar, transportar y almacenar el CO_2 precisa de entre el 10 % y el 20 % de la energía producida. Como consecuencia el rendimiento de las centrales térmicas basadas en fuentes fósiles, que de por sí es bajo, disminuye, por lo que es preciso quemar más combustible para mantener la producción de energía. Como consecuencia se acelera el agotamiento de estos recursos; dado que el fin de dichos recursos supone la pérdida de utilidad de las CCS, se llega a una situación paradójica: el uso de esta tecnología disminuye su vida útil tanto más cuanto más se extienda su uso.

· Dado que el potencial de almacenamiento está distribuido de una manera no uniforme (depende en definitiva de la localización de los yacimientos geológicos y de que estos se encuentren en zonas sísmicamente estables), un amplio uso de las CCS conlleva necesariamente el transporte de largas distancias y el comercio de CO_2, con los correspondientes gastos energéticos y económicos añadidos.

- Coste: Se estima que los costes durante los 20 próximos años rondarán los 50-100 $ por tonelada tratada. Dado que Europa emite alrededor de 4000 millones de toneladas de CO_2 anuales, tratar el 50 % susceptible de serlo tendría un coste anual de 150 000 millones de dólares (más del 1 % del PIB europeo). Se trataría de un coste anual en estado estacionario, esto es, sin tener en cuenta el coste inicial de fabricación e instalación de la tecnología que precisarían todos los focos de emisiones concentradas[1]. Dicho gasto se realiza para esconder el CO_2 en vez de evitarlo.

- Impacto ambiental: Existe una gran incertidumbre sobre las repercusiones del almacenamiento masivo de CO_2. En formaciones geológicas terrestres, este almacenamiento se vuelve ineficaz ante la existencia de fisuras; la filtración del gas puede producir en ocasiones la contaminación de acuíferos o su paso a superficie, donde, en caso de tratarse de zonas resguardadas o valles –y dado que el CO_2 es más pesado que el aire– se pueden alcanzar altas concentraciones poniendo en riesgo la vida local. Es por ello que el almacenamiento en yacimientos geológicos precisa de una monitorización y control continuo que indique el correcto funcionamiento del almacenamiento. Además, por el riesgo que suponen las fugas, esta monitorización debería mantenerse durante todo el periodo de tiempo que se mantenga el confinamiento del CO_2.

  Por otro lado, las posibles consecuencias del almacenamiento oceánico son menos alentadoras: si bien se estima un gran impacto en los ecosistemas marinos locales, a modo global se corre el riesgo de la acidificación de los océanos. Unas simulaciones llevadas a cabo por el IPCC muestran que un escenario en el que el almacenamiento marino contribuyese un 10 % a estabilizar en 550 ppmv la concentración de CO_2 en la atmósfera tendría como consecuencia la acidificación (descenso del pH mayor de 0.4) del 1 % del volumen oceánico total[2]. Las consecuencias a largo plazo son desconocidas y están en fase de investigación.

- Ausencia de un modelo físico válido y ampliamente constrastado con datos experimentales

[1] Este coste puede ser mayor si las CCS se desarrollan en el marco más probable, según el cual los estados son los responsables de comprar el CO_2 capturado por empresas, de su transporte y almacenamiento o, en ocasiones, de venderlo en condiciones económicamente viables a empresas petroleras para la recuperación mejorada de petróleo.

[2] El descenso del pH desde la época preindustrial (200 años) ha sido del 0.1 en niveles superiores y despreciable en profundidades oceánicas [41]

que permita conocer y predecir el comportamiento de los procesos implicados en las fases del secuestro y almacenamiento del CO_2. Todo intento de desarrollo no respaldado por un modelo de este tipo carece de sentido para la comunidad científica y acarrea riesgos no mensurables.

- Dado el estado inmaduro en el que se encuentran las CCS, el tiempo estimado para empezar a observar un efecto apreciable de disminución de emisiones (supuesta su aplicación masiva) es de varias decenas de años [41].

10.4. Conclusiones

A la vista del análisis que se ha hecho de esta tecnología, desde *El Observatorio* consideramos que todos los recursos económicos y esfuerzos políticos encaminados a fomentar e implantar las técnicas de CCS, dadas las magnitudes que de éstos precisa, tienen 2 consecuencias especialmente graves:

- Van en detrimento de otras alternativas también orientadas a una lucha eficaz contra el Cambio Climático pero que no adolecen de semejantes inconvenientes.

- Apoyan y mantienen una estructura industrial basada en combustibles fósiles, condenados a agotarse.

Considerando además el periodo de implantación y los peligros asociados al uso generalizado de dicha tecnología, concluimos que ésta no es una opción viable y por tanto nos oponemos tanto a su desarrollo como a su implantación.

Es por ello que en lo sucesivo no serán tenidas en cuenta a lo largo del informe.

Capítulo 11

Fusión

11.1. Descripción general de la fusión nuclear

La tecnología nuclear de fusión trata de obtener energía a partir de las reacciones atómicas de fusión, en las que núcleos de elementos ligeros (principalmente Hidrógeno o Helio) se unen para formar otros más pesados, liberando gran cantidad de energía en forma de calor y de radiación neutrónica. Este mecanismo es en realidad la forma de energía más extendida del Universo, ya que es también el que proporciona su energía a las estrellas.

Idealmente, la fusión nuclear representa la fuente de energía perfecta, ya que puede proporcionar grandes cantidades de energía tan sólo a partir del hidrógeno (que, en forma de agua, es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre), sin producir más residuos que Helio, un gas inerte y sin el menor potencial contaminante (y por supuesto sin emitir GEI en ningún momento de su ciclo de producción energética). Por otra parte, la densidad energética de estas reacciones garantizaría el suministro durante decenas o centenares de miles de años sin que disminuyeran apreciablemente las reservas de agua mundiales.

Por desgracia, la realidad dista bastante de esta visión idealizada de la fusión:

En primer lugar, a pesar de tratarse de un fenómeno que tiene lugar de manera espontánea en la naturaleza, la utilización controlada de la energía de fusión representa un reto tecnológico sin precedentes en la historia de la humanidad: en cierto modo, la fusión nuclear requiere de la construcción de pequeñas estrellas artificiales, ya que para lograr que las reacciones de fusión se produzcan de manera autosostenida es preciso llevar los materiales fusionables a unas condiciones extremas de presión y temperatura. Esto supone un problema principalmente porque no existe ningún material capaz de soportar las temperaturas de decenas de millones de grados que se al-

canzarían, de modo que resulta imprescindible idear un sistema capaz de contener el material en fusión (a diferencia de un reactor de fisión en el que al no ser la temperatura un requisito para que las reacciones tengan lugar, esta puede ser controlada y reducida hasta el punto de poderse contener con materiales convencionales como el hormigón o el acero).

Existen varios enfoques encaminados a resolver el problema, pero de acuerdo con el más extendido actualmente (el llamado confinamiento magnético), la solución pasaría por confinar el material fusionable mediante fuertes campos magnéticos que formaran algo así como una "botella" inmaterial. Aunque esta es una manera de solucionar el problema, la interacción de un gas a temperaturas termonucleares (inevitablemente en estado de plasma) con los campos magnéticos da lugar a un problema extremadamente complejo, lo que complica de manera pareja los dispositivos de confinamiento.

En segundo lugar, debido a las limitaciones tecnológicas mencionadas, sólo será alcanzable en el plazo de tiempo a considerar en el presente informe la forma más espontánea y energética de la fusión: la que resulta de la unión de un átomo de Deuterio con uno de Tritio (ambos isótopos del Hidrógeno). Esto aleja la fusión de su ideal de energía perfecta, ya que a diferencia de las reacciones protón-protón o Deuterio-Deuterio que tienen lugar en el Sol, esta reacción emite fuertes radiaciones neutrónicas y además obliga a introducir un elemento que no existe en la Tierra en estado natural y que sí es radiactivo: el Tritio.

Así pues, en el momento actual, la energía nuclear de fusión es vista en muchos círculos (y en particular en los informes energéticos de la comisión europea [43], [44]) como algo lejano e incierto, aunque con un gran potencial a largo plazo. Por otra parte, la mayor parte de los grupos ecologistas son contrarios a la utilización de la fusión nuclear, pues la perciben como algo próximo a la energía nuclear convencional o como un gasto inútil y demasiado arriesgado. [45], [46].

11.2. Revisión histórica

En realidad, la investigación de la fusión nuclear como fuente útil de energía comenzó prácticamente al mismo tiempo que la de la fisión (lo que también da idea de la diferencia en los niveles de complejidad tecnológica de una y otra). A finales de los años cuarenta la energía termonuclear estaba siendo investigada con fines completamente distintos (el desarrollo de la bomba de hidrógeno), pero pronto se hizo evidente el potencial del uso pacífico de esta forma de energía, de modo que a comienzos de los 50 comenzó su desarrollo de forma simultánea en la URSS y en EEUU.

En un comienzo, estos programas de investigación eran estrictamente militares (y por tanto secretos), pero a medida que se fue profundizando en el problema (y a medida que éste demostró ser mucho más complejo de lo que inicialmente se había estimado), las tecnologías de fusión de uso civil y militar comenzaron a diferenciarse rápidamente. Así pues, a comienzos de los 60, se hizo evidente que la cooperación científico-tecnológica internacional no sólo no suponía ningún riesgo militar sino que además era imprescindible, puesto que ninguno de los países interesados estaba en condiciones de lograr el objetivo por separado [47].

Desde entonces la investigación relacionada con la fusión se ha desarrollado de manera profundamente internacional, alcanzando, incluso durante la Guerra Fría, grados de cooperación impensables en otros campos. Por otra parte, a medida que la complejidad de la tecnología avanzaba, las inversiones necesarias para seguir avanzando aumentaban proporcionalmente, haciendo los costes de la investigación en energía de fusión sólo equiparables a los de otros grandes proyectos científicos (como la astronáutica tripulada, o más recientemente, los de los grandes aceleradores de partículas).

Finalmente, a mediados de la década de los 80 se firmó en Ginebra el acuerdo ITER, por el cual EEUU, la URSS, Europa (a través de la agencia EURATOM) y Japón se comprometieron a construir un gran reactor prototipo que permitiera desarrollar una primera serie de reactores comerciales.

Este acuerdo pasó por diversos avatares (como su abandono temporal por parte de EEUU, o la caída de la URSS) que llevaron casi a su cancelación, pero finalmente, tras complejas negociaciones, se logró recuperar un amplio consenso internacional (incluyendo finalmente en el proyecto no sólo a sus miembros fundadores, sino también a China, India y Corea del Sur) y la construcción del ITER comenzó finalmente en 2007, en su emplazamiento final de Cadarache (Francia) con un presupuesto de unos diez mil millones de euros (incluyendo construcción y operación) y una vida útil de unos 30 años.

Hay que subrayar que la historia de esta investigación ha estado siempre determinada por ciertas circunstancias que le son totalmente características, y que a menudo han influido (no siempre positivamente) en su desarrollo: a la inequívoca complejidad científico-tecnológica del problema hay que añadir los tremendos costes asociados a los dispositivos experimentales, la absoluta necesidad de colaboración internacional, sus importantísimas implicaciones geo-políticas (en particular ligadas a las doctrinas energéticas de los grandes bloques) o su origen militar, que no siempre ha quedado atrás de manera clara (como sucede con la investigación del confinamiento inercial,

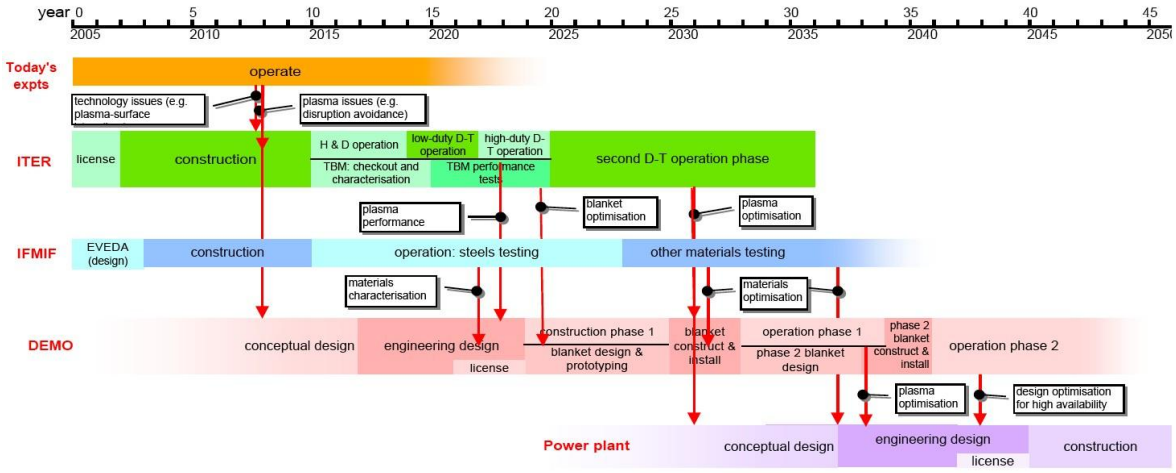


Figura 11.1: *Calendario del Programa Internacional de Fusión [48]*

esencialmente ligada al desarrollo de armamento termonuclear y láseres militares, o con las potenciales aplicaciones de un tokamak limitado usado como fuente de neutrones para producir material fisionable de alta gradación mediante transmutación).

Así pues, de manera similar a lo sucedido con otras fuentes energéticas alternativas, las épocas de mayor desarrollo de la energía de fusión han coincidido típicamente con los momentos de mayor incertidumbre acerca del suministro de combustibles fósiles (el acuerdo ITER fue firmado pocos años después de la crisis del petróleo de finales de los 70) y sus épocas de mayor estancamiento (como los años 90) con aquellas otras en las que éste no se ha percibido como un problema prioritario.

11.3. El futuro de la fusión

El programa ITER no termina con la construcción y operación del propio ITER (de hecho, ITER significa "El Camino"), sino que incluye todo un conjunto de programas que culminan con la construcción de una primera serie de reactores de producción de energía eléctrica de carácter ya comercial.

A grandes rasgos, según lo planeado, el ITER debe comenzar su operación hacia el 2015 (con H primero, con D-T hacia 2020). El programa científico contempla una vida útil que se extiende hasta 2035. Paralelamente, dentro del mencionado programa de *broader approach*, los actuales

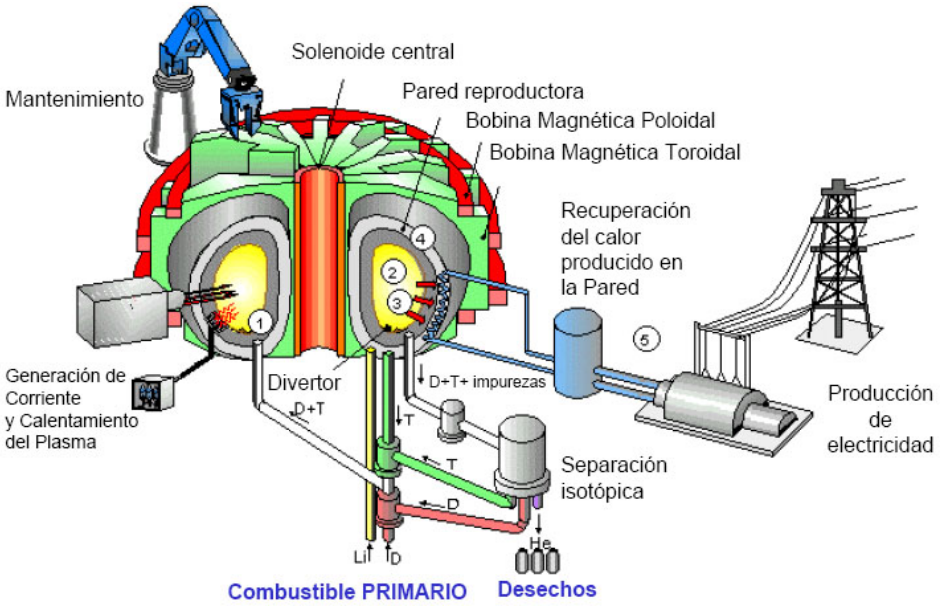


Figura 11.2: *Esquema de una central de fusión*

tokamak (principalmente el JET y el JT-60), así como un segundo tokamak satélite serán empleados para apoyar la investigación física llevada a cabo en el ITER. Además, otro de los pilares del programa es el centro IFMIF, en el que se ensayarán los futuros materiales de construcción para el reactor comercial bajo condiciones de radiación neutrónica similares a las que se darán en éste, con el fin de desarrollar materiales capaces de soportar las exigentes condiciones ambientales manteniendo al mismo tiempo una vida útil aceptable económicamente (lo que supone uno de los principales retos tecnológicos hoy en día).

Aprovechando todo el conocimiento adquirido (y que habría ido siendo implementado en el proceso de diseño), hacia el 2025 empezará a construirse el DEMO, que podría ser operativo hacia el 2030-2040. Este reactor sería ya un prototipo comercial, aproximadamente un 15 % más grande que el ITER, y produciría en régimen continuo 2 GW de potencia con un Q= 25 [1].

Finalmente, hacia 2040 podría comenzar la construcción de la primera serie de reactores comerciales, teóricamente por una cuarta parte del precio de DEMO y con una capacidad similar (el objetivo es pasar de un coste de 14 €/W_e a unos 8 €/W_e por la mejora en el diseño al pasar del prototipo al diseño comercial y de ahí a unos 4 €/W_e al introducir el factor de escala de una serie grande de reactores).

[1] Q representa el ratio entre la energía térmica obtenida de las reacciones de fusión y la energía necesaria para dar comienzo a las mismas (mediante los sistemas de calentamiento y confinamiento del plasma, principalmente).

Respecto al funcionamiento de la planta, no será muy distinto al del actual ITER. Probablemente la mayor diferencia (más allá del incremento de tamaño y otros aspectos derivados del cambio de función de la instalación) residirá en la implementación de un sistema de producción de tritio integrado en la estructura y en una presencia de sistemas de diagnóstico mucho menor.

En la figura 11.2 puede verse el diseño esquemático del funcionamiento de una central de fusión.

11.4. Comparativa con la energía nuclear convencional

Una de las cuestiones principales que se plantean a la hora de analizar la energía de fusión es hasta qué punto heredará los muchos problemas de la fisión (que ya fueron planteados en el capítulo 6).

El hecho cierto es que, a pesar de las mencionadas limitaciones que impone la inmadurez tecnológica de esta fuente de energía, se puede afirmar que supone un verdadero salto cualitativo con respecto a la energía convencional de fisión, ya que no plantea prácticamente ninguno de los problemas de aquella:

- En primer lugar, la energía de fusión, incluso basada en el tritio, no planteará problemas de suministro en su combustible: en efecto, el tritio necesario se producirá en las propias plantas a partir del Litio, un metal razonablemente abundante en la corteza terrestre y en el agua marina (con unas abundancias relativas estimadas de 2.0×10^{1} mg por kilogramo y 1.8×10^{-1} mg por litro, respectivamente). Aunque las reservas de Litio permitirían utilizar la fusión como fuente de energía primaria durante miles de años (en particular debido a las pequeñas cantidades de tritio necesarias), no se debe olvidar que la fusión D-T es sólo un primer paso hacia la fusión D-D, en la que tanto el Litio como el Tritio serán innecesarios.

- En segundo lugar, la energía de fusión no produce residuos radiactivos en el sentido estricto del término: el único material radiactivo involucrado en el proceso, el Tritio, permanece en todo momento en el interior del reactor ya que es producido y consumido en él. El producto de la reacción, el Helio, no plantea ningún problema medioambiental.

  El problema radiológico de la fusión nuclear viene derivado de la radiación neutrónica, ya que ésta tiende a activar aquellos materiales que están expuestos a ella durante mucho tiempo. De este modo, algunos componentes estructurales de este tipo de reactores se volverían

ligeramente radiactivos[2], obligando así mismo a reemplezarlos periódicamente.

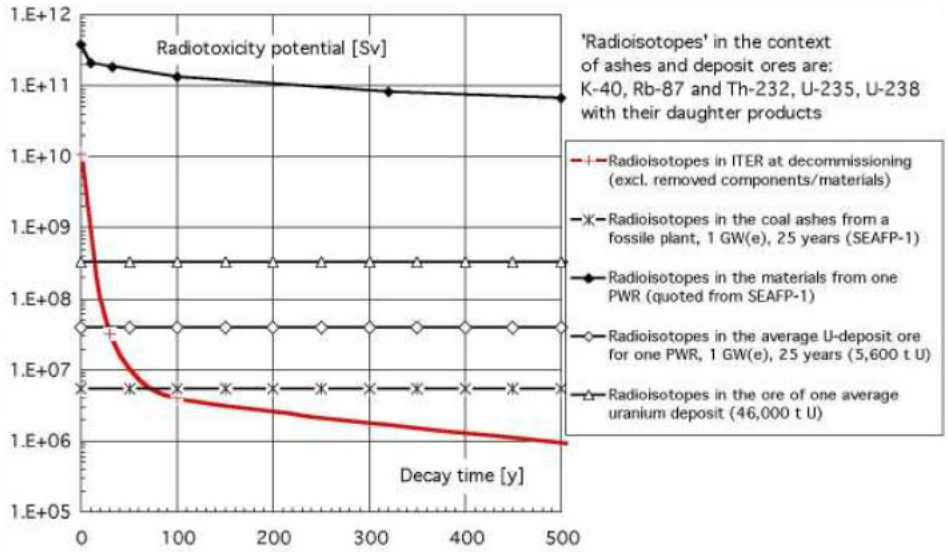


Figura 11.3: *Comparativa de la radiotoxicidad de los residuos generados en distintos tipos de centrales eléctricas (PWR hace referencia a una central de fisión) [49]*

Como consecuencia de todo ello, la fusión no estaría completamente exenta de materiales radiactivos, pero ninguno de ellos sería comparable en radiotoxicidad ni en vida media a aquellos generados por la energía nuclear convencional. Así pues, aunque se crearían cantidades considerables de residuos de baja actividad (principalmente al desmantelar los reactores al fin de su vida útil), el tiempo de almacenamiento necesario para que alcanzaran niveles seguros de radiactividad sería del orden de los cien años (frente a los miles o decenas de miles de años de los residuos de alta actividad de la fisión), lo que resulta tecnológica, social y medioambientalmente mucho más asumible.

- En tercer lugar, por la misma naturaleza de los procesos físicos que tienen lugar en ella, la fusión nuclear no plantea el riesgo de un accidente nuclear: en un reactor convencional, todo el combustible a utilizar durante más de un año está situado en el núcleo del reactor, dependiendo de los mecanismos externos de moderación y control para no desarrollar tasas de reacción excesivas, de modo que en caso de fallar estos mecanismos la energía liberada puede crecer peligrosamente (con resultados tristemente conocidos).

Por el contrario, en una central de fusión, sólo hay unos pocos gramos de material si-

[2]El nivel de radiotoxicidad de los elementos activados depende no obstante de una correcta elección de los materiales empleados en su construcción, ya que de no realizarse ésta correctamente los residuos generados pueden ser considerables (aunque sin acercarse en ningún caso a los generados por la fisión).

multáneamente en el reactor, siendo necesario el uso deliberado de complejos sistemas para alimentarlo con el combustible necesario para sostener la reacción. Así mismo, el mantenimiento del propio confinamiento requiere del buen funcionamiento simultáneo de la mayor parte de los sistemas de la central. En el peor escenario posible (un fallo simultáneo de todos los sistemas, o la peor combinación posible de fallos concebible, fruto de un sabotaje o un atentado, por ejemplo), el confinamiento se rompería y las condiciones necesarias para el mantenimiento de la reacción se degradarían rápidamente, impidiendo que ésta continuara. Así pues, resulta imposible que un reactor de fusión estalle como resultado de su propia actividad. Incluso en el caso de que estallara como resultado del hipotético atentado (mediante el uso de bombas, aviones, etc.), la cantidad de material radiactivo presente en el reactor en un momento dado es muy pequeña (En un momento dado sólo hay algunos gramos de tritio reaccionando en el núcleo), por lo que la contaminación del medio ambiente sería mínima. En particular, los exhaustivos análisis de seguridad llevados a cabo durante el diseño de ITER garantizan que incluso en el peor escenario posible, la dosis de radiación en el exterior del perímetro de la planta se mantendrían siempre por debajo de los 10 mSv (el nivel a partir del cual es necesario establecer planes de evacuación para la población afectada, o bien la dosis máxima admitida a lo largo de dos años para el público general).

- En cuarto lugar, la tecnología de fusión de confinamiento magnético[3] no plantea problemas de proliferación, ya que su tecnología no guarda ninguna relación con la empleada para usos militares (a diferencia de lo que sucede con la fisión). De este modo, ni los materiales, ni los combustibles ni las instalaciones requerirían de medidas especiales de control y protección. Así mismo, la difusión de la tecnología de fusión como fuente de energía a escala mundial no crearía inestabilidades políticas equiparables a las que hoy podemos ver como resultado de la proliferación de la energía nuclear convencional y sus infraestructuras industriales.

[3]Que será la que previsiblemente resulte desarrollada.

Capítulo 12

El consumo energético en Europa

12.1. Introducción

Cualquiera que sea la fuente bibliográfica que se consulte, se demuestra que el consumo energético en Europa ha aumentado de manera sostenida a lo largo de los últimos 20 años, con un incremento muy superior al demográfico.

Esto ha llevado a los miembros de *El Observatorio* a analizar la realidad del consumo energético, enfatizando principalmente en los siguientes puntos:

- Comportamiento del incremento de la demanda
- Consumo por sectores económicos
- Fuentes de energía primaria
- Emisiones de CO_2

A lo largo de las siguientes subsecciones, se desarrollará cada uno de estos puntos en profundidad.

