



El reto

Fernando Sapiña

energético

Gestionando el legado de Prometeo

El reto

Fernando Sapiña

energético

Gestionando el legado de Prometeo

FINALISTA DEL PREMIO EUROPEO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA
ESTUDI GENERAL 2004

PUV PUBLICACIONS
UNIVERSITAT
DE VALÈNCIA



Director de la colección:
Juli Peretó

Coordinación:
Soledad Rubio

*Esta publicación no puede ser reproducida, ni total ni parcialmente,
ni registrada en, o transmitida por, un sistema de recuperación de información,
en ninguna forma ni por ningún medio, ya sea fotomecánico, fotoquímico,
electrónico, por fotocopia o por cualquier otro, sin el permiso previo de la editorial.*

© Fernando Sapiña Navarro, 2006

© De la presente edición:

Càtedra de Divulgació de la Ciència, 2006

www.valencia.edu/cdciencia

cdciencia@uv.es

Publicacions de la Universitat de València, 2006

www.uv.es/publicacions

publicacions@uv.es

Producción editorial: Maite Simón

Diseño del interior y maquetación: Inmaculada Mesa

Corrección: Comunico, C.B.

Diseño de la cubierta: Enric Solbes

ISBN: 84-370-6405-8

Depósito legal: V-1448-2006

Impresión: Guada Impresores, SL

Para Irene y Encarna

—¿Qué es lo que podrá encontrarse para sustituir al carbón?
¿Puede usted imaginarlo, señor Cyrus? —preguntó Pencroff.

—Sí, más o menos —repuso el ingeniero.

—¿Qué podrá quemarse en vez de carbón?

—El agua —dijo Cyrus Smith

—¿Agua? ¿Agua para calentar las calderas de los vapores y de las locomotoras? ¿Agua para calentar el agua? —dijo Pencroff.

—Cyrus Smith respondió:

—Sí, pero agua descompuesta en sus elementos constitutivos, y descompuesta, sin duda, por la electricidad, que se habrá convertido entonces en una fuerza poderosa y manejable, pues todos los grandes descubrimientos, por una ley inexplicable, parecen concordar y completarse en el mismo momento. Sí, amigos míos, yo creo que el agua será empleada algún día como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados aislada o simultáneamente, suministrarán una fuente de luz y de calor inagotables, dotada de una intensidad de la que carece la hulla. Algún día, los pañoles de los vapores y los ténederes de las locomotoras irán cargados de esos dos gases comprimidos, que se quemarán en las calderas con una enorme potencia calorífica. Así pues, nada hay que temer. Mientras la tierra esté habitada, dará satisfacción a las necesidades de los habitantes. Éstos nunca carecerán de luz ni de calor, como tampoco de las producciones de los reinos vegetal, mineral y animal. Creo que cuando se agoten los yacimientos de hulla, se obtendrá el calor con el agua. El agua es el carbón del futuro.

—Me gustaría verlo —dijo Pencroff.

—Te has descolgado demasiado pronto para eso, Pencroff —dijo Nab, en su única intervención en la conversación.

JULIO VERNE (1874): *La Isla Misteriosa*,
Madrid, Alianza Editorial, 1998.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	11
Capítulo 1. UN PROBLEMA: LA NECESIDAD DE UN NUEVO SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	17
LA CIUDAD DEL CARBÓN	22
LA CIUDAD DE LOS COCHES.....	27
LA HISTORIA SECRETA DEL PLOMO	34
CALENTAMIENTO GLOBAL.....	40
PROBLEMAS POLÍTICOS Y ECONÓMICOS.....	47
¿SE ACABA EL PETRÓLEO?.....	48
UN RETO PARA EL SIGLO XXI.....	52
Capítulo 2. UNA VISIÓN: LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO	53
HIDRÓGENO.....	55
HIDRÓGENO: PRODUCCIÓN	57
HIDRÓGENO: DISTRIBUCIÓN Y ALMACENAMIENTO	65
USOS DEL HIDRÓGENO EN SISTEMAS BASADOS EN UNA COMBUSTIÓN CONVENCIONAL.....	69
LAS PILAS DE COMBUSTIBLE	72
TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE	75
LA SEGURIDAD DEL HIDRÓGENO.....	84
UN EXPERIMENTO AMBIENTAL CON HIDRÓGENO	85
LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO	87

