

ENERGÍA SOSTENIBLE

sin malos humos

Adaptación al caso de
España del exitoso libro:
***SUSTAINABLE ENERGY –
WITHOUT THE HOT AIR***
D. MacKay

Javier Samanes | Julio Pascual | Alberto Berrueta

Miguel Araiz | Leyre Catalán | Patricia Aranguren | David Arricibita

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Energía sostenible. Sin malos humos

Energía sostenible. Sin malos humos

Javier Samanes Pascual
Julio Pascual Miqueleiz
Alberto Berrueta Irigoyen
Miguel Araiz Vega
Leyre Catalán Ros
Patricia Aranguren Garacochea
David Arricibita de Andrés

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

This adaptation, based on *Sustainable energy – Without the hot air* (1st edition)
© 2009 David J. C. MacKay, is published by arrangement with UIT Cambridge Ltd. (www.uit.co.uk)

Esta adaptación, basada en el libro de David J. C. MacKay *Sustainable energy – Without the hot air* (1ª ed.), se ha publicado gracias al acuerdo alcanzado con UIT Cambridge Ltd.

Título: *Energía sostenible. Sin malos humos*

Autores: Javier Samanes Pascual / Julio Pascual Miqueleiz /
Alberto Berrueta Irigoyen / Miguel Araiz Vega / Leyre Catalán Ros /
Patricia Aranguren Garacochea / David Arricibita de Andrés

Edita: Universidad Pública de Navarra / Nafarroako Unibertsitate Publikoa
1ª edición: 2019; 1ª reimpresión: 2020

Fotografía de cubierta: pxhere.com/en/photo/856655 (Creative Commons CC0)

Imágenes: Autores

Composición: Pretexto

Imprime: Rodona Industria Gráfica

ISBN: 978-84-9769-353-0

Depósito Legal: NA 2354-2019

© Universidad Pública de Navarra / Nafarroako Unibertsitate Publikoa

© De los autores

© De los autores de sus respectivas fotografías

Coordinación y distribución: Sección de Comunicación (Publicaciones)

Universidad Pública de Navarra

Campus de Arrosadia

31006 Pamplona

publicaciones@unavarra.es

www.unavarra.es/publicaciones/



Licencia Creative Commons Attribution-Non-Commercial-Share-Alike 4.0 International

*Dedicado a todos aquellos que no van a poder disfrutar
de las reservas de energía acumuladas
durante millones de años.*

David J. C. MacKay,
Sustainable energy – Without the hot air

Índice

Prólogo	11
Prefacio	13
I. Números, no adjetivos	17
1. Motivación	19
2. Hoja de balance	43
3. Coches	53
4. Viento	57
5. Aviones	61
6. Sol	65
7. Calefacción y refrigeración	79
8. Hidroelectricidad	83
9. Luz	87
10. Viento marino	91
11. Electrodomésticos	99
12. Olas	107
13. Alimentos y agricultura	111
14. Mareas	117
15. Fabricación y transporte	125
16. Geotermia	137
17. Servicios públicos	143
18. ¿Podemos vivir de las energías renovables?	147
II. Marcando la diferencia	159
19. Muchos pocos suman poco	161
20. Mejorando el transporte	167
21. Calefacción inteligente	193

22. Uso eficiente de la electricidad	211
23. ¿Combustibles fósiles sostenibles?	215
24. ¿Nuclear?	221
25. ¿Vivir de las renovables de otros países?	231
26. Fluctuaciones y almacenamiento	241
27. Cinco planes energéticos para España	261
28. Pongamos los costes en perspectiva	271
29. Qué hacer ahora	283
30. Planes energéticos para el mundo	295
31. La última cosa de la que deberíamos hablar	309
32. Diciendo que sí	321
III. Apéndices técnicos	323
A. Coches II	325
B. Viento II	337
C. Aviones II	345
D. Sol II	363
E. Calefacción y refrigeración II	371
F. Olas II	393
G. Mareas II	399
H. Fabricación y transporte II	413
IV. Datos útiles	419
I. Referencia rápida	421
J. Población y superficies	435
K. Historia energética española	445
Bibliografía	449
Sobre los autores	461
Agradecimientos	469

Prólogo

Aunque la energía ha sido, a lo largo de la historia, uno de los principales motores de cambio en las sucesivas civilizaciones, el impacto de su consumo sobre el medio ambiente a escala global jamás había llegado a amenazar el equilibrio de nuestro planeta. Tal vez, por ello, ha hecho falta que miles de científicos de más de 190 países, reunidos en torno al Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, en sus siglas inglesas), hayan lanzado la voz de alarma sobre el calentamiento global para que la comunidad internacional tome conciencia de que, ahora sí, el modelo energético actual de nuestra sociedad puede suponer un riesgo real para el futuro del planeta.

Las energías renovables se configuran como una de las principales armas para luchar contra el cambio climático. Inicialmente calificadas despectivamente como tecnologías poco viables y sin capacidad de suministro a gran escala, su curva de aprendizaje se ha recorrido en los últimos años con inusitada rapidez, siendo en estos momentos competitivas frente a las energías convencionales. Sin embargo, ni siquiera el espectacular descenso de costes que han experimentado ha evitado que vuelvan a oírse voces críticas, esta vez relativas a su almacenamiento energético y capacidad de integración en la red eléctrica. Los últimos avances en estos temas están volviendo a desmentir las supuestas limitaciones del nuevo modelo energético basado en energías renovables, siendo su implantación prácticamente imparable.

A pesar de todo ello, y en pleno siglo XXI, en el que las «fake news» y las campañas de intoxicación invaden casi cualquier ámbito de difusión de la información, resulta necesario hacer un balance honesto de la situación en que nos encontramos a nivel energético sin partir a priori de ningún posicionamiento doctrinario. Preguntas como «¿es posible en estos momentos un sistema totalmente renovable?», «¿existe recurso energético y capacidad de generación suficiente para abastecer a toda la humanidad?», «¿es cierto que consumimos demasiado y de forma poco eficaz?» o «¿es viable una movilidad totalmente eléctrica?» tienen a menudo respuestas extremas dependiendo del ámbito en el que se realizan.

Las personas que han escrito este libro son expertas en energías renovables y eficiencia energética, y llevaban años realizándose las mismas preguntas y desconfiando de respuestas dogmáticas que dieran por zanjado el tema en un sentido u otro. Cuando cayó en sus manos el libro de David J. C. MacKay, *Sustainable energy – Without the hot air*, vieron la oportunidad de realizar un análisis crítico de la situación energética actual que, con muchas cifras y análisis bien argumentados, permitiese componer una imagen del problema fidedigna y alejada de dogmas, y ayudase a entender hasta qué punto esta revolución energética es real y ha llegado para quedarse.

Conozco a Javier, Julio, Alberto, Miguel, Leyre, Patricia y David desde hace ya unos cuantos años, en los que he trabajado con ellos en muchos y ambiciosos proyectos, y me ha hecho una ilusión especial su petición para que prologue este libro. Además de buenos investigadores, son excelentes profesionales de la educación que han formado ya a unas cuantas generaciones de estudiantes. Como los buenos comunicadores, poseen esa rara combinación de atesorar amplios conocimientos y tener al mismo tiempo una innata capacidad para transmitirlos. El presente libro es consecuencia de ello y consigue explicar de forma sencilla, pero en profundidad, aspectos como los principales elementos de consumo de las sociedades actuales, las tecnologías de generación, los balances energéticos, el uso eficiente de la energía, los recursos energéticos y la viabilidad de implantar sistemas energéticos nuevos a nivel mundial.

Por todo ello, querido lector, querida lectora, no encontrarás en este libro posicionamientos de partida a favor o en contra, ni datos sesgados, ni análisis tendenciosos. Como muy bien dicen los autores, se trata de «dar números» y no de «poner adjetivos», para conseguir que elabores tus propios argumentos y te formes tu propia opinión sobre esta revolución energética de la que, de un modo u otro, todos vamos a ser protagonistas. Y todo ello con un talante abierto, positivo, divertido y entretenido, para que puedas comprobar que también es posible hablar de la energía «sin malos humos».

Pablo Sanchis Gúrpide

Profesor Titular del Dpto. de Ingeniería Eléctrica,
Electrónica y de Comunicación de la Universidad Pública de Navarra
Director de la Cátedra de Energías Renovables
Responsable del Grupo de Investigación en Ingeniería Eléctrica,
Electrónica de Potencia y Energías Renovables

Prefacio

¿Puede España ser sostenible energéticamente? Si alguna vez te has planteado esta pregunta, o quieres saber en qué gastamos la energía y de dónde podría ser obtenida, aquí encontrarás respuestas. Nuestros recursos renovables son inmensos, pero también lo es nuestro consumo. Este libro no solo se centra en analizar la situación actual y las posibilidades que las energías renovables tienen en nuestro país, sino que, presentando de forma clara los datos sobre nuestro gasto energético, permite a cada lector identificar sus mayores consumos, de tal forma que pueda considerar cómo reducirlos. *Energía sostenible. Sin malos humos* es la adaptación al caso español, actualizando los datos, del libro publicado hace una década por David MacKay en el Reino Unido.

La sostenibilidad es hoy en día una preocupación creciente en la sociedad. Pero a menudo este interés se ve contaminado por cifras enormes que resultan muy complicadas de comprender. Además, todos hemos oído hablar en algún momento sobre pequeños gestos al alcance de nuestra mano que podrían permitir un cambio hacia un modelo sostenible. Nada más lejos de la realidad, pequeñas acciones solo permiten pequeños cambios, y el cambio de modelo energético al que nos enfrentamos requiere grandes acciones. Para deshacernos de todo este ruido, en este libro se presentan los números de forma clara y sencilla, utilizando unidades a nuestro alcance y que son comprensibles por todas las personas. Esto permite identificar de una forma mucho más personal los consumos energéticos de nuestro día a día. A lo largo de la primera parte del libro se van construyendo dos columnas: una de color rojo, que representa la agregación de consumos, y otra de color verde, que representa la capacidad de generación. Estas columnas ofrecen una comparación muy visual de la infraestructura renovable que sería necesaria para mantener nuestro ritmo de consumo energético actual. Además, utiliza números «gordos» obtenidos de la experiencia del día a día. Por ejemplo, para calcular la capacidad de generación eólica se parte de una velocidad de viento estimada a partir de la velocidad típica de un ciclista urbano. Toda esta información se encuentra en la primera parte del libro, en los capítulos del 1 al 18.

Sin embargo, este libro no se centra únicamente en el análisis de la situación actual, sino que da un paso más y propone alternativas al modelo energético actual con el fin de alcanzar un modelo 100% renovable a medio plazo. Estas medidas incluyen un aumento importante en la potencia renovable instalada, un aumento en la eficiencia energética y algunos ligeros cambios en nuestro estilo de vida que permitan una reducción del consumo. Por supuesto, los tres frentes deben ser atacados al mismo tiempo. Estas propuestas se recogen en la segunda parte del libro, en los capítulos 19 a 32.

Por último, este es un libro divulgativo al alcance de todas las personas, que busca transmitir toda la información de forma clara e intuitiva sin perderse en complicados cálculos. Pero si eres de los que les gustan las cuentas, al final del libro encontrarás un apartado en el que se explica de forma rigurosa muchos de los cálculos simples realizados en las primeras partes del libro. Estos apéndices técnicos forman la tercera parte del libro, son los apéndices de la A hasta la H.

Cómo leer este libro

Muchos de los capítulos comienzan con una cita. Por favor, no asumas en ningún momento que la hemos colocado ahí porque estemos de acuerdo con ella; tomadla como una provocación, como una hipótesis que debe ser críticamente revisada, y, en algunos casos, como una simple introducción.

Algunos de los capítulos de la primera parte del libro (1-18) van acompañados de un apéndice técnico (A-H). Estos capítulos técnicos comienzan en la página 323.

Al final de cada capítulo hay una serie de notas que aportan más información sobre algunos de los aspectos discutidos en los mismos. Estas notas amplían la información presentada y, en un gran número de ocasiones, proporcionan el texto de referencia del que se han extraído alguno de los datos que han sido utilizados.

También se recogen una serie de páginas web que pueden resultar interesantes en cada momento de la lectura. En el momento de la publicación todas ellas funcionan, pedimos perdón anticipadamente si estas páginas comienzan a dar problemas con el paso del tiempo. Por supuesto, este es un libro abierto a la discusión y nos gustaría recibir comentarios, críticas o correcciones. Todo esto se puede realizar a través de la web del libro: <https://es-sinmaloshumos.com>.

Este libro es gratis

Bueno, esto no es del todo cierto si tienes en tus manos la versión impresa del libro. Obviamente, su edición e impresión tiene un coste que debe ser cubierto. Sin embargo, los autores del libro no pretendemos sacar ningún beneficio económico del mismo. Por este motivo, existe una versión totalmente gratuita que se puede conseguir a través de Internet. Más información en la web del libro: <https://es-sinmaloshumos.com>.

Siguiendo el ejemplo de David MacKay, publicamos este libro bajo la licencia Creative Commons Attribution-Non-Commercial-Share-Alike 4.0 International. Por supuesto, invitamos a todos los lectores a utilizar el material aquí desarrollado y expuesto, siempre que no se realice con un propósito comercial. En la web se encuentran las figuras más importantes con mayor resolución por si fuesen de utilidad para vuestras presentaciones.



Figura 1: Enlace a la página web del libro: <https://es-sinmaloshumos.com>.

Parte I

Números, no adjetivos

Capítulo 1

Motivación

Vivimos en una época en la que las emociones y los sentimientos cuentan más que la verdad, y en la que hay una gran ignorancia sobre la ciencia.

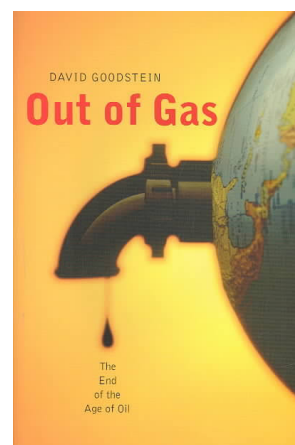
James Lovelock

Hay opiniones muy diversas sobre el problema energético actual. A modo de ejemplo, mira los dos libros que te presentamos al margen de esta página; el primero es de un físico, y el segundo, de un economista. En *Out of gas*, el físico David Goodstein, del Instituto Tecnológico de California (Caltech), describe una inminente crisis energética como consecuencia de «El fin de la edad del petróleo». Esta crisis llegará pronto, predice. La crisis golpeará, no cuando se extraiga la última gota de petróleo, sino cuando la extracción no pueda satisfacer la demanda —quizás tan pronto como 2015 o 2025, anunciaba en el año 2004—. Además, incluso si mágicamente pudiéramos sustituir de forma instantánea toda la energía que consumimos por nuclear, Goodstein sostiene que la crisis del petróleo sería reemplazada por una crisis nuclear en unos veinte años, ya que las reservas de uranio también se vaciarían.

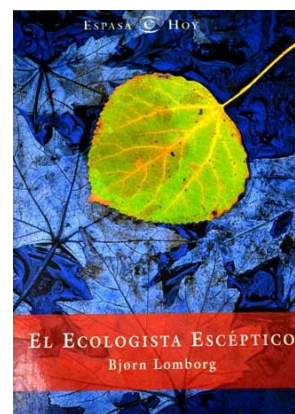
Sin embargo, en *El ecologista escéptico*, el economista Bjørn Lomborg pinta un cuadro totalmente diferente. Él mantiene que «todo va bien». No solo eso, sino que «todo va a mejor». Además, afirma que «no nos dirigimos a una gran crisis energética», y que «hay muchísima energía».

¿Cómo pueden dos personas inteligentes llegar a conclusiones tan distintas? ¡Intentemos llegar al fondo de esta cuestión!

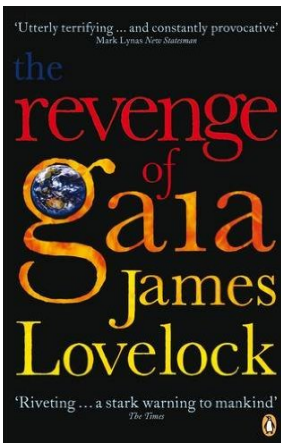
La energía irrumpe como tema recurrente en las noticias en estos últimos años con titulares que hablan sobre el cambio climático o sobre la factura de la electricidad. ¿Cómo debería hacer frente España a sus necesidades energéticas? ¿Y el mundo?



Out of gas, de David Goodstein (2004).



El ecologista escéptico, de Bjørn Lomborg (2001).



The revenge of gaia, de James Lovelock (2006).

«¿Energía eólica o nuclear?», por ejemplo. Es difícil imaginar un tema en el que haya una mayor polarización entre expertos. En 2011 la canciller alemana Angela Merkel anunció el cierre inmediato de siete centrales nucleares y programó el cierre del resto para antes de 2022 diciendo: «Nuestro sistema eléctrico tiene que cambiar radicalmente, y se puede cambiar. Queremos que la electricidad sea más segura y, al mismo tiempo, fiable y barata». Por otra parte, durante el III Congreso de Seguridad Nuclear ENSREG, celebrado en Bruselas en junio de 2015, Miguel Arias Cañete, Comisario europeo de Acción por el Clima y Energía desde 2014 y anterior ministro español de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2011-2014), dijo: «Si queremos ser realistas, cualquier solución a nuestros grandes desafíos energéticos ha de tener en cuenta la energía nuclear».

Discusiones sobre este tema tienen lugar también dentro del propio movimiento ecologista. Los ecologistas están de acuerdo en que hay que hacer *algo* urgentemente, pero *¿qué?* Jonathon Porritt, presidente de la Sustainable Development Commission escribió: «hoy en día, no hay justificación para llevar a cabo planes de desarrollo de nueva potencia nuclear, y [...] cualquiera de estas propuestas es incompatible con la estrategia de desarrollo sostenible [del Gobierno]»; y «una estrategia no nuclear puede y debe ser suficiente para producir todos los ahorros de emisiones que necesitamos hasta 2050 y a más largo plazo, y para asegurar el acceso seguro a fuentes fiables de energía». Por el contrario, el ambientalista James Lovelock escribió en su libro *The revenge of gaia*: «Ahora ya es demasiado tarde para llevar a cabo un desarrollo sostenible». Desde su punto de vista, la fisión nuclear, aunque no sea recomendable como panacea a largo plazo para nuestro descompuesto planeta, es «la única medicina efectiva que tenemos ahora». La energía eólica *onshore* es «meramente [...] un gesto para acreditar la conciencia medioambiental [de nuestros líderes]».

Este acalorado debate trata básicamente sobre números. ¿Cuánta energía podría proporcionar cada fuente, a qué coste económico y social y con qué riesgo? Sin embargo, raramente se mencionan los números. En debates públicos, la gente simplemente dice «la nuclear es un despilfarro de dinero» o «tenemos una cantidad enorme de sol y viento». El problema con estos argumentos es que no es suficiente saber que algo es «enorme»: necesitamos comparar un «enorme» con otro «enorme», es decir, con nuestro *enorme consumo energético*. Para hacer esta comparación necesitamos números, no adjetivos.

Además, cuando se usan números, su significado suele estar oculto por la enormidad. Se eligen los números para impresionar o para ganar puntos en una discusión, en lugar de para informar. «Los residentes de

Los Ángeles conducen 230 millones de km –la distancia entre la Tierra y Marte– cada día». «Cada año se deforestan 27 millones de hectáreas de selva». «6000 millones de kilos de basura se tiran cada año a los océanos». «Los españoles tiran 7,7 millones de toneladas de alimentos cada año». «El papel que se quema cada año en el Reino Unido podría llenar 103 448 autobuses de dos pisos».

Si se alinearan todas las ideas ineficaces para solucionar el problema del cambio climático, se recorrería la distancia desde la Tierra hasta la Luna y vuelta..., estamos divagando.

¿Cuál es el resultado de esta falta de números y hechos? Estamos en medio de una inundación de argumentos injustificados. Por ejemplo, algunas entidades reparten consejos sobre cómo podemos aportar nuestro granito de arena para salvar el planeta: «desconecta el cargador de tu teléfono móvil cuando no lo estés usando»; y si alguien apunta que los cargadores de móvil no son nuestro *principal* consumo energético, aparece la típica frase «muchos pocos suman mucho». ¿Muchos pocos suman mucho? Una frase más realista es:

Si todo el mundo hace un poco, conseguiremos poco.

Las empresas también contribuyen a esta verborrea cuando nos dicen lo maravillosas que son, o cómo nos pueden ayudar a «poner nuestro granito de arena». En la página web de BP, por ejemplo, se celebran las reducciones de dióxido de carbono (CO₂) que esperan conseguir cambiando la pintura utilizada en sus barcos. ¿Alguien está impresionado por esto? Seguro que todos adivinamos que no es la pintura exterior, sino el *contenido* de los tanques lo que merece atención si las emisiones de CO₂ de la sociedad han de reducirse significativamente. BP también ha creado un servicio on-line de neutralización del carbono, targetneutral.com, donde se dice que puedes «neutralizar» tus emisiones de carbono y «eliminar su coste para la Tierra» –en definitiva, que tu CO₂ puede limpiarse– por solo 20 € al año. ¿Qué implicaría esto? Si el coste de arreglar el cambio climático fueran 20 € por persona, ¡el Gobierno podría arreglarlo con los cambios que lleva el presidente en el bolsillo!

Más reprobables son las empresas que se aprovechan de la actual conciencia medioambiental ofreciendo «baterías que funcionan con agua», «teléfonos móviles biodegradables», «turbinas eólicas portátiles para llevar en el brazo» y otros sinsentidos.

Quizá los engaños que más ofenden son los que vienen de la gente que realmente debería saber –los editores de medios de comunicación que crean falsos mitos–, como por ejemplo el editor del *New Scientist* con su artículo sobre el «coche propulsado con agua»*.

* Mira las notas al final del capítulo (pág. 38) para conocer más detalles. (Todos los capítulos tienen unas notas finales donde se proporcionan referencias, fuentes de información y más detalles de los argumentos mencionados a lo largo del capítulo. Para no distraer al lector, no pondremos ninguna marca que haga referencia a estas notas finales a lo largo de los capítulos).



Figura 1.1: Greenpeace utilizó este cartel publicitario en 2006. ¿Tienen los aerogeneradores el potencial para sustituir a las odiadas torres de refrigeración?

En un clima donde la gente no entiende los números, los periódicos, campañas, empresas y políticos tienen vía libre para seguir aprovechándose de esta situación.

Necesitamos números simples, y necesitamos que sean fáciles de entender, de comparar y de recordar.

Con números seremos capaces de responder mejor a preguntas como las siguientes:

- ¿Puede un país como España vivir de sus propias fuentes de energía renovable?
- Si todo el mundo programa su termostato a una temperatura un grado más cercana a la del exterior, conduce un coche pequeño y apaga el cargador del móvil cuando no lo esté usando, ¿evitaremos la crisis energética?
- ¿Deberían incrementarse sustancialmente los impuestos a los combustibles para el transporte? ¿Se deberían rebajar a la mitad los límites de velocidad?
- ¿Alguien que prefiere los aerogeneradores a las centrales nucleares es «un enemigo de la sociedad»?
- Si el cambio climático es «una amenaza mayor que el terrorismo», ¿se debería criminalizar la «apología de los viajes» y redactar leyes en contra de la «promoción del consumo»?
- ¿Seremos capaces, mediante un cambio a «tecnologías avanzadas», de eliminar nuestras emisiones de gases de efecto invernadero sin cambiar nuestro estilo de vida?
- ¿Se deberá animar a la gente a comer más comida vegetariana?
- ¿Es la población de la Tierra seis veces mayor de lo que debería?

¿Por qué hablamos sobre política energética?

Hoy en día hay tres motivos para discutir sobre energía.

En primer lugar, los combustibles fósiles son un recurso limitado. Es probable que el petróleo barato (con el que funcionan nuestros coches y camiones) y el gas barato (con el que calentamos muchos de nuestros edificios) se acaben mientras todavía estemos vivos. Por eso, buscamos fuentes de energía alternativas. De hecho, dado que los combustibles fósiles son un recurso valioso y útil para la fabricación de plásticos y un gran

número de otros objetos, quizás deberíamos guardarlos para darles un uso más inteligente que simplemente quemarlos.

En segundo lugar, estamos interesados en la seguridad del suministro energético. Incluso si los combustibles fósiles están todavía disponibles en algún lugar del mundo, quizás no queramos depender de ellos si eso va a hacer que nuestra economía sea vulnerable ante los caprichos de extranjeros impredecibles. Si miramos la Figura 1.2, parece que realmente «nuestros» combustibles fósiles ya han alcanzado su pico. Europa tiene un inminente problema con la seguridad del suministro. Además, el uso del carbón en Europa también tiene sus días contados. La Agencia Internacional de la Energía, en su informe sobre el carbón publicado en 2016, pronosticaba que su consumo para electricidad se reducirá un 4,1 % al año en la UE hasta 2021 [1]. En España también se pronostica un futuro cada vez menos favorable al carbón, ya que la UE estableció el 1 de enero de 2019 como fecha límite para el cierre de las minas de carbón dependientes de ayudas públicas, y el 1 de julio de 2020 es la fecha límite en la que podrán operar las centrales de carbón sin haber acometido costosas obras para reducir los contaminantes que expulsan.