Como ya se ha dicho, el propósito principal de este documento es la elaboración de un modelo energético para Europa que esté presente hasta la mitad del siglo XXI. Esto incluye la elaboración de un modelo para lo que serían las entradas a este sistema: los datos de consumo energético. Naturalmente, es imposible saber a ciencia cierta cómo se va a comportar el consumo energético en la región europea durante los próximos 40 años. Sin embargo, y dada la prolongada serie temporal en la que el aumento de consumo ha sido sostenido, resulta razonable pensar que va a seguir siendo así. La naturaleza propia del sistema (neo-)liberal presupone el constante crecimiento y, como consecuencia, un constante aumento del consumo. Las estimaciones realizadas por *El Observatorio* han sido, sin embargo, conservadoras. Como se verá a lo largo de este capítulo,

la suposición de partida ha sido la del mantenimiento a un ritmo constante del aumento en el consumo energético.

En la sección 12.2 se explica el estado actual del consumo en Europa.

12.2. Estado actual del consumo energético en el primer mundo

En esta sección se presentan las evoluciones de consumo energético para la OCDE desde la década de los 70 del pasado siglo hasta el año 2004. Los países miembros de la OCDE conforman el denominado "Primer Mundo" y representa más de tres cuartas partes del PIB mundial. Dichos resultados han sido obtenidos de [25].

12.2.1. Consumo por tipo de combustible

La figura 12.1 representa la serie de datos para el consumo de energía primaria para toda la OCDE según el tipo de combustible, desde el año 1971 hasta el año 2004, en MTEPs. La dependencia de los países desarrollados del petróleo ha sido, en líneas generales, ascendente a lo largo de las últimas tres décadas. En la línea de la dependencia del petróleo, ha aumentado también la dependencia de otro combustible fósil: el gas natural. Por último, la dependencia del último gran combustible fósil, el carbón, ha ido disminuyendo hasta alcanzar niveles porcentuales casi testimoniales.

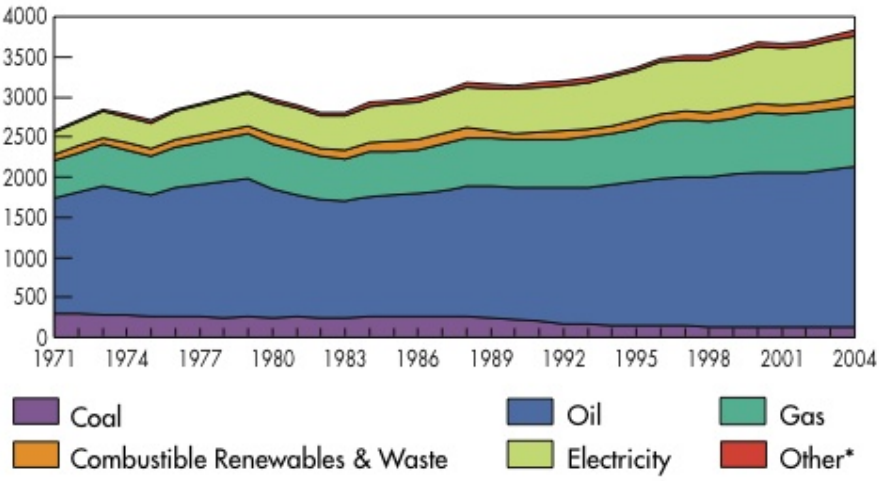


Figura 12.1: *Consumo de energía primaria por tipo de combustible en la OCDE en Mtep, según [25]*

De todo el consumo de la OCDE, el correspondiente a la región europea supuso, en el año

2004, el 30.4 %, alcanzando un valor de 1332.144 Mtep, o 15493 TWh.

El aumento de la demanda de energía primaria tiene una media del 1.3 % anual desde el año 1971 hasta el año 2004.

12.2.2. Consumo de energía primaria por sectores económicos

Para la región de la OCDE, el consumo energético primario atendiendo a los sectores de la economía se puede representar a través de la figura 12.2. Hay que resaltar el papel de los sectores transporte y eléctrico en el consumo de energía primaria. Cada uno de ellos se reparte el 33 % de la tarta. Por tanto, para poder reducir las emisiones de CO_2 no solo es necesario pensar en nuevos procesos de generación eléctrica más eficientes y menos contaminantes, sino que es de capital importancia el desarrollo de tecnologías del transporte que no se basen en la combustión de hidrocarburos y que, al mismo tiempo, dichas tecnologías utilicen en la menor medida posible el uso de combustibles fósiles. El presente documento se centrará posteriormente en la elaboración de un marco energético en el que los procesos de generación eléctrica y el consumo del sector transporte sean lo más eficientes y limpios posible.

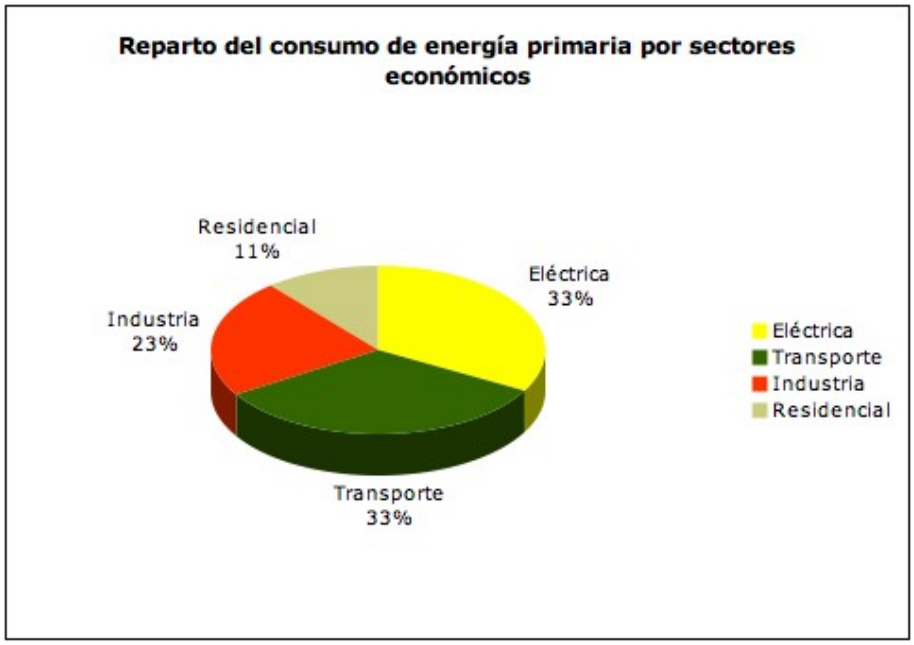


Figura 12.2: *Consumo de energía primaria por sectores económicos en la OCDE en porcentaje en 2004, según [25]*

Por otro lado, el consumo de energía primaria por parte del sector industrial representa un 23 % del total. Sería importante también que los procesos industriales incorporaran técnicas de obtención de energía más eficientes. Sin embargo, al ser estos procesos de muy variada índole, queda fuera del propósito de este documento el análisis en profundidad de un modelo renovado

para este sector.

El sector residencial, que comprende el gasto energético a nivel doméstico y/o comercial, representa un porcentaje muy bajo del consumo total de energía primaria. Se puede pensar en técnicas para permitir que su impacto medioambiental se minimice, tales como la generalización de sistemas de climatización basados en energía solar. Sin embargo, nuevamente su análisis en profundidad queda fuera del objetivo de este documento, al representar un porcentaje muy bajo en el consumo y, previsiblemente, aún más, en cuanto a las emisiones.

Capítulo 13

Conclusiones preliminares

Tal y como ha quedado ya señalado, el propósito del presente informe es tratar de estimar las posibilidades y el alcance de determinadas políticas, consideradas beneficiosas, con el fin de conocer la gravedad de la situación ante la que nos encontramos, como ciudadanos y como seres humanos, así como evaluar la efectividad de aquellas soluciones, de diversos grados de profundidad, que en el momento presente podemos considerar factibles.

Una vez alcanzada cierta comprensión de la situación tecnológica actual mediante el análisis técnico realizado en los anteriores capítulos, se empleará la información recopilada para plantear el modelo predictivo, de acuerdo con la estructuración inicial del informe.

En particular, el método de trabajo consiste en suponer la aplicación óptima de cuantas medidas generales se encuentren a nuestro alcance en el momento presente y de incorporar aquellas otras que el desarrollo sociotecnológico previsible vaya permitiendo a lo largo de las próximas décadas hasta alcanzar el año 2050, término de nuestras previsiones. De este modo, se han tratado ya a lo largo de páginas anteriores medidas tales como la eficiencia energética, la implantación de medios de generación energética alternativa, transición a la economía del Hidrógeno, etc. buscando establecer esos niveles de desarrollo previsible.

Este método, no obstante, resulta problemático en ocasiones debido a aquellas medidas teóricamente destinadas a contribuir a un desarrollo sostenible (o al menos a reducir la emisión de GEI), pero que por distintos motivos plantean a cambio incovenientes suficientemente graves como para que su posible adopción deba ser puesta en tela de juicio. Así pues, en aquellos casos en que los efectos beneficiosos no sean evidentes, es preciso tomar una decisión acerca de la postura a adoptar.

13.1. Primeras conclusiones

A la luz de los datos aportados, se han adoptado las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, la energía más sostenible es aquella que no se llega a producir: la principal medida a tener en cuenta es el ahorro de energía. Puesto que entre las hipótesis iniciales figura el aumento constante de la demanda energética, y por tanto las necesidades energéticas no pueden ser modificadas, esto implica una máxima implantanción de medidas y tecnologías destinadas a la eficiencia energética. Mediante ellas, será necesario producir menos energía para atender una misma demanda.

  No obstante, en el modelo, con el fin de lograr una mayor claridad, la eficiencia aparecerá como una "fuente de energía" en el lado de la producción, de tal manera que su volumen pueda compararse directamente con el de otras fuentes reales. De este modo, la energía que aparezca como "producida" por la eficiencia debe interpretarse como una energía que no se ha llegado a requerir gracias al uso de tecnologías y técnicas de gestión más eficientes.

- En segundo lugar, tras la eficiencia, la manera más sostenible de responder a las necesidades energéticas de la sociedad es mediante el empleo de energías renovables. Así pues, el empleo de estas será también maximizado. El volumen de energía producida mediante estos medios estará pues limitado solamente por el máximo volumen que en el plazo considerado puedan alcanzar según unas previsiones razonables.

  Aquí cabe hacer una distinción importante. De nuevo, buscando la simplicidad, se consideran aquellos sistemas destinados a producir energía eléctrica a gran escala. Aquellos sistemas no destinados a la producción eléctrica (o destinados a usos descentralizados, tales como el calentamiento de agua, el frío solar, sistemas aislados, etc.) quedan incluidos dentro de la eficiencia.

- En tercer lugar, el hidrógeno aparece como una tecnología de gran potencial por dos motivos principales:

  · Primero, por el aumento de eficiencia intrínseco que supone como tecnología: el consumo total de energía de una máquina propulsada por un motor alimentado con una pila de hidrógeno es claramente menor que el de la misma máquina propulsada por un motor convencional. Por otra parte, estos sistemas están sólo al comienzo de su desarrollo, y por lo tanto, aumentar su eficiencia significativamente resultará mucho más sencillo y barato de lo que resulta hoy en los motores diésel o de gasolina.

  · Segundo, el hidrógeno resulta una excelente manera de versatilizar el sistema de producción energética: puede ser empleado prácticamente en cualquier ámbito en el que

hoy son utilizados los hidrocarburos (tanto como combustible en bruto como mediante pilas), así como para producir electricidad de manera eficiente, y a su vez puede ser producido mediante distintas técnicas, a partir de hidrocarburos, electricidad o energía nuclear, según lo determinen las circunstancias. En esto último, el hidrógeno viene a suplir una de las principales limitaciones de las fuentes renovables: la incapacidad para atender al consumo no eléctrico (principalmente, la sección de energía primaria correspondiente a transporte e industria).

Así pues, se potenciará una transferencia lo más amplia posible (determinada por el ritmo predecible de evolución de los sistemas basados en hidrógeno) de todos los sectores, haciendo especial hincapié en el del transporte.

- En cuarto lugar, y resumiendo los tres puntos anteriores, el cálculo de la producción energética se estructurará de la siguiente manera:

  Primero se calculará la cantidad de energía que no es necesario producir gracias a la eficiencia. A continuación se calculará la energía eléctrica que es posible producir mediante fuentes renovables. Tras esto quedará la cantidad de energía eléctrica que será necesario producir mediante fuentes convencionales, incluyendo hidrocarburos y nuclear (sobre la energía nuclear se discutirá más adelante).

  Una vez calculada la energía eléctrica, se estudiará el resto del consumo primario (dividido en transporte, residencial e industria). A cada uno de estos se les asignará también un porcentaje de energía "producida" mediante eficiencia y otro porcentaje de transferencia al hidrógeno (que representará el consumo en cada sector que será atendido mediante las nuevas tecnologías de hidrógeno). De nuevo, el porcentaje que no sea cubierto por la eficiencia o por la transferencia al hidrógeno será atendido de manera convencional. De este modo, las emisiones originadas por este último consumo se considerarán producidas por tecnologías similares a las existentes en la actualidad (ya que representan la fracción que no ha podido ser modernizada mediante la eficiencia o transferida a otras tecnologías).

  Por último, queda el volumen de energía-hidrógeno acumulado en los distintos sectores. Esta energía será producida en primer lugar por el excedente de energía eléctrica (si lo hubiera) y por la termólisis de las centrales nucleares (de nuevo, si las hubiera, y la tecnología lo permitiera). El volumen de hidrógeno restante será producido a partir de hidrocarburos.

  Aquí resulta interesante destacar que se ha optado por producir hidrógeno a partir de hidrocarburos y energía eléctrica a partir de fuentes renovables, cuando lo contrario (o una mezcla de ambos) también es posible. El motivo de esta elección es que, de nuevo, la producción de hidrógeno es la manera más eficiente de emplear los hidrocarburos, mientras que

la producción de hidrógeno mediante renovables incluye de todos modos la producción de electricidad (una etapa intermedia que supone una pérdida adicional de eficiencia).

- En quinto lugar, la fusión también es aceptada como una fuente de energía de gran potencial, no emisora de GEI, con reservas de combustible inagotables en las escalas de tiempo consideradas y con un impacto ecológico moderado, que podrá ser empleada tanto para la producción directa de electricidad como para la producción de hidrógeno mediante termólisis. De este modo, aparece como una de las principales esperanzas de lograr un modelo globalmente sostenible a largo plazo.

  Sin embargo, parece excesivamente optimista esperar que la fusión permita la producción de energía a gran escala antes de la década de 2050, incluso en el mejor de los escenarios. Así pues, la fusión no aparecerá como fuente energética disponible en el modelo, pero se supondrá en cualquier caso que la investigación en su dirección continúa a la mayor velocidad posible.

- Por último, aparecen una serie de tecnologías "problemáticas", en el sentido de que su utilización, si bien puede contribuir en algún aspecto de manera positiva, plantean a cambio otros efectos marcadamente negativos.

  Estas medidas son principalmente tres: el empleo de biocombustibles y biomasa, las tecnologías de captura y almacenamiento de Carbono (CCS) y el uso de centrales nucleares convencionales (esto es, de fisión) para la generación de electricidad.

  Dotar a los biocombustibles de un papel relevante en la lucha contra el Cambio Climático supone fuertes inversiones y esfuerzos a medio y largo plazo en implantar una tecnología emergente que obliga a mantener la dependencia del sector Transportes del petróleo, a la par que un uso irresponsable y masivo del suelo que conlleva la aparición de nuevos problemas de carácter humanitario y ecológico. Aunque su utilización limitada en Europa podría resultar aceptable (en los términos descritos en el capítulo 7). Dicha implantación limitada se traduciría en una pequeña reducción en la emisiones asociadas al uso de hidrocarburos (debidas a la sustitución de estos por biocombustibles). Sin embargo la concreción de dichos límites requeriría un abordar cuestiones fuera de los propósitos del presente informe (tales como la gestión de aguas, situación agraria, etc.), por lo que no serán incluidos en el modelo predictivo. Esto no debería suponer una pérdida significativa de relevancia en los resultados para un modelo cualitativo como el nuestro (como ya se explicó en el capítulo 2) ya que en cualquier caso el volumen de reducción de las emisiones sería pequeño.

  Las técnicas de CCS representan otro ejemplo de tecnología incipiente y no demostrada, cuyo desarrollo e implantación masiva supone nuevamente esfuerzos a medio y largo plazo

no justificados por las enormes inversiones (a fondo perdido) que requieren, y porque que contribuirían a una manutención de la dependencia de los hidrocarburos, un aumento del consumo energético, graves riesgos medioambientales y la aparición de nuevos problemas, como la definición de competencias y responsabilidades en cuanto a la monitorización y tráfico de CO_2.

Por lo tanto, el uso de estas dos queda descartado de modo que sus efectos no influirán en el modelo de predicción.

13.2. La energía nuclear: escenarios

El caso de la energía nuclear es particularmente problemático, pues si bien, por un lado, sus efectos negativos pueden ser extremadamente graves, puede ser contemplada, por el otro, como una respuesta viable y ya conocida a buena parte de las cuestiones a analizar, puesto que se postula como una fuente de energía de gran potencia, no renovable, pero con grandes reservas, no emisora de GEI y con el potencial de producir hidrógeno mediante termólisis a medio plazo (ver capítulos 6 y 9). Por otra parte, podría considerarse que sus efectos negativos podrían ser cancelados o al menos controlados mediante las tecnologías y políticas de gestión adecuadas.

Pero, más allá de lo que objetivamente pueda haber de cierto en esta apariencia a priori, lo que nos mueve a realizar un análisis más detallado de la energía nuclear es la importancia social inmediata que tiene: la energía nuclear convencional no sólo está desarrollada e implantada a nivel tecnológico, sino también a nivel industrial, lo que trae consigo (en especial teniendo en cuenta las características financieras de su mercado, marcadas por las inversiones gigantescas y los periodos de amortización medidos en décadas) la existencia a día de hoy de poderosos sectores de la economía con intereses creados en torno a ella. Así mismo, y a diferencia de las otras tecnologías "problemáticas" analizadas, la opinión pública europea y mundial viene observando la energía nuclear desde hace ya 50 años, lo que la capacita más que sobradamente para formarse un juicio al respecto de ella sin la necesidad de intermediarios técnicos (un juicio que en un estado de derecho es, o debería ser, vinculante).

El resultado de esta "experiencia" es, a día de hoy, una clara división de opiniones: frente a la postura claramente contraria que ha marcado la última década, fruto de accidentes como los de Chernobyl y Three Mile Island, así como de una toma de conciencia clara respecto a los riesgos que esta forma de generación de energía entraña, se extiende cada vez más en la sociedad actual la idea de que se trata de un mal menor y probablemente necesario si se quiere evitar el problema del Cambio Climático y del agotamiento de los recursos energéticos fósiles. Así mismo, el carácter

marcadamente tecnológico de esta solución le confiere una imagen futurista y sofisticada que encaja bien en la idea –peligrosamente– generalizada de que cualquier problema puede y debe ser solucionado mediante soluciones técnicas.

Así pues, consideramos que la incertidumbre acerca de qué camino tomar en este tema es lo suficientemente grave, determinante y general como para llevar a cabo un estudio más pormenorizado, sin limitarnos a descartarla o adoptarla sin más.

De este modo, a lo largo del análisis se considerarán tres escenarios distintos, en cada uno de los cuales se supondrá una política distinta en lo referente a la cuestión nuclear:

- En el primero de ellos (escenario *"Apagado"*), se adopta la política de acabar completamente con la energía nuclear convencional. Así, se congela inmediatamente toda la investigación en este campo, y se detiene la construcción de nuevas centrales. Las centrales existentes en la actualidad siguen operando hasta el final de su vida útil, siendo clausuradas y desmanteladas sin recibir prórrogas de ningún tipo.

  Puesto que la edad media de las centrales nucleares en Europa es de unos 15 o 20 años, puede considerarse que una política antinuclear razonable consistiría en reducir a la mitad el parque nuclear hacia mediados de la década de 2020 y contar sólo con una cantidad marginal durante la siguiente, de tal modo que en 2040 no quedara ninguna central en funcionamiento. Así pues, el grueso del desmantelamiento se llevaría a cabo entre 2020 y 2030.

- En el segundo de ellos (escenario *"Continuista"*), se aboga por una utilización moderada de la enegía nuclear convencional. De este modo, se prosigue la investigación de centrales de fisión de nueva generación. Por otra parte, se procede al desmantelamiento de centrales antiguas con el mismo calendario que en el escenario anterior, pero reemplazándolas en este caso con centrales nuevas.

  Así pues, el parque nuclear europeo crece ligeramente hasta la década de 2030 (a una media de una central[1] extra construida por país y década). A partir de 2030 comienzan a estar

[1] En general, a lo largo del informe se tomará la "central" como unidad de producción de energía nuclear. Conviene aclarar que estas "centrales" no tienen que corresponder necesariamente a centrales físicas, sino a una hipotética central arquetípica, representativa de los valores de potencia-consumo de cada una de las generaciones nucleares.

disponibles las centrales de GIV (consultar Línea Cronotecnológica), que sustituyen a las de GIII+. En un principio, su ritmo de construcción es el mismo, pero después se acelera ligeramente debido a las ventajas de esta nueva tecnología (como su capacidad termolítica en un escenario cada vez más dependiente del hidrógeno). Finalmente, en la última década, además de las correspondientes al ritmo de creación de nuevas centrales, se reemplaza la primera tanda de centrales GIII+ (las construidas en 2010), igualándose así para este año el número de centrales GIII+ y GIV, con un total de unas 250.

- Por último, el tercer escenario (*"Proliferación"*) representa la utilización masiva de la energía nuclear. En primer lugar tenemos el mismo escenario de desmantelado y reemplazo de centrales del escenario anterior, pero en este caso el ritmo de construcción extra asciende a unas 3 por país y década de media. Cuando se alcanza la tecnología GIV, se comienza también a este ritmo, pero luego se acelera hasta llegar a la construcción de unas 100 centrales por década en todo el continente (a lo que hay que sumar el reemplazo de las GIII+ que llegan al fin de su vida útil). Así pues, al comienzo de la década de 2050, Europa dispone de un parque de unas 535 centrales, casi cuatro veces las existentes en la actualidad, y por encima de la totalidad de la suma mundial en nuestros días.

Conviene antes de terminar hacer una última reflexión acerca de la energía nuclear: si se baraja su utilización es sólo debido a la gravedad de la situación y la perentoria necesidad de luchar contra el Cambio Climático. Esta fuente de energía es considerada como altamente indeseable en términos absolutos, y sólo es analizada como un hipotético mal menor. Esto significa además que, en el caso de ser empleada, se tratará de crear el menor impacto ecológico posible y se exigirán las máximas medidas de seguridad que resulten posibles para evitar la contaminación radiactiva. De este modo, se potenciaría dentro de la investigación en el tema el desarrollo de técnicas de gestión y control de residuos, así como la experimentación con técnicas de enterramiento geológico profundo, con el fin de determinar científicamente su viabilidad como forma de control de residuos (que tampoco consideramos demostrada a priori).

Por otra parte, en cualquiera de los tres escenarios, como ya se ha mencionado antes, se supone que la investigación en fusión nuclear continúa y que las primeras centrales de este tipo de tecnología comienzan a estar disponibles en 2050. Así pues, en el primer escenario la fusión aparecería como una fuente nueva empleable para sustituir las centrales basadas en hidrocarburos y para atender la demanda de hidrógeno, mientras que en los dos otros escenarios se producirá una transición lo más rápida posible, por la cual las centrales de fisión irán siendo sustituidas paulatina

y totalmente por centrales de fusión. En ningún caso será justificable la utilización de la energía de fisión cuando la de fusión esté ya disponible.

Por lo tanto, puesto que el uso de la energía de fisión, en caso de producirse, será necesariamente temporal (hecho que, por otra parte, también impone lo limitado de las reservas de uranio), no se avanzará más en la investigación del ciclo del Uranio y los reactores rápidos. Del mismo modo, el reprocesamiento de residuos radiactivos será orientado únicamente a reducir la cantidad y la radiotoxicidad de los mismos, y no a su reutilización: se detendrá la producción de MOX y se limitará al mínimo imprescindible el transporte de residuos por el riesgo implícito que supone.

En conclusión, una de las preguntas secundarias del análisis sería *"¿Es necesario incluir la energía nuclear entre las tecnologías a emplear a pesar de los gravísimos inconvenientes y peligros de su uso?"*.

Mediante un análisis comparativo de los resultados obtenidos para los distintos escenarios se espera llegar a una conclusión al respecto.