Capítulo 3. DE RETOS Y OBSTÁCULOS: HACIA UN SISTEMA SOSTENIBLE DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	89
LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LAS CIUDADES	92
EL SECUESTRO DEL DIÓXIDO DE CARBONO	94
LA ENERGÍA NUCLEAR, ¿ES LA SOLUCIÓN?.....	98
LA CUESTIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DEL SUMINISTRO ENERGÉTICO	100
VIABILIDAD DE UN SISTEMA ENERGÉTICO SOSTENIBLE BASADO EN ENERGÍAS RENOVABLES.....	104
ENERGÍA HIDROELÉCTRICA.....	105
BIOMASA	107
ENERGÍA EÓLICA	110
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	113
LA TRANSICIÓN.....	116
Capítulo 4. EL LEGADO DE PROMETEO.....	121
BIBLIOGRAFÍA	125

PRESENTACIÓN

De mi primera visita al Museo de las Ciencias de Valencia recuerdo la exposición *Detrás del enchufe*. En ella se explicaba una serie de fenómenos físicos básicos relacionados con la electricidad. Sin duda, el título de la exposición es atrayente y permite múltiples interpretaciones. Se podría organizar, por ejemplo, una conferencia con el mismo nombre que explicara la generación de electricidad. Un asunto importante, sin duda, el de comprender cómo se obtiene ese portador de energía que permite el funcionamiento de televisores, neveras, equipos de música, etc. Y podría aprovecharse, por qué no, para que la gente supiera que el título de la exposición no tiene sentido para unos 2.000 millones de personas que no tienen acceso a las formas modernas de energía.

El gran reto de la humanidad para el siglo XXI es avanzar hacia un mundo sostenible. En la novena reunión de la Comisión para el Desarrollo Sostenible, celebrada en el año 2001, se trató del papel central que la energía juega en este tema. Esa importancia tiene su origen en que muchos de los objetivos del desarrollo sostenible sólo pueden lograrse si se asegura el acceso de toda esa gente a la electricidad. Y, también, se debe a que la forma actual de producir, distribuir y utilizar la energía no es viable a largo plazo.

Las razones de la inviabilidad del sistema energético actual tienen que ver con que éste depende de los combustibles fósiles. Estas fuentes de energía no son renovables y, por tanto, se están agotando. Además, su uso produce la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, un gas de efecto invernadero. El aumento de las emisiones de estos gases va a provocar un cambio climático, cuyos primeros efectos ya se están sintiendo en la actualidad. Y, finalmente, también se emiten contaminantes que afectan a la salud de las personas.

Es necesario un cambio en el sistema energético. A corto y medio plazo las opciones están bastante claras. Se debe aumentar la eficiencia en el uso de la energía, es decir, utilizar menos energía para obtener el mismo servicio, y se deben utilizar cada vez más las fuentes renovables y limpias de energía. Pero, a largo plazo, es necesario dejar de emplear los combustibles fósiles. Y, probablemente, la única propuesta que se ha hecho de un nuevo sistema energético sostenible que pueda ser viable está basada en la economía del hidrógeno. En la economía actual, los portadores de energía son la electricidad y los combustibles fósiles. En una economía del hidrógeno sostenible, se sustituyen los segundos por hidrógeno, obtenido a partir de fuentes de energía renovables y limpias.

Los problemas que plantea el desarrollo de una economía del hidrógeno de este tipo son múltiples. Así, es necesario desarrollar sistemas baratos de obtención, distribución, almacenamiento y uso eficiente del hidrógeno. Esto no quiere decir que no existan este tipo de tecnologías en la actualidad: el problema es que su coste es muy elevado. Tenemos tecnologías de obtención de electricidad a partir de fuentes de energía renovables. Existen tecnologías que permiten obtener hidrógeno a partir de agua y electricidad. Tenemos formas de almacenar y distribuir el hidrógeno. Y las pilas de combustible convierten de forma muy eficiente el hidrógeno, de nuevo, en electricidad, que puede ser empleada para hacer funcionar un aparato, una máquina o un motor.

La transición desde una economía de los combustibles fósiles a una economía del hidrógeno plantea, además, otro tipo de incertidumbres. Debe planificarse de forma cuidadosa con el fin de hacer que los costes sociales, ambientales y económicos asociados a la misma sean mínimos, y debe asegurarse que esas nuevas tecnologías sean accesibles para toda la población mundial. A muy largo plazo, en cualquier caso, las ventajas derivadas de la reducción de la contaminación y de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la descentralización del sistema de producción de energía y del aprovechamiento de fuentes de energía locales compensarán todos esos costes.