En tercer lugar, es muy probable que el uso de combustibles fósiles esté cambiando el clima. Se han identificado diversas actividades humanas como causantes del cambio climático, pero la mayor contribución la produce el aumento del efecto invernadero causado por el dióxido de carbono. Una gran parte de las emisiones de dióxido de carbono procede de la quema de combustibles fósiles. Y la principal razón por la que quemamos combustibles fósiles es por energía. El problema climático es, en gran parte, un problema energético.

Da igual cuál de estas tres razones (recurso finito, seguridad de suministro o cambio climático) te motive más, necesitamos números con sentido sobre energía.

Las dos primeras razones son simplemente motivaciones egoístas para reducir drásticamente el uso de combustibles fósiles. La tercera, el cambio climático, es una motivación más altruista –serán las futuras generaciones durante varios cientos de años quienes tengan que lidiar con los problemas del cambio climático, no nosotros–. Se dicen cosas como «¿qué sentido tiene que yo haga algo? ¡China está fuera de control!». Ahora vamos a hablar un poco sobre el cambio climático porque nos gustaría resumir algunos datos relacionados con este dilema ético de cómo hacerle frente. Si no te interesa el cambio climático, puedes pasar directamente a la siguiente sección en la página 36.

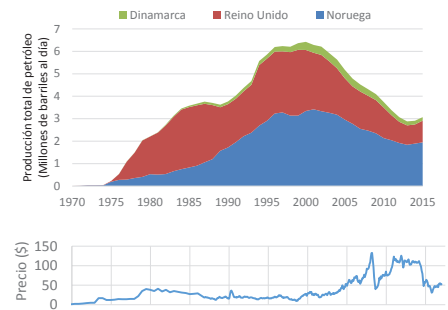
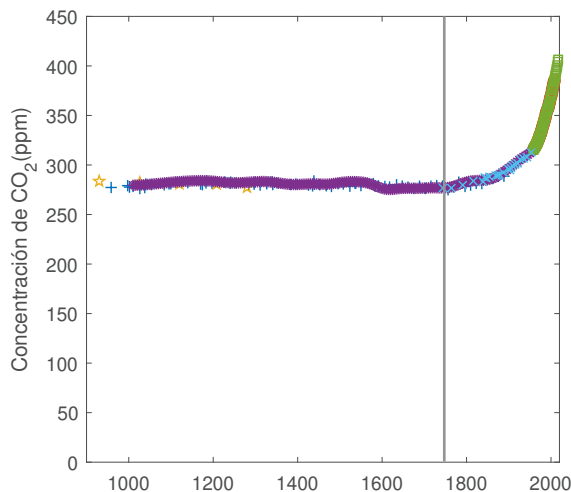


Figura 1.2: ¿Se están acabando «nuestros» combustibles fósiles? Producción de petróleo en algunos países de Europa (datos del *BP Statistical Review of World Energy* de 2016) y precio del barril de Brent en \$.

Figura 1.3: Concentración de CO_2 en la atmósfera, en partes por millón, durante los últimos 1100 años. Las medidas se han tomado a través de burbujas de aire atrapadas en hielo (hasta 1977) y directamente en Hawái (desde 1958). Los distintos colores de la gráfica indican distintas fuentes de datos. Creemos que ha pasado algo raro entre 1800 y 2000. Hemos señalado en línea gris el año 1769, que es cuando James Watt patentó su máquina de vapor. (La primera máquina de vapor se inventó 70 años antes, en 1698, pero la de Watt era mucho más eficiente y desencadenó la Revolución Industrial).



El cambio climático

La relación entre la energía y el cambio climático se razona en tres pasos. 1: la quema de combustibles fósiles aumenta la concentración de dióxido de carbono; 2: el dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero; 3: aumentar el efecto invernadero aumenta la temperatura media global del planeta (entre otros efectos).

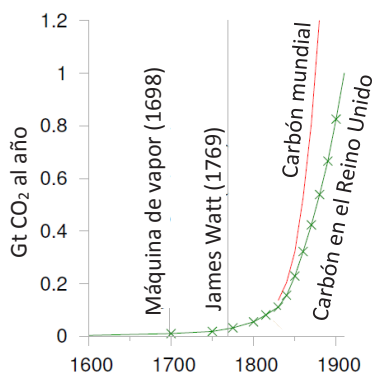


Figura 1.4: Historia de la producción de carbón en el Reino Unido y a nivel mundial desde 1600 hasta 1910. La producción se mide en miles de millones de toneladas de CO_2 —una unidad incomprensible, sí, pero no te preocupes: enseguida le vamos a dar personalidad—.

Emisiones de dióxido de carbono

Empecemos por el hecho de que la concentración de dióxido de carbono está aumentando. En la Figura 1.3 se muestran medidas de la concentración de CO_2 en el aire desde el año 1000 hasta ahora. Algunos «escépticos» —como el actual presidente estadounidense, Donald Trump, quien ha calificado en varias ocasiones el cambio climático como una «cara farsa» (*expensive hoax*)— aseguran que el reciente incremento en la concentración de CO_2 es un fenómeno natural. ¿Significa «escéptico» ‘persona que ni siquiera ha mirado los datos’? ¿No crees que, posiblemente, *algo* haya pasado entre el año 1800 y el 2017? ¿Algo que no era parte de los procesos naturales que pasaban durante los anteriores 1000 años?

Algo pasó, y se llamó Revolución Industrial. Hemos señalado en el gráfico el año 1769, cuando el británico James Watt patentó su máquina de vapor. Aunque la primera máquina de vapor se inventó en 1698, la de Watt, que era bastante más eficiente, fue la que realmente desencadenó la Revolución Industrial.

denó la Revolución Industrial. Una de las principales aplicaciones de la máquina de vapor fue el bombeo del agua fuera de las minas de carbón. El Reino Unido fue el país que lideró este proceso de modernización industrial, que supuso un cambio radical en la sociedad de todos los países. La Figura 1.4 muestra lo que pasó con la producción de carbón mundial y británico desde 1769. Se presenta la producción en miles de millones de toneladas de CO₂ expulsadas al quemarse este carbón. En 1800 el carbón se utilizaba para fabricar hierro, para hacer barcos, para calentar edificios, para mover locomotoras y otra maquinaria, y, por supuesto, para hacer funcionar las bombas que permitían extraer más carbón del interior de las montañas. La Revolución Industrial triunfó en el Reino Unido, entre otras cosas, porque este territorio estaba muy bien dotado de carbón: cuando comenzó la Revolución Industrial, la cantidad de carbono contenido en el carbón del subsuelo del Reino Unido era aproximadamente el mismo que el que contenía el petróleo bajo Arabia Saudí.

La extracción de carbón en España se cree que comenzó también entre los años 1769 y 1771, pero en forma de pequeñas explotaciones en cuencas mineras de carácter familiar que ni siquiera constan en los registros oficiales. La minería del carbón en España comenzó a ganar importancia durante el siguiente siglo, que fue cuando se fraguó la industria minera. Es por ello que, para analizar esta primera época de desarrollo del carbón, nos vamos a centrar en la evolución del Reino Unido, a la que siguió el resto del mundo.

En los 30 años entre 1769 y 1800 la producción anual de carbón en el Reino Unido se duplicó. Después de otros 30 años (1830), ya se había duplicado de nuevo. La siguiente duplicación de la producción ocurrió en 20 años (1850), y otra vez en otros 20 años (1870). Este carbón permitió a los británicos vivir una era dorada. La prosperidad que tuvieron Inglaterra y Gales se reflejó en un siglo de incremento de población sin precedentes.

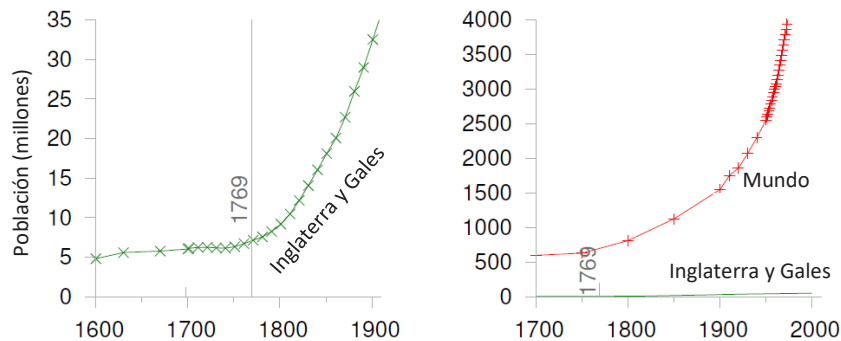


Figura 1.6: Población en millones de habitantes en Inglaterra y Gales a la izquierda, y en el mundo, e Inglaterra y Gales a la derecha.

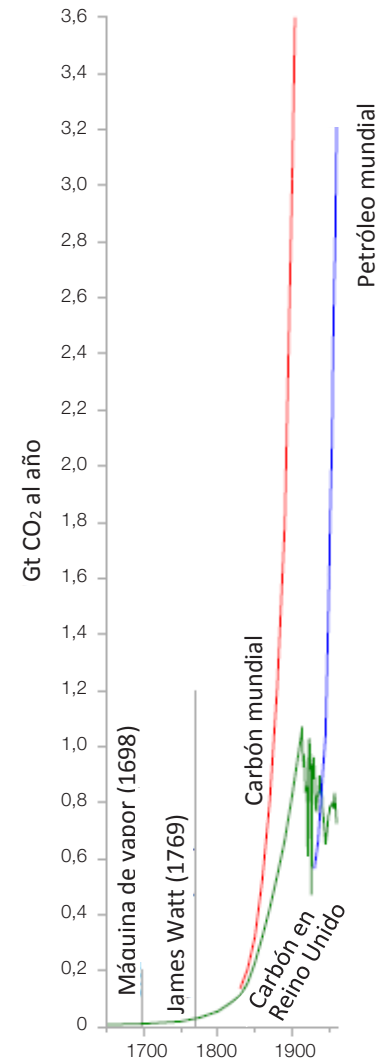
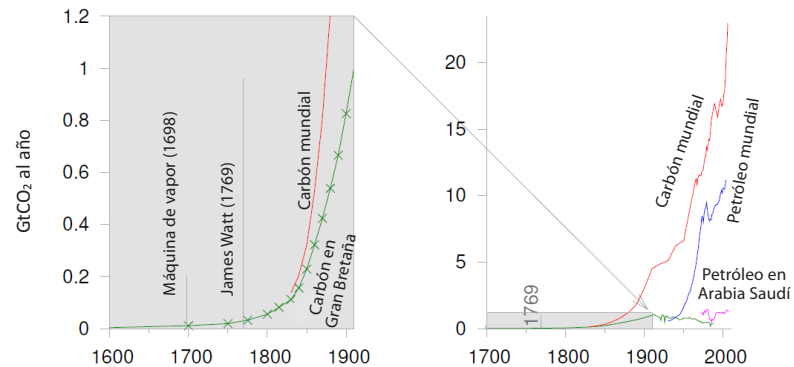


Figura 1.5: Lo que vino a continuación. Producción de carbón en el Reino Unido y en el mundo desde 1650 hasta 1960, con la misma escala que la Figura 1.4.

Figura 1.7: Emisiones de CO_2 provocadas por la quema de carbón entre 1600 y 1900 a la izquierda, y emisiones a partir de 1700 por la quema de carbón y petróleo a la derecha.



Otros países se fueron subiendo al carro a medida que la Revolución Industrial se extendía. En la Figura 1.5 se comparan la producción de carbón del Reino Unido y del resto del mundo con la misma escala que la Figura 1.4, moviendo la ventana histórica a 50 años más tarde. La producción en el Reino Unido hizo pico en 1910, mientras que la producción mundial continuó duplicándose cada 20 años. La producción de carbón en España fue bastante inferior a la del Reino Unido, como se muestra en la Figura 1.8, ya que el carbón en nuestro país no se encuentra en lugares tan accesibles como en el Reino Unido. Además, el crecimiento de este sector se produjo bastante más tarde, retrasándose el pico de generación de carbón hasta el año 1985.

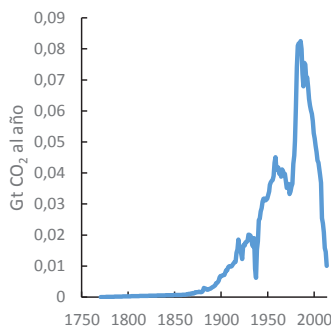


Figura 1.8: Producción de carbón en España. La escala del eje vertical es diferente a las del resto de figuras, ya que la producción en España es mucho menor.

Es difícil mostrar la evolución de la producción de carbón en un único gráfico. Para mostrar lo que pasó durante los siguientes 50 años con la misma escala, necesitaríamos un libro de ¡1 metro de alto! Para solucionarlo, podemos reducir la escala del eje vertical, o apretar el eje de forma no uniforme para poder ver al mismo tiempo y en el mismo gráfico cantidades pequeñas y grandes. Para ello recurrimos a la escala logarítmica, que la hemos usado en los dos gráficos inferiores de la Figura 1.9 (pág. 28). En esta escala, cualquier incremento de diez veces (de 1 a 10, de 10 a 100, de 100 a 1000) se representa con una distancia constante en la página. En escala logarítmica, una magnitud que crece un porcentaje anual fijo (que se llama «crecimiento exponencial») queda representada mediante una línea recta. Los gráficos logarítmicos son maravillosos para entender crecimientos. Aunque los gráficos de las Figuras 1.4 y 1.5 transmiten el mensaje de que la producción de carbón creció rápidamente, las tasas de crecimiento no quedan claras. Los gráficos logarítmicos nos permiten comparar tasas de crecimiento. Mirando las pendientes de las curvas de población, por ejemplo, podemos ver que la tasa de crecimiento de población mundial durante los últimos 50 años

ha sido un poco mayor que la tasa de crecimiento en Inglaterra y Gales en torno al año 1800.

Entre 1769 y 2014, la tasa anual mundial de producción de carbón se ha multiplicado por 1000. En 2015 el consumo de carbón bajó un 5% respecto al de 2014, y la producción, un 4%, lo cual supuso la primera disminución desde la década de los 90. Sin embargo, la Agencia Internacional de la Energía considera que todavía no ha hecho pico y que el consumo mundial de carbón seguirá aumentando hasta el año 2021. Además, hoy en día se extraen otros tipos de combustibles fósiles aparte del carbón –el gráfico central de la Figura 1.9 muestra la producción de petróleo, por ejemplo–, pero, aun así, en términos de emisiones de CO₂, el rey sigue siendo el carbón.

La quema de combustibles fósiles es la principal causante del aumento de la concentración de CO₂. Esto es un hecho, pero espera: se oye un zumbido persistente procedente de inactivistas climáticos. ¿Qué dicen? Mira este extracto de un artículo de Dominic Lawson, columnista de *The Independent*:

La quema de combustibles fósiles libera a la atmósfera unas **7 gigatoneladas** de CO₂ anuales, que parecen muchas. Ahora, la biosfera y los océanos liberan a la atmósfera unas 1900 gigatoneladas y **36 000 gigatoneladas** de CO₂ anuales [...] una de las razones por las que algunos de nosotros somos escépticos en el énfasis que se pone al papel de la quema de combustibles fósiles en el efecto invernadero—. Reducir las emisiones de CO₂ producidas por el hombre es megalomanía, exageración de la importancia del hombre. Los políticos no pueden cambiar el tiempo.

Ahora tenemos tiempo para el escepticismo. Está claro que no todo lo que dicen los escépticos va a misa, pero los periodistas irresponsables como Dominic Lawson se merecen un buen rapapolvo.

El primer problema de la argumentación de Lawson es que *las tres cifras* que proporciona (**7**, 1900 y **36 000**) *¡están mal!* Los números correctos son **26**, 440 y **330**. Aparte de estos errores, analicemos el argumento de Lawson, lo relativamente pequeñas que son las emisiones causadas por el hombre.

Sí, por supuesto, los flujos naturales de CO₂ *son* mayores que el flujo adicional que producimos desde hace 200 años, cuando empezamos a quemar combustibles fósiles en serio. Sin embargo, es terriblemente engañoso cuantificar únicamente los grandes flujos naturales que van *hacia* la atmósfera y dejar de mencionar los flujos casi exactamente iguales que fluyen *desde* la atmósfera de vuelta a la biosfera y a los océanos. La cosa es que estos flujos *naturales* hacia y desde la atmósfera han sido prácticamente iguales durante milenios. Esto quiere decir que no es para nada

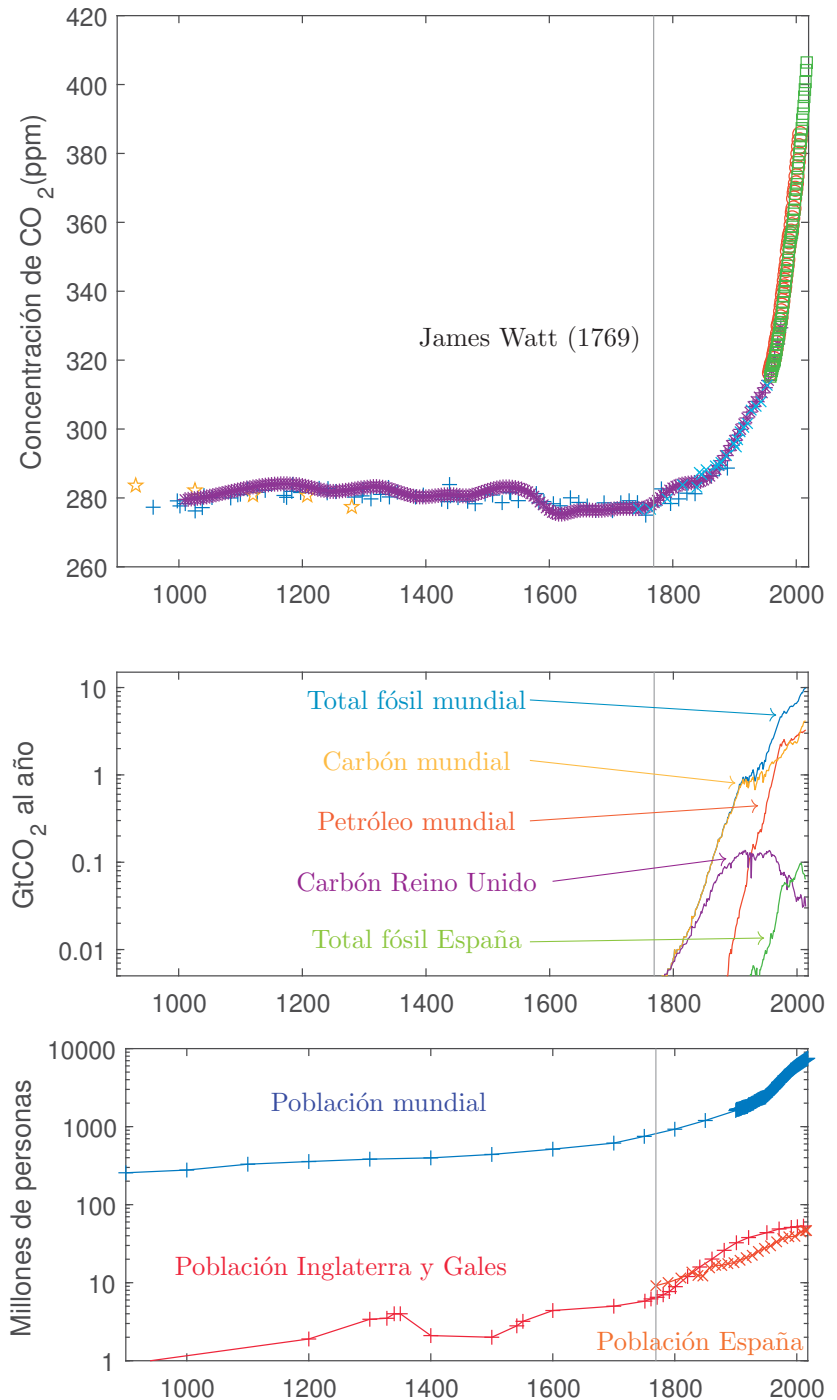
Figura 1.9: El gráfico superior muestra la concentración de dióxido de carbono (CO_2), en partes por millón, durante los últimos 1100 años –los mismos datos mostrados en la Figura 1.3–. Aquí tienes un retrato de James Watt y su máquina de vapor de 1769.



El gráfico central muestra (en escala logarítmica) las gigatoneladas de CO_2 emitidas a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles a nivel mundial (azul) y en España (verde), la quema de carbón a nivel mundial (amarillo) y en el Reino Unido (violeta) y la quema de petróleo a nivel mundial (naranja). Al inicio de la Revolución Industrial todas las emisiones se correspondían a la quema de carbón en el Reino Unido. Conforme más países se fueron sumando a esta revolución las emisiones escalaron rápidamente, aunque aún claramente dominadas por el carbón. A partir del siglo XIX las emisiones provocadas por la quema de derivados del petróleo crecen hasta igualar a las del carbón.

El gráfico inferior muestra (en escala logarítmica) algunas de las consecuencias de la Revolución Industrial: un rápido crecimiento de la población de Inglaterra y Gales (rojo), seguida por la población española (naranja) y la población mundial (azul).

Al contrario que con los gráficos ordinarios de las páginas anteriores, la escala logarítmica nos permite mostrar tanto las poblaciones de Inglaterra y Gales y España como la del mundo en un mismo diagrama, y ver relaciones interesantes entre ambas.



relevante que sean mayores que los producidos por el hombre. Los flujos naturales *se cancelan por sí solos*. Por lo tanto, por grandes que sean, han mantenido constante la concentración de CO_2 durante los últimos milenios. La quema de combustibles fósiles, por el contrario, crea un *nuevo* flujo de carbono que, aunque pequeño, *no se cancela*. Pongamos una simple analogía en el control de pasaportes en la llegada a un aeropuerto. Mil pasajeros llegan cada hora, y hay exactamente los oficiales necesarios para procesar a **mil pasajeros a la hora**. Hay una pequeña fila, pero, gracias a que la tasa de llegadas y de servicio son exactamente iguales, la fila no crece. Ahora imagina que, debido a la niebla, un pequeño número de vuelos es desviado aquí desde un aeropuerto cercano. Este hecho añade un extra de **50 pasajeros a la hora** al salón de llegadas –un pequeño aumento en comparación con la tasa de llegadas de mil pasajeros por hora–. Al principio las autoridades no aumentan el número de oficiales, y estos siguen procesando exactamente a mil pasajeros por hora. Entonces, ¿qué pasa? La fila va creciendo. Poco a poco, vale, pero *crece*. De la misma manera, la quema de combustibles fósiles provoca innegablemente un aumento en la concentración de CO_2 en la atmósfera y en la superficie de los océanos. Ningún escéptico climático discute este hecho. Cuando hablamos de la concentración de CO_2 , el ser humano *es* importante.

La quema de combustibles fósiles aumenta significativamente la concentración de CO_2 . ¿Pero esto importa? «El carbono es naturaleza», el sector petrolero nos lo recuerda, «el carbono es vida». Si el CO_2 no tuviera efectos perjudiciales, las emisiones de carbono no tendrían ninguna importancia. Sin embargo, el dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero. Pon más CO_2 en la atmósfera y hará lo que hacen los gases de efecto invernadero: absorber la radiación infrarroja (calor) emitida por la Tierra y volver a emitirla en direcciones aleatorias, de forma que se impide el flujo que debería ir desde el planeta hacia el espacio, como si fuera una manta. Por lo tanto, el CO_2 calienta la Tierra. Este hecho no se basa en complejas medidas de la temperatura mundial a lo largo de la historia, sino en las sencillas propiedades físicas de las moléculas de CO_2 . Los gases de efecto invernadero son una manta, y el CO_2 es una de las capas de esta manta.

Por lo tanto, si los humanos conseguimos doblar o triplicar las concentraciones de CO_2 (que es hacia donde nos dirigimos sin ningún esfuerzo), ¿qué va a pasar? De eso no estamos tan seguros. La ciencia del clima es difícil. El clima es una bestia imprevisible y compleja, y saber exactamente cuánto calentamiento producirá una duplicación del CO_2 es difícil. El consenso al que se llega con los mejores modelos climáticos apunta a que doblar la concentración de CO_2 tiene prácticamente el mismo efecto que incrementar la intensidad del Sol en un 2 %, lo que aumentaría la temperatura media global del planeta en algo así como 3°C. Esto sería lo que los historiadores llaman una «cosa mala». No re-

citaremos la letanía completa de probables efectos drásticos, porque seguro que ya la has oído. La letanía comienza con «la capa de hielo de Groenlandia se derretirá y, en un período de 100 años, el nivel del mar crecerá 7 metros». Tales temperaturas no se han visto en la Tierra desde hace, al menos, 100 000 años, y se cree que el ecosistema se alterará de tal forma que la Tierra dejará de proporcionar algunos de los bienes y servicios que actualmente consideramos garantizados.