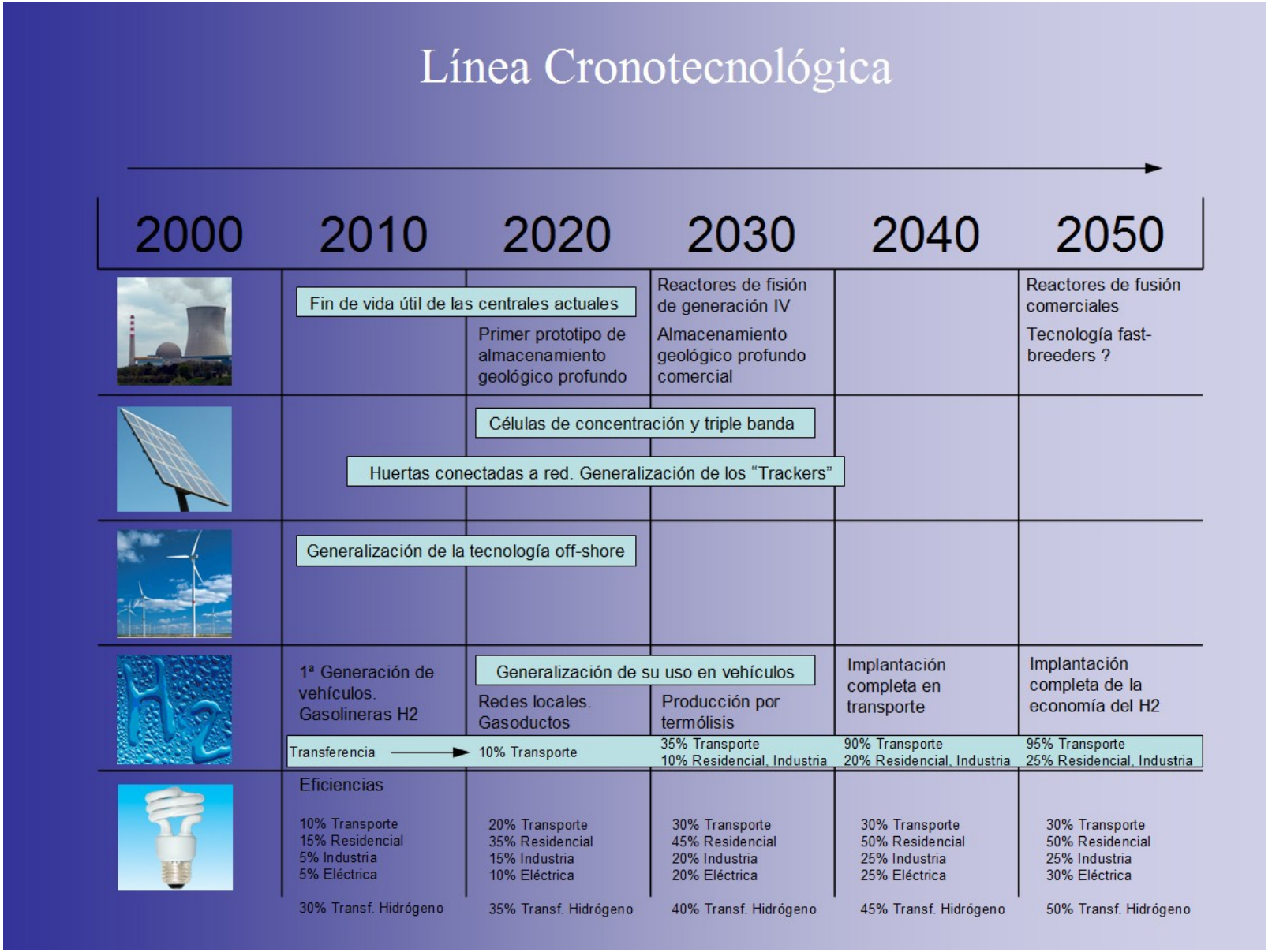


Figura 13.1: *Línea Cronotecnológica*

Parte II

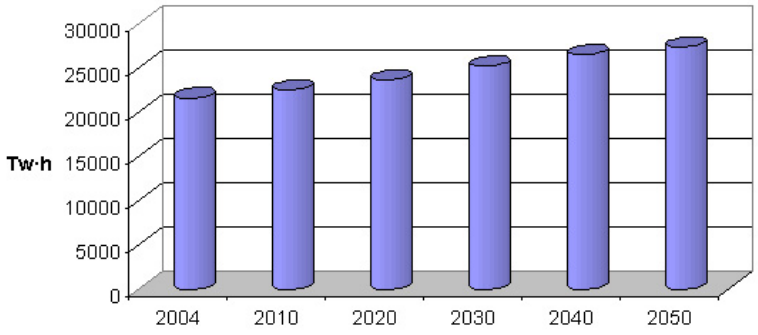
Modelo Predictivo

Capítulo 14

Evolución de la demanda energética

El modelo que se va a desarrollar tiene como fin predecir el abastecimiento energético de la OCDE Europea. Una vez analizadas las diferentes tecnologías y lo que de ellas se puede esperar, la demanda energética es la responsable de determinar cuáles de ellas y en qué cantidad se precisan, siguiendo los criterios de preferencias marcados en el capítulo 13.

El dato inicial del que parte el modelo es la demanda de energía primaria del año 2004 [25]. A partir de éste, mediante la aplicación de los porcentajes anuales de crecimiento estimados [10], [51], [50], se obtiene la demanda de energía primaria; en particular se retienen los valores de los años 2010, 2020, 2030, 2040 y 2050, como se muestra en la figura 14.1.



	Consumo de energía primaria (TW·h)					
	2004	2010	2020	2030	2040	2050
TOTAL	21600	22523,22	23670,35	25217,11	26461,91	27394,61
% anual crecimiento	0,70	0,50	0,64	0,48	0,35	

Figura 14.1: *Evolución de la demanda de energía primaria*

Es importante resaltar el hecho de que se trabaja con energía primaria. En la literatura se suelen encontrar dos conceptos: por un lado el de energía primaria (en términos de abastecimiento o bien de demanda) y por otro el de energía final (generalmente como energía consumida). La

diferencia entre ambos no es despreciable; como ejemplo se menciona que en la misma fuente [25] y para el mismo año, el consumo final de la OCDE Europea superó ligeramente los 15000 TWh. Evidentemente la diferencia radica en que no toda la energía primaria está disponible para el consumo, dadas principalmente las pérdidas en los procesos de transformación de energía.

Un análisis puede hacerse en base a la energía primaria, en base a la energía final consumida o incluso usando ambos conceptos si se tienen en cuenta los rendimientos de los procesos implicados que permiten pasar de una a otra. Este último es el caso del presente análisis, como se verá más adelante.

A continuación, para cada año considerado se realiza la división de la demanda de energía primaria en 5 sectores:

- Producción de energía eléctrica[1].
- Sector Transportes.
- Sector Industrial.
- Sector Residencial.
- Producción de Hidrógeno.

En el primer año de predicción, el 2010, los cuatro primeros sectores se reparten según indica la figura 14.2, considerándose nula (despreciable) la porción correspondiente a la producción de Hidrógeno.

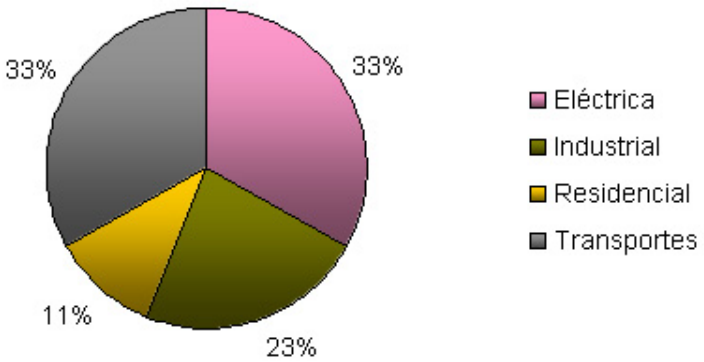
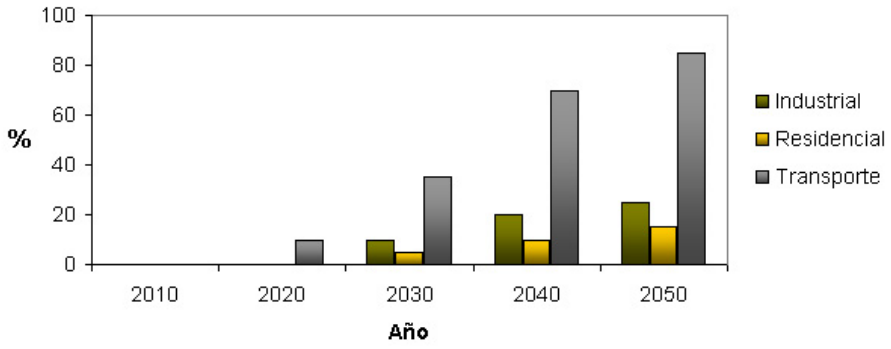


Figura 14.2: *Reparto porcentual de energía primaria por sectores en 2010*

[1]Dado que se considera un sector propio, en el resto de sectores se excluye el consumo eléctrico.

La evolución de los sectores obedece al traspaso de una porción de cada uno de ellos al quinto sector; esto debe entenderse como la sustitución progresiva (dentro de lo posible) de los modos convencionales del empleo de energía de un sector por otros basados en el consumo de hidrógeno. Por ejemplo, la progresiva sustitución de los vehículos convencionales por vehículos de hidrógeno reduce la energía primaria del sector transportes a la vez que aumenta aquélla necesaria en el sector de producción de hidrógeno. Esta transferencia de tecnología se produce a un ritmo diferente en cada sector, teniendo cada uno de ellos su propio techo cuantitativo. La figura 14.3 muestra el porcentaje cedido al sector de producción de hidrógeno para cada uno de los otros cuatro sectores y para cada año considerado.



	2010	2020	2030	2040	2050
Eléctrica	0	0	0	0	0
Transportes	0	10	35	70	85
Industrial	0	0	10	20	25
Residencial	0	0	5	10	15

Figura 14.3: *Transferencia porcentual de energía primaria al Hidrógeno por sectores*

Las figura 14.4 muestra el reparto de las necesidades de energía primaria por sector y año en forma porcentual.

Finalmente, la aplicación de estos porcentajes a los valores absolutos de energía primaria demandada permite obtener la cantidad de energía primaria por sector y año considerado, como se muestra en la figura 14.5.

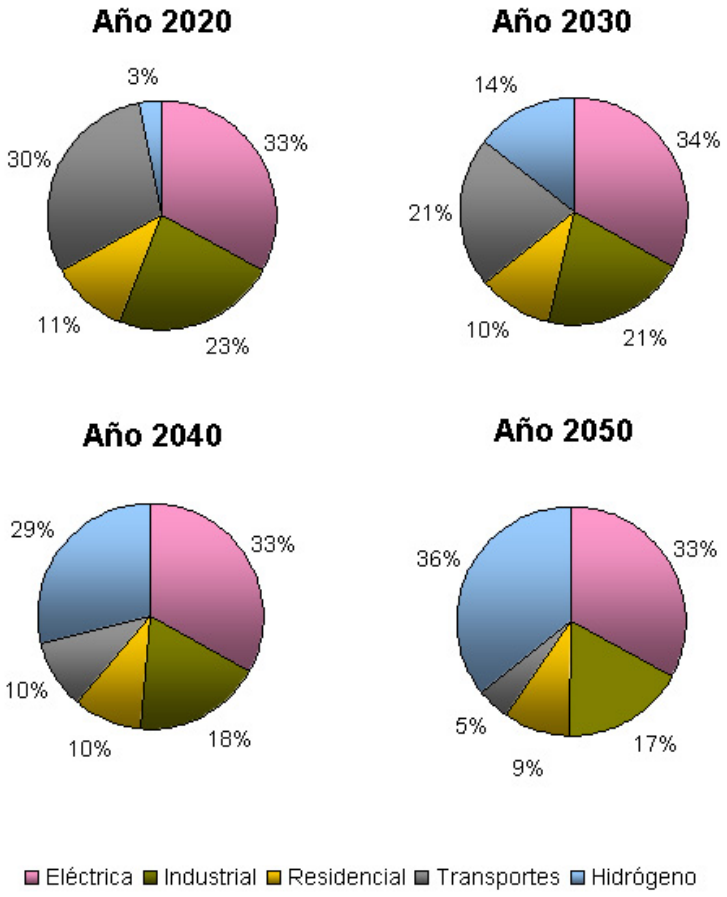


Figura 14.4: *Reparto porcentual de energía primaria por sectores en varias décadas*

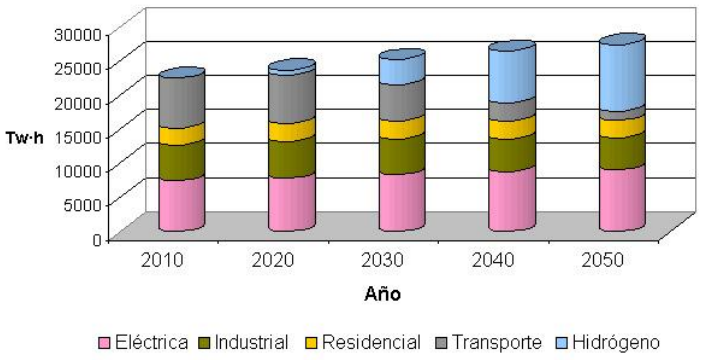


Figura 14.5: *Demanda de energía primaria por sectores*

Capítulo 15

Evolución de la producción energética

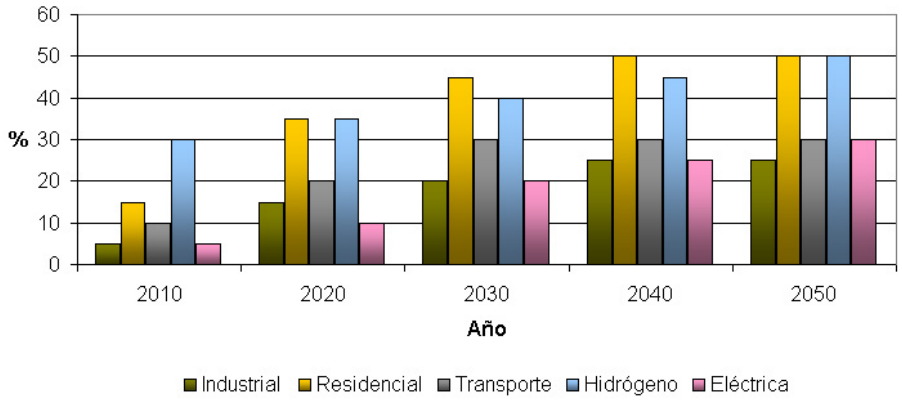
El siguiente eslabón del modelo pasa por detallar para cada sector mencionado cómo se produce el suministro energético; éste debe hacerse según los criterios de prioridad detallados en 13. Es por ello que primeramente se tiene en cuenta la eficiencia energética (por sectores y de forma global). Tras su sustracción, queda para cada sector la demanda energética que, según el caso, tendrá que ser suministrada a partir de unas fuentes u otras.

15.1. La eficiencia

En principio todos los sectores son susceptibles de disminuir su demanda energética simplemente por la aplicación de mejoras de la eficiencia en el lado del consumo. Esta disminución conlleva el ahorro de cierta cantidad de energía, la cual (puesto que no es necesario generarla) puede considerarse que ha sido producida de forma ficticia por la aplicación de dichas medidas de eficiencia.

Para cada sector, dada la tecnología implicada, existe un potencial diferente de la eficiencia. En la figura 15.1 se detalla la evolución a lo largo del tiempo de la eficiencia de cada sector en tanto por ciento referido a la energía demandada para el mismo sector y el mismo año, de acuerdo con lo ya expuesto en el capítulo 8.

La figura 15.2 muestra la parte de energía ahorrada (o generada de forma ficticia) para cada año al considerar la eficiencia de todos los sectores en su conjunto.



Sectores	2010	2020	2030	2040	2050
Eléctrica	5	10	20	25	30
Transporte	10	20	30	30	30
Industrial	5	15	20	25	25
Residencial	15	35	45	50	50
Hidrógeno	30	35	40	45	50

Figura 15.1: *Mejora porcentual de la eficiencia por sectores*

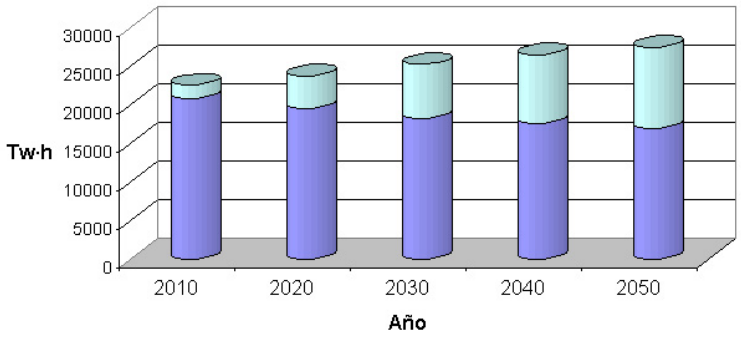


Figura 15.2: *Efecto global de la eficiencia sobre la energía primaria*

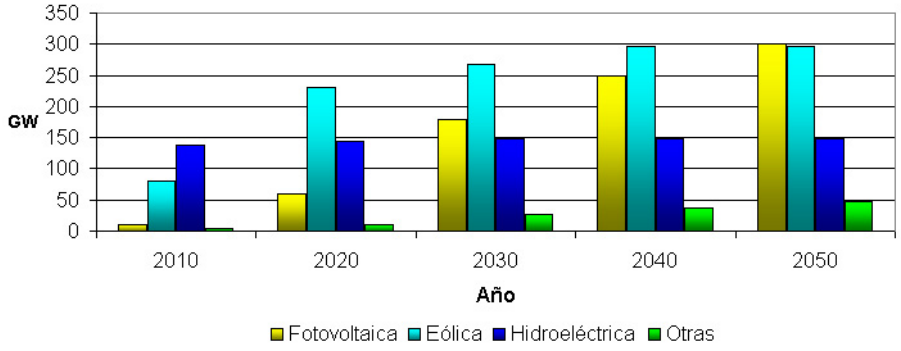
15.2. Sector Eléctrico

El bloque de energía primaria dedicado a la producción de energía eléctrica debe ser cubierto por las diferentes fuentes de energía según sus posibilidades y los criterios de preferencia marcados en el capítulo 13.

La primera fuente considerada es la eficiencia (a modo de fuente ficticia). El potencial de ésta ha sido detallado anteriormente.

La segunda recoge las distintas fuentes de energía renovable. Al final de los respectivos apar-

tados del capítulo 5 se ha obtenido la estimación de cuáles pueden llegar a ser las potencias instaladas y sus respectivos números de horas equivalentes. La figura 15.3 resume los datos de potencia instalada, y la figura 15.4 recoge la evolución de la energía eléctrica producida anual a partir de estos recursos renovables.



	2010	2020	2030	2040	2050
Fotovoltaica	10	60	180	250	300
Eólica	80	230	267	296,5	297
Hidroeléctrica	137	145	148	148	148
Termosolar	0,9	4	15	16,5	18
Geotérmica	2,5	6	12	21,5	28,5

Figura 15.3: *Energías renovables: potencia instalada*

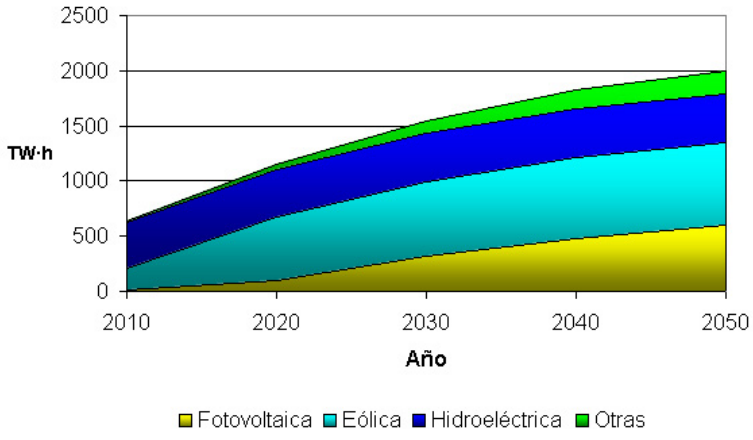
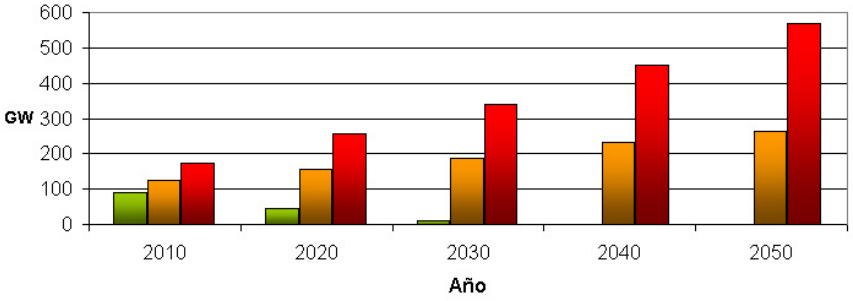


Figura 15.4: *Energías renovables: energía producida*

En tercer lugar entra en juego la producción de electricidad llevada a cabo por las centrales nucleares. Esta cantidad se obtiene a partir de la potencia instalada en cada uno de los tres

escenarios considerados y del número de horas equivalentes[1].



E. Apagado	90	45	9	0	0
E. Continuista	125	155	186,5	231,5	262,5
E. Proliferación	175	255	341,5	452,5	570

Figura 15.5: *Potencia nuclear instalada por escenarios*

Cabe destacar que, tanto en el caso de las fuentes renovables como en el de las centrales nucleares, el valor numérico de la energía obtenida es directamente una energía eléctrica (teravatios-hora eléctricos finales); por lo tanto, para trasladar esta cifra al de energía primaria, es preciso dividirla por el rendimiento que se tiene en la conversión de la energía contenida en fuentes fósiles tradicionales a energía eléctrica: si una cantidad de energía primaria E da lugar a una cantidad de energía eléctrica final $\eta \cdot E$, el hecho de disponer de las cantidades anteriores de energía eléctrica final supone una cantidad de energía primaria de dicha cantidad dividida por η. Este rendimiento en la actualidad tiene un valor en torno a 0.4, pero es susceptible de aumentar con el tiempo por la generalización de centrales más eficientes, como las de ciclo combinado. La evolución considerada es la siguiente:

2010	2020	2030	2040	2050
0,4	0,45	0,5	0,55	0,6

Figura 15.6: *Rendimiento estimado de las centrales térmicas*

En resumidas cuentas, cada TW·h eléctrico obtenido por fuentes renovables o nuclear "rellena" una cantidad de $\frac{1}{\eta}$ TW·h en la energía primaria demandada que, de otro modo, habría tenido que ser generado a costa de las fuentes fósiles (petróleo, carbón y gas).

Tras la generación eléctrica llevada a cabo por las fuentes mencionadas, aquella cantidad de energía primaria demandada por este sector que aún no se ha conseguido abastecer (en caso de haberla) es preciso obtenerla a partir de las fuentes de energía convencionales.

[1]El número de horas equivalentes de las centrales nucleares del modelo ha sido estimado en 6800 h, de acuerdo con la bibliografía.

En las gráficas 15.7, 15.8 y 15.9 se muestra cómo se abastece la energía primaria destinada al sector eléctrico en cada uno de los escenarios considerados.

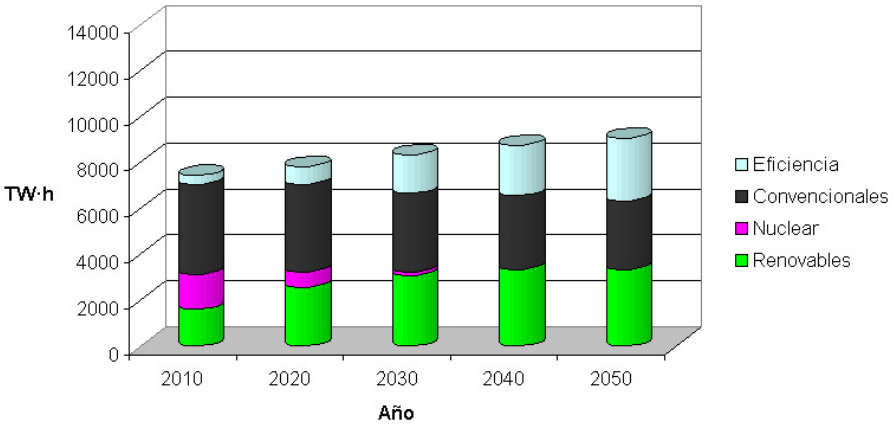


Figura 15.7: *Energía primaria: Sector Eléctrico. Escenario Apagado*

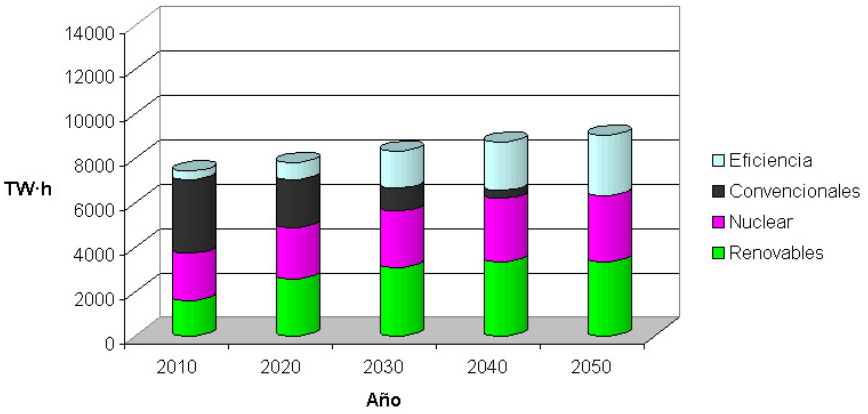


Figura 15.8: *Energía primaria: Sector Eléctrico. Escenario Continuista*

Ocasionalmente puede producirse un exceso de energía eléctrica como consecuencia de haber maximizado la eficiencia y las fuentes de energía renovable y de haber impuesto posteriormente la producción nuclear correspondiente a cada escenario. En particular, el Escenario Proliferación deja de precisar el empleo de energías convencionales en la generación de energía eléctrica alrededor del año 2030; a partir de ese momento existe un exceso de energía eléctrica obtenida, que será desviada a la generación de hidrógeno por hidrólisis.