Todas estas cuestiones, que analizaremos en este libro no son sólo abordadas en conferencias científicas y en distintas organizaciones políticas supranacionales. Aparecen continuamente en los medios de comunicación. Como muestra, aquí tenemos algunos ejemplos. El 14 de agosto de 2004, al abrir el periódico, me encontré con el siguiente titular. «Ozono en el aire: los corredores sufrirán hoy en sus pulmones la contaminación atmosférica». En el cuerpo de la noticia leí que los ciclistas que, ese día, participarán en una prueba en los Juegos Olímpicos de Atenas sufrirán problemas pulmonares debidos a la contaminación. Unos días más tarde, otra noticia llamó mi atención. «La contaminación mata poco a poco: un estudio demuestra que los contaminantes habituales causan miles de muertes al año en Europa». El Sistema de Información Europeo de Contaminación del Aire y la Salud (red APHEIS) presentó un informe sobre los efectos de la contaminación sobre la salud de los habitantes de 26 ciudades. En Madrid, una reducción del 50 % en los niveles de partículas sólidas en suspensión evitaría 260 muertes al año y más de 500 hospitalizaciones. Declaraciones del subdirector general de Salud Ambiental del Ministerio: «El ciudadano debería estar más concienciado. Pide hospitales, pero a lo mejor debería pedir medios alternativos de transporte».

31 de julio de 2004: «El crudo supera los 40 dólares por primera vez en 14 años: el precio del petróleo en Nueva York fija un nuevo récord». El miedo a una crisis de abastecimiento sería, según la noticia, la causa del elevado precio del petróleo. Los problemas de Yukos, la petrolera rusa, la situación en Irak, los atentados terroristas en Arabia Saudí y las crisis políticas de Nigeria y Venezuela han asustado a los mercados. Un mes más tarde: «El petróleo roza los 50 dólares en Nueva York al cierre de otra semana de máximos: los mercados de crudo no dan tregua ante el recrudecimiento de la tensión en Irak». Declaraciones de un representante de la Fundación de Industrias del Petróleo, una entidad estadounidense: «Mucha demanda, poca oferta e inestabilidad. Es una fórmula sencilla».

1 de agosto de 2004: «El humo tenía un precio». Luis Balairón, investigador del Instituto de Meteorología: «Lo preocupante no es

que suban las temperaturas, sino la proporción de CO₂ en la atmósfera. Hemos pasado de una proporción de 280 partes por millón, muy estable durante los últimos mil años, a las 370 ppm actuales, y con unas proyecciones para los próximos años muy preocupantes». Francisco Ayala-Carcedo, investigador del Instituto Geológico y Minero: «acostumbrado a la medida de los tiempos geológicos, yo era de los que no veía el cambio climático. Sin embargo, ahora se puede demostrar que, por ejemplo, en los últimos 30 años, la temperatura media ha aumentado en España 1,53 °C. Los días de nieve en Navacerrada han pasado de 130, en el año 1970, a 80 en 2000, un 40 % menos y, en ese mismo puerto, se han multiplicado por siete los días con máximas de más de 25 °».

16 de junio de 2004. Entrevista a Klaus Hasslemann, experto en cambio climático: «No podemos no hacer nada, pero si estudiamos el problema con calma y desarrollamos las tecnologías necesarias, se puede frenar el cambio climático sin que afecte en absoluto a nuestro estilo de vida. Pasar de energías fósiles a energías renovables no costaría más de un 3 o un 4 % del producto interior bruto en cualquier país. Y eso equivale más o menos al crecimiento de un año. Es decir, hablamos de un retraso en el crecimiento económico de un año, una minucia comparada con los problemas a que nos enfrentamos». Unos días antes, «Utopías para el problema energético: la Conferencia Mundial sobre las Energías Renovables advierte en Bonn de que no hay otro camino para resolver los retos del futuro. España, 2050: las urbanizaciones de los extrarradios surtirán su demanda de energía con paneles solares instalados en los techos de las casas. En las zonas rurales, el abastecimiento correrá por cuenta de pequeñas centrales de biomasa, basadas en la incineración de purines y otros residuos orgánicos. La demanda de la industria y de los centros urbanos, al menos en parte, será satisfecha por grandes parques eólicos instalados más allá de la línea costera. Habrá también centrales que aprovechen el oleaje, las mareas o el calor de la tierra. Los combustibles fósiles seguirán utilizándose, pero bastante menos y con tecnologías más eficientes. Buena parte de los coches transitará con motores de hidrógeno. La última central nuclear se habrá cerrado hace unos años:

aunque no emitiera dióxido de carbono, resultó ser una tecnología insostenible por sus riesgos medioambientales. ¿Una utopía? De ninguna manera, coincidieron esta semana cerca de 3.000 políticos y activistas reunidos en Bonn en una conferencia mundial sobre las energías renovables».