El modelado climático es difícil y tiene algunas incertidumbres. Pero la incertidumbre sobre la forma exacta en la que el clima responderá al aporte extra de gases de efecto invernadero no justifica nuestra pasividad. Si fueras en moto a toda velocidad por una zona con espesa niebla y cerca de un acantilado, pero no tuvieras un mapa totalmente preciso del acantilado, ¿justificaría esa falta de precisión en el mapa *no* reducir la velocidad de la moto?

Responsabilidad histórica del impacto climático

Entonces, ¿quién debería frenar la moto?, ¿quién debería limpiar las emisiones de carbono?, ¿quién es responsable del cambio climático? Esta es una cuestión ética, por supuesto, no científica, pero las discusiones éticas también deben estar basadas en hechos. Exploremos ahora los datos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Primero una frase sobre las unidades en las que se miden. Los gases de efecto invernadero incluyen dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno; cada uno de los gases tiene propiedades físicas diferentes y lo normal es expresar las emisiones de todos los gases en «cantidad equivalente de CO₂», donde «equivalente» significa que ‘tiene el mismo efecto de calentamiento durante un intervalo de tiempo de 100 años’. Una tonelada equivalente de dióxido de carbono se puede abreviar como «1 tCO₂e», y mil millones de toneladas como «1 GtCO₂e» (una gigatonelada).

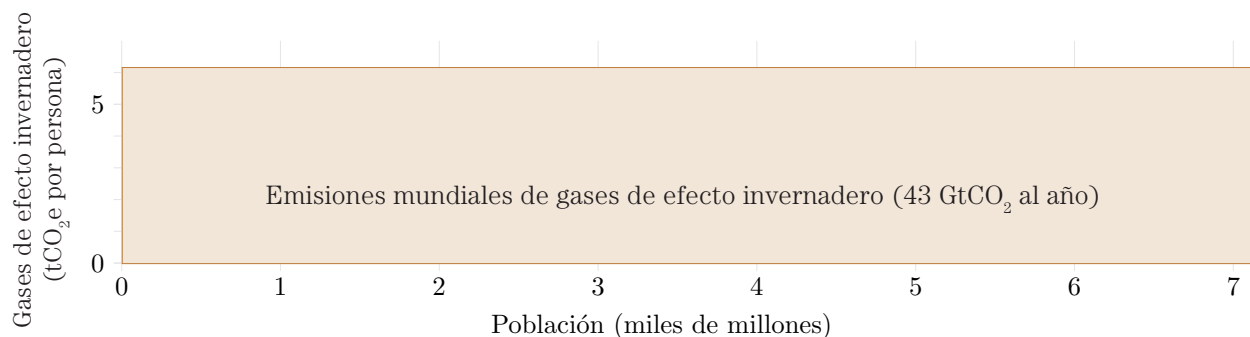
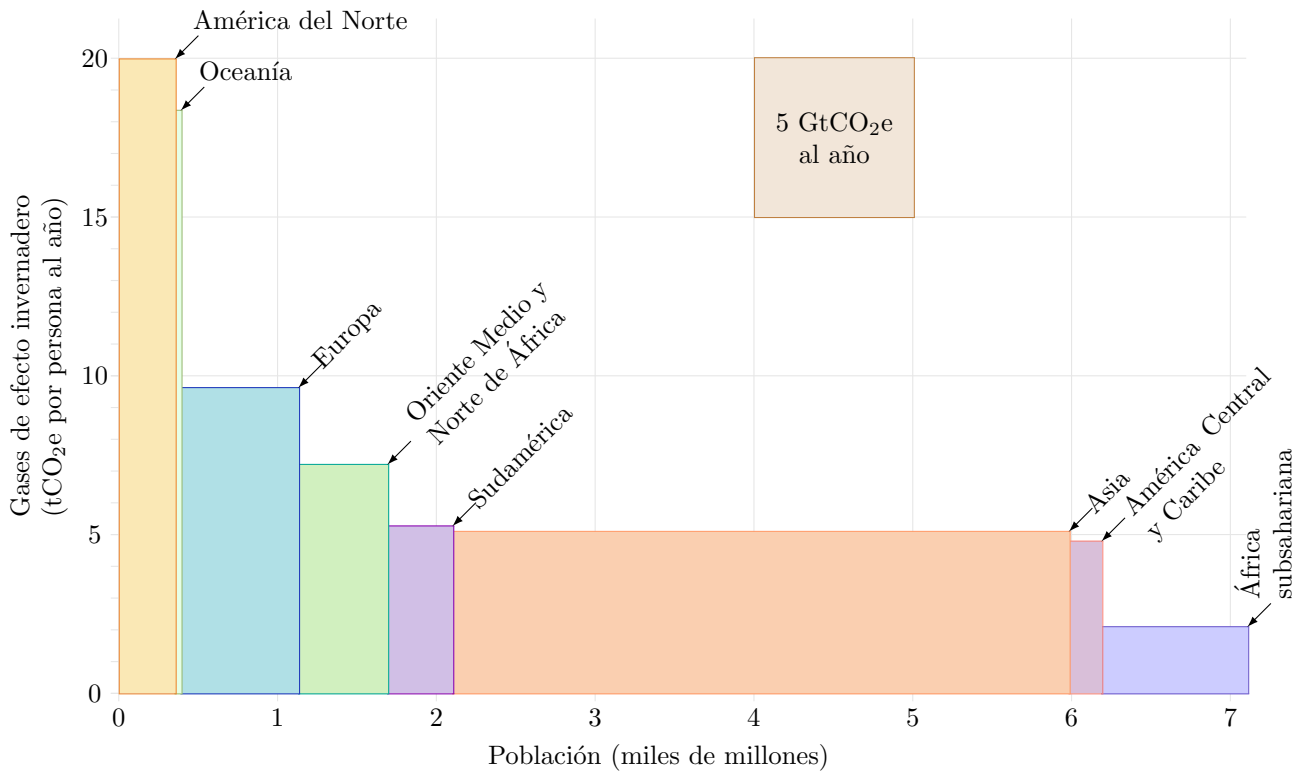


Figura 1.10: Emisiones de CO₂ por persona y año expresadas en toneladas.



En el año 2013, las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero fueron de en torno a 43 mil millones de toneladas equivalentes de CO₂. Un número incomprensible. Pero lo podemos interpretar de una forma mucho más entendible e individualizada dividiéndolo por el número de personas que vivíamos en el planeta en aquel año, unos 7 mil millones, para obtener las emisiones *por persona*, unas 6 tCO₂ por año y persona. Así, podemos representar las emisiones mundiales mediante un rectángulo cuya anchura es la población (7 mil millones) y cuya altura son las emisiones per cápita (Figura 1.10).

Todos nacemos iguales, pero, claro, no todos emitimos 6 tCO₂ al año. Podemos separar las emisiones del año 2013 y mostrar cómo el rectángulo de 43 mil millones de toneladas se reparte entre las regiones del mundo (Figura 1.11).

Esta figura, que está dibujada con la misma escala que la Figura 1.10, divide el mundo en ocho partes. El área de cada rectángulo representa las emisiones de efecto invernadero de una región. La anchura del rectángulo es la población, y su altura, las emisiones medias per cápita en esa región.

Figura 1.11: Emisiones de CO₂ por persona y año desglosadas por regiones.

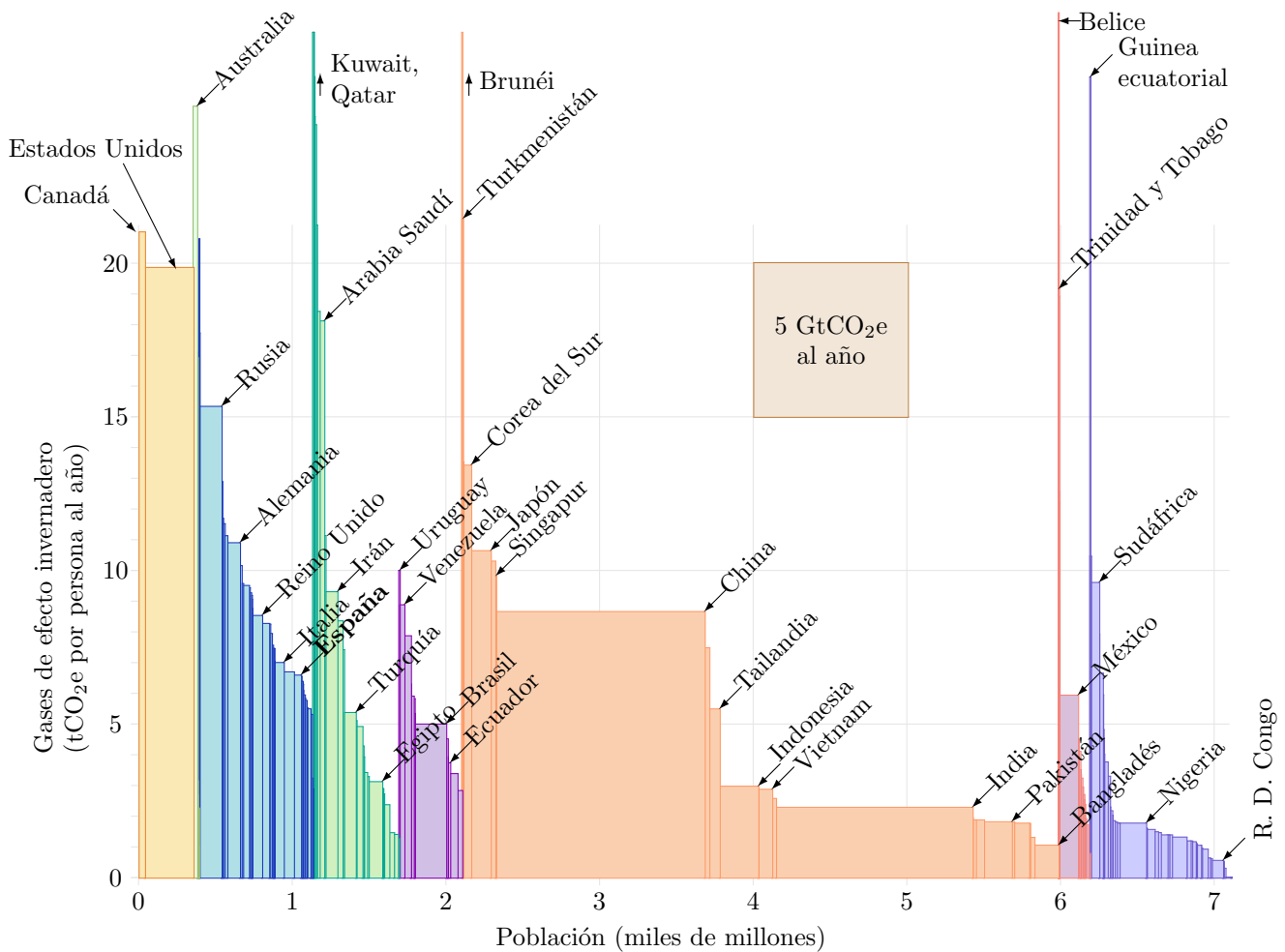


Figura 1.12: Emisiones de CO₂ por persona y año desglosadas por países.

En el año 2013, las emisiones de efecto invernadero per cápita en Europa superaban en más del 50 % la media mundial; y las de América del Norte eran más que el triple de esta media.

Podemos seguir subdividiendo, separando cada región en sus países. Aquí es donde empieza a ser realmente interesante (Figura 1.12).

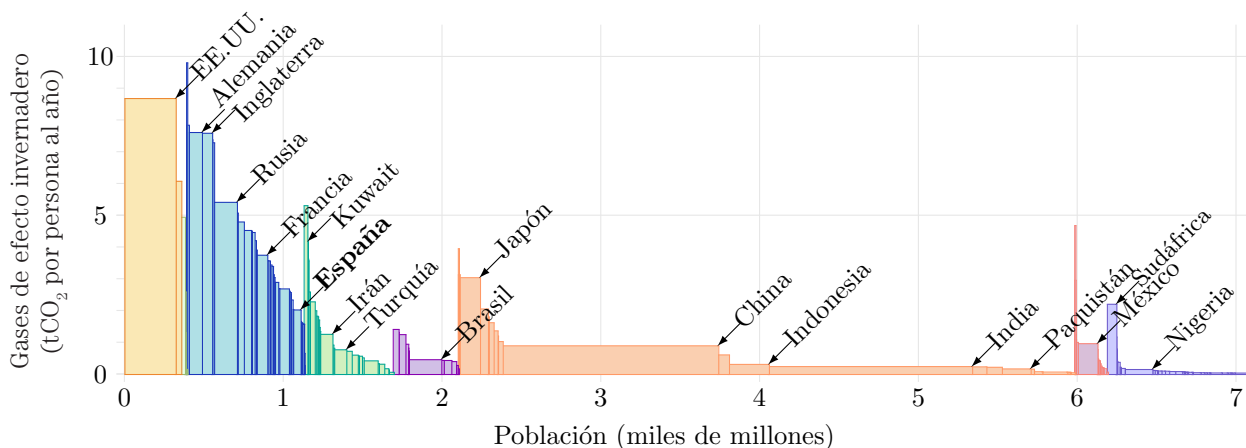
Los grandes países con las mayores emisiones per cápita son Australia, Canadá y EE.UU. China, los países europeos, Japón y algunos países de Oriente Medio aparecen como importantes perseguidores. En comparación con el resto de países europeos, los españoles contaminamos un 30 % menos que la media, situando nuestro nivel de emisiones de CO₂ en

torno a la media de emisiones mundial ¿Y qué pasa con China?, ese país que «ya está fuera de control». Pues el área de su rectángulo es, con diferencia, la mayor del diagrama. Su principal competidor es Estados Unidos, con un área que supera por poco la mitad de la de China. En los últimos años, las emisiones per cápita de China han superado la media mundial, y el rápido incremento que están teniendo en los últimos años es alarmante. Por su parte, las emisiones per cápita de India, el otro gigante asiático en cuanto a población, son inferiores a *la mitad* de la media mundial. Sin embargo, hay que tener en cuenta, para ser justos, que la mayoría de las emisiones industriales de China e India son debidas a la fabricación de *cosas para los países ricos*.

Por lo tanto, asumiendo que «hay que hacer algo» para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ¿quién tiene mayor responsabilidad? Como ya hemos dicho, esta es una cuestión ética. No puede haber un razonamiento ético que niegue que la mayor responsabilidad recae sobre los países de la izquierda de este diagrama –los países con emisiones que representan el doble o triple de la media mundial–. Países que tienen mayor poder económico. Países como EE.UU. y los europeos, por ejemplo. Pero tampoco podemos olvidar grandes países en desarrollo como China.

Si asumimos que la actividad humana ha dañado el clima, y que alguien debería arreglarlo, ¿quién tiene que pagar? A veces se dice «quien contamina debería pagar». En los gráficos anteriores vemos quién está contaminando hoy. Pero lo que realmente importan son las emisiones *totales* acumuladas; ya que gran parte del CO₂ emitido (un tercio aproximadamente) vagará por la atmósfera durante 50 o 100 años. Si aceptamos la idea ética de que «quien contamina debería pagar», tenemos que analizar el tamaño de la huella histórica de cada país. El siguiente gráfico (Figura 1.13)

Figura 1.13: Emisiones de CO₂ entre 1880 y 2013 por persona desglosadas por países. Las emisiones se han expresado como un promedio anual.



muestra las emisiones de CO₂ acumuladas en el período 1880-2013, expresadas como emisiones anuales medias.

Ahí sigue España, no demasiado contaminante en comparación con nuestros vecinos del Viejo Continente.

Reducción de las emisiones de dióxido de carbono

Vale, suficiente ética por ahora. ¿Qué calculan los científicos que se debe hacer para evitar que la temperatura de la Tierra aumente en 2 °C respecto al nivel preindustrial? (2 °C es el incremento por encima del cual se prevén consecuencias graves). El consenso es claro. Debemos dejar el hábito de usar combustibles fósiles y, además, debemos hacerlo rápido. Los países europeos, entre los que se incluye España, se comprometieron en 2007 a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2020 de, al menos, un 20 % respecto a los niveles de 1990 (a día de hoy, en 2019, se espera que se logre este objetivo). Posteriormente, en 2013, la Unión Europea se comprometió a una reducción bastante más ambiciosa para el año 2050, que concretó en unas emisiones un 80 % menores respecto a los niveles de 1990. Este compromiso para 2050 es muy ambicioso, pero el resto de regiones del mundo deben contribuir también a esta reducción. El 4 de noviembre de 2016 entró en vigor el Acuerdo de París, un acuerdo internacional menos concreto que los compromisos de la Unión Europea, pero que se puede calificar como exitoso, ya que fue capaz de poner de acuerdo a la mayoría de los países, incluso a China y a Estados Unidos, que son los países con mayores emisiones del mundo. Por desgracia, el 1 de junio de 2017, siete meses después de la entrada en vigor de este plan, el presidente estadounidense Donald Trump hizo pública la salida de su país de este acuerdo, y justificó su decisión en una interpretación *errónea* de un estudio publicado por el MIT (Massachusetts Institute of Technology). El presidente extrajo de este estudio la conclusión de que el MIT estimaba que el Acuerdo de París contribuiría a reducir en solo 0,2 °C el aumento de temperatura hasta el año 2100, lo cual considera despreciable. Sin embargo, al día siguiente de las declaraciones de Trump, el MIT emitió un comunicado en el que aclaraba que esta reducción de 0,2 °C es respecto a las acciones previamente pactadas en el acuerdo de Copenhague, que, si se compara con no aplicar ninguna política climática, la reducción sería de 1 °C. Los científicos del MIT valoraron en este comunicado el Acuerdo de París como «un esfuerzo vital y sin precedentes de casi 200 países para responder a la urgente amenaza del cambio climático global».

Además, hay que decir que, aunque consiguiéramos materializar estas ambiciosas reducciones, es poco probable que se solucione el pro-

blema. Los científicos calculan que, incluso, si las emisiones mundiales disminuyeran gradualmente hasta llegar a una reducción del 60% en 2050 (respecto a los niveles de 1990), es más probable que las temperaturas mundiales se incrementen en más de 2°C a que no lo hagan. ¿Qué significa esto para un país como España? Si utilizamos la idea de «contracción y convergencia», es decir, que todos los países llegarán a tener las mismas emisiones per cápita, España tiene que hacer una reducción del 85%: deberíamos reducir desde nuestras actuales 6,5 toneladas de CO₂ por persona y año a, aproximadamente, **1 tonelada por persona y año** para el 2050. Esto sí que es un recorte, podríamos planteárnoslo como *no más combustibles fósiles*.

Una última cuestión sobre la motivación del cambio climático: A pesar de que bastantes actividades humanas emiten gases de efecto invernadero, la principal causa de estas emisiones es el **uso de energía**. Algunas personas defienden que no se debe reducir el consumo de energía con excusas como «el metano de los pedos de las vacas causa más calentamiento global que los viajes en avión». Sí, los desechos agrícolas y ganaderos supusieron un décimo de nuestra contribución al calentamiento global en el año 2012. Pero el uso de la energía supuso tres cuartos de nuestra contribución (Figura 1.14). El problema del cambio climático es básicamente un problema de energía.

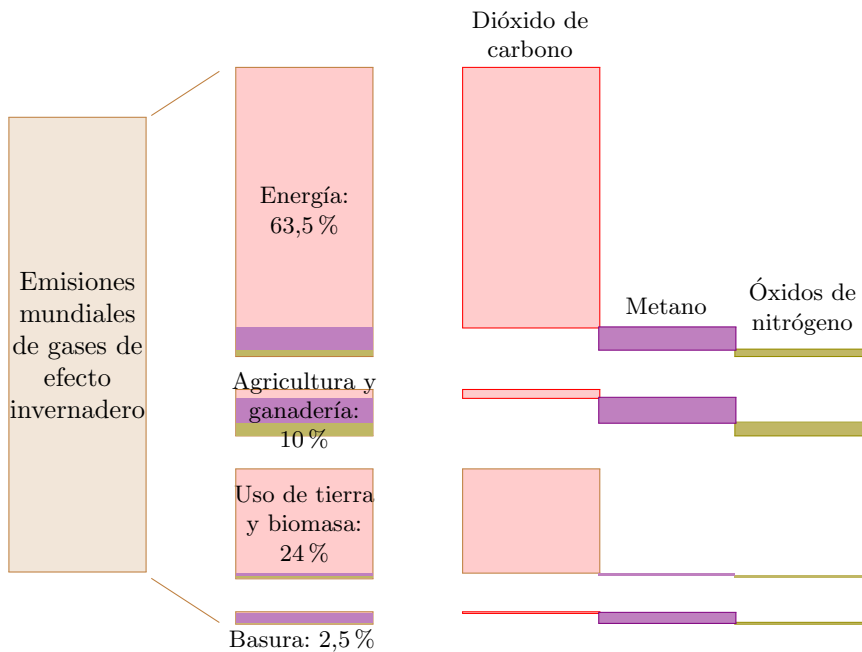


Figura 1.14: Desglose de las emisiones de gases de efecto invernadero (2012) por causa y por gas. «Energía» incluye centrales de generación, procesos industriales, transporte, procesado de combustibles fósiles y uso energético en edificios. «Uso de tierra y biomasa» significa cambios en el uso de la tierra, deforestación y la quema de biomasa no renovable, como la turba. «Basura» incluye la retirada y tratamiento de desechos. Los tamaños indican el potencial de calentamiento global de cada fuente durante 100 años. Fuente: Emission Database for Global Atmospheric Research.

Advertencias para los lectores

Vale, suficiente sobre cambio climático. Asumamos que ya estamos motivados para deshacernos de los combustibles fósiles. Cualquiera que sea tu motivación, el objetivo de este libro es ayudarte a calcular números y hacer las cuentas necesarias para evaluar decisiones políticas y establecer una base sólida que te ayude a ver *qué propuestas suman*. Hay que tener en cuenta que los cálculos o los números de este libro no tienen por qué ser nuevos; los libros que se han mencionado antes de Goodstein, Lomborg y Lovelock, por ejemplo, están llenos de números interesantes y cálculos justificativos, y también hay muchas otras fuentes de información fiables en Internet (véanse las notas al final del capítulo).

Lo que intentamos hacer con este libro es simplificar esos números y hacerlos fáciles de memorizar, enseñarte cómo calcular los números tú mismo y clarificar tanto la situación que cualquier lector que piense mientras lea este libro sea capaz de sacar conclusiones sorprendentes. No queremos darte nuestras propias conclusiones. Las convicciones son más fuertes si cada uno genera las suyas que si se enseñan. La comprensión es un proceso creativo. Ojalá, cuando termines de leer este libro, estés todavía más convencido de que puedes calcular cualquier cosa tú mismo.

Ten en cuenta que los cálculos que haremos son deliberadamente imprecisos. Las simplificaciones son imprescindibles para entender los conceptos. Primero, los números que se redondean son más fáciles de memorizar. Segundo, los números redondos permiten hacer cálculos rápidos. Por ejemplo, en el libro, la población de España es de 46 millones de habitantes, y la población mundial es de 7 mil millones. Todos somos perfectamente capaces de buscar cifras más exactas, pero la exactitud se interpondría en la senda del razonamiento claro. Por ejemplo, si aprendemos que las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero en el año 2013 fueron de 43 mil millones de toneladas equivalentes de CO_2 , podemos calcular al instante, sin falta de calculadora, que las emisiones medias por persona fueron de algo más de 6 toneladas equivalentes de CO_2 . Este cálculo no es exacto, pero es suficientemente preciso como para dar lugar a conversaciones interesantes. Por ejemplo, si te aprendes que un vuelo intercontinental de ida y vuelta emite casi 2 toneladas de CO_2 por pasajero, saberte la vara de medir de las emisiones anuales medias (6 toneladas y pico por persona y año) te ayuda a darte cuenta de que uno solo de estos viajes en avión gasta más de un tercio de las emisiones de carbono medias por persona al año.

Intentaremos basar los argumentos en la experiencia diaria en lugar de movernos a través de las impersonales estadísticas nacionales. Por

ejemplo, si vamos a estimar el consumo energético de comer carne de ternera, y para ello queremos conocer cuanta energía hace falta para criar a este animal, asumiremos que una ternera tiene los mismos requerimientos energéticos por kg que un humano. Así deducimos que una ternera necesita 9 kWh al día. Por supuesto, después comprobamos estos cálculos con los que hace otra gente y con estadísticas oficiales (puedes ver estos datos en las notas al final de cada capítulo). Este libro no pretende ser la fuente definitiva de datos super precisos, sino que intenta ilustrar la forma de usar números aproximados para aportar ideas constructivas a interesantes conversaciones sobre energía.