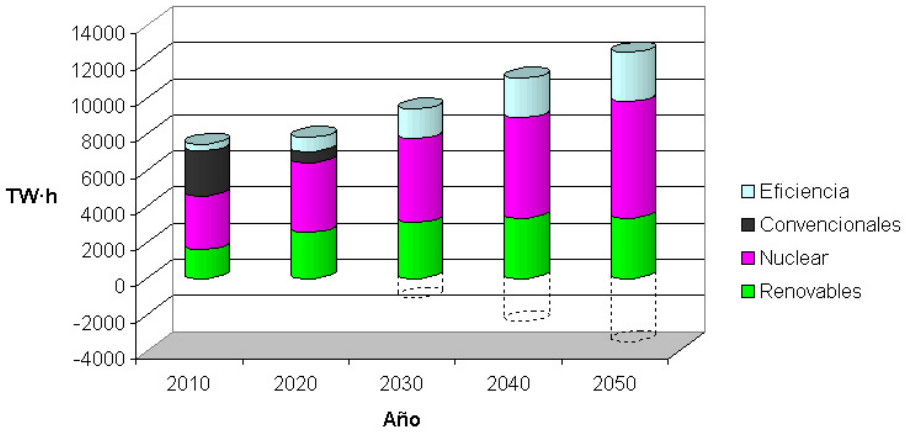


Figura 15.9: *Energía primaria: Sector Eléctrico. Escenario Proliferación (punteado, el exceso de energía eléctrica).*

15.3. Sector Transportes

Si ahora se considera la energía primaria demandada por este sector, su abastecimiento sólo es posible mediante la eficiencia y las fuentes convencionales.

El modelo cuenta con un fuerte traspaso de este sector al Sector del Hidrógeno, ya que se contempla una progresiva sustitución de los vehículos tradicionales por aquéllos de nueva generación que usan el hidrógeno como combustible. Sin embargo, cabe esperar una modesta mejora en el rendimiento de aquellos vehículos tradicionales, lo que confiere un ahorro por parte de la eficiencia. Son éstos los responsables del uso de fuentes de energía tradicional de este sector.

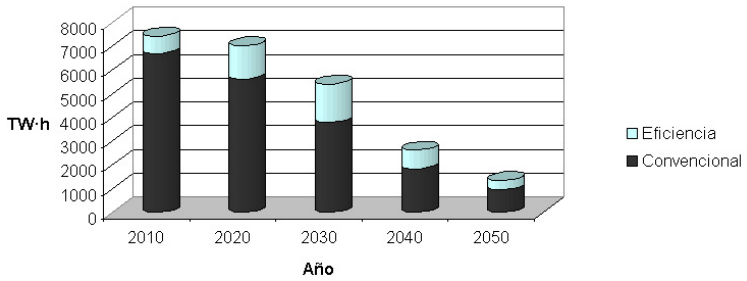


Figura 15.10: *Distribución de energía primaria: Sector Transportes*

15.4. Sector Industrial

Al igual que en el caso anterior, este sector sólo se abastece mediante la eficiencia y las fuentes de origen no renovable. Este reparto se muestra en la figura 15.11.

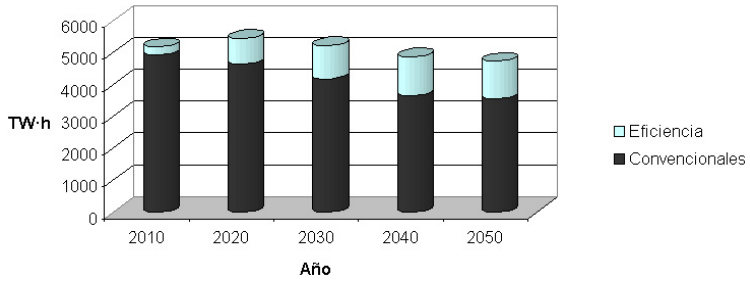


Figura 15.11: *Distribución de energía primaria: Sector Industrial*

15.5. Sector Residencial

Nuevamente la cantidad de energía primaria de origen no renovable se obtiene una vez sustraída la cantidad de energía correspondiente a la eficiencia. Es de recordar que todo lo que atañe al consumo eléctrico (ya sea en hogares, industria u otros) queda englobado en el Sector Eléctrico.

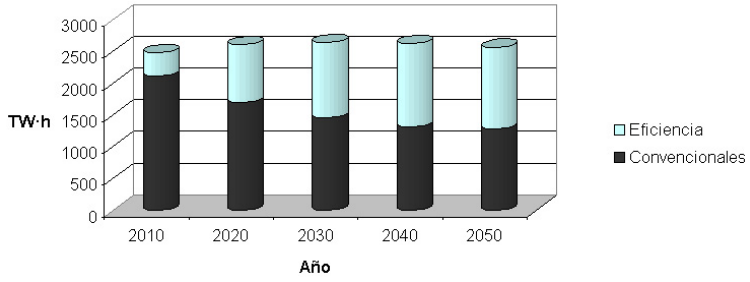


Figura 15.12: *Distribución de energía primaria: Sector Residencial*

15.6. Sector Hidrógeno

La necesidad de producir hidrógeno aparece como consecuencia del traspaso de energía que el resto de sectores hace en una medida u otra a éste, gracias a la aplicación de la tecnología que usa el hidrógeno como combustible. Dado que dicha tecnología generalmente goza de un mejor rendimiento, la eficiencia evita el consumo de una parte no despreciable de energía primaria.

Se estima que será posible obtener hidrógeno por termólisis en centrales nucleares de Generación IV; dicha posibilidad se contempla únicamente en los escenarios Continuista y Proliferación, ya que en el Escenario Apagado, por la evolución descrita en el capítulo 13, no se llega a implantar dicho tipo de centrales.

Por otro lado, el exceso de producción de energía eléctrica (o mejor dicho, el exceso de energía primaria dedicada a la producción de electricidad) puede emplearse en la producción de hidrógeno por electrolisis. Este exceso debe ser multiplicado por el anterior rendimiento de la tabla 15.6 para reconvertir energía primaria en energía eléctrica final. Esta cantidad es la que debe multiplicarse posteriormente por el rendimiento de la electrolisis, que es además bastante elevado (se promediará con el valor de 0.9 para todos los años); de la misma manera que ocurría en la producción de electricidad a partir de fuentes renovables y nuclear, es preciso dividir cualquier cantidad final por el rendimiento del proceso asociado de conversión de energía primaria a energía final. Dado que la cantidad $0.9 \cdot \eta \cdot$*(exceso de energía eléctrica)* representa un hidrógeno producido final, la energía primaria que se ha evitado consumir es $\frac{0.9 \cdot \eta}{\eta_0} \cdot$*(exceso de energía eléctrica)*, donde ahora η_0 es el rendimiento que hay en el paso de energía primaria a hidrógeno final producido a partir de combustibles fósiles. Se promedia este rendimiento con el valor de $\eta_0 = 0.7$ tomado a partir de los datos resumidos en el capítulo 9 y de [52].

El resto de la energía primaria demandada para la producción de hidrógeno (en caso de haberla), debe ser satisfecho con fuentes de energía convencionales.

El reparto final de la producción de Hidrógeno para cada escenario se muestra en las figuras 15.13, 15.14 y 15.15.

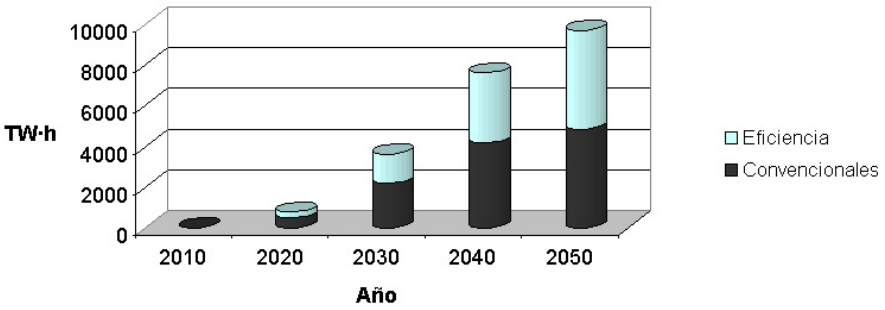


Figura 15.13: *Distribución de energía primaria: Sector Hidrógeno. Escenario Apagado*

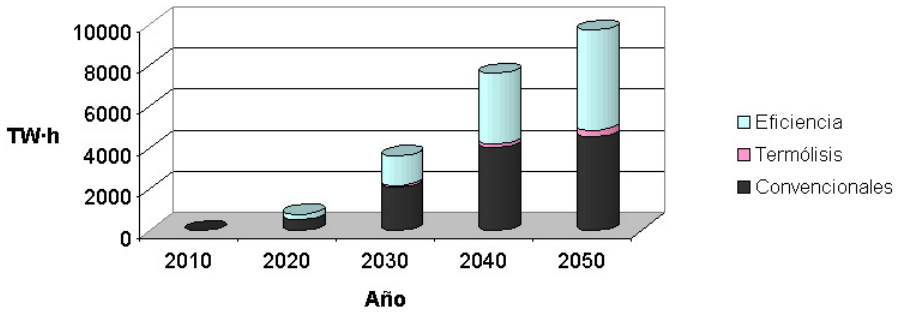


Figura 15.14: *Distribución de energía primaria: Sector Hidrógeno. Escenario Continuista*

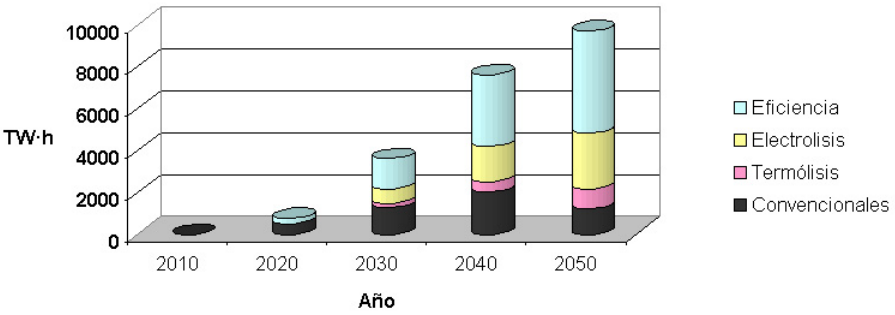


Figura 15.15: *Distribución de energía primaria: Sector Hidrógeno. Escenario Proliferación*

15.7. Abastecimiento de energía primaria por fuentes

Una vez analizado cada uno de los sectores y completado su abastecimiento desde las diferentes fuentes, es posible reconstruir la evolución de la energía primaria demandada pero desglosada esta vez según las diferentes fuentes energéticas. Los resultados se muestran en las figuras 15.16, 15.17 y 15.18.

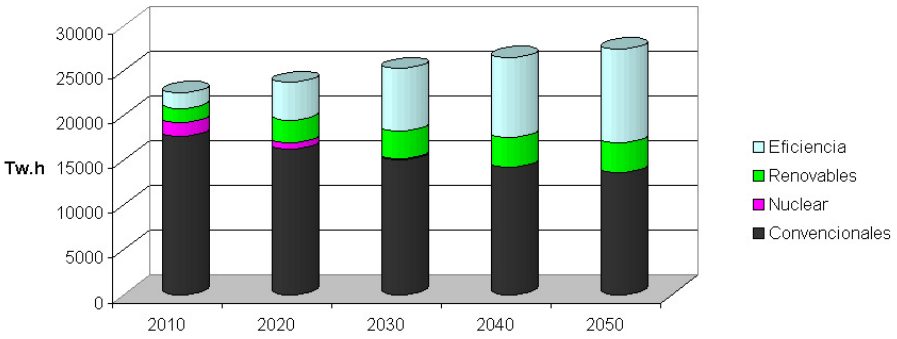


Figura 15.16: *Energía primaria por fuentes. Escenario Apagado*

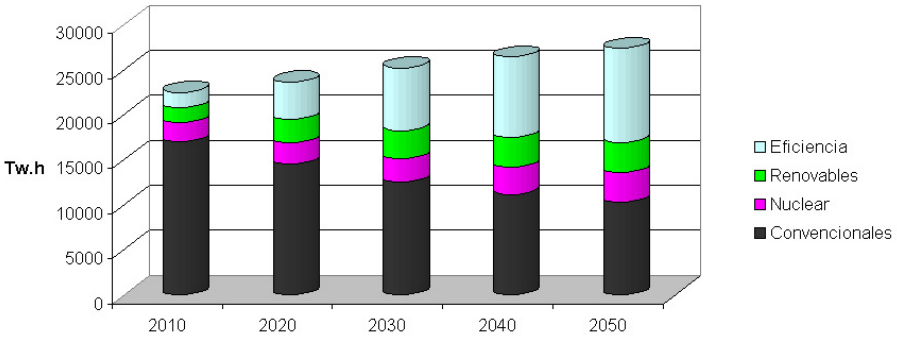


Figura 15.17: *Energía primaria por fuentes. Escenario Continuista*

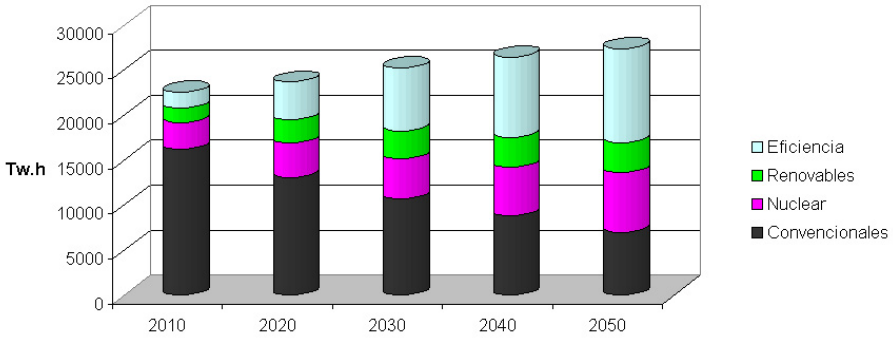


Figura 15.18: *Energía primaria por fuentes. Escenario Proliferación*

Capítulo 16

Evolución de las emisiones

El último paso del modelo predictivo consiste en la obtención de las emisiones que se producen como consecuencia del esquema energético resultante. Como se ha visto, cada uno de los sectores en que se ha dividido la demanda de energía primaria de la OCDE Europea (Energía Eléctrica, Transportes, Industrial, Residencial e Hidrógeno) ha sido satisfecho en la medida de lo posible por fuentes no emisoras de GEI. Sin embargo, para cada sector (dada la *inercia* que todo sistema tiene, no es posible sustituir el abastecimiento energético de la noche al día) sigue existiendo una dependencia de las fuentes tradicionales, ahora sí, decreciente con el tiempo y diferente para cada uno de los tres escenarios considerados. Esta dependencia causante de emisiones es conocida dado que se ha obtenido en el capítulo anterior los teravatios-hora que cada sector precisa cubrir con fuentes convencionales. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es obtener las emisiones, medidas en teragramos de $CO_{2\ eq}$[1].

Todos los sectores en su actividad "tradicional"[2] emplean de forma global una combinación propia de gas, carbón y petróleo. Es por ello que la tasa de emisión de cada sector, vista en teragramos de $CO_{2\ eq}$ por cada teravatio-hora de energía primaria demandado, es diferente para cada uno de ellos y a la vez diferente de la misma tasa considerada para el carbón, el petróleo o el gas por separado (salvo el caso de que cierto sector precisara sólo de una de las tres fuentes, cosa que no ocurre)[3]. En definitiva las tasas de las emisiones de cierto sector por unidad de energía primaria demandada se han obtenido relacionando ambos parámetros (emisiones/energía primaria) consultados en los documentos pertinentes[25]. En el caso del hidrógeno, que no tiene actividad tradicional, el dato ha sido obtenido por una media de los diferentes métodos de producción [52].

[1] Este concepto se explica en el capítulo 3.

[2] La que ha venido sucediendo hasta ahora, esto es, basando su abastecimiento en las fuentes de energía tradicionales.

[3] Si bien es lógico que dicha tasa para el sector transportes sea más próxima a la del petróleo por abastecerse en gran parte de él, que la tasa del sector electricidad sea más próxima a la media del carbón y el gas, etc.

Los resultados son:

Industria	0,169
Transporte	0,227
Residencial	0,132
Hidrógeno	0,094
Eléctrica	0,282

Figura 16.1: *Emisiones de CO_2 en Tg por TW·h de energía primaria*

Conviene insistir en que las emisiones son por teravatio-hora de energía primaria, y no por teravatio-hora de energía final. Es por ello que a primera vista pueden parecer más bajas que las respectivas tasas del carbón, del petróleo y del gas, que habitualmente se dan por teravatio-hora final u obtenido. La diferencia entre unos y otros se debe a los rendimientos de los procesos implicados de conversión de energía en cada sector.

Finalmente, el producto de estas tasas por la energía que cada sector requiere en cada año considerado dan como resultado las emisiones de este sector en dicho año; la suma de las emisiones de todos los sectores dan las emisiones de $CO_{2\ eq}$ totales de ese año, por lo que es posible obtener su evolución a lo largo de las décadas. Esta evolución se muestra en la gráfica 16.2, en la que además se ha añadido el nivel de emisiones del 2000 y aquél que, según lo expuesto en el capítulo 3, representa el objetivo para el 2050.

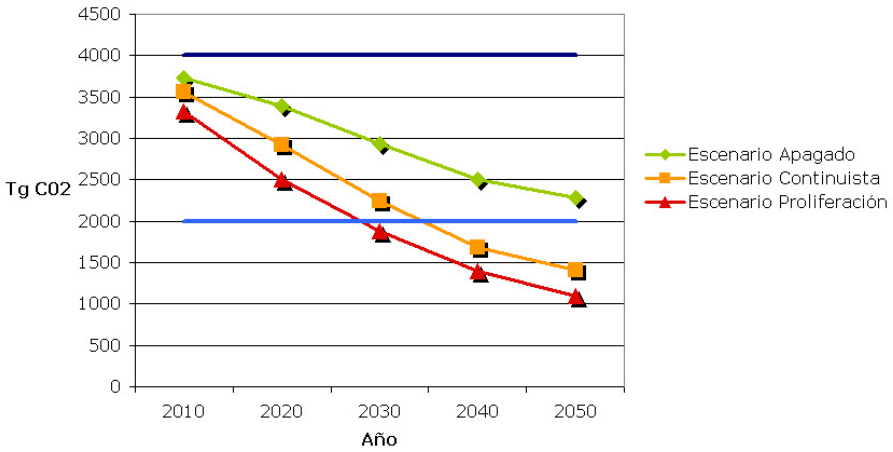


Figura 16.2: *Evolución de las emisiones para los tres escenarios*

Estas emisiones totales por década se pueden desglosar, gracias a cómo ha sido concebido el modelo, según los diferentes sectores, como se muestra en la figura 16.3.

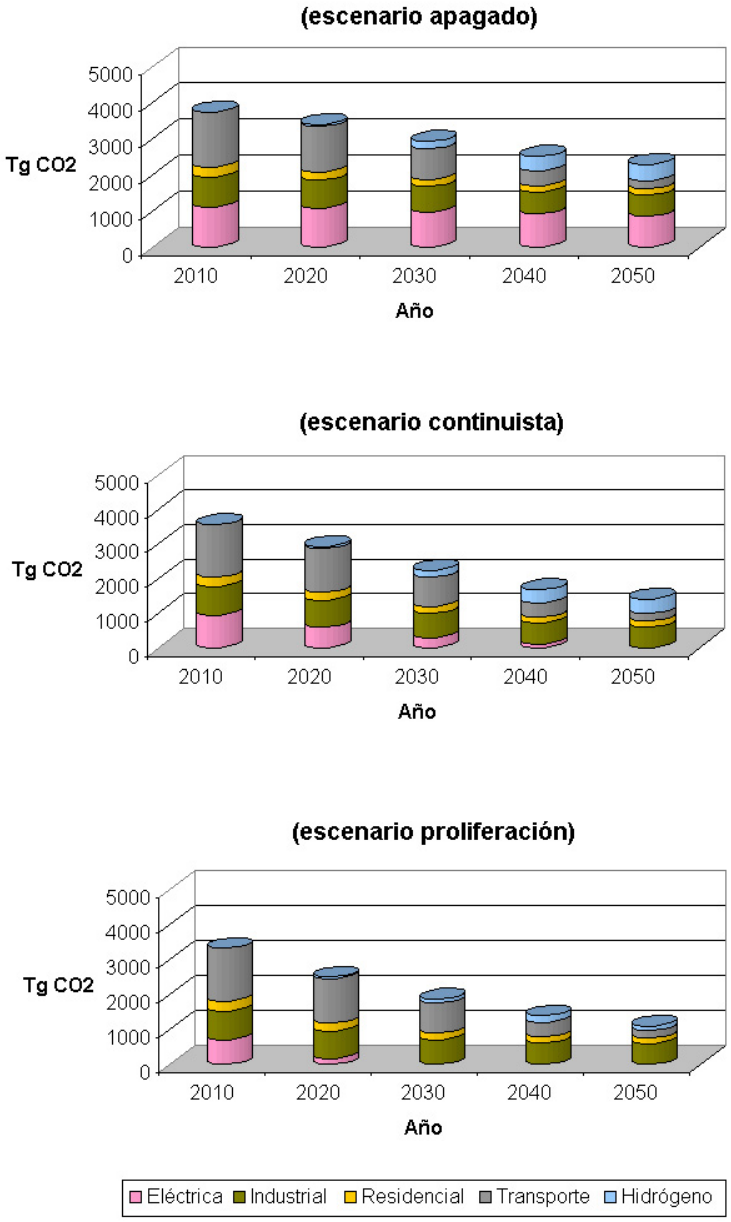


Figura 16.3: *Distribución de emisiones por sectores*

Por último, se indica el volumen de emisiones emitido a lo largo de todo el periodo de tiempo considerado, tomando las emisiones de cada año en particular como la media de la década. El resultado se muestra en la figura 16.4.

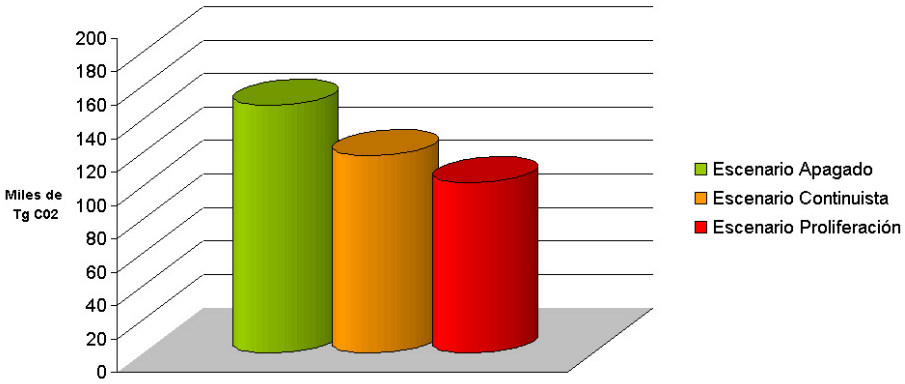


Figura 16.4: *Volumen total de emisiones acumuladas*

Parte III

Conclusiones

Capítulo 17

Conclusiones sobre el modelo básico

Una vez llevado a cabo el análisis precedente, llega el momento de bosquejar unas primeras conclusiones. Es preciso señalar que dichas conclusiones no son en modo exhaustivas, y que el modelo predictivo creado es una poderosa herramienta que puede ser empleada para analizar los resultados generales que cabe esperar de la aplicación de unas u otras políticas medioambientales, o bien el impacto que cabe esperar del desarrollo de sistemas tecnológicos aplicables en función de unas estimaciones cuantitativas acerca de su implantación y efectividad.

De un modo u otro, con este modelo es posible juzgar la relevancia y la utilidad de dichas políticas y tecnologías, bien en términos absolutos, o bien, preferiblemente, en comparación con otras que estén en competencia.

En este caso, podemos analizar el impacto (o el nivel de éxito) de las medidas propuestas a modo de hipótesis al comienzo del informe y juzgar los resultados que pueden esperarse de ellas. Así mismo, para aumentar la fiabilidad de los resultados, es posible juzgar la sensibilidad del modelo con respecto a ciertos parámetros, modificándolos y observando el impacto que dicha variación tiene en los resultados finales. Esto es particularmente importante en aquellos parámetros más especulativos, ya que, si bien su valor cuantitativo no puede ser determinado con precisión, sí es posible hacerlo con la dependencia global del sistema con respecto a ellos.

Finalmente, una vez realizado el análisis de las distintas variantes paramétricas, se habrá abarcado un conjunto de escenarios razonablemente amplio, lo que permitirá extraer algunas conclusiones globales y proponer respuestas para las preguntas que se han ido formulando a lo largo de las primeras partes del informe.

17.1. Análisis de los resultados

El modelo construido puede ser contemplado como un sistema cerrado con una serie de datos de entrada (llamados parámetros) y otra serie de datos de salida (llamados resultados). En las siguientes tablas se resumen los principales:

Parámetro	**Fuente**
Crecimiento en consumo	Tomado de [25],[10]
Tasas de transferencia al H_2	Estimadas a partir de [44]
Tasas de ahorro por eficiencia	Estimadas a partir de [30]-[37]
Potencias instaladas	Estimadas a partir de [10],[6],[56],[57]
Horas equivalentes	Información técnica
Factores de conversión primaria-final	Información técnica
Eficiencia en producción de hidrógeno	Estimados a partir de [52]
Relaciones consumo uranio/potencia	Información técnica/Especulativos(GIV)
Coeficiente de termólisis	Especulativo
Relaciones energía/emisiones	Información técnica/Estimados a [25], [52]
Distribución de consumo por sectores actual	Tomado de [25], [50]

Tabla 17.1: *Principales parámetros del modelo*

Resultado
Evolución de la distribución de consumo por sectores
Reparto de la producción eléctrica
Reparto de la producción de hidrógeno
Reparto del abastecimiento de los otros sectores
Emisiones por sectores
Emisiones totales por décadas
Porcentaje de energía no renovable
Potencia nuclear instalada
Uranio consumido

Tabla 17.2: *Principales resultados del modelo*

Así pues, tomaremos los parámetros como datos de entrada, definiéndolos a partir de las hipótesis políticas y económicas previamente establecidas y ya desarrolladas en capítulos anteriores, y los resultados como datos de salida, derivados gracias al modelo a partir de los primeros.