Este libro trata sobre el futuro energético. En el primer capítulo se plantea toda la problemática asociada al uso de los combustibles fósiles, desde la contaminación hasta la insostenibilidad de su utilización. En el segundo se abordan las tecnologías que existen en la actualidad para producir, almacenar, distribuir y utilizar de forma eficiente el hidrógeno, así como las posibles implicaciones ambientales que podría tener la utilización de este compuesto a gran escala. En el tercer capítulo se plantea cómo ese sistema debe estar basado en las fuentes de energía renovables, y cómo podría llevarse a cabo la transición desde la economía de los combustibles fósiles a una economía del hidrógeno. Acabaré con una recapitulación y algunas consideraciones generales.

AGRADECIMIENTOS

En el año 2002 José María Moratal me invitó a dar una charla en un curso dirigido a profesores de enseñanza secundaria y bachillerato, organizado por el Servei de Formació Permanent de la Universitat de València. Acordamos que el tema de la misma sería la economía del hidrógeno, lo que me sirvió para organizar el material que, sobre el particular, ya impartía en el módulo de libre elección *Energía, recursos y medio ambiente*. En el año 2004 José María Moratal y Juan José Borrás me invitaron a impartir una conferencia sobre el mismo tema, esta vez más extensa, en un curso sobre energía en la XI Edició de la Universitat d'Estiu de Gandia. Las notas de la misma constituyen la base de este libro. En el primer capítulo también he empleado las notas preparadas para el taller *L'alé de la màquina* que, al final, no pude impartir en la X Edició de la Universitat d'Estiu de Gandia.

Durante la preparación de las notas para las conferencias y los talleres, así como durante la redacción del libro, he contado con la inestimable ayuda y comprensión tanto de mi pareja, Encarna Coret, como de la de mis compañeros de la Unidad de Nanomateriales del Institut de Ciència dels Materials de la Universitat de València, Eduardo Martínez y José Vicente Folgado. El texto ha sido revisado, en alguna de sus versiones, por ellos y, también, por los demás integrantes de la Unidad, Nerea Valero, José Navas, Jaume Vila y David Vie.

Capítulo 1
UN PROBLEMA: LA NECESIDAD DE UN NUEVO
SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

En la película *En busca del fuego* se cuenta la historia de una tribu de hace unas decenas de miles de años que no sabía cómo hacer fuego, pero sí cómo conservarlo. Su fuego, que con tanto cuidado mantenían constantemente encendido, se apaga. Y, entonces, envían a tres miembros de la tribu en su busca. En esta película se tomaron mucho interés en que todo fuera lo más auténtico posible. El lenguaje corporal de los personajes se debe a las indicaciones de Desmond Morris; Anthony Burgess creó un lenguaje imaginario de 200 vocablos y se tuvieron en cuenta también las costumbres de algunas tribus de Tasmania, las islas Andamán y Nueva Guinea que, en pleno siglo XX, viajaban para pedir fuego a sus vecinos cuando el suyo se extinguía. Estas poblaciones vivían en zonas en las que las condiciones para hacer fuego no eran las más adecuadas. Y perdieron el conocimiento de cómo hacerlo, si es que lo tuvieron alguna vez...

El fuego, en aquella época, se utilizaba para combatir el frío, para tener luz durante la noche y para cocinar alimentos. En la actualidad, para mucha gente en los países en vías de desarrollo, las cosas apenas han cambiado desde el punto de vista del consumo de energía. A la madera se le han unido como combustibles los residuos de las cosechas y los excrementos de los animales, es decir, emplean la biomasa como fuente de energía. Y, en lo que se refiere a sus usos, utilizan el fuego, además, para producir cerámica y metales. Pero éstas son actividades que no realiza cualquiera. En los países en vías de desarrollo más pobres, los combustibles tradicionales constituyen, en algunos casos, más del 90 % del consumo total de energía.

TABLA 1
Consumo mundial de energía primaria, 2001

Fuente	Energía primaria (EJ)	Porcentaje del total
Combustibles fósiles	332	79,4
Petróleo	147	35,1
Gas natural	91	21,7
Carbón	94	22,6
Renovables	57	13,7
Hidroeléctrica	9	2,3
Tradicional	39	9,3
Nuevas renovables	9	2,2
Nuclear	29	6,9
Total	418	100

La energía obtenida de distintas fuentes a escala mundial se expresa normalmente en exajulios (EJ). Un exajulio es un trillón de julios. Fuente: *World Energy Assessment: Overview 2004 Update*, United Nations Development Program, Nueva York, 2004.

Sin embargo, a escala global, la mayor parte del consumo de energía está basada en el uso de combustibles fósiles. En efecto, en 1998, el 79,4 % de la energía primaria provenía de este tipo de combustibles. Un 9,3 % tuvo su origen en combustibles tradicionales, un 6,9 % en la energía nuclear, mientras que la energía hidroeléctrica y las nuevas energías renovables contribuyeron cada una con un 2,3 y un 2,2 %, respectivamente.