Para los cálculos usaremos sobre todo datos de España y, ocasionalmente, de Europa, América o el mundo, pero no debería resultarte demasiado difícil rehacer estos cálculos para la región que te interese.

Permítenos terminar este capítulo con algunas advertencias más para los lectores. No solo nos acostumbraremos a aproximar los números que calculemos, sino que también ignoraremos todos los detalles a los que los inversores, directivos y economistas tienen que prestar atención. ¡Pobre gente! Si intentas instalar una tecnología renovable, un simple 5% de incremento en el precio puede marcar la diferencia entre el éxito y el fracaso; por eso, cuando hablamos de negocios, cualquier detalle ha de tenerse en cuenta. Pero un 5% es muy poco para el radar de este libro. Este es un libro sobre factores de 2 y factores de 10. Hablamos de límites físicos de la energía sostenible, no de la viabilidad económica. Mientras que la economía siempre cambia, los límites físicos no se moverán. Necesitamos entender estos límites.

Los debates sobre política energética suelen ser confusos y emocionales, ya que la gente suele mezclar afirmaciones *objetivas* con afirmaciones *éticas*.

Ejemplos de **afirmaciones objetivas** son «la quema global de combustibles fósiles emite 34 mil millones de toneladas de dióxido de carbono cada año»; y «si se duplica la concentración de CO₂, las temperaturas medias del planeta aumentarán entre 1,5 y 5,8°C en los próximos 100 años»; y «un aumento de temperatura de 2°C derretirá la capa de hielo de Groenlandia en 500 años», y «el deshielo completo de Groenlandia causaría un aumento de 7 metros en el nivel del mar».

Una afirmación objetiva es o verdadera o falsa; saber si es una cosa o la otra puede ser difícil; es un tema científico. Las afirmaciones que se acaban de enumerar son o verdaderas o falsas. Pero no estamos seguros de que todas sean verdaderas. Algunas de ellas ya se consideran «muy probables». La dificultad de decidir qué afirmaciones objetivas son verdaderas conlleva discusiones entre la comunidad científica; pero, tras

la suficiente experimentación y discusión científica, la veracidad o falsedad de la mayoría de las afirmaciones objetivas se llega a resolver, al menos «sin ninguna duda razonable».

Ejemplos de **afirmaciones éticas** son «está mal explotar los recursos globales de tal forma que suponga un coste importante para generaciones futuras»; y «contaminar no debería ser gratis»; y «los países con mayores emisiones de CO₂ durante el último siglo tienen el deber de liderar las acciones contra el cambio climático», y «¡es justo repartir los derechos de emisiones de CO₂ a partes iguales entre toda la población mundial!». Estas afirmaciones no son «o verdaderas o falsas». Que estemos de acuerdo con ellas o no depende de nuestros juicios éticos, de nuestros valores.

El objetivo de este libro es hablar sobre hechos, no de ética. Queremos explicar los hechos de forma muy clara, para que la gente pueda tener interesantes debates sobre decisiones éticas. Queremos que todo el mundo entienda cómo los hechos restringen nuestras opciones. Como buenos científicos, intentaremos mantener nuestro punto de vista ético lejos de este libro, aunque, ocasionalmente, dejaremos escapar algo —esperamos que nos disculpe—.

Si es o no es *justo* que Europa y Norteamérica acaparen toda la tarta de emisiones es una cuestión ética; nosotros estamos aquí para recordarte el *hecho* de que no podemos comernos la tarta y también conservarla; para ayudarte a identificar las propuestas políticas sin sentido e ineficientes, y para ayudarte a identificar las políticas energéticas que son compatibles con tus valores personales.

¡Necesitamos un plan que sume!

Notas y textos de consulta

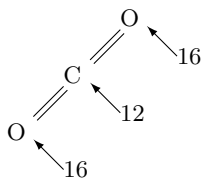
Al final de cada capítulo matizamos detalles de ideas que hemos comentado durante el mismo, fuentes de información y citas, así como sugerencias para quien quiera leer más sobre un tema concreto.

Página

- 20 «*Nuestro sistema eléctrico tiene que cambiar radicalmente, y se puede cambiar. Queremos que la electricidad sea más segura y, al mismo tiempo, fiable y barata*» es la traducción de una frase dicha por Angela Merkel cuando, en 2011, anunció la decisión de cerrar la totalidad de las centrales nucleares alemanas antes de 2022. La frase la recogió el periódico *The Independent* el 30 de mayo de 2011 [2].
- 20 «*Si queremos ser realistas, cualquier solución a nuestros grandes desafíos energéticos ha de tener en cuenta la energía nuclear*». Esta cita es la traducción de una frase del discurso pronunciado por Miguel Arias Cañete en la III Conferencia sobre Seguridad Nuclear de ENSREG. Se puede tener acceso

a la transcripción completa de la conferencia a través de la página web de la Comisión Europea [3].

- 20 *Jonathon Porritt*, «*Is nuclear the answer?*». Sección 3. Asesoramiento a los ministros, (marzo de 2006). www.sd-comission.org.uk.
- 20 ...«*la nuclear es un despilfarro de dinero*», «*tenemos una cantidad enorme de sol y viento*». Traducción de unas declaraciones de Ann Leslie, periodista, realizadas en el programa Any Questions? de la radio británica BBC Radio 4, el 10 de febrero de 2006.
- 20/21 «*Los residentes de Los Angeles conducen [...] entre la Tierra y Marte*». Traducción de un informe the Earthworks Group, 1989, página 34.
- 21 ...*tu CO₂ puede limpiarse por solo 20 € al año*. targetneutral es una iniciativa de la petrolera BP por la que se propone un pago de 2,86 \$ por persona para comprar los derechos de emisión de una tonelada de CO₂. En su web promocionan esta compra para compensar el efecto medioambiental de la emisiones de cada uno.
- 21 ...«*baterías que funcionan con agua*». *New Scientist*, 29 de julio de 2006, página 35. Este artículo, titulado «El coche propulsado por agua podría salir al mercado en 2009», comenzaba así:
 «Olvida los coches propulsados por alcohol o por aceites vegetales. Dentro de poco será posible conducir coches que solo lleven agua en sus depósitos. Estos serán los coches sin emisiones definitivos».
 «Aunque el agua no es, a primera vista, una fuente de energía, tiene una importante virtud: es una abundante fuente de hidrógeno, el elemento considerado como el combustible del futuro».
 De hecho, el trabajo descrito por el *New Scientist* no era ridículo –se trata de un coche que usa boro como combustible, siendo la reacción boro/agua uno de los primeros procesos químicos–. ¿Por qué decidió el *New Scientist* convertir esto en una historia que sugiriera que el combustible era agua? El agua no es un combustible. Nunca lo ha sido y nunca lo será. ¡Ya está quemada!
 La primera ley de la termodinámica dice que no puedes sacar energía de la nada; solo puedes convertir un tipo de energía en otro. La energía de un motor tiene que venir de algún sitio. De todas formas Fox News difundió una historia todavía más absurda [4].
- 22 *El cambio climático es «una amenaza mayor que el terrorismo*». Declaración de sir David King, consejero científico jefe del gobierno británico. Enero de 2004 [5].
- 22 ...«*apología de los viajes*». Es una alusión a la apología o enaltecimiento del terrorismo definido por el Código Penal español en el artículo 578 de la Ley Orgánica 10/1995.
- 24 *La primera máquina de vapor se inventó en 1698*. De hecho, Hero de Alejandría describió una máquina de vapor, pero, dado que no se rescató esa idea durante los siguientes 1600 años, consideramos el invento de Savery en 1698 como la primera máquina de vapor *práctica*.
- 24/28 *Figura 1.3 y Figura 1.9*. Los datos son de [6] (las medidas abarcan desde 1958 hasta 2004); [7] (datos desde 1734 hasta 1983); [8] (desde 1958 hasta 2018); [9] (datos desde el año 1000 hasta 1978); [10] (datos desde 950 hasta 1888); y [11] (desde hace 11000 años hasta hace 470 años). Por cierto, este gráfico no debe confundirse con el llamado «gráfico de palo de hockey», que representa la temperatura global del planeta a lo largo de la historia. Un lector atento se habrá dado cuenta de que en el argumento sobre el cambio climático que presentamos no hemos hecho ninguna mención a registros históricos de temperatura.



Los pesos de un átomo de carbono y de una molécula de CO_2 tienen una proporción de 12 a 44, ya que el átomo de carbono pesa 12 unidades y los de oxígeno pesan 16 unidades cada uno. $12+16+16=44$.

24/25/28 *Figura 1.4, Figura 1.5 y Figura 1.9.* Hemos tomado los datos de [12], [13], la Agencia Holandesa de Asesoramiento Ambiental [14], National Bureau of Economic Research [15], [16], [17], [18], [19] y [20]. Jevons fue el primer autor que habló del «pico del petróleo». En 1865 estimó las reservas británicas de carbón fácilmente accesibles, miró la historia de crecimiento exponencial del consumo y predijo el final de este crecimiento exponencial y del dominio británico industrial a nivel mundial. «No podemos mantener durante mucho tiempo nuestro actual ritmo de crecimiento del consumo. [...] la influencia en nuestro progreso se hará patente en menos de un siglo. [...] la conclusión está clara, que nuestro alegre progreso actual tiene una duración limitada». Jevons tenía razón. En un siglo llegó el pico en la producción de carbón en el Reino Unido, a lo que le siguieron dos guerras mundiales.

27 *Dominic Lawson, columnista de The Independent.* Esta cita es una adaptación de la columna de Dominic Lawson en *The Independent*, del 8 de junio de 2007. No es una cita literal: hemos editado sus palabras para abreviar la cita, pero teniendo cuidado de no corregir ninguno de sus errores. **Los tres números que menciona son incorrectos.** Aquí explicamos sus meteduras de pata. En primer lugar, habla de «dióxido de carbono», pero da las citas del carbono: la quema de combustibles fósiles emite 26 gigatoneladas de CO_2 al año a la atmósfera (no 7 gigatoneladas). Un error típico. Después dice que los océanos emiten a la atmósfera 36 000 gigatoneladas de carbono al año. Este error es mucho peor: 36 000 gigatoneladas es ¡la cantidad total de carbono que hay en los océanos! El flujo anual es mucho menor, alrededor de 90 gigatoneladas de carbono al año (330 GtCO_2 al año), de acuerdo con los diagramas estándar del ciclo del carbono [21]. Del mismo modo, su flujo de «1900 gigatoneladas» de la biosfera a la atmósfera está mal. El número correcto de acuerdo con los diagramas estándar es de unas 120 gigatoneladas de carbono al año (440 GtCO_2 al año).

Por cierto, el aumento en la concentración de CO_2 atmosférico que se ha observado cuadra con lo que cabe esperar si se asume que la mayor parte del carbono emitido por los humanos permanece en la atmósfera. Entre 1715 y 2004 la quema de combustibles fósiles y la producción de cemento ha emitido a la atmósfera unas 1160 GtCO_2 [22]. Si todo este CO_2 siguiera en la atmósfera, su concentración habría aumentado en 160 ppm (desde 280 hasta 440 ppm). El incremento real ha sido de unas 100 ppm (de 275 a 377 ppm). Por lo tanto, más o menos el 60% de estas emisiones continúan en la atmósfera.

29 *El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero.* El debate emocional que se ha generado en torno a este tema empieza a ser un poco aburrido, ¿no? «Los científicos ya han llegado a un consenso». «No, ¡no han llegado!», «¡sí han llegado!». En este asunto, lo mejor que podemos hacer es aconsejar a quien quiera afrontar este tema sin tanto jaleo que se lea un breve informe escrito por Charney et al. [23]. Las conclusiones de este informe son especialmente relevantes, ya que la Academia Nacional de las Ciencias de Estados Unidos encargó el estudio y seleccionó a sus autores basándose en su experiencia y «buscando un equilibrio adecuado». Se convocó a un grupo de científicos «siguiendo los consejos de la Mesa de Investigación sobre el Clima del Consejo Nacional de Investigación para sentar las bases científicas para la previsión de posibles cambios en el clima originados por las emisiones de dióxido de carbono causadas por el hombre». Específicamente, se les pidió que: «identificaran las bases sobre las que se asienta nuestro conocimiento actual sobre el tema, analizaran de forma cuantitativa la adecuación e incertidumbre de nuestro conocimiento de estos factores y procesos y que resumieran en términos concisos y objetivos

nuestro conocimiento actual sobre la relación entre el dióxido de carbono y el clima en beneficio de los legisladores».

El informe tiene solo 33 páginas, se puede descargar gratis [23] y su lectura es muy recomendable. Deja muy claro qué conceptos científicos estaban claros ya en 1979 y qué partes todavía presentaban incertidumbres.

A continuación, resumimos algunos puntos destacables de este informe. Primero, doblar la concentración de CO₂ atmosférico aumentaría el calentamiento neto de la troposfera, océanos y tierra en una potencia media por unidad de área de aproximadamente 4 W/m² si el resto de propiedades de la atmósfera permanecieran constantes. Este efecto se puede comparar con la potencia media absorbida por la atmósfera, tierra y océanos, que es 238 W/m². Así que doblar la concentración de CO₂ tendría el mismo efecto que incrementar la potencia del Sol en un 4/238 = 1,7%. En segundo lugar, las consecuencias de este calentamiento debido al CO₂ son difíciles de predecir debido a la complejidad del sistema atmósfera/océanos, pero los autores predijeron un incremento de entre 2°C y 3,5°C, con mayores aumentos en latitudes altas. Finalmente, los autores resumen: «lo hemos intentado, pero no hemos sido capaces de encontrar efectos físicos sobrestimados ni subestimados que pudieran reducir el calentamiento inducido por la duplicación del CO₂ atmosférico a un nivel despreciable o revertir sus efectos conjuntos». Advierten que, gracias a los océanos, «el gran y poderoso volante de inercia del sistema climático global», es posible que este calentamiento ocurra de una forma suficientemente lenta como para que sea difícil de detectar en las próximas décadas. Sin embargo, «el calentamiento finalmente llegará, y los cambios en los climas regionales [...] podrían ser muy significativos».

En el prefacio, escrito por el presidente de la Mesa de Investigación sobre el Clima, Verner E. Suomi, se resumen las conclusiones con una famosa cascada de dobles negaciones: «Si el dióxido de carbono continúa aumentando, el grupo de estudio no encuentra ninguna razón para dudar de que ocurrirán cambios en el clima, y ninguna razón para pensar que estos cambios serán despreciables».

- 30 *La letanía completa de probables efectos drásticos del cambio climático –seguro que ya la has oído–*, si no, lee [24].
- 30 *División de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero por región y por país*. Fuente de datos: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT). Fecha de actualización: 2 de febrero de 2017. Las tres primeras figuras muestran el total nacional de los seis principales gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC, SF₆), excluyendo las contribuciones de los cambios en el uso del suelo y de los bosques. La Figura 1.13 de la página 30 muestra las emisiones acumuladas únicamente de CO₂.
- 34 *Ahí sigue España, no demasiado contaminante en comparación con nuestros vecinos del Viejo Continente*. En la Figura 1.13 (pág. 33) se muestran valores per cápita, ya que, debido a las enormes diferencias de tamaño entre los diferentes países, consideramos los valores per cápita más útiles para el análisis de la responsabilidad que cada región tiene en relación al cambio climático. Sin embargo, también es interesante recopilar las emisiones totales de los países que cuentan con emisiones más elevadas a lo largo de la historia. Los diez primeros países son EE.UU. (367 GtCO₂), China (158 GtCO₂), Rusia (104 GtCO₂), Alemania (83 GtCO₂), Reino Unido (65 GtCO₂), Japón (51 GtCO₂), India (37 GtCO₂), Francia (33 GtCO₂), Canadá (29 GtCO₂) y Ucrania (27 GtCO₂). El orden per cápita es: Luxemburgo, EE.UU., República Checa, Alemania, Reino Unido, Estonia, Bélgica, Canadá, Rusia y Kazajistán.

- 34 *Al día siguiente de las declaraciones de Trump, el MIT emitió un comunicado...* Los científicos del MIT que publicaron el comunicado el día 2 de junio de 2017 [25] son precisamente los que lideraron el estudio citado por Donald Trump en su justificación de abandonar el Acuerdo de París. En el comunicado mencionan dos argumentos de Donald Trump que consideran erróneos:
- «El acuerdo [de París] también supone POCO para el clima».
 - «De acuerdo con los investigadores del MIT, si todas las naciones firmantes cumplieran sus obligaciones, el impacto en el cambio climático sería despreciable. Se ha estimado que es probable que el impacto reduzca el aumento global de temperatura en menos de 0,2 grados celsius hasta 2100».
- Los investigadores del MIT aseveran que estos argumentos son erróneos por dos razones:
- Primero, los 0,2°C de los que habla Trump son en comparación con el acuerdo de Copenhague. Si se compara con no implantar ninguna política climática, la diferencia es de 1°C. Esta es una reducción importante, a pesar de que se necesita reducir al menos 2°C.
 - Segundo, el análisis presentado por el MIT estudia únicamente los efectos de las acciones comprometidas por los países firmantes del Acuerdo de París. Sin embargo, este Acuerdo prevé reuniones periódicas para tomar acciones más decididas e integrar nuevos países en el Acuerdo.
- 36 *Hay muchas otras fuentes de información fiables en Internet.* Recomendamos, por ejemplo, las siguientes: El *Statistical Review of World Energy* publicado por BP [26], la Comisión de Desarrollo Sostenible (www.sd-comision.org), la Asociación Eólica Danesa (www.windpower.org), Ambientalistas por la Energía Nuclear (<http://ecolo.org/base/basesp.htm>) y el Departamento de Energía Eólica de la Universidad de Risø (<http://www.vindenergi.dtu.dk/english/About>).
- 37 *Afirmaciones objetivas con afirmaciones éticas.* Las afirmaciones éticas se conocen también como «juicios de valor», y normalmente utilizan verbos como «debería», «tiene que», o adjetivos como «justo», «bueno» o «malo». Para más información se puede leer [27].

Capítulo 2

Hoja de balance

*A la naturaleza no se
le puede engañar.*
Richard Feynman

Hablemos sobre el consumo energético y la producción de energía. Actualmente, la mayor parte de la energía consumida en los países desarrollados se genera a partir de combustibles fósiles; y eso no es sostenible. Conocer cuánto tiempo exactamente podríamos vivir bajo este modelo energético es una cuestión muy interesante, pero que no abordaremos en este libro. Queremos pensar en *vivir sin combustibles fósiles*.

Vamos a hacer dos pilas. En la pila de la izquierda, la roja, iremos amontonando nuestro consumo de energía; y en la pila derecha, la verde, iremos añadiendo la producción sostenible de energía. Iremos construyendo las dos pilas poco a poco, añadiendo elementos a ambos lados conforme vayamos comentándolos.

La pregunta que vamos a tratar de responder en este libro es la siguiente: *¿es posible vivir de forma sostenible?* Para eso, iremos añadiendo todas las fuentes posibles de energía sostenible a la pila de la derecha, la verde.

En la pila izquierda, la roja, estimaremos el consumo de una persona típica en España; os animamos a que vayáis sumando vuestro propio consumo, para que construyáis una pila roja personalizada también. Más adelante descubriremos también el consumo energético medio de europeos y americanos.

Al ir estimando nuestro consumo energético en calefacción, transporte, fabricación, etc., el objetivo no es solo calcular un número para la pila izquierda de nuestra hoja de balance, también queremos entender de qué depende cada valor que obtengamos y lo susceptibles que son a modificaciones.

Algunos de los consumos que analizaremos para la pila de la izquierda serán:

- transporte
 - coches, aviones, mercancías
- calefacción y refrigeración
- luz
- dispositivos electrónicos
- comida
- fabricación.

En la pila derecha, la de producción energética sostenible, las categorías principales serán:

- viento
- sol
 - fotovoltaica, térmica, biomasa
- hidroelectricidad
- olas
- mareas
- geotérmica
- ¿nuclear? (con un signo de interrogación, porque no está claro si la energía nuclear cuenta como «sostenible»).

En la pila derecha, la verde, iremos añadiendo las estimaciones de producción sostenible de energía para España. Esto nos permitirá responder a la pregunta de: *¿Puede España sobrevivir con sus propias energías renovables?*

La cuestión de si las distintas fuentes sostenibles de energía que vayamos incluyendo en la pila verde son económicamente viables es un tema importante también, pero dejaremos este asunto a un lado y construiremos las dos pilas primero. A veces, la gente se centra demasiado en la viabilidad económica y se olvida de la visión global del problema. Por ejemplo, mucha gente debate sobre si *la energía eólica es más barata que la energía nuclear o no*, pero olvida preguntarse *¿cuánto uranio queda?*

El resultado cuando sumemos todos los elementos en ambas pilas podría tener una pinta así:

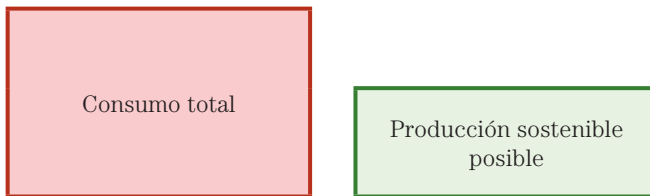
Consumo total

Producción sostenible posible

Si vemos que el consumo es mucho menor que la producción sostenible a la que podemos aspirar, podríamos decir:

¡Bien!, *quizás* podamos vivir de forma sostenible. Miremos el coste económico, social y medioambiental de todas estas alternativas sostenibles y descubramos cuáles merecen un mayor esfuerzo en investigación y desarrollo. Si hacemos un buen trabajo, podría no darse una crisis energética.

Por el contrario, el resultado podría tener la siguiente forma:



Un escenario mucho más desolador. Este panorama viene a decir: «no importan los aspectos económicos de las energías sostenibles, simplemente no podemos generar suficiente energía sostenible para soportar nuestro actual estilo de vida, se avecinan cambios enormes».

Energía y potencia

La mayoría de los debates sobre consumo energético y producción de energía son confusos debido a la proliferación de unidades en las que medimos la energía y la potencia, desde «toneladas equivalentes de petróleo» hasta «teravatios-hora» (TWh), pasando por «exajulios» (EJ). Nadie, a excepción de un especialista, sabe intuir qué significa «un barril de petróleo» o «un millón de julios» en términos más cercanos. En este libro expresaremos todo en un único conjunto de unidades más manejables con las que todo el mundo se pueda identificar.

La unidad elegida para la **energía** es el kilovatio-hora (kWh). Esta cantidad es la unidad empleada en las facturas eléctricas y costó de media a cada usuario doméstico alrededor de 17 céntimos de € en España en 2018. Como veremos, la mayoría de las elecciones que hacemos diariamente relacionadas con el consumo energético requieren cantidades de energía iguales a unos pocos kilovatios-hora.

A lo largo del libro, realizaremos numerosos cálculos que nos permitirán conocer la energía consumida o generada al día. Por lo tanto, hablaremos de kWh consumidos o generados al día (kWh/d). En realidad, tenemos que ser conscientes de que estaremos hablando de **potencia**



Figura 2.1: Distinguiendo entre potencia y energía. Cada una de estas bombillas de 60 W tiene una potencia de 60 W cuando se encienden, no tiene una «energía» de 60 W. La bombilla utiliza 60 W de potencia eléctrica cuando está encendida; emitiendo 60 W de potencia en forma de luz y de calor (sobre todo lo segundo).

(la velocidad a la que consumimos o producimos energía). También emplearemos ocasionalmente el vatio (W) o el kilovatio (kW), como explicaremos más adelante. ($40 \text{ W} \approx 1 \text{ kWh/d}$ y $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} \approx 24 \text{ kWh/d}$). El kilovatio-hora al día es una buena unidad *humanizada*; la mayor parte de las actividades personales que *devoran* energía lo hacen a un ritmo de unos pocos kilovatios-hora al día. Por ejemplo, una bombilla de 40 W que mantenemos encendida todo el tiempo emplea **un** kilovatio-hora al día. Algunas compañías eléctricas incluyen gráficos en sus facturas mostrando el consumo energético en kilovatios-hora al día. Emplearemos esta misma unidad para todas las formas de energía, no solo la eléctrica (incluiremos el consumo de gasolina, de gas o de carbón).