Debido a la manera en que se ha planteado el modelo, un primer análisis de resultados debe ir apoyado necesariamente en la comparación de los tres distintos escenarios. Esto puede ser contemplado como un caso particularmente importante del método variacional antes comentado: el cálculo global del impacto del mayor o menor uso de la energía nuclear de fisión.

Por último, para realizar este análisis, resultaría necesario fijar de antemano unos criterios justificados y apoyados sobre la etapa previa de investigación, que permitan un establecimiento lo más claro y objetivo posible de los resultados que debe alcanzar un cierto escenario para poder ser calificado de "deseable" o "exitoso", y por lo tanto para poder juzgar el carácter beneficioso o perjudicial de un conjunto de parámetros de entrada (que a su vez representan a un conjunto de políticas reales, de ahí la importancia).

Puesto que el objetivo final del presente informe es determinar hasta qué punto es posible encontrar soluciones tecnológicas a la insostenibilidad del modelo energético actual, y siempre como marco de trabajo para determinar a partir de él las soluciones, igualmente necesarias, en las dimensiones social y política del problema, estos criterios de evaluación deben ir forzosamente ligados a la medida de la sostenibilidad de cada escenario. En torno a la definición del concepto de sostenibilidad no existe un consenso general, de modo que desde *El Observatorio* tomaremos la definición ya comentada en el capítulo 5, pero aplicada a un modelo general más que a una determinada fuente de energía.

Considerando que sólo se pretende analizar la problemática relacionada con la energía, los parámetros que determinan la sostenibilidad o insostenibilidad del modelo pueden ser acotados en gran medida, limitándolos a aquellos en los que la energía tiene más impacto (que además, resultan a su vez principalmente influidos por la producción y consumo de energía, y no por otros elementos). Así pues, el principal indicador es el relacionado con la contribución del sector energético al Cambio Climático, es decir, las emisiones de GEI, de las que, como se señalaba, el consumo de energía primaria de origen fósil es el principal responsable, por delante de otros factores contribuyentes tales como la agricultura, el cambio de uso de suelos, los residuos industriales, etc. (ver capítulo 3). Otros indicadores importantes que determinan lo sostenible de un escenario son el consumo de combustibles fósiles sobre el consumo total de energía, que indica lo dependiente que es el sistema de fuentes de energía agotables (y que en el caso de Europa resulta particularmente importante por la problemática añadida de la dependencia energética del exterior), o la cantidad de energía-uranio consumida, que también permite determinar la dependencia con respecto de esta otra fuente no renovable, pero que además indica la cantidad de residuos radiactivos de alta actividad generados (y que representan, en sí mismos, un impedimento específico para la sostenibilidad).

Lógicamente, nuestro modelo está orientado hacia estos indicadores, que pueden ser obtenidos a partir de sus resultados. En particular, se obtienen los niveles de emisiones (década a década y totales), las distribuciones de energía por sectores y origen, y la potencia nuclear instalada, así co-

mo el consumo de combustible de fisión (también década a década y total). En este último caso se ha comparado el consumo total de cada escenario con el total de las reservas mundiales estimadas. El objetivo de esto es hacer hincapié en la escasez de este recurso, que se pone especialmente de manifiesto cuando la utilización de la energía nuclear convencional alcanza niveles relevantes[1].

Así pues, para establecer el criterio únicamente queda por determinar qué valores de estos indicadores pueden considerarse positivos o negativos, lo que de nuevo nos sitúa en un problema difícil de abordar desde esta perspectiva:

- En primer lugar, el caso del Cambio Climático resulta particularmente complicado por varios motivos:

    · El Cambio Climático es un fenómeno global, por lo que la influencia de nuestro modelo en él es, en sí misma, imposible de calcular en la medida en que las emisiones de GEI de Europa suponen menos del 15 % de las globales. Así pues, a no ser que se hagan suposiciones acerca de lo que sucede en el resto del mundo, los niveles de emisiones que produzca un escenario particular en el modelo no pueden ser traducidos en efectos en el clima.

    · Como se vio en el capítulo 3, el IPCC ha establecido valores de concentraciones atmosféricas de CO_2 que corresponden a ciertos aumentos de temperatura media planetaria (y ha esbozado los efectos progresivamente graves que cabe esperar para cada una de estas concentraciones). El funcionamiento del sistema global de fuentes y sumideros del ciclo del Carbono es tremendamente complicado debido a la multitud de sinergias y efectos antagónicos presentes, por lo que sería demasiado complejo establecer una relación directa entre los niveles de emisiones globales de GEI (en Tg de CO_2 equivalente) y las concentraciones que producirán, en particular a largo plazo.

    · A pesar de ser el contribuyente más importante a la emisión de GEI, el sector energético no es el único que produce emisiones Los cluorofluocarbonados (CFC) y gases afines (HFC y HCFC) que se usan industrialmente en refrigeradoras o aerosoles de espuma y en la agricultura intensiva son responsables del 24 % de las emisiones globales de CO_2

[1] Un cálculo similar podría realizarse con los hidrocarburos, determinando los porcentajes de las reservas estimadas que consume cada uno de los escenarios. Sin embargo esto resultaría menos claro puesto que en primer lugar, existe menos consenso acerca de las reservas de hidrocarburos existentes, en segundo lugar se trata de un recurso cuyo uso está mucho más extendido que el de la energía nuclear, por lo que el porcentaje de consumo europeo resultaría menos significativo globalmente y por último debido a que los importantísimos factores políticos, industriales y económicos que intervienen en el agotamiento de los hidrocarburos (y que serán previsiblemente mucho más complejos que los asociados al agotamiento del uranio) escapan a los propósitos del informe.

equivalente. Además el metano (CH_4) producido principalmente en la descomposición enterética y los óxidos nitrosos muy utilizados en la fabricación de fertilizantes son responsables respectivamente del 15 % y 6 % de las emisiones globales de CO_2 equivalente.

Así pues, al establecer criterios para la evaluación de la evolución de las emisiones es necesario hacer algunas hipótesis adicionales. Con respecto al resto del mundo, puesto que el alcance de este modelo ha sido limitado expresamente a Europa, se hará la hipótesis más sencilla posible: la de suponer que la evolución de sus emisiones corre en paralelo con las de nuestro modelo[2]. Igualmente, se considerará que el porcentaje que supone la energía con respecto a las emisiones totales se mantendrá constante a lo largo de las décadas (asumiendo que en otros sectores se introducirán medidas equivalentes a las introducidas en éste).

De este modo el impacto antropogénico total sobre la atmósfera será proporcional al derivado de las emisiones del modelo. Aunque esto resulta evidentemente poco realista, no está en absoluto fuera de lugar dadas las características del informe: en efecto, hay que recordar que no pretende realizar predicciones precisas sobre lo que sucederá en el futuro, sino simplemente especular acerca de qué podría suceder si se adoptaran ciertas medidas, con el fin de saber qué medidas son adecuadas y cuáles no. Desde este punto de vista, complicar el análisis introduciendo elementos externos a él como las diferencias geopolíticas entre las distintas regiones del mundo o la influencia de sectores no energéticos, lejos de aportar información relevante, sólo enturbia los resultados. En definitiva, el impacto positivo o negativo de una determinada tecnología sobre las emisiones será el mismo en Europa que en cualquier otro lugar del planeta a pesar de que quizá después, desde un punto de vista económico o político, esa tecnología no pueda o no quiera ser implantada en otros lugares. De nuevo nos salimos del aspecto técnico de la cuestión.

Con las emisiones energéticas europeas convertidas en un reflejo de las emisiones totales mundiales es posible establecer ya un criterio cuantitativo. Como ya ha sido explicado, este criterio no puede basarse en la cantidad absoluta de emisiones, sino en su evolución. Así pues, adoptaremos como criterio de referencia el valor propuesto en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC publicado en 2007 de reducir los niveles de emisiones entre un 50 % y un 80 % respecto de las emisiones de 2000 para el año 2050. Puesto que es porcentual, este tipo de criterio se adapta bien a la proporcionalidad europea-global de emisiones planteada. De

[2]En definitiva, si es posible establecer un modelo tecnológico sostenible y autónomo (como se pretende en el presente informe), es posible también, al menos desde un punto de vista técnico, imaginar una generalización global de los sistemas y tecnologías implicados.

cumplirse esto, la concentración de CO_2 en la atmósfera comenzaría lentamente a dejar de aumentar, alcanzando finalmente un máximo en torno a las 450 ppm y una subida máxima de la temperatura global de entre 2^oC y 2.5^oC. Por supuesto, para lograr disminuciones en la concentración atmosférica de GEI serán precisos tiempos mucho más largos (y probablemente también medidas más drásticas).

- Con respecto a la dependencia de fuentes de energía no renovables y la producción de residuos radiactivos, no resulta tan sencillo fijar una cantidad límite: ambos son indeseables y el objetivo debería ser reducirlos al máximo. Para establecer ese límite sería necesario, en el primer caso hacer predicciones macroeconómicas y políticas con el fin de determinar los precios que podrían alcanzar los hidrocarburos y su impacto sobre la economía de la zona (fijando el límite en algún efecto derivado, como la aparición de crisis económicas o sociales de cierta gravedad) y en el segundo calcular estadísticamente los incidentes y accidentes nucleares y la capacidad técnica y política para gestionar los residuos producidos que cabría esperar en las cinco próximas décadas dependiendo de la actividad en el sector, así como el aumento de las dosis recibidas por la población como resultado (y los correspodientes aumentos en la incidencia de las patologías relacionadas). En este caso, fijar un límite concreto resulta difícil.

17.2. Escenarios básicos

En primer lugar se mostrarán los resultados obtenidos para el escenario básico, tal y como ha sido propuesto en capítulos anteriores. En este escenario se producirá la comparación entre los efectos de los tres escenarios nucleares considerados (Apagado, Continuista y Proliferación). Así pues, de acuerdo con los criterios de evaluación establecidos, en las siguientes figuras se pueden ver, para cada escenario, los niveles de emisiones por décadas (figura 17.1) y acumulados (17.2), los porcentajes de energía fósil y nuclear (17.3)-(17.5) y los consumos de uranio también acumulados y por décadas (17.7 y 17.8).

Tras observar los datos representados en las figuras, se pueden alcanzar dos conclusiones inmediatas: en primer lugar, los tres escenarios conducen a descensos en las emisiones, a pesar de experimentar un aumento continuado en los niveles de consumo de energía primaria. Esto puede considerarse un resultado positivo, ya que indica que al menos en una primera aproximación, las medidas propuestas son suficientes para producir una inversión en la tendencia actual. En segundo lugar, no se aprecian diferencias cualitativas entre los tres escenarios, sino sólo cuantitativas: es decir, si bien (como veremos) se pueden hacer distinciones de gran relevancia entre ellos, no presentan distintos comportamientos, obteniéndose en todos los casos un descenso suave en los

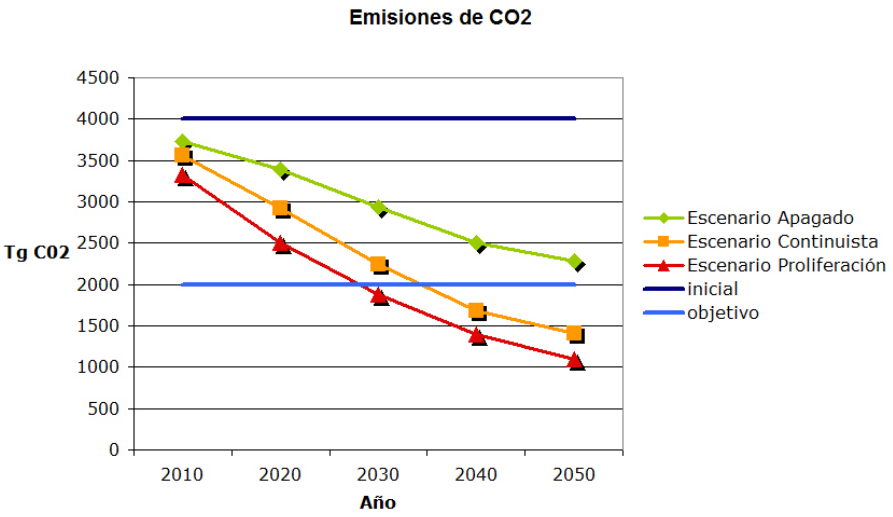


Figura 17.1: *Evolución de las emisiones para los tres escenarios*

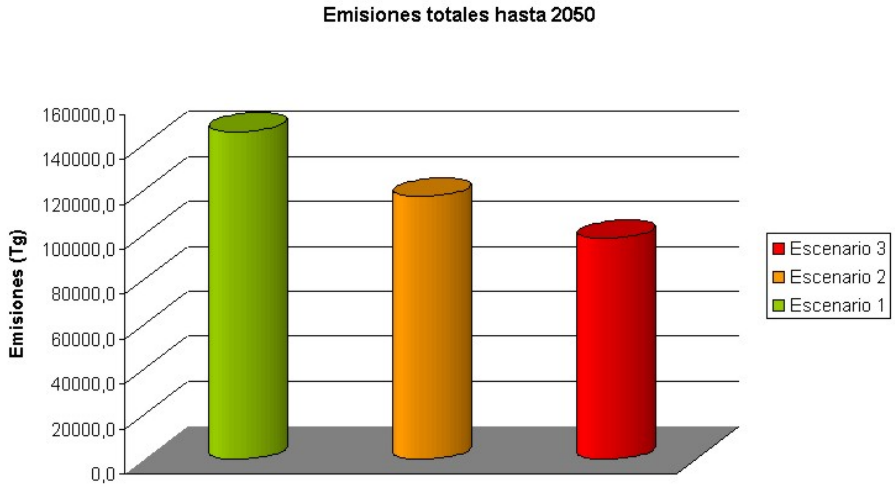


Figura 17.2: *Emisiones acumuladas hasta 2050*

niveles de emisiones. Así mismo, en los tres casos, se puede observar una cierta tendencia a la saturación en la última década. Esta tendencia viene marcada por el umbral de energía fósil mínima requerida en cada uno de ellos que no ha podido ser reemplazada por ninguno de los métodos propuestos (ver figuras 17.3-17.5).

Para realizar comparaciones entre los tres escenarios se hace necesario recurrir a un criterio cuantitativo, puesto que la diferencia entre ellos está más asociada a *cuánto* emiten que a *cómo* lo hacen. De este modo, recuperando los datos del informe del IPCC (expuestos en el capítulo 3),

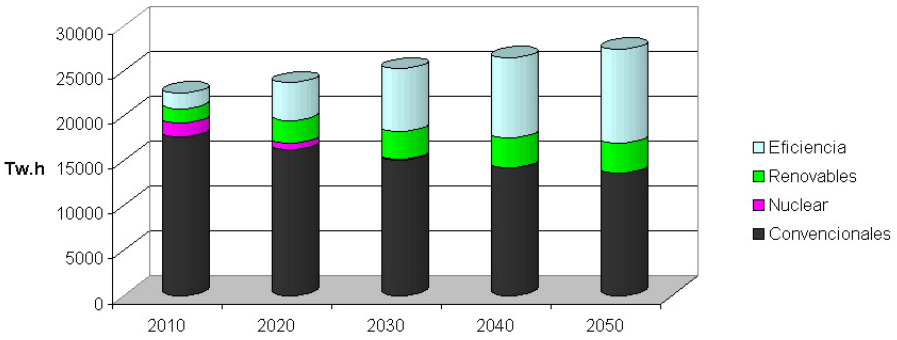


Figura 17.3: *Abastecimiento de energía primaria según su fuente en el Escenario Apagado, por décadas*

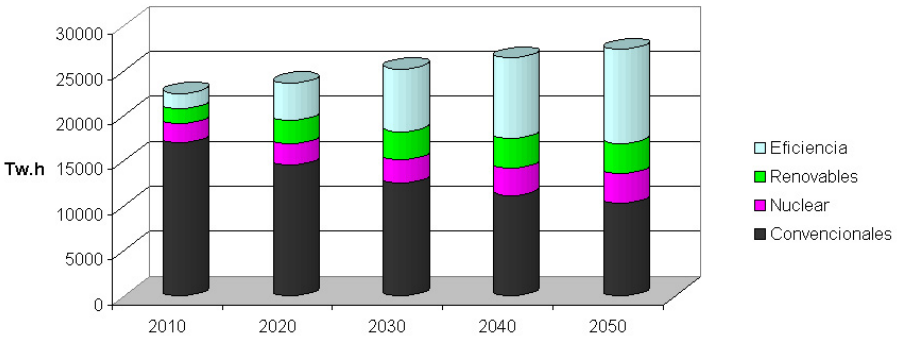


Figura 17.4: *Abastecimiento de energía primaria según su fuente en el Escenario Continuista, por décadas*

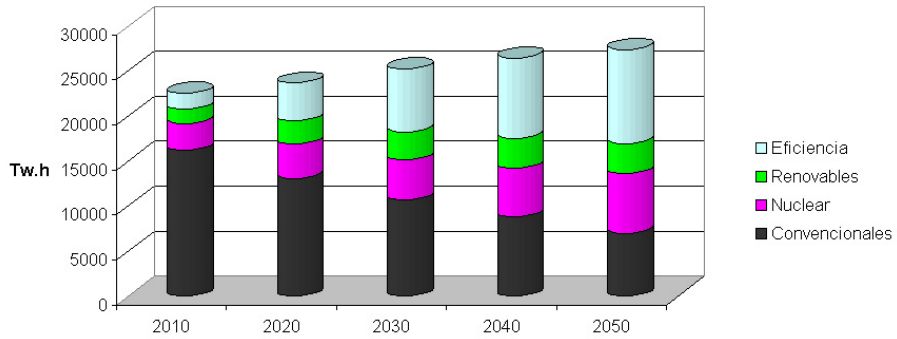


Figura 17.5: *Abastecimiento de energía primaria según su fuente en el Escenario Proliferación, por décadas*

El Observatorio tomó como objetivo reducir a la mitad las emisiones del año 2000 (en el entorno de los 4000 Tg en Europa) para el año 2050, dada la gravedad de las consecuencias previstas en caso de reducciones menores.

Establecer dicha cantidad de emisiones como límite de lo aceptable tampoco resulta com-

pletamente clarificador: como puede verse en el gráfico 17.1, todos los escenarios terminan por alcanzarlo (aunque el primero cruzaría la línea hacia el final de la última década del modelo), siendo la única diferencia a ese respecto *cuándo*: la utilización o no de la tecnología nuclear convencional puede suponer una diferencia de hasta 30 años en el momento en que dicho límite es alcanzado.

Esta evolución puede ser analizada en las gráficas 17.3-17.6, que muestran el abastecimiento de energía primaria emisiones por sectores. Aquí, el efecto que tiene la energía nuclear puede apreciarse adecuadamente: en efecto, en el Escenario Apagado, las medidas orientadas a la eficiencia y la generación eléctrica mediante fuentes renovables no bastan para afrontar la demanda eléctrica, por lo que una fracción de ésta (en torno al 25 %, ver figura 17.6) debe ser producida todavía a partir de hidrocarburos. En el escenario continuísta, esta situación se logra corregir en la década de 2040, en la que toda la energía eléctrica es producida a partir de fuentes renovables o nucleares. Por otra parte, la cantidad de energía nuclear es aproximadamente la justa para esto, ya que el consumo de hidrocarburos para la generación de energía hidrógeno no desciende significativamente con respecto al escenario anterior (ver figuras 15.14 y 15.15). Finalmente, en el escenario de máxima proliferación, la energía eléctrica producida en las centrales nucleares es suficiente para terminar con el consumo de hidrocarburos en la generación eléctrica hacia mediados de la década de 2020 y para sostener la implantación de la economía del Hidrógeno sin recurrir en ningún momento a cantidades importantes de combustibles fósiles. En otros términos, el importante exceso de generación eléctrica es trasvasado a otros sectores mediante el hidrógeno, reduciendo las emisiones correspondientes a la generación de éste. Hay que destacar que un aumento mayor de la generación eléctrica conduciría a una saturación, ya que una vez cubierta también la generación de energía-hidrógeno el exceso eléctrico no podría emplearse en ningún otro sector y no podría utilizarse.

Hasta aquí la energía nuclear convencional aparece como una importante herramienta para lograr la reducción de emisiones, pero hay dos aspectos que no deben ser olvidados antes de poder alcanzar conclusiones con respecto a ella:

En primer lugar, aunque el impacto de su utilización puede verse claramente en la diferencia entre los escenarios, revelando un efecto significativo, el empleo de la energía nuclear no es, en términos absolutos, la medida de mayor impacto del modelo: en efecto, como puede verse en la figura (17.5), incluso en el caso en que su uso fuera más extendido, la energía nuclear no sobrepasaría nunca el 25 % del consumo total de energía primaria, quedando por debajo de la participación de las energías renovables en el caso moderado y por debajo del impacto total de la eficiencia en todos los escenarios. Por otra parte, como se verá más adelante, la eliminación, por ejem-

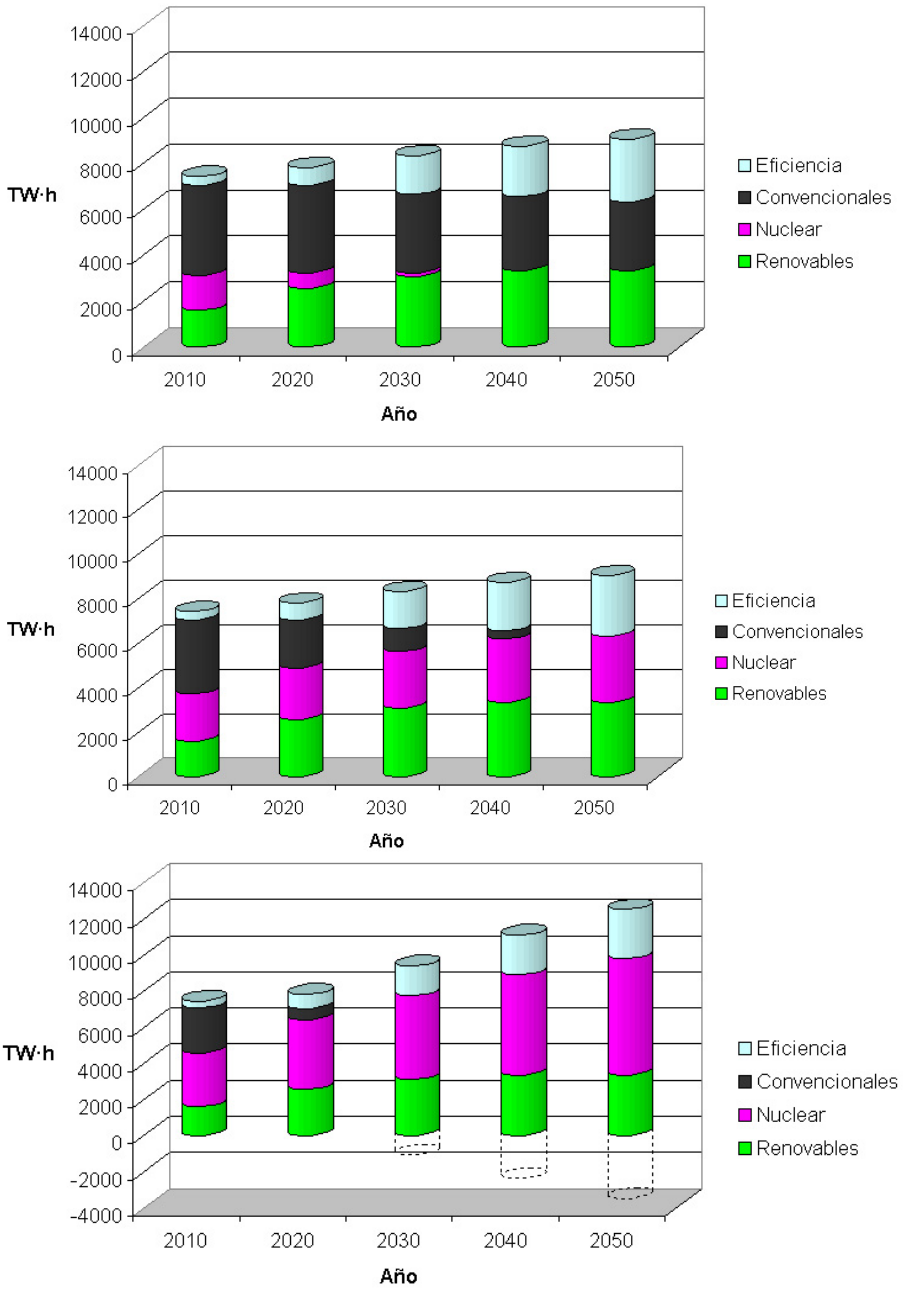


Figura 17.6: *Reparto de la producción eléctrica por fuentes y décadas*

plo, de las tecnologías basadas en hidrógeno produce unos efectos mucho más profundos que los que se derivan de los distintos niveles de utilización de la tecnología nuclear en estos tres escenarios.

En segundo lugar, como ya se señaló antes, el nivel de emisiones no es el único criterio a tener en cuenta a la hora de determinar la viabilidad de un escenario: al menos se han señalado ya otros

dos relevantes en nuestro modelo, la dependencia final de los combustibles fósiles y la generación de residuos radiactivos.