TABLA 2
Agresiones ambientales debidas a las actividades humanas, por sector, a mediados de la década de 1990

Agresiones	Línea base natural	Índice de disrupción humana (<i>a</i>)	Cuota de disrupción humana ocasionada por:			
			Suministro de energía comercial	Suministro de energía tradicional	Agricultura	Fabricación, otros
Emissiones de plomo a la atmósfera (<i>b</i>)	12.000 t/año	18	41 % (uso de combustibles fósiles, incluidos los aditivos)			59 % (producción de metales, fabricación, incineración de residuos)
Acetate añadido a los océanos	200.000 t/año	10	44 % (petróleo, cosechas, transporte)	Insignificante	Insignificante	56 % (eliminación de residuos de aceite, incluidos los cambios de aceite de motor)
Cadmio Emisiones a la atmósfera	1.400 t/año	5,4	13 % (uso de combustibles fósiles)	5 % (uso de combustibles tradicionales)	12 % (incendios agrícolas)	70 % (producción de metales, fabricación, incineración de residuos)
Total azufre Emisiones a la atmósfera	31 millones t-S/año	2,7	85 % (uso de combustibles fósiles)	0,5 % (uso de combustibles tradicionales)	1 % (incendios agrícolas)	13 % (producción de metales, incineración de residuos)

Agresiones	Línea base natural	Índice de disrupción humana (d)	Cuota de disrupción humana ocasionada por:			
			Suministro de energía comercial	Suministro de energía tradicional	Agricultura	Fabricación, otros
Flujo de metano a la atmósfera	160 millones t/año	2,3	418 % (combustibles fósiles, cosechas)	5 % (uso de combustibles tradicionales)	65 % (arroz sin desgranar, animales domésticos, limpieza de terrenos)	12 % (vertederos)
Fijación del nitrógeno (como NO _x , NH ₃) (c)	140 millones (t-N/año)	1,5	30 % (uso de combustibles fósiles)	2 % (uso de combustibles tradicionales)	67 % (fertilizantes, incendios agrícolas)	1 % (incineración de residuos)
Mercurio Emisiones a la atmósfera	2.500 t/año	1,4	20 % (uso de combustibles fósiles)	1 % (uso de combustibles tradicionales)	2 % (incendios agrícolas)	77 % (producción de metales, fabricación, incineración de residuos)
Oxido nitroso Flujos a la atmósfera	33 millones t/año	0,5	12 % (uso de combustibles fósiles)	8 % (uso de combustibles tradicionales)	80 % (fertilizantes, limpieza de terrenos, disrupción de acuíferos)	Pequeño
Partículas Emisiones a la atmósfera	3.100 millones t/año (d)	0,12	35 % (uso de combustibles fósiles)	10 % (uso de combustibles tradicionales)	40 % (incendios agrícolas)	15 % (producción de metales, limpieza de terrenos no agrícolas, residuos)

Un problema: la necesidad de un nuevo sistema de producción de energía

Agresiones	Línea base natural	Índice de disrupción humana (d)	Cuota de disrupción humana ocasionada por:			
			Suministro de energía comercial	Suministro de energía tradicional	Agricultura	Fabricación, otros
Hidrocarburos que no contienen metano Emisiones a la atmósfera	1.000 millones t/año	0,12	35 % (procesado y uso de combustibles fósiles)	5 % (uso de combustibles tradicionales)	40 % (incendios agrícolas)	20 % (limpieza de terrenos no agrícolas, incineración de residuos)
Dióxido de carbono Flujos a la atmósfera	150.000 millones t-C/año	0,05 (e)	75 % (uso de combustibles fósiles)	3 % (deforestación para leña)	15 % (deforestación para limpieza de terrenos)	7 % (deforestación neta para madera, fabricación de cemento)

La magnitud de la agresión es sólo un factor que determina el tamaño del impacto ambiental real. Fuente: *Energy and the challenge of sustainability*, United Nations Development Program, Nueva York, 2000.

a) El índice de disrupción se define como la relación entre el flujo generado por los humanos y el flujo natural.

b) En esta tabla se asume que la parte correspondiente a la automoción de las emisiones de plomo inducidas por el hombre representa un 50 %.

c) Calculado basándose en la fijación total del nitrógeno menos la de N₂O.

d) Masa seca.

e) Aunque aparentemente pequeño, debido a la larga vida atmosférica y otras características del CO₂, este ligero desequilibrio de los flujos naturales de CO₂ ocasiona un incremento anual del 0,4 % en la concentración atmosférica.

El uso de los combustibles fósiles lleva aparejada una serie de problemas. Algunos son ambientales. Otros son políticos y económicos. Finalmente, tenemos los problemas de sostenibilidad.