En muchas conversaciones coloquiales la gente emplea de forma intercambiable los términos energía y potencia, sin embargo, en este libro debemos utilizarlos rigurosamente de acuerdo a su significado científico. *Potencia es el ritmo con el que se consume o genera energía.*

Quizás una buena forma de explicar los términos **energía** y **potencia** es a través de la analogía con el **agua** y el **caudal de agua** en un grifo. Si tú quieres un trago de agua, lo que estás queriendo es un **volumen** de agua, **un litro** por ejemplo (si tienes mucha sed). Cuando abres el grifo, creas un **flujo** de agua. En el caso de que solo salga un chorrito, dicho flujo será de **un litro por minuto**. En el caso de un grifo más generoso, ese flujo podría ser de 10 litros por minuto. Puedes obtener el mismo **volumen** (un litro) o bien abriendo el grifo lento durante un minuto o abriendo el grifo más generoso durante una décima parte de minuto. El **volumen** entregado en un determinado tiempo es igual al **caudal** multiplicado por el **tiempo**:

$$\text{volumen} = \text{caudal} \times \text{tiempo}.$$

Decimos que un *caudal* es el *ritmo* al que se está entregando el *volumen*. Si conoces el volumen rellenado en un tiempo determinado, puedes calcular el caudal dividiendo ese volumen entre el tiempo:

$$\text{caudal} = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}.$$

Aquí está la conexión con energía y potencia. **Energía** es como el **volumen** de agua, y **potencia** es como el **caudal**. Por ejemplo, en cuanto enciendes una tostadora, esta empieza a consumir **potencia** a un ritmo de un kilovatio y continúa consumiendo ese kilovatio hasta que la apagas. Dicho de otra manera, la tostadora (si se deja encendida permanentemente) consume un kilovatio-hora (kWh) de energía en una hora, o, lo que es lo mismo, 24 kilovatios-hora al día.

volumen
se mide en
litros

energía
se mide en
kWh

caudal
se mide en
litros por minuto

potencia
se mide en
kWh al día

Cuanto más permanezca encendida la tostadora, más **energía** consume. Puedes calcular cuánta energía se utiliza en una determinada actividad multiplicando la potencia que consume por su duración:

$$\text{energía} = \text{potencia} \times \text{tiempo}.$$

El julio es la unidad estándar de medida de la energía, pero lamentablemente es demasiado pequeña para trabajar con ella. Un kilovatio-hora equivale a 3,6 millones de julios (3,6 megajulios).

Las potencias son tan útiles e importantes que, a diferencia del caudal de agua, tienen sus propias unidades. Cuando hablamos de un caudal podríamos medirlo en «litros por minuto», «galones por hora» o «metros cúbicos por segundo»; estos nombres de unidades dejan claro que el caudal es «un volumen por unidad de tiempo». A la potencia de *un julio por segundo* se le llama *vatio*. A 1000 julios por segundo se le llama kilovatio. Hablemos con propiedad: la tostadora utiliza un kilovatio. No significa que consuma «un kilovatio por segundo». El «al segundo» está implícito en la definición de kilovatio, ya que un kilovatio significa «un kilojulio al segundo». De igual forma decimos «una central nuclear produce un gigavatio». Un gigavatio, por cierto, son mil millones de vatios, un millón de kilovatios o 1000 megavatios. Entonces un gigavatio equivale a un millón de tostadoras.

Por favor, nunca jamás digáis «un kilovatio al segundo», «un kilovatio a la hora» o «un kilovatio al día»; ninguna de estas son unidades válidas de potencia.

Una última cosa para aclarar: si en algún momento se dice «alguien usó un gigavatio-hora de energía», simplemente se está haciendo referencia a *cuánta* energía se ha empleado, no a *cómo de rápida* se ha usado. Hablar de gigavatios-hora no implica que la energía se haya tenido que utilizar *en una hora*. Podrías haber consumido ese gigavatio-hora de energía al encender un millón de tostadoras durante una hora o encendiendo únicamente 1000 tostadoras durante 1000 horas.

Como ya hemos dicho, hablaremos en numerosas ocasiones de energía al día, kWh/d *por persona*. Una de las razones por las que nos gusta esta unidad individualizada de potencia es porque permite de manera muy sencilla pasar de hablar de lo que ocurre en España a lo que ocurre en otros países o regiones. Por ejemplo, imagínate que estamos debatiendo sobre la incineración de residuos y nos dicen que en España la incineración de los residuos genera una cantidad de energía de 3TWh al año y que en Dinamarca esta tecnología es capaz de generar

volumen
se mide en
kWh
o en
MJ

potencia
se mide en
kWh al día
o en
kW
o en
W (vatios)
o en
MW (megavatios)
o en
GW (gigavatios)
o en
TW (teravatios)

10 TWh ¿Nos aporta algo decir que Dinamarca incinera «más» residuos que España? Sí es interesante conocer el dato total de producción de energía a partir de residuos, aunque creemos que lo que realmente nos interesa saber es la energía obtenida por incineración de residuos *por persona*. (Para que conste, en Dinamarca la generación *per capita* es de 5 kWh/d por persona, y en España apenas alcanza 0,2 kWh/d por persona. Así que los daneses incineran alrededor de 25 veces más que los españoles). Para ahorrar tinta, muchas veces abreviaremos «por persona» con «/p».

Discutiendo todos los temas «por persona» desde el comienzo nos permitirá acabar con un libro mucho más manejable, un libro que esperamos que pueda servir para debatir sobre energía sostenible en todo el mundo.

Detalles quisquillosos

Pero ¿no se conserva la energía? Hablamos todo el rato de «usar» energía, ¿no dice una de las leyes de la naturaleza que la energía ni se crea ni se destruye?

Sí, estamos siendo imprecisos. Este es realmente un libro sobre *entropía*, una cuestión algo más difícil de explicar. Cuando «gastamos» un kilojulio de energía, lo que estamos haciendo realmente es tomar un kilojulio en una determinada forma de energía, que tiene *baja entropía* (por ejemplo, la electricidad), y *convertirla* en la misma cantidad de energía, pero de otro tipo, generalmente uno que tiene mucha más entropía (como el agua caliente o el aire caliente). Cuando hemos «usado» la energía, todavía está ahí, pero normalmente no podemos «usarla» una y otra vez, ya que solamente la energía de *baja entropía* es útil para nosotros. A veces, estos grados diferentes de energía se distinguen añadiendo una etiqueta a las unidades: 1 kWh(e) es 1 kilovatio hora de energía eléctrica, el grado más alto de energía. 1 kWh(t) es un kilovatio de energía térmica, la energía presente en diez litros de agua hirviendo, por ejemplo. La energía albergada en «cosas» a alta temperatura es más útil (entropía más baja) que la energía en «cosas» tibias. Un tercer grado de energía es la energía química que, al igual que la electricidad, es energía de alta calidad.

Es cómodo, aunque quizás un poco descuidado, hablar de energía en lugar de hablar de entropía, y es lo que haremos la mayor parte del tiempo en este libro. Sin embargo, en alguna ocasión arreglaremos este descuido, por ejemplo, cuando hablemos de la refrigeración, las centrales eléctricas, las bombas de calor o la energía geotérmica.

¿Estáis comparando peras con manzanas? ¿Se puede comparar diferentes formas de energía como la energía química que alimenta un coche de gasolina o la electricidad que genera un aerogenerador?

Al comparar la energía consumida con la energía que se podría generar, no queremos que parezca que estamos asumiendo que todas las formas de energía son equivalentes e intercambiables. La energía eléctrica que se produce en un aerogenerador no se puede emplear en un coche de gasolina, y la gasolina no se puede emplear directamente para encender la televisión. En principio, la energía se puede convertir de una forma a otra y esta transformación implica perder algo de esa energía en el proceso. Las centrales eléctricas basadas en combustibles fósiles, por ejemplo, gastan *energía química* para producir *energía eléctrica* (con una eficiencia que ronda el 40%). Y las plantas de aluminio consumen *energía eléctrica* para crear un producto con elevada *energía química* (con una eficiencia de alrededor del 30%).

En algunos informes de producción y consumo de energía, todas las formas diferentes de energía se indican con las mismas unidades, pero se emplean unos factores que, por ejemplo, hacen valer la energía eléctrica generada con centrales hidroeléctricas 2,5 veces más que la energía química del petróleo. Este incremento del valor de la energía eléctrica efectiva se puede justificar diciendo: «bueno, 1 kWh de electricidad es equivalente a 2,5 kWh de petróleo, porque si utilizamos toda esa cantidad de petróleo en un central eléctrica podríamos generar un 40% de esos 2,5 kWh, que es 1 kWh de energía eléctrica». En este libro, sin embargo, utilizaremos un factor de conversión de 1 cuando comparemos las diferentes formas de energía. Esto no quiere decir que 2,5 kWh de petróleo no sean ineludiblemente equivalentes a 1 kWh de electricidad; este ratio de intercambio parece ser el aceptado a nivel mundial cuando se emplea este combustible fósil para generar energía eléctrica. Sí, la conversión de energía química en eléctrica se hace con esta particular ineficiencia. Pero la energía eléctrica también se puede transformar en energía química. En un mundo alternativo (quizás no muy lejano) con relativa abundancia de electricidad y escasez de combustibles fósiles, habría algunas aplicaciones en las que estos combustibles aportarían importantes ventajas (por ejemplo, los viajes en avión en los que se requiere almacenar gran cantidad de energía con poca masa). En estos casos, podríamos emplear la electricidad para preparar combustibles líquidos (pagando el correspondiente canon, por supuesto). La ineficiencia de este proceso de conversión energética haría que nos hicieran falta, aproximadamente, 3 kWh de electricidad para generar cada kWh de gasolina. Por lo tanto, creemos que la mejor forma de resumir y comparar los distintos tipos de energía es mantener que 1 kWh de energía química equivale a 1 kWh de electricidad. Esta elección de un factor de conver-

sión igual a 1 implica que algunos de los cálculos que se presentan en este libro parecerán diferentes a los de otras personas.

Y queremos recalcar otra vez que esta elección no implica que estemos sugiriendo que podrías convertir cualquier forma de energía en otra. Transformar energía química en eléctrica siempre tiene unas pérdidas, de igual manera que las tiene convertir electricidad en energía química.

La física y las ecuaciones

A lo largo del libro, el objetivo no es solo calcular los valores del consumo actual de energía y la posible cantidad de producción sostenible, también queremos dejar claro *de qué dependen estos números*. Entender qué es lo que afecta a estos valores es esencial si tenemos que elegir cuáles son las políticas adecuadas para cambiarlos. Solo si somos capaces de entender la física que está detrás de los consumos energéticos y de la producción de energía podremos evaluar afirmaciones como la que dice que «los coches desperdician el 99% de la energía que consumen; podríamos rediseñarlos para que usen 100 veces menos energía». ¿Es esta frase verdadera? Para explicar la respuesta necesitamos emplear ecuaciones como esta:

$$\text{energía cinética} = \frac{1}{2}mv^2.$$

Sin embargo, admitimos que para muchos lectores estas fórmulas son como un idioma extranjero. Por eso hacemos la siguiente promesa: *reservaremos todo este lenguaje desconocido para los capítulos técnicos del final del libro*. Seguro que hay otros muchos lectores que disfrutan con estos capítulos. El hilo conductor de este libro (desde la página 19 hasta la página 321) se ha intentado que sea accesible a cualquiera que sepa sumar, multiplicar y dividir. Y está especialmente enfocado a nuestros queridos electos y no electos representantes, los miembros de los parlamentos.

Un último apunte antes de ponernos manos a la obra: no lo sabemos todo sobre energía. No tenemos todas las respuestas, y los números que se presentan están abiertos a revisión y corrección. De hecho, esperamos correcciones que publicaremos en la página web del libro: <https://es-sinmaloshumos.com>. Lo único que tenemos claro es que las respuestas a nuestras cuestiones sobre energía sostenible involucran números. Este libro los tiene y enseña cómo manejarlos. ¡Esperamos que lo disfrutes!

Notas y textos de consulta

Página

- 47 *El «al segundo» está implícito en la definición de kilovatio.* Otros ejemplos de unidades que, al igual que el vatio, ya tienen un «por tiempo» incluido son, por ejemplo: el nudo («la velocidad de nuestro yate era de 10 nudos!», un nudo es una milla náutica por hora); el hercio («podría oír un zumbido a 50 hercios», un hercio es una frecuencia de un ciclo por segundo); el amperio («el fusible se abre cuando la corriente es superior a 13 amperios», *no* 13 amperios por segundo) y el caballo de potencia («mi coche tiene 90 caballos», *no* 90 caballos por segundo, ni 90 caballos por hora, ni 90 caballos por día, simplemente 90 caballos).
- 47 *Por favor; nunca jamás digáis «un kilovatio al segundo».* Hay algunas excepciones específicas y un tanto raras a esta regla. Si hablamos de un crecimiento en la demanda de potencia, podríamos decir: «la demanda de potencia española está creciendo 1 gigavatio al año». En el Capítulo 26, donde se discuten las fluctuaciones de la energía eólica, se dirá: «la máxima pendiente se produjo a las 4:30 a.m. del día 22, alcanzando los 1250 MW por hora». Y por favor tened cuidado, una sola sílaba puede llevar a confusión: por ejemplo, tu contador de la luz está midiendo en kilovatios hora (kWh, *no* en «kilovatios por hora»).

En la página 422 podrás encontrar un gráfico que te ayudará a pasar de kWh al día a la mayoría de las unidades en las que habitualmente se expresa la potencia.

Capítulo 3

Coches

Para nuestro primer capítulo sobre el consumo de energía, vamos a estudiar un icono de la civilización moderna: el coche con una sola persona en su interior.

¿Cuánta energía al día consume un usuario de coche habitual? Una vez que tengamos algunos datos, el cálculo resulta sencillo:

$$\frac{\text{energía utilizada por día} = \text{distancia recorrida por día}}{\text{distancia por unidad de combustible}} \times \text{energía por unidad de combustible}.$$

Para la **distancia recorrida al día** utilizaremos 22 km.

Para la **distancia por unidad de combustible**, la inversa de lo que llamamos **consumo**, utilizaremos 14 kilómetros por litro (7 l/100 km).

¿Y qué hay de la energía por unidad de combustible (también llamada poder calorífico o densidad energética)? En lugar de simplemente consultar el dato, es más divertido estimar esta cantidad de forma indirecta y creativa. El combustible de los vehículos a motor (bien sea diésel o gasolina) es un hidrocarburo. Casualmente, también podemos encontrar hidrocarburos en nuestra mesa de desayuno. No hay más que coger el paquete de mantequilla o margarina y mirar en el lateral su valor calórico: aproximadamente 8 kWh por kg (Figura 3.2). Ya que se ha estimado la distancia recorrida por unidad de *volumen* de combustible, necesitamos conocer el poder calorífico como energía por unidad de *volumen*. ¿Cuál es la densidad de la mantequilla? Bueno, la mantequilla flota en el agua, al igual que lo hace el combustible, por lo que su densidad debe de ser algo inferior a la del agua, la cual es de 1 kg



Figura 3.1: Una de las consecuencias del coche con una sola persona en su interior: los atascos. Foto sacada del blog «Do you really need a car?»



Figura 3.2: ¿Quieres saber la energía que contiene el combustible de los coches? Mira en la etiqueta del paquete de mantequilla o margarina. El valor calórico es, aproximadamente, 3000 kJ por 100 gramos, o unos 8 kWh por kg.

por litro. Suponiendo que la densidad es de 0,8 kg por litro, se obtiene un valor calorífico de:

$$8 \text{ kWh por kg} \times 0,8 \text{ kg por litro} \simeq 7 \text{ kWh por litro.}$$

En lugar de seguir arrastrando intencionadamente una estimación imprecisa, vamos a cambiar al valor real para la gasolina: 10 kWh por litro (un coche que consuma 7 l/100 km, consume 70 kWh/100 km).

Sustituyendo estos datos en la expresión anterior para la energía utilizada por día se obtiene:

$$\text{energía utilizada por día} = \frac{22 \text{ km/día}}{14 \text{ km/litro}} \times 10 \text{ kWh/litro} \simeq 16 \text{ kWh/día.}$$

¡Enhorabuena! Hemos hecho nuestra primera estimación sobre el consumo. Este consumo se recoge en la pila de la izquierda de la Figura 3.3. La altura de la pila representa 16 kWh por día y por persona.

Esta es nuestra estimación para el ciudadano medio. En los siguientes capítulos se discutirá el consumo energético diario de nuestras actividades, tomando como referencia ejemplos representativos o consumos *medios* de todos los habitantes de España. En la segunda parte del libro se discutirá cómo podemos reducir nuestro consumo si se introducen algunas mejoras o tecnologías alternativas, como el uso del coche eléctrico.

¿Por qué un coche puede recorrer 14 kilómetros por litro de combustible? ¿A dónde va a parar esa energía? ¿Podríamos fabricar coches que recorriesen 1400 kilómetros con un litro? Si queremos intentar reducir el consumo, tenemos que entender la física que hay detrás del consumo de los coches. Estas cuestiones se responden en el capítulo técnico Apéndice A, el cual proporciona de forma sencilla una teoría sobre el consumo energético de los coches. Te animamos a leer dicho capítulo, siempre y cuando las fórmulas del tipo $\frac{1}{2}mv^2$ no te produzcan vértigo.

La conclusión de este capítulo es la siguiente: un ciudadano medio en España usa 16 kWh al día para desplazarse en coche. En el siguiente capítulo necesitamos incrementar la pila de generación sostenible; así podremos hacernos una idea de cuánta energía estamos consumiendo diariamente.

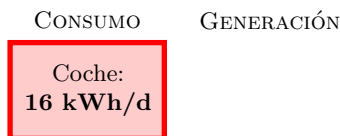


Figura 3.3: Conclusión del Capítulo 3: El consumo medio por persona debido al uso del coche es de 16 kWh al día.

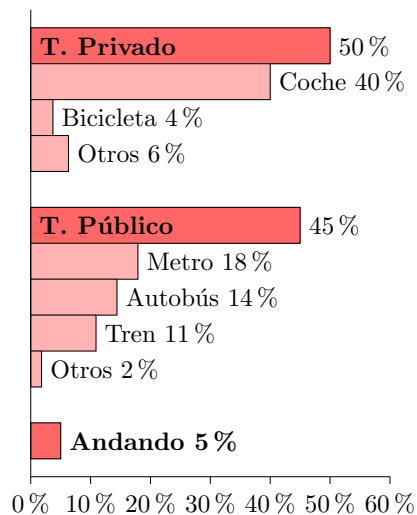


Figura 3.4: Datos sobre hábitos de desplazamiento al trabajo en España en 2015 de acuerdo con el estudio de la empresa Edenred [https://www.edenred.es/blog/habitos-transporte-empleados-espana/].

Preguntas

¿Qué pasa con el coste energético de producir el combustible para el coche?

Aunque es una buena pregunta, en este libro hemos calculado los consumos energéticos asociados a cada actividad teniendo en cuenta únicamente dicha actividad. Esta elección hace que la estimación sea más sencilla, pero estamos de acuerdo en que es una buena idea intentar estimar el impacto energético completo de la actividad considerada. Se ha estimado que, para conseguir cada unidad de gasolina, se requieren 1,4 unidades de petróleo y otros combustibles primarios [28].

¿Qué pasa con el coste energético de fabricar un coche?

Sí, este coste también ha caído fuera de la frontera de este capítulo. Hablaremos sobre la producción de coches en el Capítulo 15.

Notas y textos de consulta

Página

- 53 *Para la distancia recorrida al día utilizaremos 22 km.* De acuerdo con el informe «Cuentas ecológicas del transporte en España» [29] en el año 2007 la distancia media recorrida al día en coche por cada persona en España era de 29 kilómetros, que se redujo en 2012 a 26,5 kilómetros por la crisis. De acuerdo con el estudio realizado por un comparador de seguros (seguros.es), dicha cifra alcanzó los 33 kilómetros en 2015. Si tomamos el factor de ocupación medio de cada vehículo igual a 1,5 [30], se obtiene que la distancia recorrida al día de media es de 22 kilómetros.
- 53 *Para la distancia por unidad de combustible, la inversa de lo que llamamos consumo, utilizaremos 14 kilómetros por litro.* Un vehículo nuevo del año 2017 puede presentar un consumo combinado (ciudad y carretera) de entre 4,5 y 6 litros a los 100 km (si no se consideran los vehículos híbridos), de acuerdo con los datos proporcionados por distintos fabricantes. Si, además, se tiene en cuenta que el consumo real es de media un 20% superior al acreditado por los fabricantes, de acuerdo con el estudio realizado por el portal *autopista.es*, parece razonable considerar un consumo combinado de 6 litros a los 100 km como un dato representativo. Pero no todos los coches que circulan en la actualidad por nuestras carreteras presentan el mismo consumo, hay que tener en cuenta que la edad media del parque automovilístico español era de 11,5 años a finales de 2015 según ANFAC (Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones). Los coches más antiguos presentan consumos más elevados, por lo que considerar un consumo medio combinado de 7 litros a los 100 kilómetros puede resultar incluso conservador. Con este consumo medio, la distancia media recorrida por litro de combustible es de 14,3 kilómetros; la redondearemos a 14 kilómetros.
- 54 *Suponiendo que la densidad es de 0,8 kg por litro.* La densidad de la gasolina es de 0,737 kg/l, mientras que la del diésel es de 0,82-0,95 kg/l.



Figura 3.5: Los vehículos tienen unas emisiones asociadas que se analizarán en el Capítulo 31.

Poderes caloríficos

Gasolina	10 kWh por litro
Diésel	11 kWh por litro

54 *...vamos a cambiar al valor real para la gasolina: 10 kWh por litro.* El ORNL (Laboratorio Nacional de Oak Ridge, EE.UU.) proporciona los siguientes poderes caloríficos superiores: diésel: 10,7 kWh/l, combustible para aviación: 10,4 kWh/l, gasolina: 9,7 kWh/l. Cuando mires los poderes caloríficos, encontrarás «poder calorífico superior» y «poder calorífico inferior». Estos valores no se diferencian en más de un 6% para los combustibles de los motores, por lo que esta diferencia no es crucial, sin embargo, dejadnos explicar la diferencia entre ambos. El poder calorífico superior es la energía química real liberada cuando se quema el combustible. Uno de los productos de la combustión es agua y, en la mayoría de motores y centrales eléctricas, una parte de la energía se consume en evaporar esta agua. El poder calorífico inferior expresa la energía que queda, asumiendo que la energía de vaporización se desperdicia. Cuando nos preguntamos «¿cuánta energía consume mi estilo de vida?», el poder calorífico superior es la cantidad correcta a emplear. El poder calorífico inferior, por otro lado, es interesante para un ingeniero de una central eléctrica que tenga que decidir qué combustible va a quemar para producir electricidad. A lo largo de este libro, hemos intentado emplear poderes caloríficos superiores.

Una nota final para aquellos que digan «la mantequilla no es un hidrocarburo»: vale, no es un hidrocarburo *puro*; pero es una buena aproximación decir que el principal componente de la mantequilla son cadenas largas de hidrocarburos, como en la gasolina. La prueba es que esta aproximación nos ha llevado a un dato que se aleja un 30% de la respuesta correcta. Bienvenidos a la guerrilla, físicos.

Capítulo 4

Viento

¿Cuánta energía se puede generar a partir del viento?

Se puede hacer una estimación del potencial de la energía eólica terrestre (onshore) en España multiplicando la potencia media producida por unidad de área en un parque eólico por el área por persona del país:

potencia por persona = potencia por unidad de área \times área por persona.

En el Apéndice B se explica cómo estimar la potencia por unidad de área de un parque eólico en España. Si la velocidad típica de viento es de 5 m/s, o 18 km/h, la potencia por unidad de área es de 1,3 W/m².

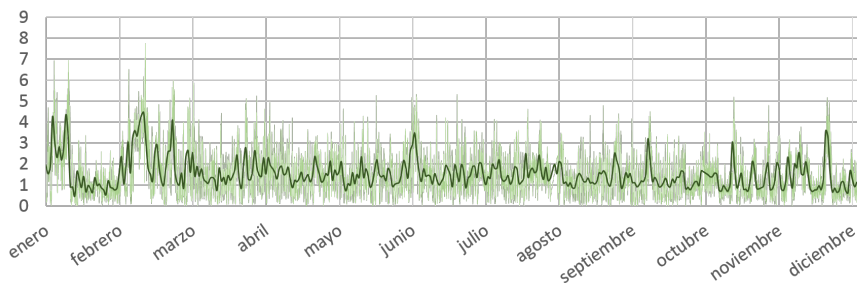


Figura 4.2: Velocidad media del viento, en metros por segundo, en la Puebla de Alcocer (Badajoz): diaria, en verde oscuro; y treinta minutil, en verde claro, durante el año 2016. Ver también Figura 4.6.

Considerar una velocidad media de 5 m/s es probablemente una estimación muy generosa para muchos lugares de España. Por ejemplo, la Figura 4.2 muestra la velocidad media diaria en una región de Badajoz durante el año 2016. La velocidad media diaria no alcanza ningún día los 5 m/s, ver en la Figura 4.6 el histograma. Sin embargo, en otros lugares, esta estimación se ve ampliamente superada, como, por ejemplo, en A Coruña, en la Sierra de Faladoira (ver Figura 4.4).



Figura 4.1: Los aerogeneradores se emplean para transformar la energía del viento en electricidad.



Figura 4.3: Localizaciones elegidas para analizar la velocidad del viento.