De nuevo, en el primer caso sólo obtenemos diferencias cuantitativas, ya que no hay diferencias de órdenes de magnitud entre los escenarios, ni se puede afirmar en ninguno de ellos que se haya logrado una independencia total con respecto a los combustibles tradicionales: si bien se han logrado reducciones muy importantes (limitándolos a que oscilan entre el 20 % y ligeramente por debajo del 50 %, dependiendo del escenario), sigue existiendo en cualquier caso un límite inferior de sectores no transferibles. En este aspecto es especialmente relevante el efecto saturación que se produce con respecto a la energía nuclear: un exceso de producción no es suficiente para reducir esta dependencia (con las emisiones que lleva asociadas), puesto que está originada por aquellos sectores de la economía (principalmente industriales y de transporte) en los que los combustibles fósiles no pueden ser sustituidos definitivamente por la electricidad o el hidrógeno. Por supuesto, las estimaciones que se han realizado acerca de los porcentajes de transferencia hacia el hidrógeno son especulativas, y por lo tanto el nivel exacto en el que se situará este umbral no puede asegurarse, pero parece claro que no será posible realizar una transferencia completa en todos los sectores, incluso aunque sólo se consideren aspectos puramente tecnológicos (que, llegados a este punto, probablemente no serían los más importantes). Esto es bastante razonable teniendo en cuenta la actual omnipresencia de los hidrocarburos en todos los aspectos energéticos de nuestra sociedad.

Respecto a la generación de residuos radiactivos, el indicador más adecuado es sin duda el consumo de mineral de uranio. Como ya se vio en el capítulo 6, la cantidad de mineral empleada es transformada casi integramente en desechos: primero aproximadamente el 90 % del mineral acaba en la forma de desechos de baja o media actividad durante el proceso de refinado, mientras que el 10 % restante se convierte en combustible nuclear. Esta última parte es la que se introduce en los reactores y al cabo de uno o dos años de operación queda convertida casi íntegramente en residuos radiactivos de alta actividad.

En las figuras 17.7 y 17.8 se pueden apreciar los consumos de mineral de uranio a lo largo de las décadas para los tres escenarios, así como la cantidad total. De este modo, la décima parte de dicha cantidad total quedará convertida en residuos de alta radiotoxicidad con una vida media de miles o decenas de miles de años. Como puede apreciarse, en el caso de Apagado, el consumo sería insignificante en 2030 y habría desaparecido por completo la década siguiente. Por contra, en el Escenario Proliferación, el consumo final habría crecido más de un 500 % con respecto a los niveles actuales. Respecto al consumo total, cabe destacar que en este último caso, Europa habría consumido en cuatro décadas el 10 % de las reservas de uranio disponibles. Incidentalmente,

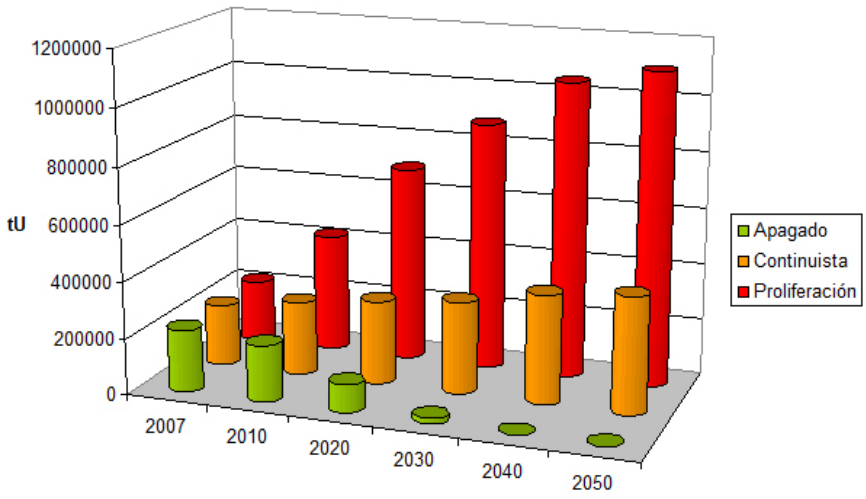


Figura 17.7: *Evolución en el consumo de mineral de uranio en los tres escenarios (acumulado en cada década)*

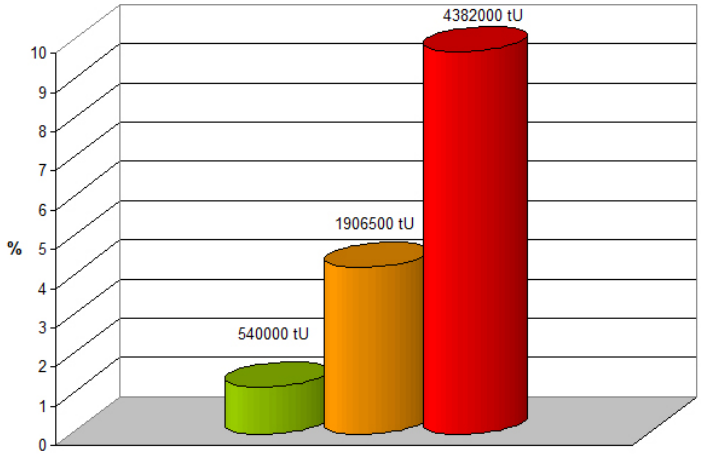


Figura 17.8: *Porcentaje de las reservas mundiales estimadas de mineral de uranio consumidas en cada uno de los escenarios hasta 2050 (sobre unas reservas totales estimadas de 45 MtU)*

puesto que la población Europea está ligeramente por debajo de ese porcentaje con respecto a la población mundial, es evidente que dicho modelo no es en absoluto exportable: aplicado de modo global, en un mundo con más de 5000 reactores nucleares, el uranio se agotaría completamente antes del fin del periodo modelado en este informe. Aunque la cuestión de cuánto uranio "le toca" a Europa en el reparto mundial escapa por completo a los objetivos de este informe (puesto que además de las implicaciones económicas y políticas tiene una dimensión puramente ética), queda

patente que el impacto sobre las reservas de la utilización de la energía nuclear hasta estas escalas es muy considerable.

Sin embargo, la generación de residuos no termina ahí, ya que también se debe tener en cuenta el desmantelamiento de todas las centrales construidas y de aquellas ahora existentes (cuyos restos también constituyen residuos radiactivos, a menudo de gran radiotoxicidad), así como todos los procesos industriales asociados a la generación nuclear (transporte, refinado, almacenamiento, etc.) cuyo volumen es también proporcional al consumo de uranio. Por último, el riesgo de accidentes no puede ser nunca descartado y crecería parejo al nivel de proliferación. Incluso sin considerar la posibilidad de un accidente serio, el riesgo sanitario y medioambiental de un incremento correspondiente de pequeños incidentes, escapes, contaminaciones, etc. (como los que, de hecho, ya han sucedido en diversas ocasiones en Europa) no puede ser desestimado.

Por último, hay también que señalar que si las reservas mundiales de uranio se agotaran (o su suministro descendiera significativamente) hacia 2050 tal y como sugiere el último escenario del modelo, la inversión económica de la mayoría de los reactores construidos a partir de 2020 no sería rentabilizada, conduciendo a gravísimas pérdidas a la industria nuclear, a la que se puede suponer una gran importancia estratégica en dicho escenario. Además, los primeros reactores nucleares de fusión comerciales deberían estar disponibles en algún momento de la década de 2050. Llegado ese momento, independientemente de las reservas de uranio mineral restantes, la energía de fisión debería ser sustituida por la de fusión tan rápido como sea técnica y económicamente posible, lo que de nuevo podría conducir a problemas con la amortización de la última generación de reactores convencionales (o lo que sería peor: un estancamiento en la implantación de la fusión debido a los intereses financieros de la industria nuclear), tanto más graves cuanto mayor su volumen.

En definitiva, hay que recordar que el Escenario Proliferación planteado en el modelo es principalmente especulativo y supone un uso de la energía de fisión claramente por encima de cualquier planteamiento serio, tanto en lo económico como en lo relativo a la seguridad radiológica y medioambiental.

Capítulo 18

Variaciones sobre los escenarios básicos

Una vez alcanzadas las conclusiones principales del modelo general, pasaremos a hacer variaciones sobre los distintos parámetros con el fin de determinar su importancia relativa observando el impacto de su variación sobre los resultados. Así pues, a continuación se presentan varios escenarios alternativos en los que todos los parámetros excepto uno permanecen iguales que en el escenario estándar.

Como lo que se busca es subrayar el efecto de la variación, estas variaciones serán lo más profundas posibles (siempre dentro de unos órdenes razonables), de tal manera que los cambios en los resultados aparezcan claros y resulten fácilmente comparables. Por el mismo motivo, no se incluirán escenarios mixtos en los que se varían varios parámetros.

18.1. Escenario alternativo 1: consumo constante

Aunque una de las hipótesis básicas del modelo es precisamente que el consumo seguirá su tendencia actual de crecimiento, lo que se busca con ella es sólo simplificar el análisis, ya que la problemática asociada a una reducción del consumo merecería por sí sola un informe detallado y además incluye muchos más factores políticos y sociales que estrictamente técnicos. Sin embargo, es interesante comprobar el efecto que podrían tener políticas centradas en una disminución del consumo (al menos de energía, por lo que respecta al presente informe) aplicadas en paralelo con las ya propuestas.

Así, supondremos en este escenario que el consumo se mantiene constante e igual al de la pri-

mera década del modelo. Estrictamente hablando esto no constituye una reducción en el consumo pero un cambio de tendencia de tales características supone ya una transformación tan profunda en la mecánica económica de nuestra sociedad que resulta suficiente para observar cambios en los resultados. De nuevo, escapa a los objetivos de este informe el discutir el significado o la viabilidad de esta alternativa: tan sólo se muestran sus efectos.

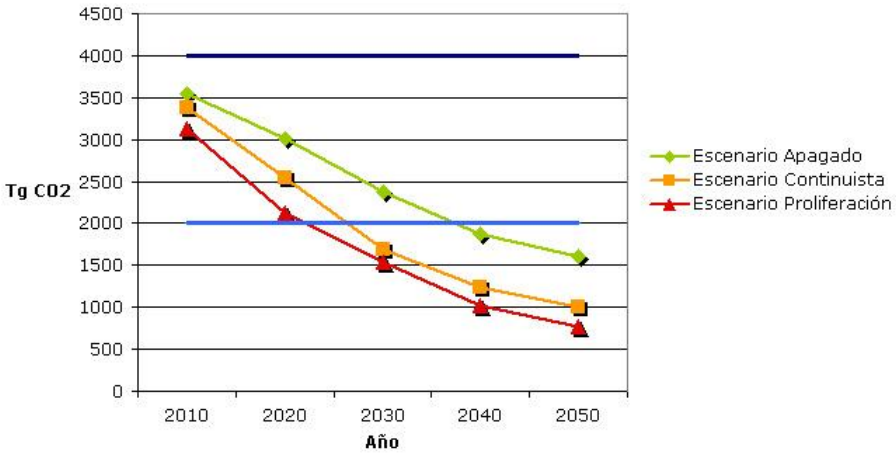


Figura 18.1: *Evolución de las emisiones por décadas (EA 1)*

Como se puede observar en la gráfica 18.1, todos los subescenarios reducen claramente sus emisiones, al mismo tiempo que se acortan distancias entre el Escenario Apagado y los escenarios nucleares. Las emisiones totales integradas (gráfica 18.3) muestran un descenso de entre el 20 % en el Escenario Apagado y un 15 % en el Proliferación. Estos resultados, aunque significativos, quizá no parecen tan fundamentales como sugeriría a priori el cambio tan importante que se ha realizado en el modelo. En particular, en la gráfica (18.2) se puede ver cómo la tendencia en los distintos escenarios resulta parecida, sin grandes cambios entre ellos (más allá del achatamiento producido por el consumo constante).

Conviene, no obstante, recordar que la eficiencia está establecida en el modelo de manera porcentual sobre el consumo (y también, en menor medida e indirectamente, el ahorro producido por la transferencia al hidrógeno). Esto significa que una buena parte del crecimiento del consumo es absorbida por una eficiencia adicional que en el escenario alternativo no aparece. Así mismo, permite subrayar la importancia de la eficiencia, que en definitiva, aunque en el modelo aparezca como una forma de "generación", implica también una reducción real en el consumo de energía. De ahí las tendencias similares que sigue el consumo de energía "real" en la gráfica 18.2.

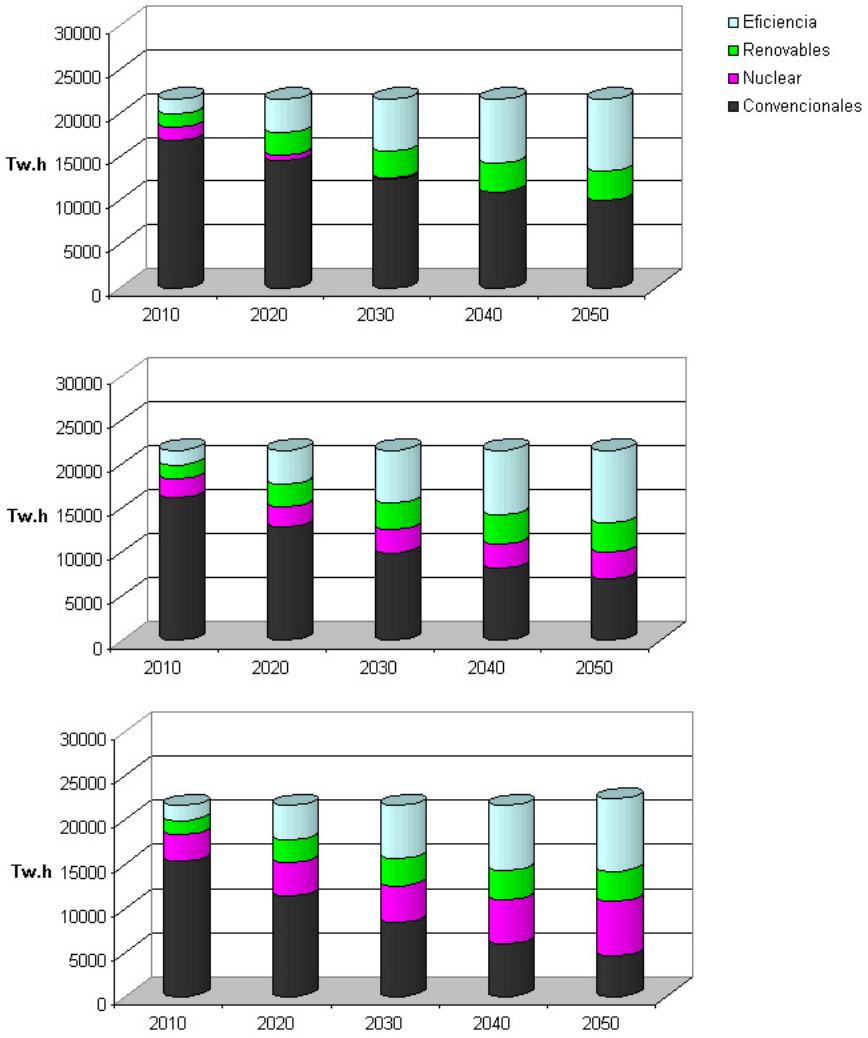


Figura 18.2: *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 1)*

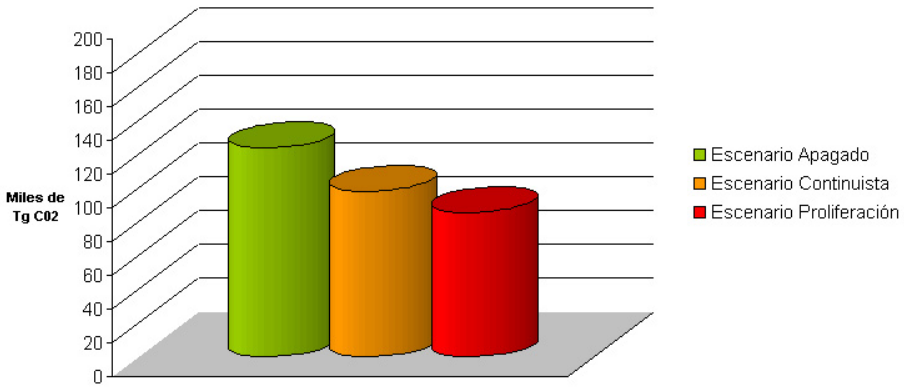


Figura 18.3: *Emisiones acumuladas (EA 1)*

Hay que señalar también que en el Escenario Proliferación aparece un pequeño exceso de producción de energía eléctrica en la última década (debido a que la demanda de hidrógeno se ve superada y ya no existe aplicación posible dentro del modelo para el excedente de electricidad), que se ve reflejado en un pequeño aumento de la energía primaria de esa década en la gráfica 18.2. No obstante, este excedente es pequeño (y por lo tanto puede considerarse que no deforma sustancialmente los resultados): apenas un 11 % sobre el total de energía nuclear y un 3.6 % sobre el total de la energía primaria.

18.2. Escenario alternativo 2: no hay transición al hidrógeno

Una de las principales medidas introducidas en el modelo destinadas a reducir las emisiones es la transición a la economía del Hidrógeno: esta tecnología no sólo produce reducciones importantes en sí misma debido a un importante incremento del rendimiento energético que conlleva, sino que además permite trasvasar el exceso energético alcanzable en la producción eléctrica a todos los otros sectores.

Así pues, para evaluar el impacto de esta tecnología, haremos ahora la hipótesis de que no se produce esta transición al hidrógeno y observaremos la diferencia.

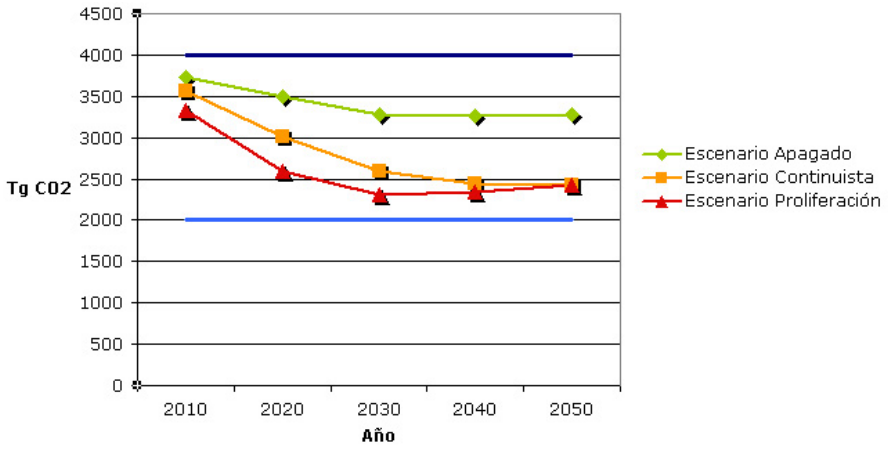


Figura 18.4: *Evolución de las emisiones por décadas (EA 2)*

Como se puede observar, en este escenario alternativo, la importancia relativa de los sectores industrial, residencial y, principalmente, transporte, permanece prácticamente inalterada, creciendo además proporcionalmente con el consumo. Esto es muy grave, ya que en estos sectores la única alternativa a las fuentes alternativas es la eficiencia, que no resulta suficiente por sí sola

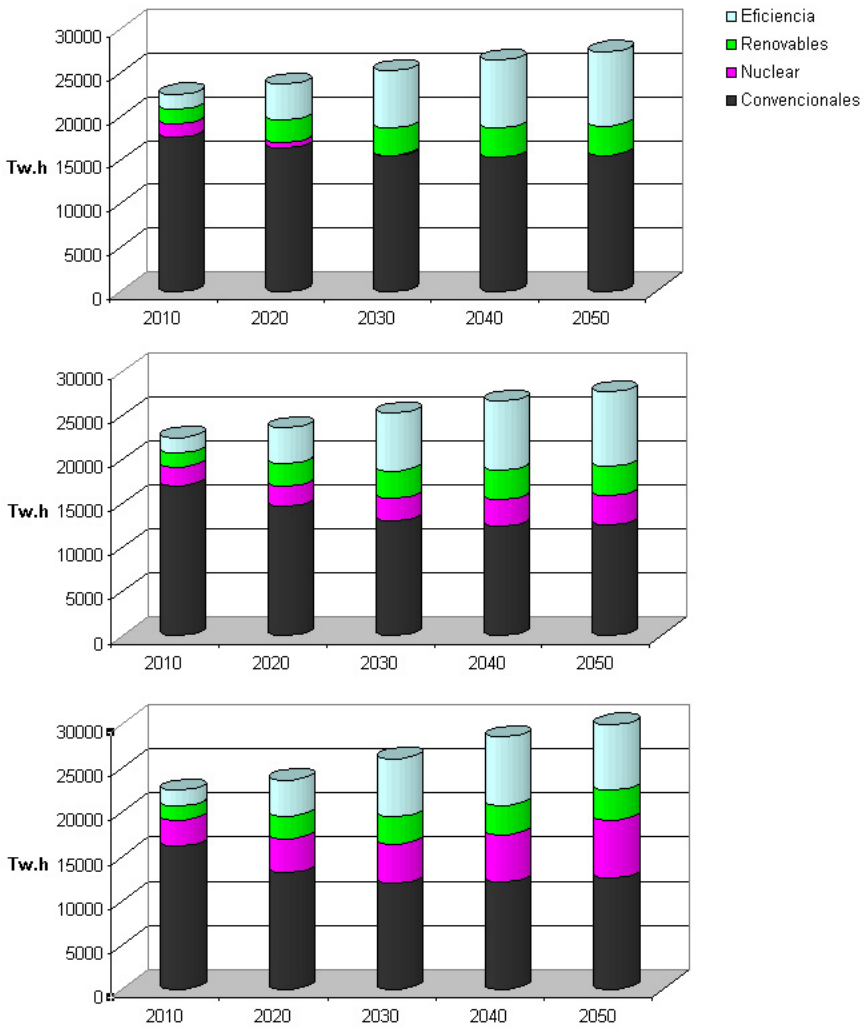


Figura 18.5: *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios(EA 2)*

para reducir satisfactoriamente las emisiones. Así, como se puede ver en la figura 18.4, en todos los escenarios se produce un sustancial empeoramiento respecto del estándar, del orden del 25 % en las cifras integradas a lo largo de todas las décadas (figura 18.6).

Resulta todavía más importante que el propio empeoramiento de los niveles de emisiones observar que en todos los casos, las emisiones se estabilizan en niveles constantes tan pronto como el 2030: esto es debido a que ahora la fracción de energía "inalcanzable" que debe permanecer generada por medios convencionales es mayor y por lo tanto, el resto de las medidas propuestas, menos eficientes. En el caso del Escenario Proliferación se da el caso sorprendente de que, no sólo no puede descender de cierto límite, sino que, a partir de 2030 crece, llegando a encontrarse con el escenario continuista en 2050 (como si no hubiera diferencias entre ellos). La explicación

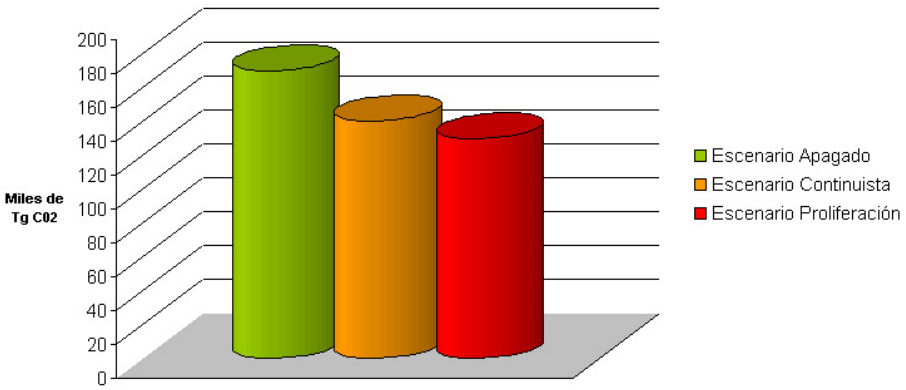


Figura 18.6: *Emisiones acumuladas (EA 2)*

a esto se encuentra de nuevo en el papel del hidrógeno como vector energético: la generación de energía eléctrica queda cubierta en el Escenario Proliferación completamente mediante renovables, eficiencia y nuclear en la década de 2030 (mientras que en el Continuista eso se consigue sólo en la de 2050). Sin embargo, en este escenario alternativo, el resto de energía eléctrica producida por las centrales nucleares que siguen construyéndose no puede emplearse en ningún otro sector (como se hace en el estándar) y así, las emisiones vuelven a crecer al ritmo del consumo y al cabo de dos décadas las emisiones son las mismas que en el Continuista. En otros términos: todas las centrales construidas a partir de 2030 son inútiles (el excedente de energía eléctrica no utilizada en el modelo supone en este caso más de la mitad de la energía nuclear producida y un 13 % del total de energía primaria).

Evidentemente, una situación en la que Europa produce más de un 10 % de energía extra a la que no puede dar salida no tiene mucho sentido. Sin embargo, sí permite extraer una conclusión importante: sin tecnologías de hidrógeno, el potencial de aplicación de la energía nuclear está muy limitado.

18.3. Escenario alternativo 3: la producción de hidrógeno mediante fósiles es más contaminante de lo esperado

Como una versión suavizada de la situación anterior, podemos suponer que la transición a la economía del hidrógeno se produce, pero los valores de rendimiento en su producción a partir de combustibles fósiles no son tan altos como se ha estimado y las emisiones que producen son equivalentes a las que producen otros sectores por kW·h producido a partir de hidrocarburos.

Este escenario alternativo es importante también debido a que el parámetro que se altera es todavía bastante especulativo, y conviene considerar la posibilidad de que acabe adoptando valores menos optimistas para dar robustez y flexibilidad al modelo.