Hay distintos tipos de problemas ambientales. Así, durante la extracción, transporte y procesado del petróleo se producen emisiones de hidrocarburos. Consideremos el caso de los accidentes de los petroleros, los buques más grandes que surcan los mares. En 1989 una de estas naves, el *Exxon Valdez*, encalló en Alaska, y vertió 39.000 toneladas de petróleo. Como consecuencia, se formó una capa de crudo de 4.000 kilómetros cuadrados. Y tenemos reciente en la memoria el accidente del *Prestige* frente a las costas gallegas...

El uso de los combustibles fósiles genera un gran número de contaminantes atmosféricos como los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles, las partículas sólidas y el dióxido de azufre. La interacción entre los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno y la luz solar forma las neblinas fotoquímicas, cuyo componente más importante es el ozono. Éste es un compuesto químico tremendamente reactivo, por lo que su presencia en las capas bajas de la atmósfera no es deseable, dado que deteriora los tejidos biológicos. En muchas ciudades de los países desarrollados se sobrepasan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud para el ozono, el dióxido de nitrógeno y las partículas sólidas. La situación en las ciudades de los países en vías de desarrollo es mucho peor puesto que, en ellas, las concentraciones de estos contaminantes son mucho mayores.

LA CIUDAD DEL CARBÓN

Siempre que hay una concentración de personas, como sucede en una ciudad, aparecen problemas de contaminación, dado que su entorno no es capaz de asimilar o eliminar las sustancias producidas como consecuencia de sus actividades. En la Antigüedad, Roma fue la mayor ciudad de Occidente. Para calentarse, para cocinar, para tener luz durante la noche empleaban antorchas, lámparas de aceite

o braseros de carbón vegetal. Los humos producían una atmósfera irrespirable dentro de las casas. Y, en el exterior, había que sumar a estas emisiones las de las panaderías, los hornos de las termas y los talleres de fundición y de cerámica. Se creaba así una neblina en la ciudad, aromatizada por los fétidos olores que desprendían las cloacas en mal estado. Séneca describe en uno de sus escritos como, por motivos de salud, se fue al campo, dejando a sus espaldas el aire malsano de Roma.

Los depósitos de carbón mineral comenzaron a explotarse en Inglaterra en el siglo XII. De hecho, en el *Domesday Book* (1086), un censo de todo lo que tenía valor económico en Inglaterra, elaborado por orden de Guillermo I el Conquistador, no se mencionan los depósitos de carbón. Llegó por primera vez a Londres en 1228, como lastre en los viajes de vuelta de los navíos desde las zonas menos pobladas de la isla. El mineral se descargaba en el puerto y, a finales del siglo XIII, éste ya inundaba los muelles, las calles y los callejones de la ciudad.

Poco a poco hubo pequeñas industrias que fueron utilizando el carbón, dado que éste ardía durante más tiempo y proporcionaba más calor que la madera. Sin embargo, la combustión del carbón produce dióxido de azufre, un gas que irrita los pulmones, y muchas más partículas sólidas que la madera. Los problemas no tardaron, pues, en aparecer. En 1306 se prohibió su uso en Londres, aunque parece que nadie hizo mucho caso... Durante el siglo XIV, la gente comenzó a utilizarlo en sus casas para cocinar y calentarse. Su uso se intensificó durante los siglos XVI y XVII. La ciudad, dicen, se adivinaba a lo lejos por la nube de humo que flotaba sobre ella. La situación empeoró con el desarrollo de la Revolución Industrial, alimentada con cantidades cada vez mayores de carbón. En Londres, a mediados del siglo XIX, los días con niebla y humos se multiplicaron por tres. Además, comenzaron a observarse aumentos de las tasas de mortalidad durante estos episodios.

En 1905 el Dr. Des Voeux denominó *smog* a la mezcla de humo y niebla (*smoke* y *fog*, en inglés) que caía sobre la ciudad cuando, en invierno, se daban las condiciones meteorológicas adecuadas.