Figura 4.4: Velocidad media de viento, en metros por segundo, en la sierra de Faladoira, A Coruña: diaria, en azul oscuro; y treinta minutos, en azul claro, durante el año 2016. Ver también Figura 4.6.

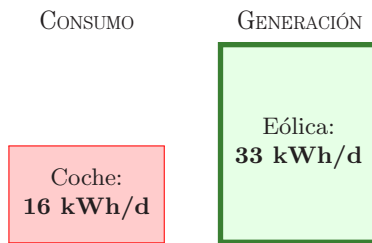
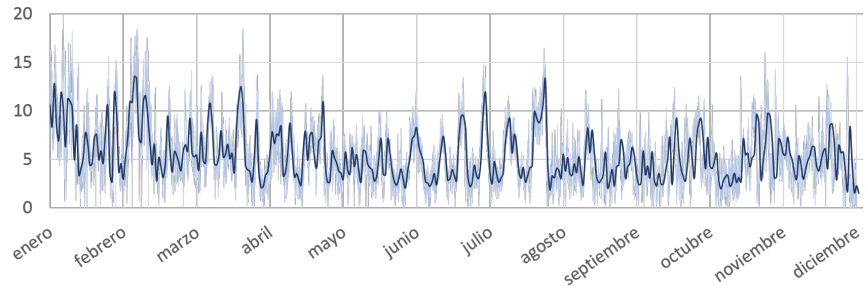


Figura 4.5: Conclusión del Capítulo 4: la máxima producción de la eólica terrestre en España es 33 kWh al día por persona.

Tabla 4.1: Dato que merece la pena recordar: potencia media por unidad de área.

Potencia por unidad de área	
Parque eólico (velocidad 5 m/s)	1,3 W/m ²

Tabla 4.2: Dato que merece la pena recordar: densidad de población en España. Ver la pág. 438 para más datos.

Densidad de población en España	
92 p/km ²	10 800 m ² /p

Sustituyendo la densidad de población de España: 92 personas por kilómetro cuadrado, o 10 800 metros cuadrados por persona, podemos calcular la potencia generada por persona:

$$1,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 10\,800 \frac{\text{m}^2}{\text{persona}} = 14\,000 \frac{\text{W}}{\text{persona}} \quad (4.1)$$

si las turbinas eólicas se situasen ocupando todo el país, y asumiendo que 1,3 W/m² es la potencia existente por unidad de área. Convirtiendo esto a nuestras unidades favoritas de potencia, tendríamos 330 kWh/día y persona. Vamos a tratar de ser más realistas. ¿Qué fracción del país se puede cubrir con parques eólicos? ¿Puede ser un 10%? En ese caso, si se cubre el 10% de la superficie más ventosa de España con parques eólicos (produciendo 1,3 W/m²), seríamos capaces de generar **33 kWh/día y persona**, lo cual prácticamente dobla el consumo medio del coche. Pero seamos conscientes de que, para conseguir esta generación, hemos utilizado un 10% de la superficie del país. Dada la separación necesaria entre aerogeneradores, un 90% de la superficie de estos parques se puede aprovechar para el cultivo. Por lo tanto, la superficie del país realmente ocupada por los aerogeneradores y la infraestructura necesaria para el funcionamiento de los parques es del 1%.

Más adelante analizaremos la eólica instalada en el mar o eólica *offshore*.

Hay que enfatizar lo generosa que es esta estimación. Para poder generar 33 kWh/día y persona en España sería necesario instalar 270 GW. Esto implica multiplicar prácticamente por 12 la potencia ya instalada en España a finales de 2016. Para hacernos una idea, a mediados de ese mismo año, la potencia instalada en el mundo era 490 GW, algo menos del doble de lo que habría que instalar únicamente en España para conseguir 33 kWh/día y persona.

Por favor, no nos malinterpretes. ¿Estamos diciendo que no debemos molestarnos en construir parque eólicos? Ni mucho menos. Simplemente queremos plasmar el hecho de que, si realmente se quiere que la generación eólica marque la diferencia, los parques eólicos tienen que ocupar superficies muy grandes.

El parque eólico de La Plana, situado cerca de la ciudad de Zaragoza, tiene 313 turbinas, lo que le permite alcanzar una potencia pico de 235 MW, ocupando un área de 3870 hectáreas. Esto implica que la potencia pico es de 6 W/m^2 . La potencia media que producirá el aerogenerador será menor, ya que no funciona a su potencia pico (o potencia máxima) durante todo el tiempo. El ratio de la potencia media con respecto a la potencia pico se llama «factor de capacidad» o «factor de carga» y varía de un lugar a otro, y según la tecnología empleada. Si se asume un factor de capacidad del 24 %, típico en los parques eólicos españoles tal y como se explica en el Apéndice B, la potencia media del parque por unidad de área es de $1,5 \text{ W/m}^2$, similar a la que habíamos supuesto.

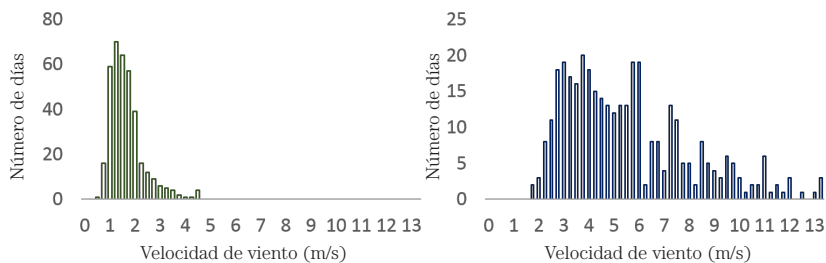


Figura 4.6: Histograma de las medias diarias, en metros por segundo, para los datos de la Puebla de Alcocer (izquierda) y la sierra de Faladoira (derecha) durante el año 2016.

Preguntas

Las turbinas eólicas son cada vez más grandes. ¿Emplear turbinas más grandes cambiaría el resultado de este capítulo?

El Apéndice B lo explica. Turbinas más grandes ofrecen economías de escala, pero no incrementan notablemente la potencia por unidad de área, ya que estas deben separarse más entre sí. Un parque eólico formado por aerogeneradores el doble de altos producirá aproximadamente un 30 % más de energía.

El viento cambia constantemente. ¿Hace esto menos útil la energía eólica?

Puede ser. Veremos este tema en el Capítulo 26, en el que se analizará la intermitencia del viento y se discutirán posibles soluciones a este problema, incluyendo el almacenamiento y la gestión de la demanda.

Notas y textos de consulta

Página

57/58/59 *Figura 4.2, Figura 4.4 y Figura 4.6.* Los datos de viento de la Puebla de Alcocer corresponden al año 2016 y han sido tomados de la página REDAREX (Red de Asesoramiento al Regante de Extremadura), a una altura de 10 m sobre la superficie terrestre. Los datos de viento de la sierra de Faladoira, también de 2016, se han obtenido de la página web de Meteogalicia, a una altura de 10 m sobre la superficie terrestre.

58 *Para poder generar 33 kWh/día y persona en España sería necesario instalar 270 GW. Esto implica multiplicar prácticamente por 12 la potencia ya instalada en España a finales de 2016.* Asumiendo el factor de capacidad medio de los parques eólicos españoles, generar 33 kWh/día requiere instalar una potencia de 270 GW. A finales de 2016, la potencia eólica instalada era de casi 23 GW. Esta potencia pico produjo 47300 GWh, lo que nos da un factor de capacidad del 24%.

De acuerdo con el GWEC (Global Wind Energy Council) la potencia instalada a finales de 2016 en todo el mundo era de 490 GW.

Capítulo 5

Aviones

Supongamos que haces un vuelo intercontinental al año. ¿Cuánta energía consumes?

Un Boeing 747-400 con 240 000 litros de combustible puede transportar a 416 personas unos 14 200 km. Recuerda que el poder calorífico del combustible es de 10 kWh por litro (lo aprendimos en el Capítulo 3). Conociendo estos datos, el coste energético de un viaje de ida y vuelta de estas características es:

$$\frac{2 \times 240\,000 \text{ litros}}{416 \text{ pasajeros}} \times 10 \text{ kWh/litro} \approx 12\,000 \text{ kWh/pasajero}. \quad (5.1)$$

Si haces uno de estos viajes al año, tu consumo energético medio diario es:

$$\frac{12\,000 \text{ kWh}}{365 \text{ días}} \approx 33 \text{ kWh/día}. \quad (5.2)$$

14 200 km es una distancia algo mayor que Madrid-Buenos Aires (10 000 km), pero inferior que Madrid-Sidney (17 600 km). Probablemente, la distancia que hemos considerado para un vuelo intercontinental esté algo sobreestimada; sin embargo, también hemos considerado que el avión está completo y si no es así el consumo medio por pasajero es mayor. Si escalamos a 11 600 km/14 200 km para considerar un vuelo más realista, pero consideramos que la ocupación del avión es del 80 %, obtenemos de nuevo un consumo de **33 kWh al día**.

Pongamos en perspectiva lo que esto significa. Hacer un vuelo intercontinental al año tiene un coste energético superior a una estufa eléctrica de 1 kW encendida durante las 24 horas del día, los 365 días del año.

Vuelo intercontinental:
33 kWh/d

Figura 5.1: Realizar un vuelo intercontinental al año supone 33 kWh al día.

La verdad es que hay gente que hace varios viajes intercontinentales al año y otros (como muchos de nuestros abuelos) que no han hecho ninguno en toda su vida. Entonces, ¿cuánto consume un español medio en vuelos? En 2016, los españoles hicimos algo más de 18 millones de viajes en avión, de los cuales 8 millones fueron domésticos, 7,5 millones europeos y 2,5 millones con destinos fuera de Europa. Podríamos considerar que un vuelo doméstico típico es un Madrid-Barcelona (500 km), un vuelo europeo típico es Madrid-Berlín (1800 km) y, por último, un vuelo al resto del mundo podría ser un Madrid-Buenos Aires (10 000 km). Haciendo esta sencilla cuenta, y considerando que los viajes son de ida y vuelta, podemos saber cuántos km vuela un español medio:

$$2 \times \frac{(8 \text{ mill.} \times 500 \text{ km}) + (7,5 \text{ mill.} \times 1800 \text{ km}) + (2,5 \text{ mill.} \times 10\,000 \text{ km})}{46 \text{ mill. de personas}}. \quad (5.3)$$

Así, se obtiene que cada español vuela 1850 km de media. Podemos estimar que el consumo medio de todos estos aviones (nacionales e internacionales) es similar al estimado en la Ecuación 5.2, es decir, 40 kWh por 100 personas-km (p-km). Por lo tanto, el consumo medio anual de los españoles en vuelos es:

$$1850 \text{ km} \times 0,4 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} = 740 \text{ kWh}. \quad (5.4)$$

O lo que es lo mismo, **2 kWh por persona y día**. Nuestra pila de consumos energéticos representa valores medios, por lo que añadimos estos 2 kWh/p/d. Sin embargo, dado que un elevado porcentaje de la población no viaja en avión, este consumo medio no representa bien a un viajero habitual. Si construyes tu propia pila de consumo, es probable que obtengas un consumo por viajes en avión superior al de la media de la población española.

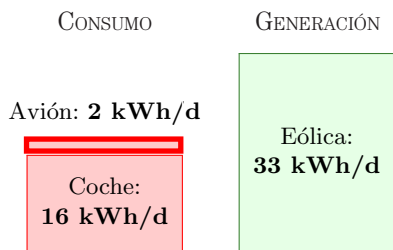


Figura 5.2: Un español medio consume en viajes en avión 2 kWh al día.

Al igual que el Capítulo 3, en el que estimamos el consumo de los coches, va acompañado por el Apéndice A, en el que se explica en qué gastan los coches la energía, en el capítulo técnico que complementa a este capítulo (Apéndice C, pág. 345) se detalla el destino de la energía utilizada en un avión. El Apéndice C nos permite dar respuesta a preguntas como «¿Consumiría la aviación mucha menos energía si viajáramos en aviones más lentos?». La respuesta es no: al contrario que los automóviles, que *pueden* ser más eficientes si se reduce su velocidad, los aviones ya funcionan casi en su eficiencia máxima. Un avión tiene que usar

energía inevitablemente por dos razones: tiene que empujar aire hacia abajo para mantenerse en vuelo y tiene que vencer la resistencia del aire. Ningún futuro diseño de avión puede mejorar radicalmente esta eficiencia. ¿Un 10% de mejora? Vale, puede ser posible. ¿Doblar su eficiencia? Tendríamos que comernos nuestras palabras.

Preguntas

¿No son los aviones turbopropulsados mucho más eficientes?

No. El *comfortably greener* Bombardier Q400 NextGen, el avión turbopropulsado «más avanzado del mundo» de acuerdo con su fabricante [31], utiliza 3,81 litros por 100 pasajeros-km (a una velocidad de crucero de 667 km/h), lo que supone un coste energético de **38 kWh por 100 p-km**. El Boeing 747-400 lleno tiene un coste energético de **42 kWh por 100 p-km**. Por lo tanto, ambos aviones presentan el doble de eficiencia que un coche ocupado por una sola persona. (El coche que estamos asumiendo en este análisis es el coche europeo medio descrito en el Capítulo 3).

¿Volar es especialmente malo para el cambio climático por alguna razón?

Sí, esa es la opinión de los expertos, aunque todavía queda algo de incertidumbre sobre este tema [32]. Un avión emite otros gases de efecto invernadero, además del CO₂, como vapor de agua y ozono, así como gases que indirectamente también contribuyen al efecto invernadero, como los óxidos de nitrógeno. Si quieres estimar tu huella de carbono en toneladas equivalentes de CO₂, deberías tomar las emisiones reales de CO₂ de tus vuelos e incrementarlas al doble o triple. En los cálculos y diagramas de este libro no incluimos esta multiplicación porque aquí nos estamos centrando en cálculos energéticos.

*Lo mejor que podemos hacer con los ecologistas
es pegarles un tiro.*

Michael O'Leary (director ejecutivo de Ryanair [33])



Figura 5.3: Bombardier Q400 NextGen.



Figura 5.4: Boeing 737-800 de Ryanair.

Notas y textos de consulta

Página

62 *En 2016, los españoles hicimos algo más de 18 millones de viajes en avión.* Los datos se han tomado de la Encuesta de Turismo de Residentes publicada por el INE cada trimestre del año 2016 [<http://www.ine.es/>].

Tabla 5.1: Eficiencias del transporte de pasajeros expresadas en energía necesaria por 100 pasajero-km.

	Energía en kWh por 100 p-km
Coche (4 ocupantes)	17
Avión Ryanair (2007)	37
Bombardier Q400, lleno	38
747, lleno	42
747, ocupación del 80%	53
Coche (1 ocupante)	70
Avión Ryanair (2000)	73

Vuelos cortos: **6,5 kWh/d**

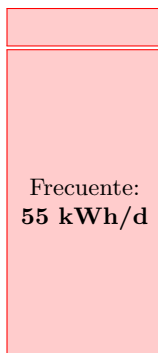


Figura 5.5: Dos vuelos de corta distancia con la aerolínea más verde: 6,5 kWh/d. Volar lo suficiente como para ser considerado viajero frecuente: 55 kWh/d.

63 *Boeing 747-400*. Los datos se han tomado de Boeing [34].

Normalmente los aviones no vuelan completamente llenos. Actualmente, la ocupación suele rondar el 80 %, aunque las aerolíneas están consiguiendo un aumento de la ocupación lento durante los últimos años. En 2011, los aviones de Ryanair tuvieron una ocupación media del 87 %, mientras que los de otras compañías como British Airways rondaban el 76 % [35]. Un 747 con una ocupación del 80 % gasta unos 53 kWh por cada 100 pasajeros y km.

¿Y qué hay de los vuelos de corta distancia? A partir de las mejoras de eficiencia acometidas en 2007 por Ryanair, «la aerolínea europea más verde», realiza vuelos a un coste de **37 kWh por 100 p-km** [35]. Esto significa que viajar por Europa con Ryanair supone un gasto energético similar a hacerlo en coche con una ocupación de dos personas por coche. El informe «Air travel carbon and energy efficiency» [35] contiene también datos del consumo de otras aerolíneas que son, en general, superiores al de Ryanair. La distancia entre Madrid y Roma es de 1370 km y entre Madrid y Berlín de 1870 km. Por lo tanto, un viaje de ida y vuelta a Roma con la aerolínea menos contaminante tiene un coste energético de 1006 kWh y un viaje de ida y vuelta a Berlín de 1370 kWh. Si un año viajas a Roma y a Berlín, tu consumo medio de potencia es de 6,5 kWh/día si usas la aerolínea menos contaminante. Con una aerolínea más contaminante podría llegar, probablemente, a 12 kWh/día.

¿Y qué pasa con los viajeros frecuentes? Para conseguir una tarjeta de viajero frecuente de una aerolínea intercontinental uno debe volar alrededor de 40000 km al año. Eso supone unos 55 kWh diarios si partimos de los números indicados al principio de este capítulo y suponemos una ocupación media de los aviones del 80 %.

Aquí se pueden añadir algunos números más publicados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) [32]: un 747-400 completo que vuela 10000 km con poca densidad de pasajeros (262 asientos) tiene un consumo energético de **50 kWh por 100 p-km**. En una configuración de alta densidad de asientos (568) que vuela 4000 km, el mismo avión tiene un consumo de **22 kWh por 100 p-km**. Un Tupolev-154 para vuelos cortos que viaje 2235 km con el 70 % de sus 164 asientos ocupados consume **80 kWh por 100 p-km**.

63 *Ningún futuro diseño de avión puede mejorar radicalmente esta eficiencia*. De hecho, el objetivo del Consejo Consultivo para la Investigación Aero-náutica en Europa (ACARE) es reducir en un 50 % el combustible usado por pasajero para 2020 (relativo al consumo del año 2000), con un 15-20 % de mejora en la eficiencia energética. Dennis Bushnell, científico jefe del Centro de Investigación de Langley, de la NASA, está aparentemente de acuerdo con este análisis de la eficiencia energética en aviación. La aviación es una industria madura. «No hay mucho que ganar salvo un aumento de un porcentaje aquí y otro allí durante largos periodos de tiempo». (*New Scientist*, 24 de febrero de 2007, página 33). El futurista «Silent Aircraft», con un diseño radicalmente diferente a los aviones convencionales [silentaircraft.org/sax40], si alguna vez fuera construido, se prevé que aumente la eficiencia energética en un 16 % con respecto a aviones convencionales [36].

Si se alcanza el objetivo del ACARE, vendrá motivado principalmente por el transporte de un mayor número de pasajeros en cada avión y por una mejor gestión del tráfico aéreo; no por grandes mejoras en la eficiencia de los aviones.

Capítulo 6

Sol

Estamos comparando nuestro consumo frente a una posible generación de energía sostenible. En los últimos tres capítulos hemos visto que algunas personas consumen más energía solo con sus traslados en coche y avión que todo el potencial eólico onshore realizable en España. ¿Podrá la energía solar marcar la diferencia?

La energía llega del Sol a la Tierra con una potencia de 1367 W/m^2 . Aun en días sin nubes, parte de esta energía es reflejada por la atmósfera, quedando unos 1000 W/m^2 al mediodía en un día claro. Esto son 1000 W por cada metro cuadrado de un área orientada hacia el sol, no por metro cuadrado de terreno. Para obtener la potencia media por metro cuadrado de terreno en España, hay que realizar varias correcciones. Primero, hay que tener en cuenta el ángulo entre los rayos del sol y el terreno, lo que reduce la intensidad del sol de mediodía hasta un 75% aproximadamente con respecto a su valor en el ecuador (Figura 6.1). También se pierde energía solar porque, obviamente, no siempre es mediodía. En un día claro de marzo o septiembre, la relación entre la radiación media y la radiación al mediodía es de en torno al 30%. Por supuesto, también se pierde energía debido a las nubes.

El efecto combinado de estos factores y la complejidad adicional de la variación estacional hace que, en valor medio, la potencia solar bruta en un tejado orientado al sur en España sea de unos 235 W/m^2 y la potencia media en un terreno plano de unos 200 W/m^2 . En otras palabras, la cantidad de energía solar que llega a España al año por metro cuadrado es el equivalente a unas 1700 horas de sol de mediodía.

Podemos convertir esta energía bruta en energía útil mediante cuatro procedimientos:

1. Solar térmica: calentamiento directo de edificios o de agua.
2. Solar fotovoltaica (FV): generación directa de electricidad.
3. Biomasa solar: utilización de árboles, bacterias, algas, maíz, soja o aceite para hacer combustibles, productos químicos o materiales.

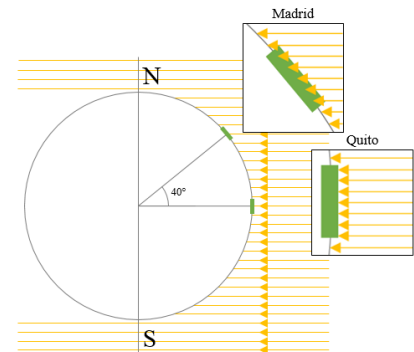


Figura 6.1: Rayos del sol incidiendo sobre la tierra al mediodía de un día de primavera u otoño. La densidad de luz solar por unidad de superficie en Madrid (latitud 40°) es aproximadamente un 75% de la del ecuador.

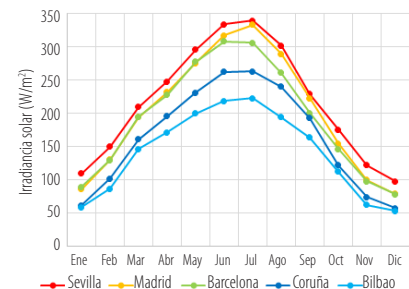


Figura 6.2: Irradiancia solar mensual media en distintas ciudades españolas. El valor medio anual en España es de 200 W/m^2 .

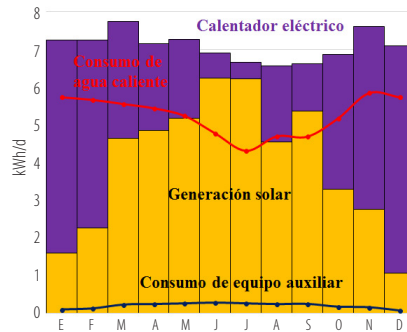
- Comida: igual que la biomasa solar pero alimentando con las plantas a humanos y otros animales.

(En el Capítulo 25 se revisarán un par de tecnologías solares adicionales apropiadas para su uso en el desierto).

Realicemos ahora estimaciones de la máxima energía que puede suministrarnos cada una de estas vías al día. Ignoraremos su coste económico y el coste energético de su instalación y mantenimiento.

Solar térmica

Figura 6.3: Energía solar generada por un panel térmico de agua caliente de 3 m² (naranja), y calor adicional necesario (morado) para producir el agua caliente necesaria en la vivienda prototipo Viridian Solar. (La foto muestra una vivienda con el mismo tipo de panel). La energía media producida al día por este panel de 3 m² fue de 4 kWh/d. El experimento simuló el consumo de agua caliente de una vivienda europea tipo: 100 litros de agua caliente (60°C) al día. La diferencia de 1,5-2 kWh entre la energía total generada y la utilizada se debe a pérdidas de calor. La potencia media por unidad de área de este panel, ubicado en el Reino Unido, es de 56 W/m². En España, con el doble de radiación, se podrían esperar 112 W/m² y una producción de 8 kWh/d. Foto de Viridian Solar.



La tecnología solar más simple es un colector solar para calentar agua. Imaginemos que cubrimos un 20% de los tejados que están orientados al sur con paneles térmicos (esto supondría unos 5 m² de paneles por persona) y asumamos que estos paneles tienen una eficiencia media del 50% al convertir los 235 W/m² de potencia solar en agua caliente (Figura 6.3). Multiplicando

$$50\% \times 5 \text{ m}^2 \times 235 \text{ W/m}^2 \times 24 \text{ h/d}, \quad (6.1)$$

resulta que, mediante energía solar térmica, se suministrarían

14 kWh al día por persona.

En el experimento de la Figura 6.3, de haber sido en España y con 5 m² de paneles, se habrían obtenido 13,5 kWh por día y persona, lo cual se aproxima mucho a la estimación realizada. Añadimos pues este valor a la Figura 6.4, pero coloreado en verde claro para indicar que es generación de baja calidad –el agua caliente no es tan valiosa como la

electricidad—. Además, el calor no puede suministrarse a la red eléctrica. Si no lo usas, se pierde. Debemos tener en cuenta que una parte de este calor capturado no estará en el lugar adecuado. En las ciudades, donde vive mucha gente, los edificios residenciales tienen menos espacio en el tejado por persona que la media nacional. Además, esta energía se generaría de una forma desigual a lo largo del año.

Solar fotovoltaica

Los paneles fotovoltaicos convierten directamente la luz del sol en electricidad. Los paneles típicos tienen una eficiencia del 15%; paneles más caros pueden llegar al 20%. Un panel comercial con un 30% de eficiencia sería todo un logro.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la eficiencia de los paneles no es realmente la eficiencia final, sino que otros factores como la temperatura o la suciedad bajan el rendimiento de un panel en torno a un 25% adicional.