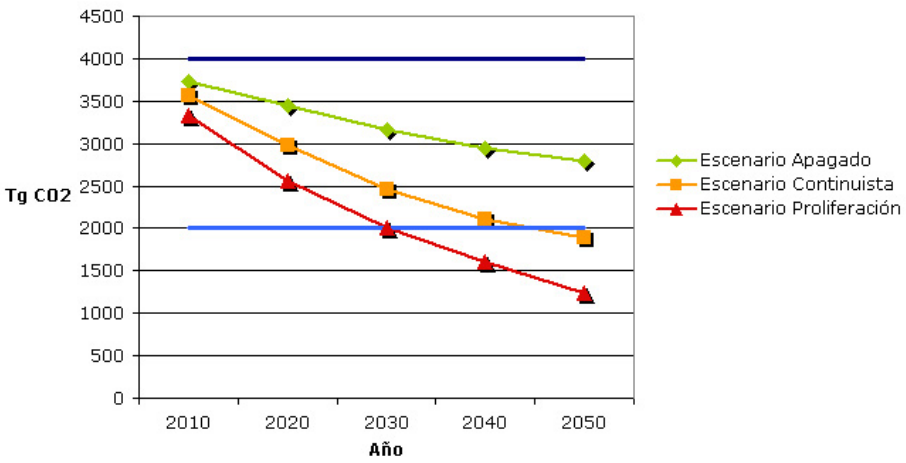


Figura 18.7: *Evolución de las emisiones por décadas (EA 3)*

Así pues, duplicando el ratio Tg CO_2 emitido por TW·h producido, obtenemos unos niveles de emisiones similares a los de otros sectores (inferiores a los del transporte pero superiores a los de residencial e industria). De este modo, volvemos a una situación mucho más parecida a la estándar, con todos los escenarios siguiendo tendencias similares, aunque con valores mayores. El incremento de emisiones acumuladas oscila entre un 5 % y un 9 %.

En este caso, los escenarios más afectados son, lógicamente, los más desnuclearizados, ya que dependen mucho más de los hidrocarburos para la producción de hidrógeno (ya que en el Escenario Proliferación existe un excedente eléctrico que puede aprovecharse para la producción de hidrógeno mediante electrolisis y una pequeña fracción extra producida gracias a la termólisis).

Como conclusión, se puede afirmar que este parámetro es importante pero que una variación significativa no invalida el modelo. De hecho, suponer unos niveles de emisiones cercanos a los del transporte es un caso tan conservador que resulta incluso poco realista: en cualquier caso parece muy improbable que la diferencia con respecto del modelo estándar pueda ser mayor que la obtenida aquí, y muy probable que sea menor.

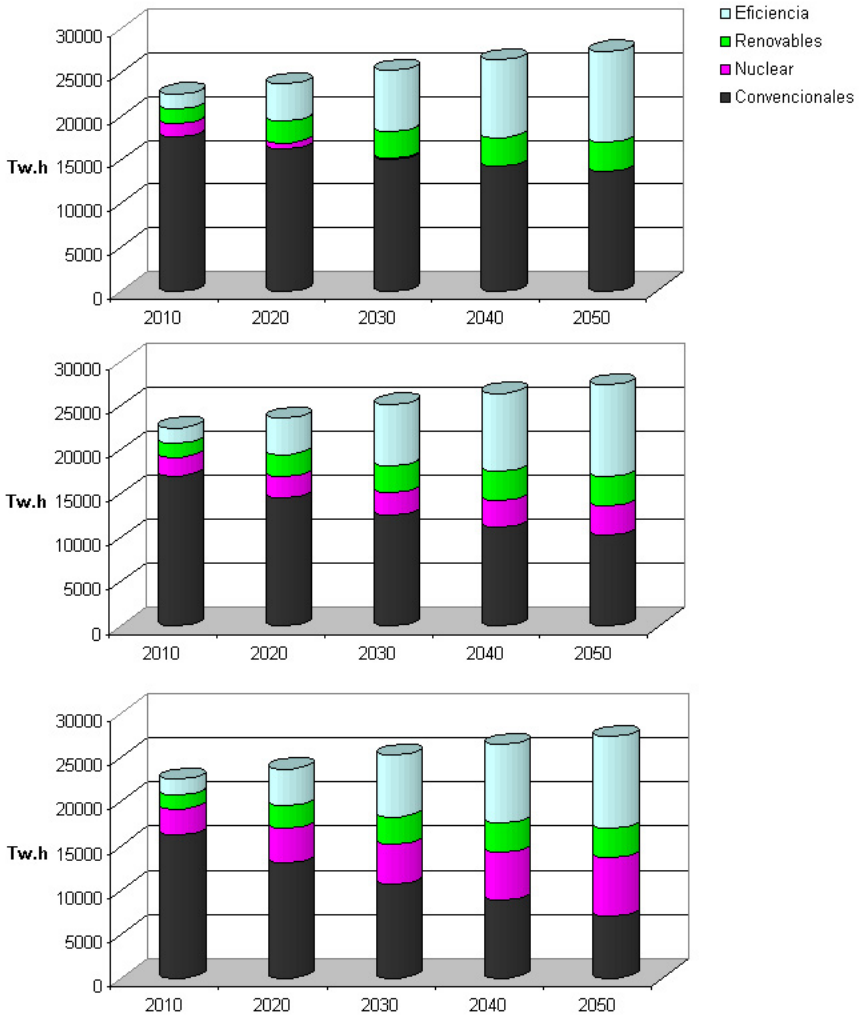


Figura 18.8: *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 3)*

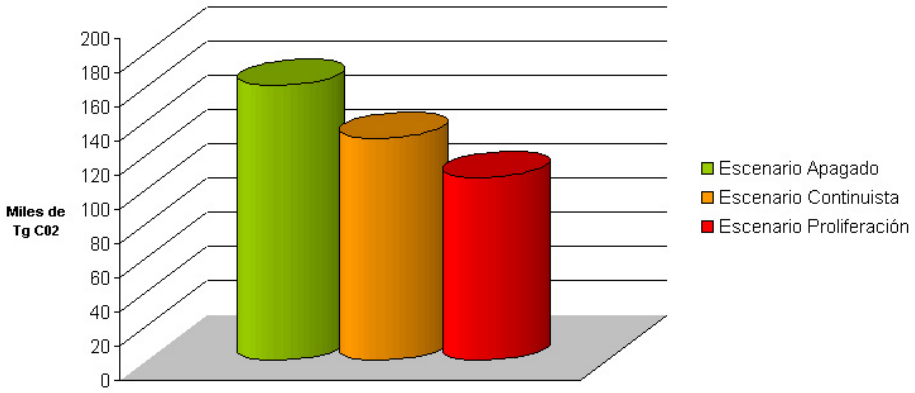


Figura 18.9: *Emisiones acumuladas (EA 3)*

18.4. Escenario alternativo 4: el coeficiente de termólisis es mayor

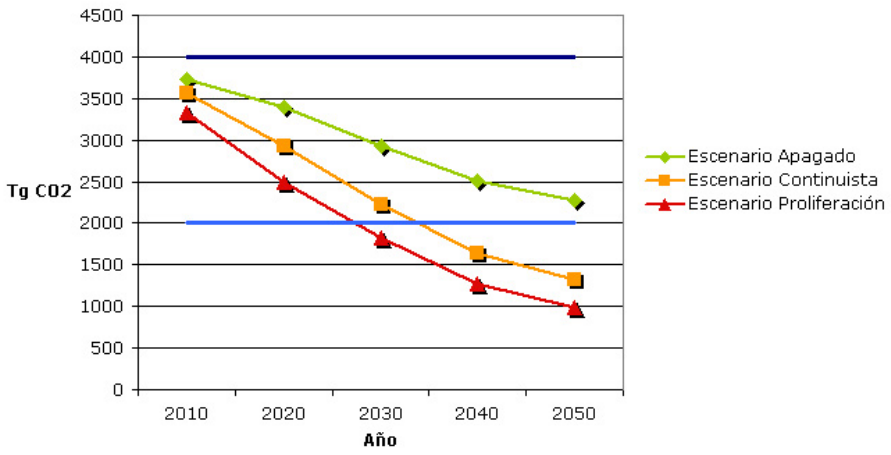


Figura 18.10: *Evolución de las emisiones por décadas (EA 4)*

Otro de los parámetros esencialmente especulativos que contiene el modelo es el coeficiente de termólisis, que indica (de manera muy simplificada) la cantidad de energía-hidrógeno que podrá producirse en una central GIV mediante la termólisis. Esta energía ha sido expresada como una producción "extra" añadida a la eléctrica y relacionada con ésta mediante el mencionado coeficiente. Como la tecnología GIV está todavía lejos de ser una realidad, no existe información técnica que permita determinar de manera segura este valor, ni tan siquiera su orden de magnitud. En cualquier caso, parece evidente que este tipo de sistemas estarían implementados en las centrales con carácter secundario, buscando aprovechar una energía térmica que no pudiera emplearse para producir electricidad. Así pues, en cualquier caso parece razonable suponer que la producción de hidrógeno por termólisis no superará la de electricidad.

Un parámetro tan especulativo como éste introduce una incertidumbre importante en el modelo, de modo que se realiza este escenario para ver el impacto de una variación importante en él: el coeficiente de termólisis se cuadriplica, obteniendo centrales GIV que producen tanta energía en forma de hidrógeno como en forma de electricidad (de nuevo se trata de una hipótesis conservadora y poco probable).

El resultado, como se puede ver en las figuras 18.10-18.12, es que la diferencia es muy pequeña incluso para una variación tan grande del parámetro: en ningún caso alcanza una relevancia suficiente como para cambiar significativamente el modelo (además, sólo es aplicable a los escenarios

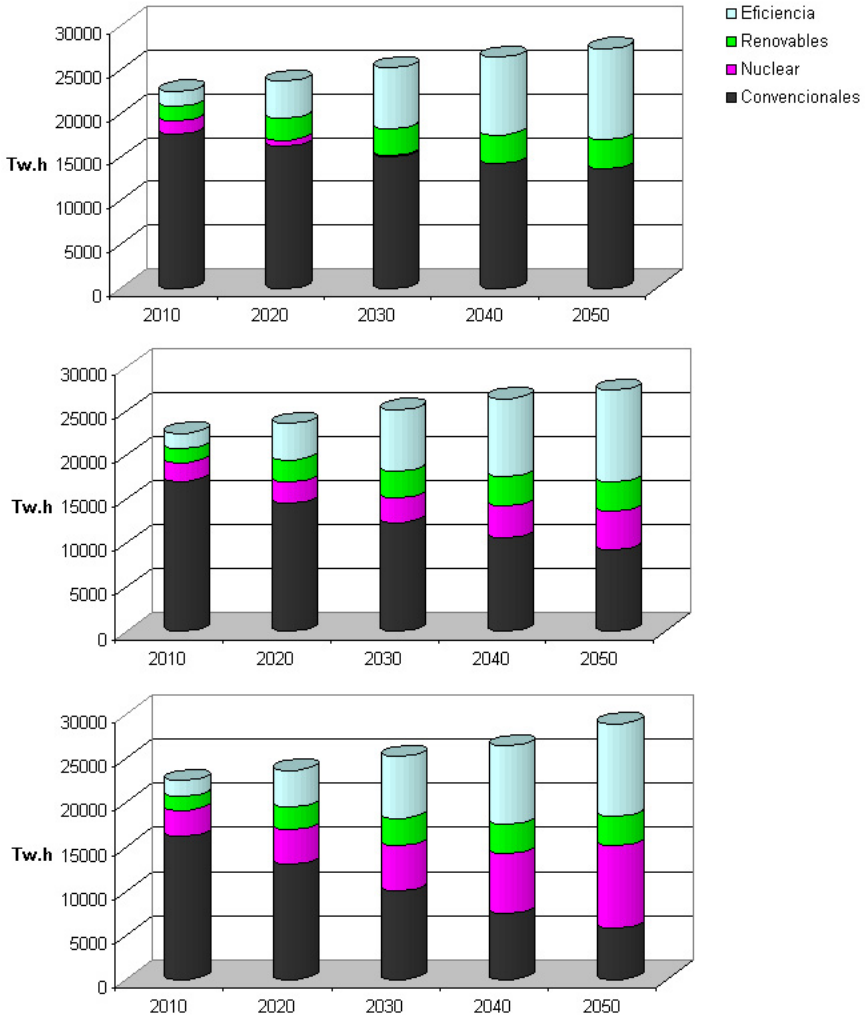


Figura 18.11: *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 4)*

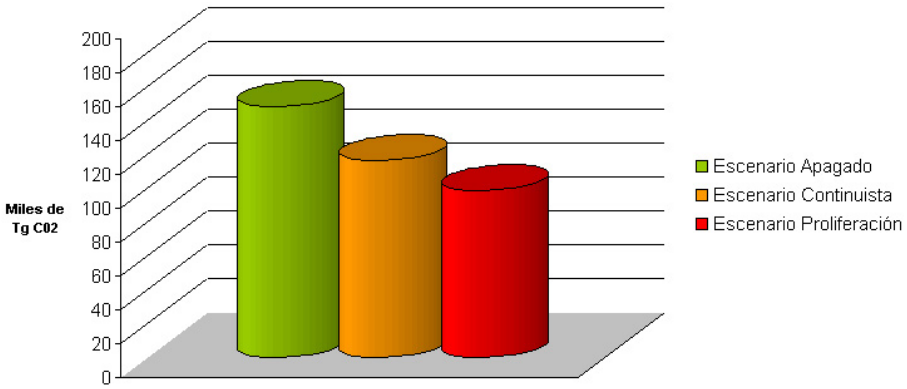


Figura 18.12: *Emisiones acumuladas (EA 4)*

nucleares): los niveles de emisiones acumuladas disminuyen un máximo de un 3 % en el caso de Proliferiación. Así pues, se puede concluir que el modelo es satisfactoriamente robusto con respecto a este parámetro, y que incluso variaciones inesperadas (razonables en una tecnología todavía por desarrollar) no afectan fundamentalmente a los resultados.

18.5. Escenario alternativo 5: no se introducen medidas destinadas a aumentar la eficiencia

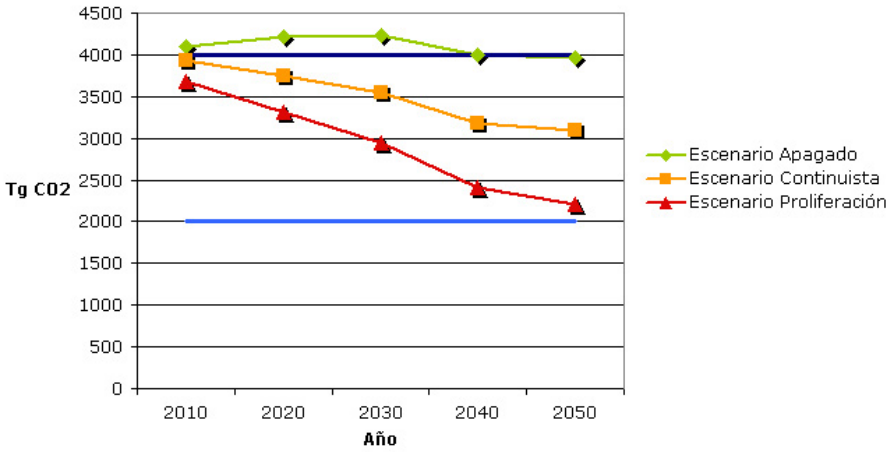


Figura 18.13: *Evolución de las emisiones por décadas (EA 5)*

La eficiencia es, como se ha afirmado ya en varios puntos del informe, la medida más acorde con la filosofía general de *El Observatorio*: la energía más sostenible es aquella que no se produce. Así pues, se ha hecho especial hincapié en la introducción de medidas destinadas al aumento de la eficiencia en todos los sectores. En este escenario alternativo se determinará la relevancia de esas medidas, observando el resultado de eliminarlas.

Como se puede ver en las figuras 18.13 y 18.14 el resultado es el más grave de los escenarios alternativos: el Escenario Apagado llega incluso a crecer en emisiones durante las primeras décadas y ni siquiera la utilización masiva de la energía nuclear permite alcanzar el objetivo ya mencionado del IPCC de reducir a la mitad las emisiones de CO_2 referidas al año 2000. Las emisiones totales integradas 18.15 crecen entre un 38 % en el caso del Escenario Apagado y un 43 % en el Escenario Proliferación. En este caso, incluso la energía eléctrica debe ser producida en parte a partir de combustibles fósiles y sólo en la década de 2050 en el escenario de Proliferación se logra un pequeño superávit que puede destinarse al hidrógeno. Así pues, la transferencia a este último

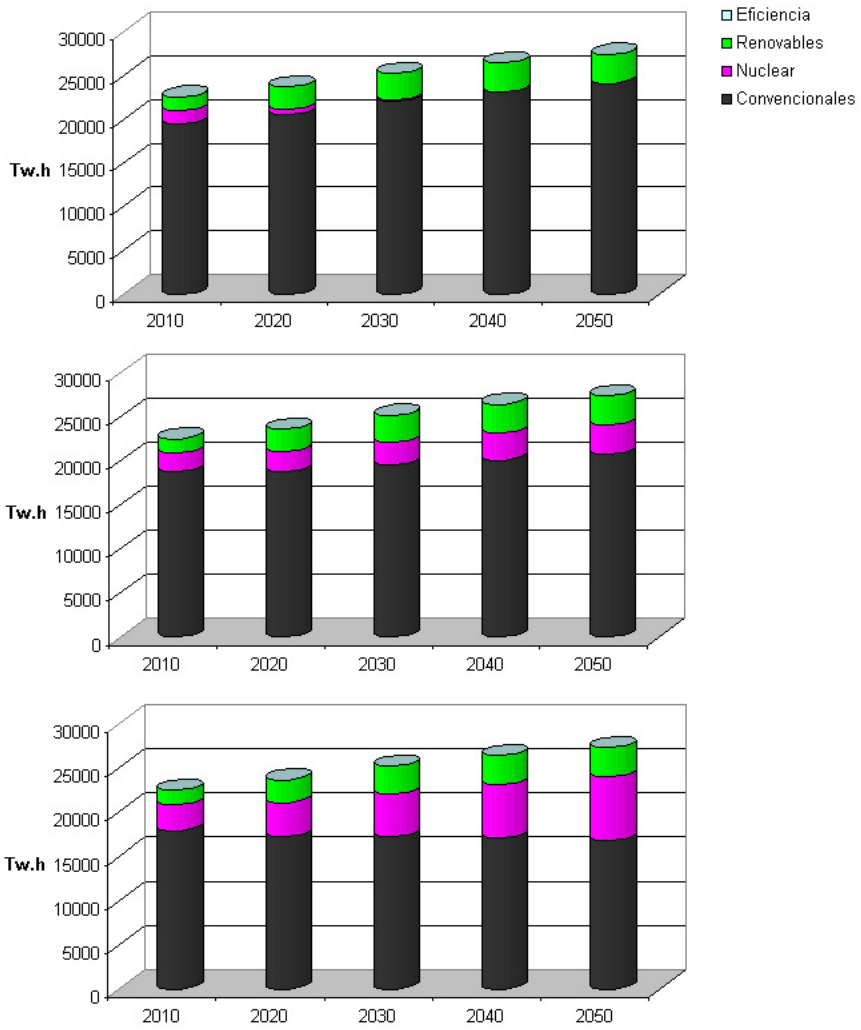


Figura 18.14: *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 5)*

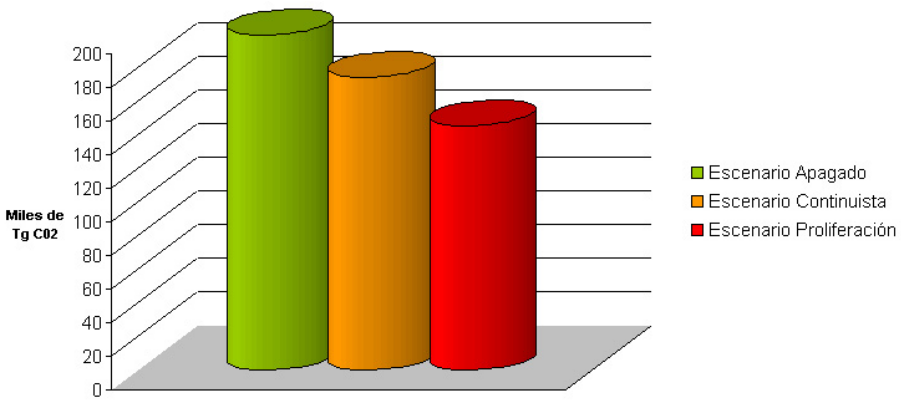


Figura 18.15: *Emisiones acumuladas (EA 5)*

se realiza basada casi exclusivamente en hidrocarburos en cualquiera de los escenarios, basando la reducción de emisiones sólo en el aumento implícito de eficiencia que tiene.

Como conclusión, es evidente que la aplicación generalizada de programas destinados a lograr aumentos muy importantes en la eficiencia es imprescindible, y no puede ser sustituida por ninguna de las otras medidas. No se trata sólo de que la eficiencia sea la mejor respuesta a la demanda energética: es que sin ella, no es posible producir la energía sin basarse mayoritariamente en hidrocarburos.

18.6. Escenario alternativo 6: no se producen cantidades significativas de energías renovables

Por último, se analizará la importancia relativa de la generación eléctrica a partir de fuentes de energía renovables (principalmente eólica, fotovoltaica e hidroeléctrica) por el mismo método que en casos anteriores: observando el impacto de su eliminación.

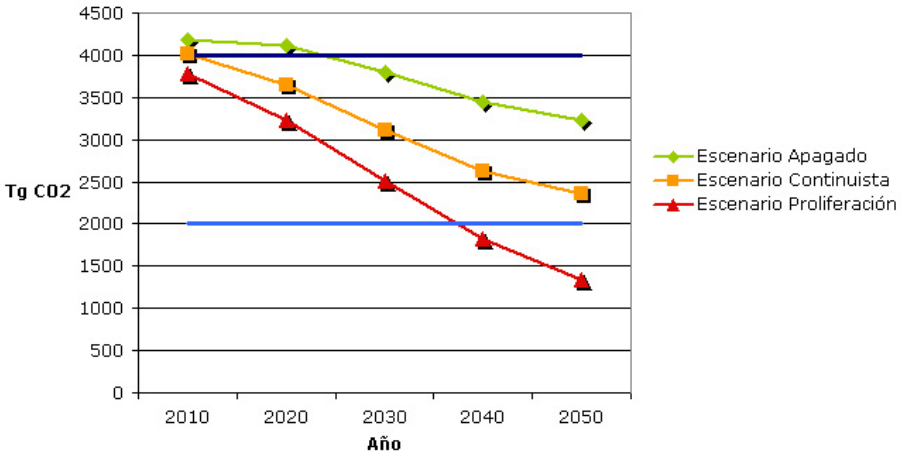


Figura 18.16: *Evolución de las emisiones por décadas (EA 6)*

Si no incluimos la implantación de energías alternativas en el modelo obtenemos un empeoramiento muy significativo de los escenarios. El Escenario Continuista se ve más afectado que los Escenarios Apagado y Proliferación (con unos incrementos de emisiones del 33 %, 26 % y 24 % respectivamente). Conviene destacar que aunque la apariencia de las tendencias es la misma que en el escenario estándar, en realidad todas las curvas han sufrido un desplazamiento vertical que produce estos incrementos en los resultados totales: esto es debido a que las energías renovables son

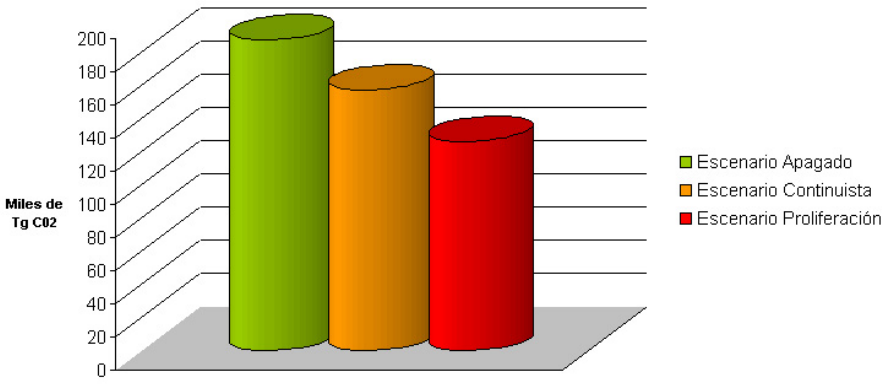


Figura 18.17: *Emisiones acumuladas (EA 6)*

una tecnología ya razonablemente madura y que está empezando a ser implantada en el momento actual. Por ello los efectos de su ausencia comienzan a hacerse sentir desde la primera década y no en las últimas como en otros casos. En otros términos, las energías renovables son una forma de generación que puede comenzar a implantarse ya y comenzar a ahorrar emisiones en el presente.

Como conclusión, una política enérgica que persiga la máxima implantación posible de energías alternativas es necesaria y no puede ser sustituida por otras medidas (en particular, la ausencia de energías renovables hace que el escenario nuclear moderado no alcance el objetivo considerado en el informe). El desarrollo previsto por el presente informe es factible aunque exigente, y por lo tanto se debe poner el máximo esfuerzo posible en desarrollar este tipo de tecnologías, y lo que hoy en día es más importante, implantarlas en el mercado económico.