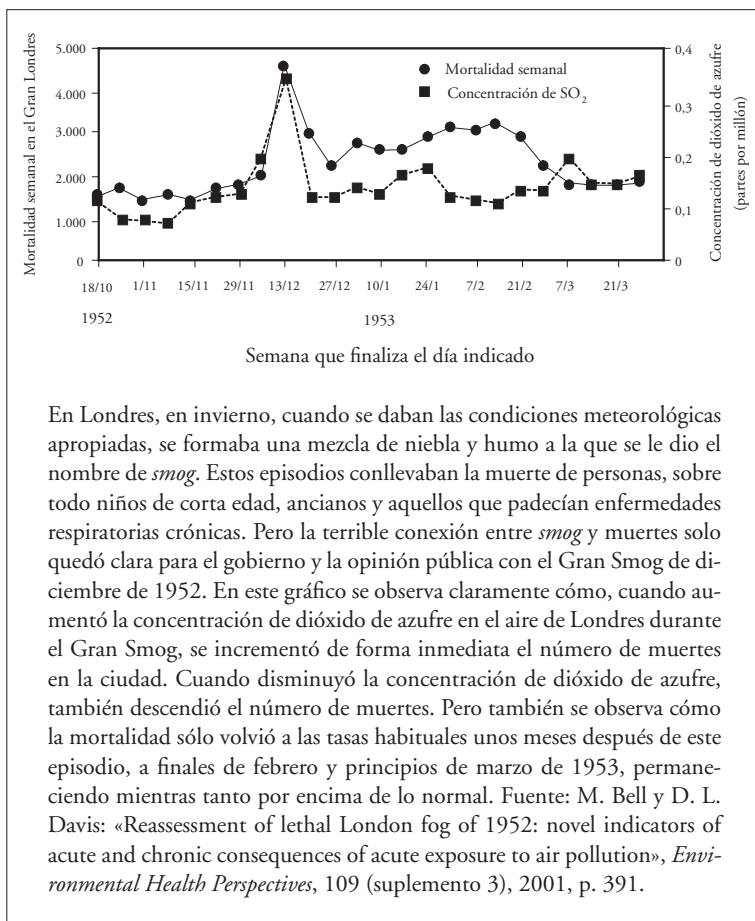
Durante la primera mitad del siglo XX, la situación mejoró. Entre 1892 y 1948 no se registraron episodios graves de *smog*. La ciudad se extendió y se desarrollaron procesos más eficientes de combustión pero, en las casas, se seguía utilizando el carbón. Cuando, en 1945, algunas autoridades trataron de crear zonas sin humos, aprovechando la reconstrucción de Londres, George Orwell defendió los fuegos de carbón como un derecho de nacimiento de los ingleses.

Después de la II Guerra Mundial, la situación económica del Reino Unido era difícil. Por esto, el carbón de más calidad se desvió a la exportación, con lo que se utilizó para el consumo doméstico un carbón de baja calidad. En noviembre de 1948, un episodio de *smog* provocó entre 700 y 800 muertes. Fue un aviso del Gran Smog que se abatió sobre la ciudad cuatro años después.

A principios de diciembre de 1952 una capa de aire frío quedó atrapada en la superficie, con aire más caliente por encima. En ella se condensó la humedad en forma de gotitas de agua, y comenzaron a acumularse las emisiones de las chimeneas de las casas y las industrias, así como las de los tubos de escape de los autobuses que, en julio, habían sustituido a los tranvías eléctricos. El fenómeno comenzó la noche del 4 al 5 de diciembre; la noche siguiente la neblina era tan espesa que, en algunas zonas, la visibilidad se hizo mínima: la gente no podía verse los pies, y sólo los ciegos encontraban los caminos de vuelta a sus casas. Despejó el día 9 de diciembre.

Desde mediados del siglo XIX los médicos sospechaban que los *smogs* mataban a la gente, sobre todo a los niños de corta edad, a las personas mayores y a los que padecían enfermedades respiratorias crónicas, como asma y bronquitis. De hecho, en la época victoriana se registraron en algunos de estos episodios cientos de muertes por encima de lo normal (500 en diciembre de 1873, y 2000 en febrero de 1880). Pero en esa época era difícil distinguir el efecto del *smog* de los efectos de las enfermedades infecciosas respiratorias, muy extendidas. Además, los *smogs* suelen estar asociados con bajas temperaturas, por lo que también había muertes por hipotermia. Pero en 1952 las enfermedades infecciosas ya eran mucho menos frecuentes y, aunque las temperaturas fueron inusualmente bajas, no lo fueron tanto como para atribuirles muchas muertes.

Un problema: la necesidad de un nuevo sistema de producción de energía



Los propietarios de funerarias y floristerías fueron los primeros que notaron que algo inusual estaba pasando: se estaban quedando sin ataúdes y flores. Sólo después del episodio se vio que había habido tres mil muertes más de las habituales. Pero la mortalidad permaneció elevada durante los dos meses siguientes. Alguien atribuyó estas muertes adicionales a una epidemia de gripe. Sin embargo, un trabajo reciente ha puesto de manifiesto que, de acuerdo con la información disponible, no hubo una epidemia de gripe en Inglaterra en esas fechas. Esas muertes se debieron al Gran Smog. El número

ro total de muertes asociadas con el mismo fue de 12.000. Como comparación, durante la II Guerra Mundial, Londres tuvo 30.000 víctimas civiles en los bombardeos.