Dicho esto, tomemos la potencia media que suministraría un panel fotovoltaico con una eficiencia del 20% en una superficie orientada al sur en España:

$$75\% \times 20\% \times 235 \text{ W/m}^2 = 35 \text{ W/m}^2. \quad (6.2)$$

La Figura 6.5 muestra datos reales que se aproximan bastante a este cálculo (el valor de la figura es menor, ya que existen separaciones entre los paneles que disminuyen el valor real de densidad de potencia). Pongamos que cada persona dispone de 12,5 m² de paneles caros (20% de eficiencia) para cubrir la mitad de los tejados orientados al sur. Estos paneles darían

$$35 \text{ W/m}^2 \times 12,5 \text{ m}^2 \times 24 \text{ h/d} = 10 \text{ kWh por persona y día.} \quad (6.3)$$

Dado que el área de todos los tejados orientados al sur es de 25 m² por persona, está claro que hay sitio tanto para estos paneles fotovoltaicos como para los térmicos que se han tratado anteriormente. Por lo tanto, añadimos también este resultado a la pila de producción en la Figura 6.7.

Una solución muy interesante, al menos en países soleados, es la de hacer sistemas combinados que produzcan agua caliente y electricidad en un único panel. Esto sería, en su forma más simple, un panel foto-

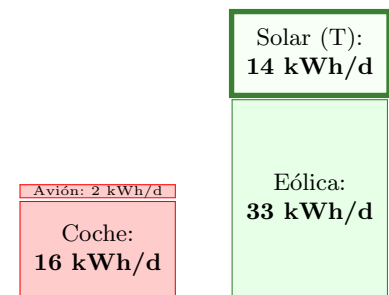


Figura 6.4: Solar térmica: 5 m² de paneles pueden proporcionar (en valor medio) unos 14 kWh de energía térmica al día.

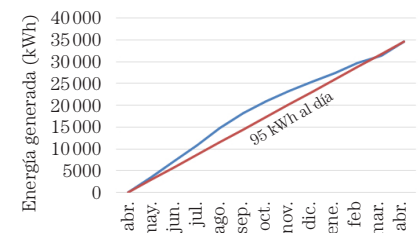


Figura 6.5: Datos reales de producción de una instalación fotovoltaica sobre tejado de 140 m². Su potencia pico es de unos 20 kW y su producción media diaria es de unos 95 kWh al día. Esto equivale a unos 28 W/m².

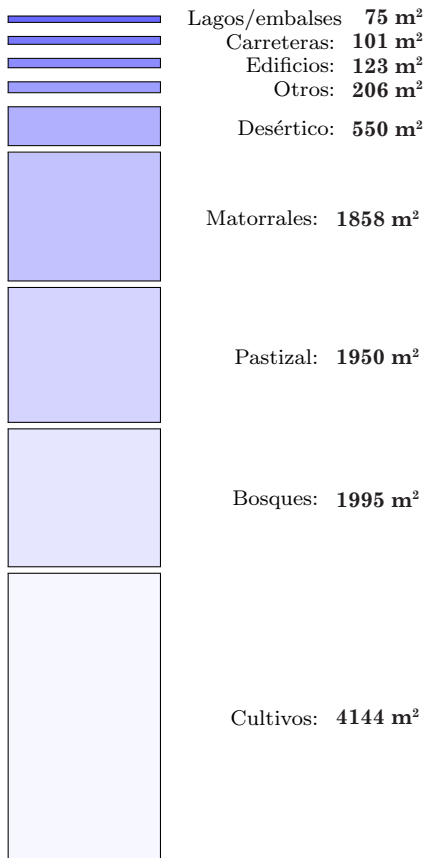


Figura 6.6: Tipos de terreno por persona en España. Sumando todos los tipos de terreno, a cada persona le tocaría 11 002 m², es decir, poco más de una hectárea. Fuente: Fundación BBVA [309], [310].

voltaico con un sistema que haga circular agua por su parte posterior. Existen también sistemas que, mediante espejos, concentran la luz en células fotovoltaicas de alta eficiencia; éstas generan electricidad mientras que se hace pasar agua por detrás de ellas calentándose para su uso. Estas tecnologías ya han sido probadas, pero, de momento, no han llegado a comercializarse de forma masiva. No obstante, existen soluciones comerciales y es posible que poco a poco empiecen a instalarse estos sistemas.

La conclusión hasta ahora: cubrir tu tejado con paneles fotovoltaicos puede proporcionar una buena parte de energía para tu consumo eléctrico, pero los tejados no son lo suficientemente grandes como para proporcionar toda la energía que utilizamos. Para sacar mayor partido a la fotovoltaica necesitamos poner los pies en la tierra.

Plantas fotovoltaicas

Una de las principales ventajas de la energía fotovoltaica es que se puede generar tanto en pequeñas instalaciones (como las descritas en la sección anterior) como en plantas de mayor tamaño. La ventaja de las instalaciones pequeñas es que la energía se genera en el mismo punto donde se va a consumir, evitando la necesidad del transporte de la electricidad. La ventaja de las grandes plantas es que se puede ocupar más espacio y que la energía generada es más barata. De hecho, en estas instalaciones en las que es más importante reducir el precio que la superficie utilizada, se suelen usar paneles fotovoltaicos de silicio policristalino, más baratos y con menor eficiencia que los utilizados para las instalaciones de tejado, donde se usan paneles de silicio monocristalino. Por lo tanto, vamos a considerar que los paneles de una gran planta fotovoltaica tienen una eficiencia del 15% (en lugar del 20% que hemos considerado antes). Además, nunca se cubre la totalidad del suelo con paneles, sino que se colocan con cierta inclinación, intentando que se sitúen perpendiculares a los rayos de sol, para que cada panel capte la máxima cantidad de energía. Esto obliga a separar los paneles para evitar que los de delante sombreen a los de detrás. Consideraremos que sobre los paneles de una planta fotovoltaica normal incide el 60% de la radiación que llega a la planta. Por lo tanto, la densidad de potencia de una planta de este tipo es de

$$75\% \times 15\% \times 60\% \times 235 \text{ W/m}^2 = 16 \text{ W/m}^2. \quad (6.4)$$

En comparación, plantas fotovoltaicas en latitudes similares a la de España tienen una potencia media de entre 4 y 18 W/m², dependiendo

principalmente de la separación entre paneles y de la cantidad de sol, entre otros factores.

Un valor razonable es cubrir 150 m² por persona (aproximadamente el 1,5% de la superficie de España) con plantas fotovoltaicas de este tipo. En este caso tendríamos

$$75\% \times 15\% \times 60\% \times 235 \text{ W/m}^2 \times 150 \text{ m}^2/\text{persona} \times 24 \text{ h/d} \approx 57 \text{ kWh por persona y día.} \quad (6.5)$$

¿Es este plan demasiado audaz? La potencia necesaria para producir estos 57 kWh por persona al día es unas 115 veces la potencia instalada en España en 2017, o 1,5 veces la potencia instalada en el mundo a finales de 2017. Por otro lado, cubrir el 1,5% de la superficie de España con paneles podría parecer, en principio, inadecuado, pero no es algo tan descabellado si se piensa que carreteras o edificios ya ocupan una superficie igual y que hay espacio de sobra para estos paneles en tierras que, además, son poco o nada productivas. Además, el precio de la fotovoltaica se está reduciendo cada vez más y las grandes plantas son económicamente rentables, así que podemos usar este número sin miedo. Una posible solución complementaria sería la de instalar paneles en lugares más soleados, como los desiertos del norte de África, e importar la electricidad. Volveremos sobre esta idea en el Capítulo 25. Esto probablemente no sea necesario en España, pero es una idea interesante para el resto de Europa.

Mitos

«Fabricar paneles fotovoltaicos requiere más energía que la que producirán durante su vida útil».

Falso. El periodo de retorno energético, es decir, el tiempo en que un panel fotovoltaico devuelve la energía que se ha utilizado para fabricarlo, está entre 1 y 2 años. En otras palabras, la cantidad de energía producida en toda su vida útil es entre 10 y 20 veces la invertida para construirlo (valor conocido como «tasa de retorno energético»). En el caso de los aerogeneradores, el periodo de retorno energético está en torno a 8 meses y su tasa de retorno energético es aproximadamente 30.

«Los paneles fotovoltaicos serán cada vez más eficientes».

Sin duda que en el futuro serán más baratos y su fabricación requerirá menos energía, mejorando así su tasa de retorno energético. Pero en el 20% de eficiencia ya está relativamente cerca de su límite teórico (ver

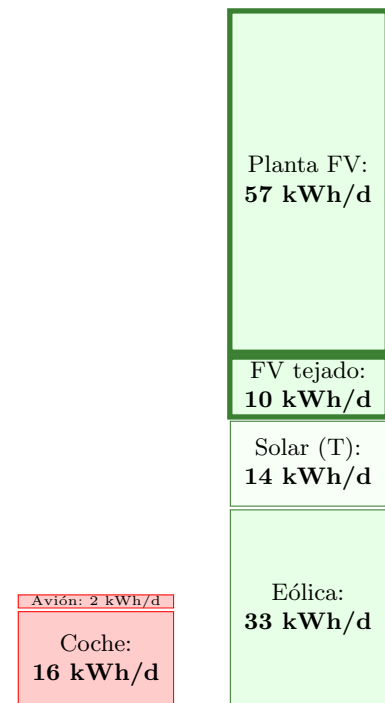


Figura 6.7: Fotovoltaica: 12,5 m² de paneles con una eficiencia del 20% darían 10 kWh por persona y día. Si cubriéramos el 1,5% de la superficie de España con paneles, darían unos 57 kWh por persona al día.

las notas al final del capítulo). Sería sorprendente que la estimación de la potencia generada por un sistema fotovoltaico sobre tejado necesite alguna vez ser revisada al alza. Ver notas al final.

Biomasa solar

Cualquier solución de bioenergía requiere primero hacer crecer algo verde con la energía del sol. ¿Cuánta energía puede recolectar nuestra sustancia verde? Hay cuatro rutas principales para obtener energía a partir de sistemas biológicos solares:

1. Podemos cultivar plantas y quemarlas en una central para producir electricidad o calor. Llamaremos a esto «sustitución del carbón».
2. Podemos cultivar plantas (colza, caña de azúcar o maíz), convertirlas en etanol o biodiésel y alimentar con ellos a coches, trenes, aviones u otras soluciones donde convenga el uso de combustibles líquidos. O podemos cultivar bacterias, cianobacterias o algas modificadas genéticamente para producir directamente hidrógeno, etanol o incluso electricidad. A estas soluciones las llamaremos «sustitución del petróleo».
3. Podemos utilizar residuos de la actividad agrícola y ganadera y quemarlos en centrales eléctricas. Estos residuos pueden ser desde paja (un residuo del pan) hasta excrementos de cerdo (un residuo del jamón). Quemar estos residuos sería también «sustitución del carbón». Una central que quemase estos residuos no daría tanta potencia por cada metro cuadrado de cultivo como una que quemase plantas especialmente diseñadas para su uso energético, pero tendría la ventaja de no monopolizar el terreno. Quemar el gas metano producido en vertederos es una forma similar de obtener energía, pero es solo sostenible mientras mantengamos un suministro constante de basura en nuestros vertederos. (La mayoría de este metano proviene de comida tirada a la basura; en España se desperdician casi 500 gramos de comida al día por persona. De estos 500 gramos, cada persona tira a la basura de su casa alrededor de 100 y el resto se pierde en el procesado y distribución). Incinerar la basura de la comida sería una forma más directa de obtener energía de la biomasa.
4. Podemos cultivar plantas para suministrarlas directamente a humanos y otros animales.

En la primera etapa de cualquiera de estos procesos, la energía está contenida en una molécula, como los carbohidratos de algunas plantas.

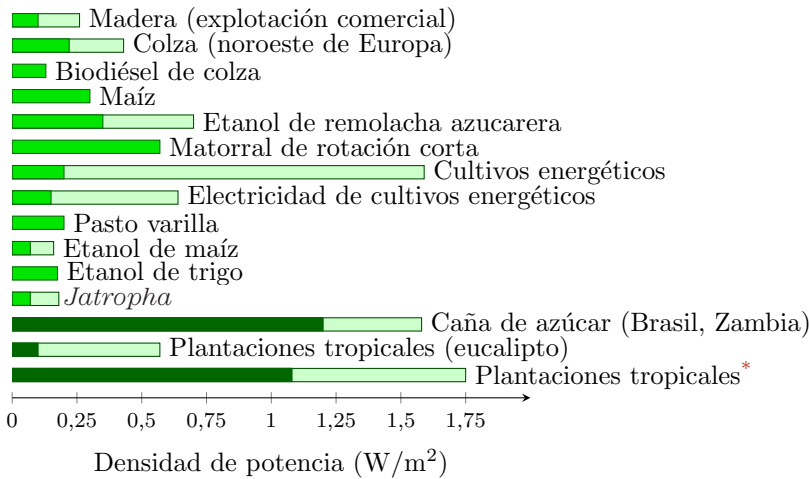


Figura 6.8: Producción de potencia por unidad de área conseguida mediante varias plantas. (Si quieres consultar las fuentes, lee las notas finales). Estas densidades de potencia varían dependiendo del riego y del uso de fertilizantes; por ello, para algunas plantas se proporcionan rangos en lugar de valores, por ejemplo, la madera tiene un rango de 0,095-0,254 W/m². Las tres densidades de potencia de la parte inferior son para cultivos de regiones tropicales. La última densidad de potencia (plantaciones tropicales*) asume modificaciones genéticas, aplicación de fertilizantes y riego. En el texto se considera 1 W/m² como valor global para un buen cultivo energético que pueda crecer en España. Ver Apéndice D para más datos.

Por ello, podemos estimar la energía que se puede obtener por cualquiera de estos medios simplemente analizando esta primera etapa. Cualquier etapa posterior supondrá una pérdida de energía, así que la energía captada en esta primera etapa es la máxima que podríamos obtener con cualquier solución basada en el crecimiento de plantas.

Por lo tanto, estimemos de momento solo la energía en esta primera etapa (en el Apéndice D entraremos en más detalle, estimando la máxima producción de cada proceso). El valor medio de irradiancia solar en España es de 200 W/m². Las plantas más eficientes de Europa son capaces de convertir solamente el 2% de esta energía en carbohidratos (¡10 veces menos que un panel fotovoltaico!), lo cual nos puede llevar a pensar que las plantas pueden dar 4 W/m²; sin embargo, su eficiencia global es generalmente más baja. Por ejemplo, el cereal en España tiene un rendimiento medio de unos 0,25 W/m² (incluyendo el grano y la paja recogida). No obstante, ciertos cultivos específicos para biomasa alcanzan rendimientos de 1 W/m² y en el sur de Europa se han llegado a conseguir hasta 2,5 W/m², aunque en condiciones muy favorables. Supongamos que utilizamos toda la superficie cultivable de España para cultivar plantas energéticas con alto rendimiento, de 1 W/m². Eso son unos 4144 m² por persona dedicados a la bioenergía. De esta forma, la máxima energía que podríamos obtener al día, ignorando cualquier proceso auxiliar como el cultivo, la cosecha y el procesado, es

$$1 \text{ W/m}^2 \times 4144 \text{ m}^2/\text{persona} \times 24 \text{ h/d} \approx 100 \text{ kWh/d por persona. (6.6)}$$

¡No está nada mal! Aunque las suposiciones para el cálculo han sido bastante optimistas. Para empezar, es esperable que el cultivo sea varia-



Figura 6.9: Todas las formas de biomasa suman 35 kWh/d por persona.

do para obtener distintos tipos de biomasa (comida, madera, biogás, biodiésel, bioetanol...), así que será más realista (incluso optimista) utilizar un valor medio de producción de $0,7 \text{ W/m}^2$. Además, si producimos toda esta biomasa ocupando toda la superficie cultivable de España y la utilizamos para generar calor o electricidad..., ¿nos quedamos sin comida! Cabe recordar aquí que España es deficitaria en uno de los principales productos agrícolas, el cereal; aproximadamente, el 43 % del cereal consumido en España es importado debido al gran consumo por parte del sector ganadero. Así que tengamos en mente que parte del recuadro de biomasa incluye la comida de humanos y otros animales; pero también pensemos que ciertas plantas dan a la vez comida y biomasa (como el trigo, que da cereal y paja). Por otro lado, si queremos biocombustibles para nuestros coches o aviones procedentes de plantas, todos los pasos que hay en la cadena desde el campo hasta la bujía nos harán perder bastante energía por el camino: entre un 25 % y un 100 % en el caso del etanol de maíz, según distintos estudios. Es decir, descontando toda la energía necesaria para producir etanol, se pueden producir tan solo $0,16 \text{ W/m}^2$ netos (siendo optimistas) o incluso cantidades negativas. Esto significa que el proceso de cultivo y refinado puede llegar a consumir más energía de la que se obtiene. De toda la biomasa producida, parte requerirá procesos de refinado con muchos pasos y poco eficientes, como el visto en el ejemplo anterior, y otros apenas requieren procesado y su eficiencia energética será mayor (como el uso de ciertas plantas para su combustión). Así que pongamos que la eficiencia global del cultivo y procesado de toda la biomasa producida sea del 50 % (y probablemente estemos siendo optimistas).

En resumen, con un rendimiento medio de unos $0,7 \text{ W/m}^2$ y una eficiencia en el cultivo y procesado del 50 %, no obtendremos más de **35 kWh por persona y día**. ¿Podrá la ingeniería genética crear plantas que conviertan la energía solar en productos químicos de forma más eficiente? Es posible, pero no se espera la creación de plantas con eficiencias muy superiores a 1 W/m^2 en Europa.

Usemos pues los 35 kWh/d por persona en nuestra columna verde, sin olvidar que esta cifra es bastante optimista. De hecho, un estudio del IDAE estima el potencial de biomasa en España en unos 12,5 kWh por persona y día (excluyendo la comida).

La biomasa tiene un gran potencial en España dependiendo de cómo se mire. Teniendo en cuenta que es necesario producir comida (más de la que ya producimos si queremos ser autosuficientes) y que la energía utilizada en el cultivo y procesado de biocombustibles cancelará buena parte de la energía almacenada en las plantas (Figura 6.10), la biomasa local nunca será suficiente para saciar nuestra sed de energía. No obstante,

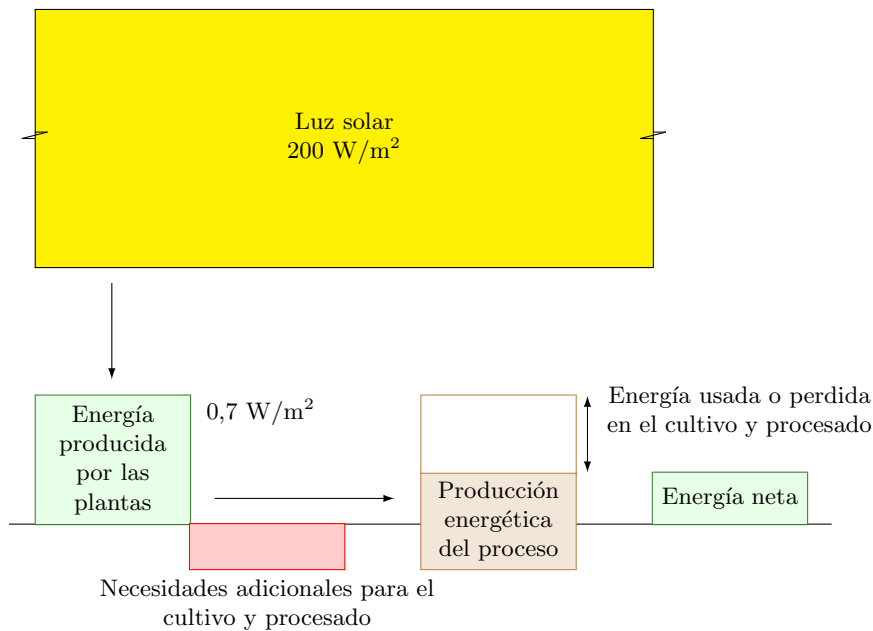


Figura 6.10: Esta figura ilustra las cuestiones cuantitativas que hay que plantearse para analizar cualquier biocombustible. ¿Cuánta energía resulta necesaria para su cultivo y su procesamiento? ¿Cuánta energía proporciona? ¿Cuánta energía neta aporta? Frecuentemente, la energía requerida, las pérdidas y la energía involucrada en los procesos hacen que la energía neta de la biomasa sea muy pequeña.

será parte de la solución y, en muchos casos, la mejor posible. Por ejemplo, en el caso de los biocombustibles, será un prometedor sustituto de los combustibles fósiles ahí donde no exista otra alternativa mejor, como, por ejemplo, en aviación. En el caso de la incineración de residuos, supone una forma, no solo de reducirlos, sino también de revalorizarlos.

Notas y textos de consulta

Página

- 65 *...reduce la intensidad del sol de mediodía hasta un 75% aproximadamente con respecto a su valor en el ecuador.* La latitud de Barcelona es de $\delta = 41,4^\circ$. La radiación de mediodía en el ecuador hay que multiplicarla por $\cos(\delta) \approx 0,75$. No obstante, este valor varía entre $\cos(\delta + 23^\circ) \approx 0,45$ y $\cos(\delta - 23^\circ) \approx 0,95$ según el día del año.
- 65 *...la cantidad de energía solar que llega a España al año por metro cuadrado es el equivalente a unas 1700 horas de sol de mediodía.* Este valor medio varía desde 1000 h en zonas de la costa del mar cantábrico hasta unas 2000 h en el sur de España. Fuente y datos adicionales en la Figura 6.13.
- 65 *...la potencia solar bruta en un tejado orientado al sur en España sea de unos 235 W/m^2 y la potencia media en un terreno plano de unos 200 W/m^2 .* Datos elaborados a partir de las fuentes: «Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT», AEMET [37] y «PVgis» [re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/].

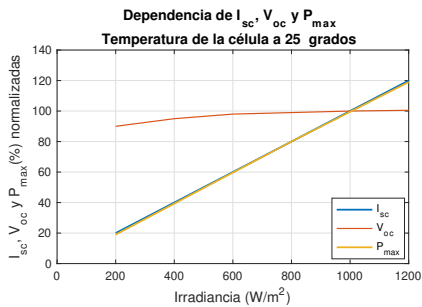


Figura 6.11: En rojo, potencia del panel PV-MLU250HC en porcentaje sobre la potencia especificada por el fabricante (250 W a 1000 W/m^2 y 25°C). Fuente: hoja de características del panel en www.mitsubishielectric-solar.com.

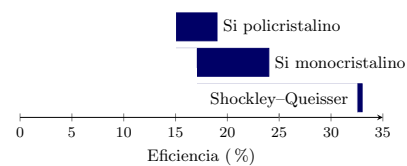


Figura 6.12: Rango de eficiencias de paneles comerciales desde valores típicos hasta el mejor registrado para las dos tecnologías más utilizadas. El límite de Shockley-Queisser es la máxima eficiencia que una célula fotovoltaica de unión simple (las habituales) podría llegar a tener bajo la luz del sol. Fuente de mejores eficiencias: Green (Solar cell efficiency tables [version 48], Progress in photovoltaics).

66 ...*(esto supondría unos 5 m² de paneles por persona)*... El cálculo se ha realizado a partir del número de metros cuadrados de edificio que hay en España por persona (123 m², ver Tabla I.3). Este número lo hemos dividido entre 4, para quedarnos solo con los tejados que dan al sur, pero aumentando esta cantidad en un 17% debido a la inclinación. Por último, dado que los paneles rectangulares no pueden cubrir toda la superficie de tejado perfectamente, teniendo que esquivar antenas y chimeneas (pongamos que como mucho cubrirán un 70% de la superficie), quedan aproximadamente 25 m² de tejado que se pueden cubrir con paneles.

67 ...*la potencia media que suministraría un panel fotovoltaico*... En un día nublado, un panel fotovoltaico genera aproximadamente diez veces menos de lo que genera en un día soleado. Como se observa en la Figura 6.11, la potencia que suministra un panel fotovoltaico es prácticamente proporcional a la potencia que recibe del sol (irradiancia). No obstante, esto se complica un poco si tenemos en cuenta la temperatura. Un panel fotovoltaico es menos eficiente cuanto más caliente está. La potencia que suelen especificar los fabricantes es válida suponiendo que el panel está a 25°C, pero el panel perderá alrededor de un 0,45% de eficiencia por cada grado que suba por encima de esta temperatura (¡en verano pueden llegar a ponerse a 70°C y perder un 20% de eficiencia!). En cualquier caso, lo que hay que entender es que cuanto más sol, más potencia. No hay que confundirse cuando oímos cosas como «un panel es más eficiente en días nublados». Quizás sea cierto, pero, sin duda, dará más potencia en días soleados. No hay que confundir «eficiencia» con «potencia».