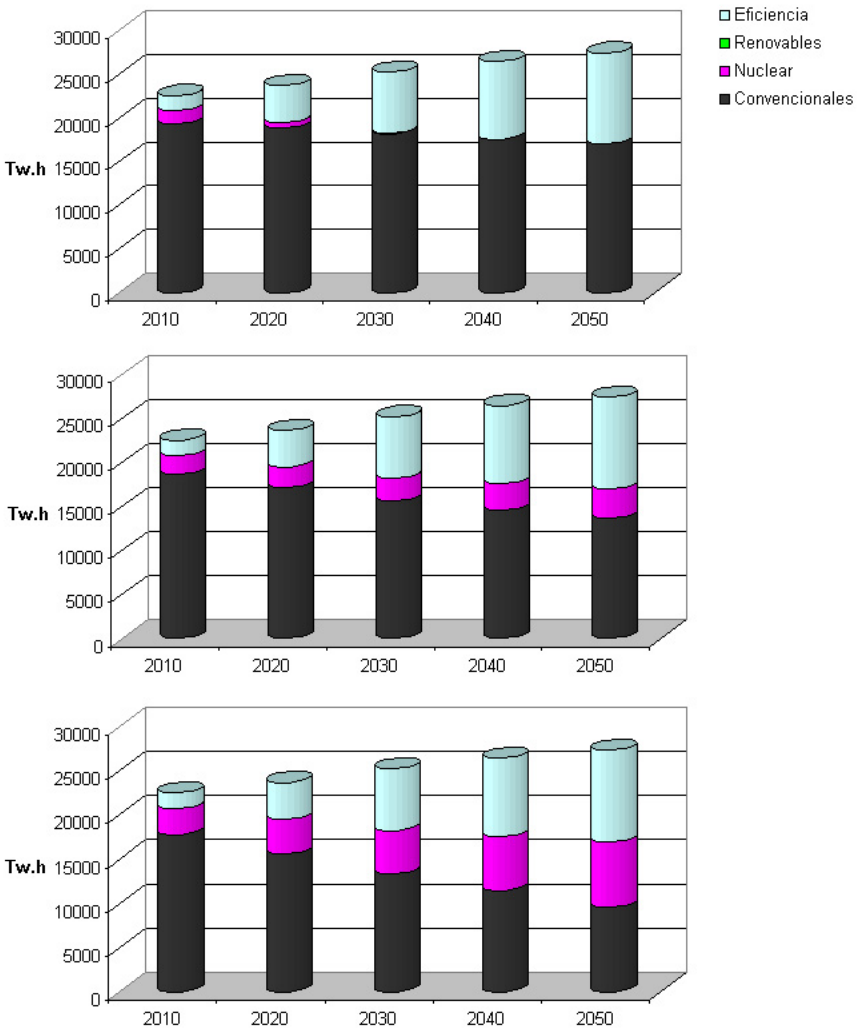


Figura 18.18: *Origen de la energía primaria por décadas para los tres subescenarios (EA 6)*

Capítulo 19

Conclusiones finales

A modo de resumen final de las conclusiones extraídas del modelo y su análisis, desde *El Observatorio* sintetizaremos algunas ideas clave y responderemos a las principales preguntas que han ido surgiendo a lo largo de la elaboración del informe:

- Los resultados muestran claramente que la condición de reducir las emisiones a niveles inferiores a la mitad de las de 2000 que apunta el IPCC en su último informe es alcanzable si se llevan a cabo políticas inteligentes y si se aborda el problema en todos sus ámbitos, haciendo uso simultáneamente de todos los medios disponibles (con la excepción de las tecnologías "contraproducentes" ya mencionadas).

- De entre las medidas propuestas, la de mayor importancia es, con diferencia, la implantación masiva de tecnologías eficientes. Sin esto, ni siquiera la combinación de todas las otras propuestas puede cambiar sensiblemente la tendencia actual.

- Resulta interesante señalar que dentro de estas "tecnologías eficientes" no se incluyen sólo tecnologías convencionales que consumen menos energía, sino también (en especial en lo tocante al Sector Residencial) a sistemas de generación descentralizados que hagan innecesario el consumo de energía para ciertas aplicaciones (calor y frio termosolar, pequeña generación eólica y fotovoltaica, etc.).

- La transferencia a la economía del Hidrógeno es también necesaria ya que, al margen de las reducciones en las emisiones que puede proporcionar por sí misma, es imprescindible para trasvasar la generación eléctrica.

- No resulta posible desechar por completo la enegía nuclear convencional si se quieren alcanzar los objetivos propuestos. Sin embargo, una utilización sustancialmente mayor de la que se hace hoy no resulta útil ni deseable ya que por un lado su potencial para generar

electricidad sin emitir GEI no justifica sus externalidades (principalmente en la forma de residuos radiactivos) y por otro, debido a las limitadas reservas mundiales de uranio, no resulta viable a medio plazo.

- A pesar de todo, existe un porcentaje significativo de la energía primaria que no podrá ser transferido a formas de generación sostenibles en el plazo del modelo (principalmente debido a usos industriales, residenciales y relacionados con el transporte), y que deberá seguir basándose en los hidrócarburos. Esto es comprensible debido a la implantación que estos tienen en nuestro actual sistema energético, pero debe hacerse el máximo esfuerzo posible para minimizar esta fracción de emisores "irreductibles".
- Gracias a los análisis de sensibilidad, se ha comprobado que el modelo resulta suficientemente robusto como para que la incertidumbre de algunos de los parámetros no intruzca variaciones cualitativas en los resultados, que pueden ser por lo tanto considerados sólidos.

Así pues, nos encontramos ahora en situación de responder a las preguntas planteadas:

¿Es simplemente posible atender la demanda energética previsible en las condiciones tecnológicas actuales?

Sí. Si el crecimiento de la demanda se mantiene dentro de los niveles previsibles, será posible atenderla al menos a corto y medio plazo. No obstante, a medio y largo plazo, el agotamiento de las reservas de hidrocarburos y de mineral de uranio pueden amenazar gravemente el abastecimiento si su relevancia en el modelo energético no se ha reducido drásticamente cuando su suministro empiece a verse reducido.

Si es así ¿Es posible hacerlo sin que ello conduzca a la destrucción del medio ambiente, al incremento peligroso del Calentamiento Global y al agotamiento de los recursos no renovables?

Hasta cierto punto sí. Sin embargo, en este caso la afirmación es mucho más restrictiva que en el anterior: si bien atender la demanda es posible de muchos modos (al menos mientras duren los combustibles fósiles), hacerlo de manera compatible con la conservación del medio ambiente requiere la realización de un gran esfuerzo y de la aplicación de todas las medidas aceptadas en este informe (u otras de naturaleza similar). En definitiva, el punto de partida es un modelo energético tremendamente dañino para el medio ambiente, y que debe crecer en volumen de consumo (de acuerdo con la hipótesis básica) a lo largo de los próximos 50 años. Cualquier medida que se deje de tomar agravará el problema.

¿Qué tecnologías son las más adecuadas globalmente para atender a esta demanda?

Principalmente aquellas que aumenten la eficiencia en el uso de la energía, bien reduciendo su consumo, bien aprovechando sistemas de generación descentralizada. A continuación, las diversas formas de generación eléctrica renovable (principalmente eólica, termosolar, fotovoltaica e hidroeléctrica) y todas aquellas tecnologías necesarias para la transferencia al hidrógeno.También puede resultar adecuado emplear pequeñas cantidades de biocombustibles, pero siempre sin permitir que su volumen crezca lo suficiente como para producir los graves inconvenientes que plantean. Por último, ya a largo plazo, el desarrollo de la energía de fusión es también de la máxima importancia para dar continuidad al abastecimiento.

¿Es necesario incluir la energía nuclear entre las tecnologías a emplear a pesar de los gravísimos inconvenientes y peligros de su uso?

De acuerdo con el modelo, sí. Si se quiere reducir las emisiones por debajo del 50 % de las de 2000 antes del 2050 manteniendo el crecimiento en la demanda, el modelo muestra que será necesario recurrir a una utilización limitada (con una relevancia similar a la que tiene en el modelo energético actual) de la energía de fisión. No obstante, la energía nuclear no debe verse como una alternativa, sino como un mal necesario aceptable sólo en el caso de que no exista otra opción: en ese sentido cabe preguntarse hasta qué punto es posible hacer esfuerzos aún mayores en el Escenario de Apagado para mejorar la implantación de medidas que la sustituyen (tales como la potencia instalada en las diferentes fuentes de energía renovable, mejores valores de eficiencia, transferencia al hidrógeno, fecha de implantación de la fusión, etc.) y en las cuales se han tomado valores posibilistas pero quizá conservadores y que no deberían entenderse como el techo teórico. Igualmente, resulta muy discutible la conveniencia de un modelo económico-energético basado en el crecimiento constante cuando el precio a pagar es la utilización de la energía de fisión.

¿Es posible un modelo energético sostenible al ritmo de crecimiento actual y con las tecnologías conocidas y previsibles?

La respuesta a esta pregunta pasa por la idea sencilla pero profunda que se defiende desde *El Observatorio*: no existen cambios técnicos importantes si no se realizan paralelamente cambios políticos y sociales.

De acuerdo con los datos expuestos en el informe, existen soluciones técnicas que pueden permitir limitar los niveles de emisiones y la concentración atmosférica de GEI hasta niveles razonables

sin que ello suponga necesariamente un empeoramiento de nuestro nivel de vida, reduciendo al mismo tiempo sustancialmente el impacto medioambiental del modelo energético en su conjunto. Sin embargo, para llevarlo a cabo nuestro modelo predictivo asume la aplicación de medidas perfectamente realizables y posibilistas, pero que requieren de los gobiernos europeos una clara voluntad política de enfrentar el problema, así como eficacia y coherencia a la hora de hacerlo. A su vez, estas transformaciones políticas requerirán de amplios movientos sociales que las exijan y controlen por un lado, y que las pongan directamente en práctica en la realidad cotidiana por el otro.

En pocas palabras, las herramientas tecnológicas están disponibles o a nuestro alcance a través de la investigación científica, pero será necesario que, como seres humanos y ciudadanos, impulsemos el cambio necesario. Evitar la catástrofe es posible pero sólo si realmente se trabaja para lograrlo.

Apéndice A

Lista de abreviaturas

GEI: Gases efecto invernadero
CCS: Carbon Capture and Storage (Technologies)
IAEA: International Atomic Energy Asociation
IEA: International Energy Agency
IPCC: International Panel on Climate Change
OCDE: Organización para la Cooperación y Desarollo Económico
ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor
PIB: Producto Interior Bruto
GI-GIV: Generaciones de centrales nucleares
EURATOM: Tratado de la Comunidad Europea de la Energía Atómica
FBR: Fast Breeder Reactor
MOX: Mixed Oxides
WISE: World Information Service on Energy
LWR: Light Water Reactor
LW: Low (Grade) Waste
ILW: Intermediate Level Waste
SMR: Steam Methane Reforming
IFMIF: International Fusion Materials Irradiation Facility
DEMO: DEMOnstration Power Plant
ETBE/MTBE: Ethil/Methyl Tertiary-Butyl Ether
CMNUCC: Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
EEI: Energy Efficiency Index
EER: Energy Efficiency Ratio
CFL: Compact Fluorescent Lamp

Apéndice B

Tabla de conversión de unidades energéticas

		(J)	(MJ)	(Wh)	(kWh)	(TWh)	(GW·año)	(tep)	(Mtep)	(btu)	(Mbtu)
1 Julio	(J)	1	1,00E-06	2,78E-04	2,78E-07	2,78E-16	3,17E-17	2,39E-11	2,39E-17	9,48E-04	9,48E-10
1 Megajulio	(MJ)	1,00E+06	1	2,78E+02	2,78E-01	2,78E-10	3,17E-11	2,39E-05	2,39E-11	9,48E+02	9,48E-04
1 Vatio-hora	(W·h), (Wh)	3,60E+03	3,60E-03	1	1,00E-03	1,00E-12	1,14E-13	8,62E-08	8,62E-14	3,41E+00	3,41E-06
1 Kilovatio-hora	(kW·h), (kWh)	3,60E+06	3,60E+00	1,00E+03	1	1,00E-09	1,14E-10	8,62E-05	8,62E-11	3,41E+03	3,41E-03
1 Teravatio-hora	(TW·h), (TWh)	3,60E+15	3,60E+09	1,00E+12	1,00E+09	1	1,14E-01	8,62E+04	8,62E-02	3,41E+12	3,41E+06
1 GW-año	(GW·año)	3,15E+16	3,15E+10	8,76E+12	8,76E+09	8,76E+00	1	7,55E+05	7,55E-01	2,99E+13	2,99E+07
1 Tonelada equivalente de petróleo	(tep)	4,18E+10	4,18E+04	1,16E+07	1,16E+04	1,16E-05	1,32E-06	1	1,00E-06	3,96E+07	3,96E+01
1 Megatonelada equivalente de petróleo	(Mtep)	4,18E+16	4,18E+10	1,16E+13	1,16E+10	1,16E+01	1,32E+00	1,00E+06	1	3,96E+13	3,96E+07
1 Unidad térmica británica	(btu)	1,06E+03	1,06E-03	2,93E-01	2,93E-04	2,93E-13	3,35E-14	2,53E-08	2,53E-14	1	1,00E-06
1 Millón de btu	(Mbtu), (MMbtu)	1,06E+09	1,06E+03	2,93E+05	2,93E+02	2,93E-07	3,35E-08	2,53E-02	2,53E-08	1,00E+06	1

Bibliografía

[1] M. Toharia, *El Clima*, Ed.Debate, 2006

[2] *Intergovernmental Panel on Climate Change Third Assessment Report: Climate Change 2001*

[3] *Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*

[4] *Cambio Climático y cooperación para el desarrollo* Fundación IPADE, 2007

[5] Cuerva, A., et al., "Aerogeneradores", Madrid 2006

[6] "I Jornada de Energías Renovables: Energía Solar" Madrid 2006 www.energias-renovables.com

[7] Plan de Energías Renovables en España 2005-2010

[8] "Quelle surface faut-il couvrir d'éoliennes pour fournir à la France le courant dont elle a besoin", Diciembre 2001, Jean-Marc Jancovici, www.manicore.com

[9] "La generación de energía hidroeléctrica" José María Marcos Fano, 2006

[10] "Energy revolution: a sustainable pathway to clean energy future for europe", Greenpeace

[11] "Diseño de un sistema aislado híbrido basado en energía eólica" 2007, Victoria, M., Gallego, C., Villafañe, L., Canal, M.

[12] "Energía: ingeniería energética y medioambiental" nº187

[13] http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_Nuclear

[14] http://es.wikipedia.org/wiki/Abandono_de_la_energ%C3%ADa_nuclear

[15] IAEA, "Nuclear Power Reactors in the World", April 1999, by courtesy

[16] EURATOM, Supply Agency. Annual Report 2005

[17] "EUROPEAN UNION ENERGY TRANSPORT 2006 IN FIGURES Part 2 : ENERGY", Directorate-General for Energy and Transport. European Commission

[18] IEEE Spectrum: "Nuclear Wasteland, Nuclear Wasteland" By: Peter Fairley

[19] "THE MOX MYTH" Wise News Communique 469-470, April 11, 1997

[20] http://www.wise-uranium.org/nfcm.html

[21] http://www.grimsel.com/

[22] http://en.wikipedia.org/wiki/Yucca_Mountain

[23] http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd03e

[24] "Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France". Diciembre 2002, ADEME (Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie), DIREM (Direction de Ressources Energétiques et Minérales)

[25] "Key world energy statistics 2006" IEA (International Energy Agency)

[26] "Land resource potential and constraints at regional and country levels" FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

[27] "Estrategia de la UE para los biocarburantes" Febrero 2006, Comisión de las Comunidades Europeas.

[28] "biocarburantes y desarrollo sostenible: mitos y realidades" Asociación de productores de energías renovables (APPA), Septiembre 2007

[29] "Les puits de carbone ne vont-ils pas absorber le surplus de CO2?". Noviembre 2005, Jean-Marc Jancovici, www.manicore.com

[30] Green paper on energy efficiency: Doing more with less. *European Commission*, 2005

[31] Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union: Status report 2006. *Institute for environment and sustainability*, 2007

[32] Transition to a sustainable energy system for Europe: The R&D perspective. *Advisory group on energy*, 2006

[33] Energy revolution: A sustainable pathway to a clean energy future for Europe. *Greenpeace*, 2005

[34] Towards a European strategy for the security of energy supply. *European commission*, 2000

[35] P. Bertoldi et al. Stand-by losses: the magnitude of the consumption, the planned policies and the technical solution. *ACEEE*, 2002

[36] P. Bertoldi et al. The European Design Competition "Lights for the future"for Energy-Efficient Lamp Dedicated fixtures: A successful example of Market transformation $ACEEE$, 2002

[37] P. Bertoldi et al. A New European Initiative to improve Efficiency of motor systems: The motor challenge program $ACEEE$, 2001

[38] "Hacia la Economía del Hidrógeno", Antonio González García-Conde, 2004.

[39] "Hydrogen Production Methods", K. McHugh, S. Eisele, 2005.

[40] "ne pouvons nous pas mettre le gaz carbonique dans un grand trou", Abril 2003, Jean-Marc Jancovici, www.manicore.com

[41] "La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono" IPCC

[42] "I jornada Cenit CO2 sobre captura y almacenamiento de CO_2", ponencia del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

[43] "The Future of Nuclear Energy in the EU", Directorate General for Energy and Transport, European Commission. Brussels, 23rd May 2002

[44] "Transition to a Sustainable Energy System for Europe: The RD perspective", Advisory Group on Energy, European Commission

[45] "ITER: Un Agujero Negro en la Economía Energética", Greenpeace, Septiembre 2003

[46] http://www.ecologistasenaccion.org/spip.php?article2412

[47] "Fusión" R. Herman, 1993

[48] http://www.iter.org/a/index_nav_2.htm

[49] "ITER Technical Basis" The ITER Project Commission, Sep. 2003

[50] "World energy outlook 2004", International Energy Agency

[51] "International Energy Outlook IEO2006", Energy Information Administration

[52] "Economics and Environmental Effects of Hydrogen Production Methods" Greg Brinkman, Fall 2003

[53] "Interacción de Plasmas Magnetizados y su Aplicación en Tokamaks" D. Carralero, E. Ahedo. Marzo de 2007

[54] "Curso de Modelización Matemática de las Olas Marinas", Ricardo Zamora Rodríguez y Antonio Souto, Departamento de Enseñanzas Básicas de la Ingeniería Naval, ETSIN (UPM)

[55] "Instalaciones de energía solar", CENSOLAR

[56] "Energía Solar Termoeléctrica", Greenpeace

[57] A. Luque "Photovoltaic Market and Costs Forecast Based on a Demand Elasticity Model", Instituto de Energía Solar, Madrid

[58] "Las energías renovables en España. Diagnóstico y perspectiva", CENER

[59] "Las energías renovables: biocombustibles", Ponencia de Dña. Aranhxa Brouns, Semana de la Ciencia, Madrid, 2007

César J. Carmona nace en Granada el 23 de abril de 1981, ciudad en la que realiza los estudios de EGB, BUP y COU, que finaliza con Matrícula de Honor, Premio Extraordinario de Bachillerato y menciones honoríficas en olimpiadas de matemáticas, física y química. A finales de 1999 comienza los estudios de Ingeniería de Telecomunicación en la Universidad Carlos III de Madrid. En 2004 fue premiado por la Federación Internacional de Astronáutica por su artículo científico ``Turbocodes, LDPC and FIRE Codes to Achieve Better Deep-Space Communications: Performance and Implementation" e invitado a su presentación en el Congreso Internacional de Astronáutica realizado en Vancouver (Canadá). En el año siguiente, organizó un grupo de trabajo en la Universidad Carlos III para participar en el diseño de un satélite estudiantil en el marco del programa SSETI. En 2006, fue invitado por la Oficina de Educación de la Agencia Espacial Europea (ESA) presentar, junto con Daniel Carralero, su propuesta de misión para el Satélite YES3, en la Universidad de Patras (Grecia). Se graduó en 2006 por la Universidad Carlos III de Madrid, tras la finalización de su proyecto Fin de Carrera ``Códigos LDPC: Decodificación Iterativa y Codificación Lineal", que obtuvo la máxima calificación posible. En la actualidad, trabaja como ingeniero de sistemas en la empresa estatal INSA (Ingeniería y Servicios Aeroespaciales) en donde realiza, entre otras, tareas de validación operacional para la ESA del satélite científico hispano-francés SMOS, que medirá a partir de 2009 la salinidad de los océanos y la humedad del sustrato de la corteza terrestre.

Daniel Carralero nace en Madrid el 19 de Abril de 1983. Realiza sus estudios de EGB, BUP y COU, finalizándolos con Matrícula de Honor y recibiendo el Premio Extraordinario Final de Bachillerato. En el año 2000 comienza a estudiar Ingeniería Aeronáutica en la Universidad Politécnica de Madrid, especializándose en Vehículos Espaciales. A lo largo de la carrera es seleccionado para diversos proyectos de colaboración con la Agencia Espacial Europea, entre los que destacan su participación en las campañas de Vuelo Parabólico y su propuesta de misión para el proyecto YES3, que presenta junto con César Carmona en 2006. Recibe una Beca de Colaboración del Ministerio de Educación y Ciencia gracias a la cual comienza a investigar en Física de Plasmas en el Departamento de Fundamentos Matemáticos de la ETSIA. Se gradúa en Febrero de 2007 con el proyecto Fin de Carrera “Interacción de plasmas magnetizados con pared y su aplicación en tokamaks”, obteniendo Matrícula de Honor. En Mayo del mismo año comienza a trabajar en el CIEMAT, en la División de Física Experimental del Laboratorio Nacional de Fusión, donde en la actualidad desarrolla una tesis doctoral acerca de turbulencia y transporte en reactores de fusión y su observación mediante sondas de Langmuir y cámaras ultrarápidas. Al mismo tiempo, colabora en distintos proyectos internacionales con laboratorios como JET, LHD o el grupo PP11 de ITER. Además de su actividad científica, ha participado en actividades de voluntariado internacional como miembro de SCI (Serbia, Siria, Líbano) y de acción medioambiental (coordinando la limpieza de varias playas gallegas durante el accidente del Prestige en 2002).

Diego Escobar nace en Madrid el 13 de Junio de 1982. Lleva a cabo los estudios de EGB, BUP y COU en Madrid, finalizándolos con Matrícula de Honor. En el año 2000 comienza la licenciatura de Ingeniería Aeronáutica en la Universidad Politécnica de Madrid. En 2003 y 2004 realiza un año académico en el Massachussets Institute of Technology, en Boston. A su vuelta de EEUU se especializa en el desarrollo de modelos numéricos aplicados a propulsión eléctrica espacial. Como resultado de estas investigaciones y de su proyecto fin de carrera obtiene el “Premio Arquímedes” otorgado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Al término de sus estudios de ingeniería en 2005 es galardonado con el “Primer Premio Nacional de Terminación de Estudios Universitarios” en Ingeniería Aeronáutica. Poco después comienza a trabajar para la empresa GMV en el proyecto Galileo, trabajo que combina con la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA) hasta comienzos de 2007. Hoy en día trabaja en el Centro Europeo de Operaciones Espaciales de la Agencia Europea del Espacio como miembro de la Oficina de Navegación estando involucrado en el desarrollo del futuro sistema europeo de navegación por satélite Galileo.

Cristóbal J. Gallego nace en Almería el 1 de Enero de 1982. Lleva a cabo los estudios de EGB, BUP y COU en Cartagena, finalizándolos con Matrícula de Honor; en este periodo es galardonado con varios premios en olimpiadas de matemáticas a diferentes niveles. En el año 2000 comienza la licenciatura de Ingeniería Aeronáutica en la Universidad Politécnica de Madrid. En 2005 realiza en el marco del programa Erasmus un año académico en la Ecole Nationale de l’Aviation Civile, en Toulouse. Durante los últimos años de la carrera orienta su interés hacia las energías renovables: obtiene el título de “Proyectista Instalador de Energía Solar” impartido por Censolar, lleva a cabo una beca de colaboración del Ministerio de Educación y Ciencia sobre pilas de combustible, y, junto con Marta V., finaliza los estudios de grado con el proyecto fin de carrera “Diseño de un sistema aislado híbrido basado en energía eólica” en colaboración con el Ciemat, calificado con Matrícula de Honor. Es ponente en varias ocasiones, nuevamente junto a Marta V., de la conferencia “Energía y Cooperación al Desarrollo”, enmarcada en actividades de Ingeniería Sin Fronteras. Se gradúa el 10 de Diciembre de 2007 como primero de su especialidad. En la actualidad investiga en el Departamento de Energías Renovables del Ciemat con una beca de doctorado sobre modelos matemático/estadísticos para la predicción a corto plazo del recurso eólico.

Marta Victoria Pérez nace en Murcia el 2 de Mayo de 1984, donde realiza sus estudios de ESO y Bachillerato, que finaliza con Matrícula de Honor, durante ese periodo participa en las olimpiadas nacionales de física y química obteniendo medalla de plata y bronce respectivamente. En 2002 se traslada a Madrid para cursar los estudios de Ingeniería Aeronáutica en la Universidad Politécnica de Madrid. Se gradúa en 2007 con el Proyecto fin de carrera “Diseño de un sistema aislado híbrido basado en energía eólica” realizado junto con Cristóbal G. y en colaboración con CIEMAT. Durante sus años de carrera colabora con la ONG Ingeniería sin Fronteras. Asociación para el Desarrollo (ISF.ApD) liderando la creación del grupo de voluntarios de la E.T.S.I.Aeronáuticos.
En la actualidad desarrolla sus estudios de doctorado en el grupo de investigación en “Integración de sistemas e instrumentos para concentración fotovoltaica” del Instituto de Energía Solar. Labor que compagina con su pertenencia al grupo de Energía de ISF.ApD y que se materializa en la realización de estudios, participación en charlas y conferencias y colaboración estrecha con el programa que se desarrolla en Mozambique donde ha estado trabajando en verano de 2007.