Este episodio forzó la adopción de medidas políticas y, en 1956, se aprobó la Ley del Aire Limpio, que autorizó a los ayuntamientos a crear zonas libres de humos y facilitó subvenciones a los propietarios para sustituir los fuegos tradicionales de carbón de las casas por otros que utilizaran electricidad, gas natural o combustibles derivados del petróleo. En cualquier caso, el progreso fue lento. Hubo que construir centrales térmicas para satisfacer la demanda de electricidad, que aumentó a medida que la gente abandonaba el carbón. Y el empuje definitivo vino con el comienzo de la explotación de los depósitos de gas natural del Mar del Norte, que provocó una disminución de su precio. Siguió habiendo episodios de *smog* (enero de 1956, 1.000 muertes; diciembre de 1957, 759 muertes; enero de 1959, 200-250 muertes). El último *smog* importante se produjo en diciembre de 1962.

Los episodios agudos de contaminación matan. Pero una contaminación no tan intensa también lo hace. En Dublín, la calidad del aire se deterioró durante la década de los ochenta del siglo pasado, cuando empezaron a utilizarse combustibles sólidos en las casas, sobre todo carbón bituminoso, en lugar de combustibles derivados del petróleo. El 1 de septiembre de 1990 el Gobierno irlandés prohibió la venta y distribución de este carbón en la ciudad de Dublín. Recientemente, un grupo de investigadores ha estudiado el efecto que tuvo la prohibición sobre la contaminación atmosférica y la salud pública de esta ciudad. En este estudio se han comparado las concentraciones de contaminantes y las tasas de mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares durante 72 meses antes y 72 meses después de la prohibición. Las tasas de mortalidad se han ajustado para tener en cuenta los efectos de la variación de la distribución de la población, de la meteorología, de las epidemias de enfermedades respiratorias y de la variación de las causas de mortalidad en ese período de tiempo.

El efecto de la prohibición fue una reducción inmediata y permanente de la concentración media de partículas de un 66 %. Las concentraciones de dióxido de azufre disminuyeron gradualmente en un 33 %. Las muertes por enfermedades respiratorias y cardiovasculares disminuyeron en un 15,5 y un 10,3 %, respectivamente. Y, lo que es más importante, este efecto se produjo inmediatamente, en el invierno siguiente a la prohibición.

Este estudio sugiere, por tanto, que una parte significativa de las muertes que se producen en las ciudades podrían tener su origen en la contaminación atmosférica. Y, en nuestras ciudades, la mayor parte de esta contaminación proviene de los tubos de escape de los coches...

LA CIUDAD DE LOS COCHES

Los automóviles son ubicuos en los países desarrollados y en muchas ciudades de los países en vías de desarrollo. El parque automovilístico mundial era, en el año 2001, de 555 millones de vehículos, para una población de 6.200 millones: un coche por cada 11,2 personas. En España, el parque era de 17 millones, un vehículo por cada 2,4 personas.

Los tubos de escape de estos vehículos emiten a la atmósfera enormes cantidades de contaminantes, como el dióxido de carbono (el motor del cambio climático) y el monóxido de carbono, un gas venenoso. O como las partículas de carbón de tamaño muy pequeño, los óxidos de nitrógeno y distintos compuestos orgánicos volátiles. Estas emisiones crean una mezcla de sustancias que comienzan a reaccionar cuando, sobre ellas, incide la luz solar, generándose así una neblina fotoquímica en la que están presentes sustancias muy reactivas. Entre ellas, la más importante es el ozono.

La ozonósfera es una región de la atmósfera que se extiende entre los 20 y los 60 kilómetros de altura. En ella hay concentraciones apreciables, aunque pequeñas, de ozono, una molécula constituida por tres átomos de oxígeno, O₃. En la atmósfera, el oxígeno se en-

El actual sistema energético está basado en unos recursos no renovables, los combustibles fósiles, y su uso lleva aparejado una serie de problemas, como el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. En este libro se analiza y se explica cuál será la naturaleza de un nuevo sistema energético sostenible basado en fuentes renovables.

El elemento central de este sistema energético será el hidrógeno, que sustituirá a los combustibles derivados del petróleo, almacenará la energía obtenida de las fuentes renovables intermitentes y podrá convertirse en electricidad en una pila de combustible. La transición de los actuales recursos no renovables al hidrógeno no puede ser inmediata, y tanto la Comisión Europea como Estados Unidos están planificando la mejor manera de llevarla a cabo. Mientras tanto, en Islandia han tomado la iniciativa y, para el año 2030, serán la primera economía del hidrógeno del mundo.