67 *Los paneles típicos tienen una eficiencia del 15%; paneles más caros pueden llegar al 20%. Un panel comercial con un 30% de eficiencia sería todo un logro.* La eficiencia de los paneles varía mucho según la tecnología utilizada. Los más típicos en grandes plantas y en hogares son los de silicio policristalino o monocristalino con eficiencias típicas en torno a 16% y 19% respectivamente (Figura 6.12), aunque existen tecnologías con eficiencias de célula mucho mayores, si bien no resultan rentables en estas aplicaciones. Existe una limitación física que hace que la eficiencia máxima de una célula fotovoltaica de unión simple expuesta al sol sea del 33,16% (límite de Shockley-Queisser [38]), pudiendo aumentar como mucho a 44% en condiciones óptimas. Esto es debido a una propiedad de los materiales denominada «banda prohibida» (*bandgap* en inglés) que representa la cantidad de energía del fotón que un material puede convertir. Los fotones llegan del sol con distintas energías (colores). Los que llegan con una energía inferior a la banda prohibida no pueden ser utilizados; los que llegan con más energía, sí; pero todo el exceso de energía no puede ser aprovechado. Para captar la máxima energía posible de estos fotones se inventaron las células multiunión. Básicamente, son distintos materiales apilados, cada uno de ellos con una banda prohibida distinta, de forma que la mayor parte de fotones puedan ser aprovechados al máximo. Con esta técnica se podría alcanzar una eficiencia teórica máxima del 68% utilizando un número infinito de capas. Sin embargo, el mejor panel comercial fabricado, con 5 capas, tiene una eficiencia del 39%. Por último, cabe mencionar que la eficiencia de las células puede mejorarse mediante lentes y espejos, lo cual, además, permite utilizar menor cantidad de célula solar para captar la misma cantidad de luz. En este caso, una célula teórica con infinitas capas podría alcanzar una eficiencia del 86,8%. Aunque la técnica de concentración ha sido utilizada en plantas fotovoltaicas, no es la práctica habitual debido a su alto coste inicial y a su difícil operación y mantenimiento. Actualmente, la práctica habitual en plantas fotovoltaicas es la utilización de paneles de silicio mono o policristalino en estructuras fijas.

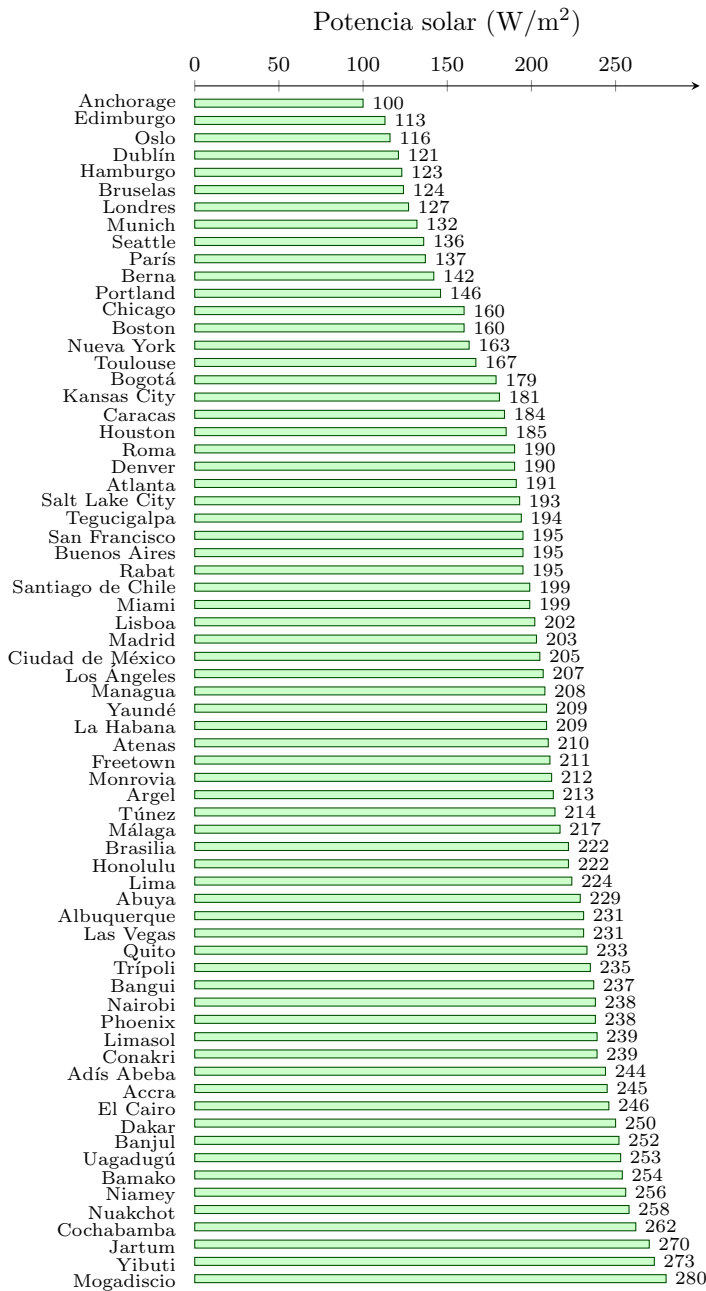


Figura 6.13: Potencia solar media sobre una superficie horizontal en algunas ciudades del mundo. Los datos de Europa, Asia y África son de la base de datos PVGIS, mantenida por la Comisión Europea, mientras que los de América proceden de la base de datos mundial Meteonorm.

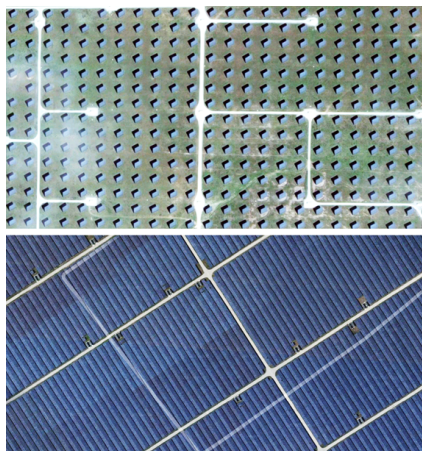


Figura 6.14: Arriba, planta solar de Amareleja, con una producción media de 4,25 W/m². Abajo, planta de Cestas con 15 W/m². La diferencia es en parte debida a la distinta radiación, pero, sobre todo, al uso del suelo. La primera hace un uso óptimo del panel, pero desaprovecha parte del recurso solar que llega al terreno de la planta. Era lo normal cuando los paneles eran tan caros que el objetivo principal era maximizar su producción. La segunda, construida 7 años después, hace un uso óptimo del suelo, pero no del módulo. La primera genera unos 2000 kWh por cada kW de panel. La segunda, si tuviera la misma radiación, generaría unos 1500 kWh por cada kW de panel. La segunda genera casi 4 veces más energía en la misma cantidad de superficie, pero inutiliza el terreno. En la primera, la fauna y flora puede coexistir, pero plantas así ocuparían más superficie para generar lo mismo. Ambas tienen sus ventajas e inconvenientes. Imágenes de Google y Digital Globe obtenidas de Google Maps.

- 68 *En comparación, plantas fotovoltaicas en latitudes similares a la de España tienen una potencia media de entre 4 y 18 W/m². La planta fotovoltaica de Amareleja, Portugal, genera 93 GWh al año en 250 hectáreas (4,25 W/m²). La planta Cestas, cerca de Burdeos, Francia, genera 350 GWh al año en 250 hectáreas (15 W/m²). La diferencia entre estas dos plantas es principalmente debida a la separación entre módulos.*
- 69 *La potencia necesaria para producir estos 57 kWh por persona al día es unas 115 veces la potencia instalada en España en 2018, o 1,5 veces la potencia instalada en el mundo a finales de 2018. En España se generan hoy en día unos 8000 GWh al año con 5,4 GW de fotovoltaica. Para producir 57 kWh al día para cada habitante de España haría falta instalar unos 600 GW (1500 plantas de 400 MW, tamaño habitual entre las grandes plantas recientemente instaladas). A finales de 2015 la potencia instalada mundial era de 227 GW, a finales de 2016 unos 300 GW y a finales de 2017 unos 400 GW. Fuentes: Red Eléctrica de España, «Avance del sistema eléctrico Español 2017» [39]; REN21, «Renewable Energies Global Status Report 2017» [40]; Instituto de Energía Solar, «Gráficos significativos energía solar fotovoltaica» [41].*
- 69 *...cubrir el 1,5% de la superficie de España con paneles podría parecer, en principio, inadecuado... Esta cantidad es similar a la ya utilizada por carreteras o por edificios, así que no parece algo imposible de hacer. Además, en España, la superficie desértica es 3 veces superior a la necesaria para esta instalación fotovoltaica... ¡y la superficie de matorrales es 12 veces mayor! Esto quiere decir que no habría por qué eliminar suelo de cultivos, bosques o pastizales para instalar 600 GW de fotovoltaica e, incluso, la mayor parte de desiertos y matorrales quedarían intactos.*
- 70 *En España se desperdician casi 500 gramos de comida al día por persona. De estos 500 gramos, cada persona tira a la basura de su casa alrededor de 100 y el resto se pierde en el procesado y distribución. Fuentes: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, «Estrategia más alimento menos desperdicio» [42]; Comisión Europea, «Preparatory study on food waste across EU 27» [43].*
- 71 *Por ejemplo, el cereal en España tiene un rendimiento medio de unos 0,25 W/m² (incluyendo el grano y la paja recogida). No obstante, ciertos cultivos específicos para biomasa alcanzan rendimientos de 1 W/m² y en el sur de Europa se han llegado a conseguir hasta 2,5 W/m², aunque en condiciones muy favorables. Se ha tomado una producción anual media de trigo en España de 3500 kg/ha y 1500 kg/ha de paja. Con una energía específica del trigo de 16,7 MJ/kg y de la paja de 13 MJ/kg (4,6 y 3,6 kWh/kg respectivamente) se obtiene un total de 0,25 W/m². No obstante, plantas como el sorgo pueden dar 21 400 kg/ha; con una energía específica de 18 MJ/kg (5 kWh/kg), por lo que el sorgo tiene un rendimiento de 1,23 W/m² [44]. Y el *Miscanthus*, en condiciones favorables, puede llegar a dar 44 000 kg/ha en el sur de Europa, es decir, 2,5 W/m² [45]. Podríamos hacer una lista interminable de cálculos para cada cultivo teniendo en cuenta las características de cada planta y lugar, aunque se puede generalizar y decir que el rendimiento de la materia seca vegetal (es decir, excluyendo el agua) es en España de entre 5000 y 20 000 kg/ha con una energía específica media de entre 4 y 6 kWh/kg. Esto corresponde a unos valores de entre 0,23 y 1,4 W/m². En cuanto a los valores extremos de producción vistos, superiores a 40 000 kg/ha, actualmente no resultan valores representativos, ya que suelen ser datos recogidos al segundo o tercer año de cosecha y en condiciones muy especiales de nutrientes, agua y exposición*

solar. Por la misma razón, en otras zonas del planeta se pueden conseguir rendimientos aún mayores, pero no en España, por lo que no se han considerado. En cuanto al contenido energético, habrá quien esté pensando que el bioetanol o el biodiésel tienen valores mucho más altos que los 6 kWh/kg propuestos (de hecho, tienen 7,5 y 9,8 kWh/kg aproximadamente), pero recordemos que estos productos refinados provienen de plantas, por lo que su rendimiento por hectárea será siempre inferior al de la propia planta. Es más, su procesado necesitará energía, reduciendo aún más su aporte energético neto. Se hablará de este tema en más detalle en Solar II (Apéndice D, pág. 363).

- 71 *Figura 6.8.* Las fuentes para esta figura son: energía neta de la madera, caña de azúcar en Brasil, plantaciones tropicales, colza [46]; colza a biodiésel [47]; jatropha [48] y [49]; pasto varilla [50]; balance neto de maíz a etanol [51]. Lectura adicional: [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57].

Capítulo 7

Calefacción y refrigeración

Este capítulo estudia la cantidad de energía que gastamos en controlar la temperatura de nuestro entorno (en casa o en el trabajo), así como el agua caliente sanitaria (ACS) que usamos, principalmente, para ducharnos. Hagamos un recorrido por estos consumos.

Agua caliente

El mayor consumo de agua caliente en un hogar podría darse al bañarse o ducharse; dependerá de nuestro estilo de vida. Estimemos, en primer lugar, la cantidad de energía gastada si nos bañamos con agua caliente.

El volumen de agua en una bañera es $50\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 150\text{ cm} \approx 190\text{ l}$. Supongamos que el agua llega a nuestra casa a 10°C , y la queremos calentar hasta 50°C . El calor específico del agua, que representa la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 litro de este líquido en 1°C , es de $4200\text{ J}/^\circ\text{C}$. Por tanto, la energía necesaria para elevar la temperatura del agua de una bañera 40°C será:

$$4200 \frac{\text{J}}{1^\circ\text{C}} \times 190\text{ l} \times 40^\circ\text{C} \approx 32\text{ MJ} \approx 9\text{ kWh}. \quad (7.1)$$

Así que darse un baño supone utilizar hasta **9 kWh**. Sin embargo, si decidimos ducharnos utilizaremos unos **1,4 kWh**.

Aire caliente: en casa y en el trabajo

Ahora bien, ¿se gasta más energía calentando agua o calentando el aire de los edificios con radiadores? Una forma de estimar la energía



Figura 7.1: Bloque de pisos. Fotografía de Enrique Arruti.

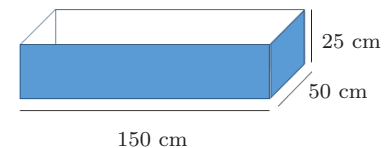


Figura 7.2: El agua en una bañera, unos 190 l.

Agua caliente: **1,4 kWh/d/p**

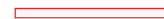


Figura 7.3: El consumo energético para ACS es aproximadamente 1,4 kWh al día por persona.

Aire caliente:
12 kWh/d

Figura 7.4: La energía diaria para calentar aire (incluyendo la calefacción tanto en casa como en el trabajo) es de aproximadamente 12 kWh al día por persona.

empleada para calentar el aire es imaginarnos un edificio calentado por estufas eléctricas, cuya potencia nos es más familiar. La potencia de un radiador eléctrico pequeño es de 1 kW (lo que supondría 24 kWh al día si lo tenemos funcionando las 24 horas). En invierno, en zonas frías de España, cada persona necesitará uno de estos aparatos para mantenerse caliente. En verano, ninguno. Por tanto, podemos estimar que, de media, una persona necesita utilizar 12 kWh al día de aire caliente. Sin embargo, una persona emplea más energía de la que necesita, ya que solemos mantener varias habitaciones de casa calientes al mismo tiempo (por ejemplo, la cocina, el salón, el baño y los dormitorios), además de nuestro lugar de trabajo. Por otro lado, también es verdad que hay una gran parte de la población que vive en zonas templadas (sur y costa mediterránea) donde el uso de la calefacción es muy escaso. Por tanto, podemos mantener la cifra de **12 kWh** al día por persona para el consumo energético promedio en España en aire caliente. El capítulo adjunto a este, el Apéndice E, contiene los cálculos más detallados para conocer a dónde se va el calor en un edificio. El modelo propuesto en esa sección permite predecir los ahorros energéticos asociados al bajar la temperatura del termostato de la calefacción, colocar ventanas con doble cristal, etc.



Figura 7.5: Estufa eléctrica para exteriores con una potencia de 13 kW. Foto de *Jocel*.

Calentar la calle y otros lujos

Existe una creciente tendencia a calentar el ambiente (algo muy habitual en las terrazas de los bares hoy en día) con estufas de exterior, bien sean estufas de gas o estufas eléctricas que calientan por radiación. Este tipo de estufas, como la de la Figura 7.5, tienen una potencia de 13 kW. Si empleas una de estas durante un par de horas todas las tardes, estarás añadiendo **26 kWh** a tu consumo diario.

Un lujo más modesto son las mantas eléctricas, que se emplean, por ejemplo, para calentar la cama. La potencia de una de estas mantas para una cama de matrimonio es de 140 W, utilizarla durante una hora supone un consumo de **0,14 kWh al día**.

Refrigeración en verano: **2 kWh/d**



Figura 7.6: Se ha estimado que la energía diaria consumida por el aire acondicionado en zonas cálidas de España en verano es de 2 kWh al día.

Aire acondicionado

En países, como España, donde la temperatura supera los 30°C en determinadas épocas del año, el aire acondicionado es casi una necesidad (más en el sur del país), y el coste energético de encenderlo puede llegar a ser considerable.

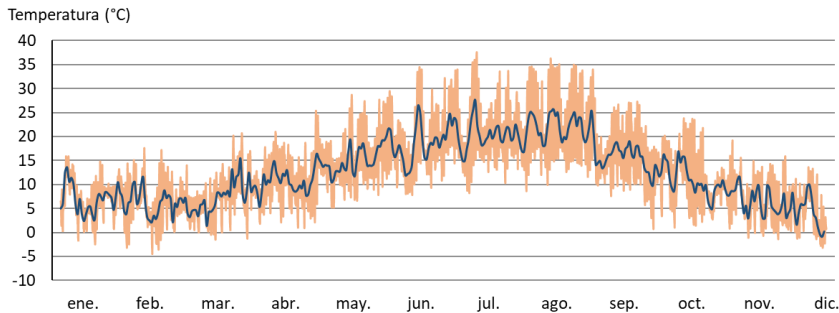


Figura 7.7: Temperatura media (línea azul) y cada 10 minutos (en naranja) en Pamplona durante el año 2016 [58].

Una forma económica de enfriar el aire es utilizar un sistema de aire acondicionado con bomba de calor. Un equipo de este tipo, para una habitación, consume 0,5 kW de potencia eléctrica y (gracias al intercambio de calor) tiene una capacidad de refrigeración de 2,5 kWt. Para estimar cuánta energía consumiría una persona en España, hemos asumido que el equipo de aire acondicionado se encenderá alrededor de 6 horas al día, unos 4 meses al año. Los días que está encendido, el aire acondicionado consume 3 kWh, por lo que la media de consumo a lo largo del año en una vivienda con aire acondicionado es de **1 kWh al día**. Sin embargo, si queremos saber el consumo medio en España, hay que considerar que muchas viviendas no necesitan ni tienen aire acondicionado. Contemos con una necesidad promedio de **0,6 kWh al día**.

Consumo total: ACS, calefacción y refrigeración

Nuestra estimación de la cantidad total de potencia que una persona podría utilizar en calefacción y refrigeración, tanto de la casa como del trabajo, así como el ACS, es de **14 kWh al día por persona** (1,4 para calentar agua, 12 para calentar aire y 0,6 para enfriar).

Ya que esta parte de refrigeración y calefacción representa una fracción importante de nuestra pila de consumos, como puede verse en la Figura 7.8, comprobemos nuestras estimaciones con otras fuentes. A nivel nacional, el consumo energético medio de un hogar en ACS, calefacción y aire acondicionado fue de unos 7000 kWh en el año 2010. Teniendo en cuenta que de media viven unas 2,3 personas en cada casa, la potencia media es de aproximadamente 8 kWh al día por persona. Además, en el sector servicios en ese mismo año fue de 7 kWh al día por persona, de los cuales podemos estimar que dos tercios serían de ACS, calefacción y aire acondicionado. Para estimar el consumo de la

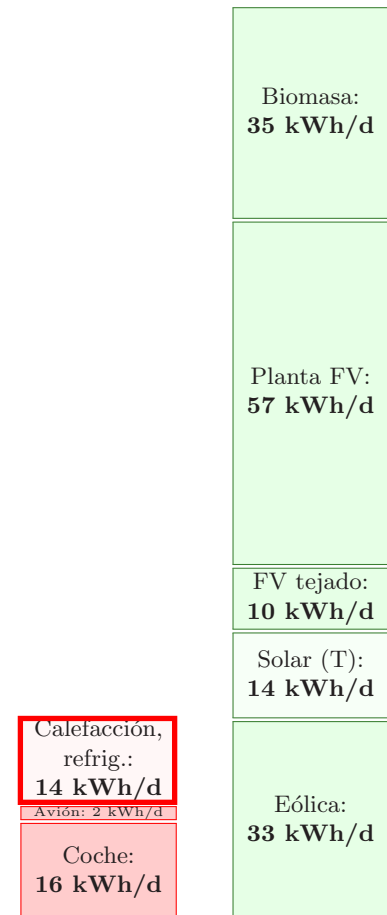


Figura 7.8: El consumo diario correspondiente a ACS, calefacción y refrigeración es de aproximadamente 14 kWh al día por persona.

calefacción del lugar de trabajo, tomemos la mitad de lo consumido en la Universidad Pública de Navarra (ya que está en una zona fría), esto es, 4 kWh al día por persona.

Sumando estas tres cantidades, podemos dar otro valor para el gasto nacional en calefacción y refrigeración, que es: $7 + 4,5 + 4 = 15,5$ kWh al día por persona. ¡Bien!, esta segunda estimación se acerca bastante a nuestra primera cifra de 14 kWh al día.

Notas y textos de consulta

Página

- 81 *A nivel nacional, el consumo energético medio de un hogar en ACS, calefacción y aire acondicionado fue de unos 7000 kWh en el año 2010. [...] Además, en el sector servicios en ese mismo año fue de 7 kWh al día por persona.* Estos datos han sido extraídos de un informe del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) [59].
- 82 *...la mitad de lo consumido en la Universidad Pública de Navarra (ya que está en una zona fría), esto es, 4 kWh al día por persona.* Para llegar a esta estimación se ha sumado la parte correspondiente al consumo de gas natural empleado para calefacción en el año 2008 [60] y el derivado del consumo eléctrico [61].

Capítulo 8

Hidroelectricidad

Para obtener potencia hidroeléctrica se necesita cierta altura y, por supuesto, lluvia. En este capítulo vamos a estimar la potencia media de toda la lluvia que acaba desembocando en el mar. Para realizar esta estimación dividiremos España en dos mitades, separando las zonas norte y sur, debido a la diferencia de precipitaciones existente entre ambas zonas.

Realicemos primero la predicción para la zona sur. Para analizar el potencial disponible en el agua de lluvia, multiplicamos las precipitaciones medias en esta zona (437 mm al año) por la densidad del agua (1000 kg/m^3), la aceleración de la gravedad (10 m/s^2) y la altitud media de la zona sur (aproximadamente 550 m). Con estos datos, la potencia por unidad de superficie que se obtiene es de $0,07 \text{ W/m}^2$. Esta es la potencia disponible por metro cuadrado de tierra en el que cae la lluvia.

Si multiplicamos este valor por la superficie por persona (5400 m^2 , si repartimos toda la superficie de la zona sur entre los 46 millones de españoles), se obtiene una potencia media disponible de aproximadamente 9,9 kWh por día y persona. Este valor es el límite superior para la obtención de potencia hidroeléctrica en la zona sur de España si se construyeran presas en todos los ríos y cada gota de lluvia fuera aprovechada. Siendo realistas, solo se embalsan aquellos ríos con saltos de altura suficientemente grandes, teniendo áreas de captación mucho más pequeñas que el país entero. Gran parte del agua se evapora antes de llegar a una turbina, y los sistemas hidroeléctricos no aprovechan el 100% de la energía potencial del agua. Se podrían construir sistemas hidroeléctricos en el curso del río u otro tipo de sistemas de pequeña escala, pero incluso aprovechando todo el agua disponible no se podrían superar los 9,9 kWh por día y persona en la zona sur del país.

Vamos ahora a realizar las mismas estimaciones para la mitad norte. La precipitación media en esta zona es de 590 mm al año, un 35% mayor que en la mitad sur. Además, la altitud media de la zona es de 645 m, por lo que los saltos de agua que podemos obtener son también mayores.

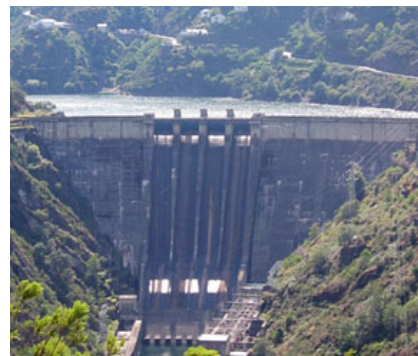


Figura 8.1: Grandas de Salime, central hidroeléctrica de 128 MW en el río Navia (Asturias).

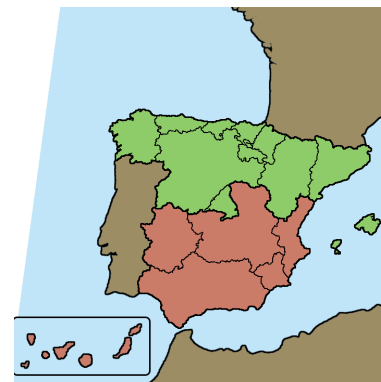
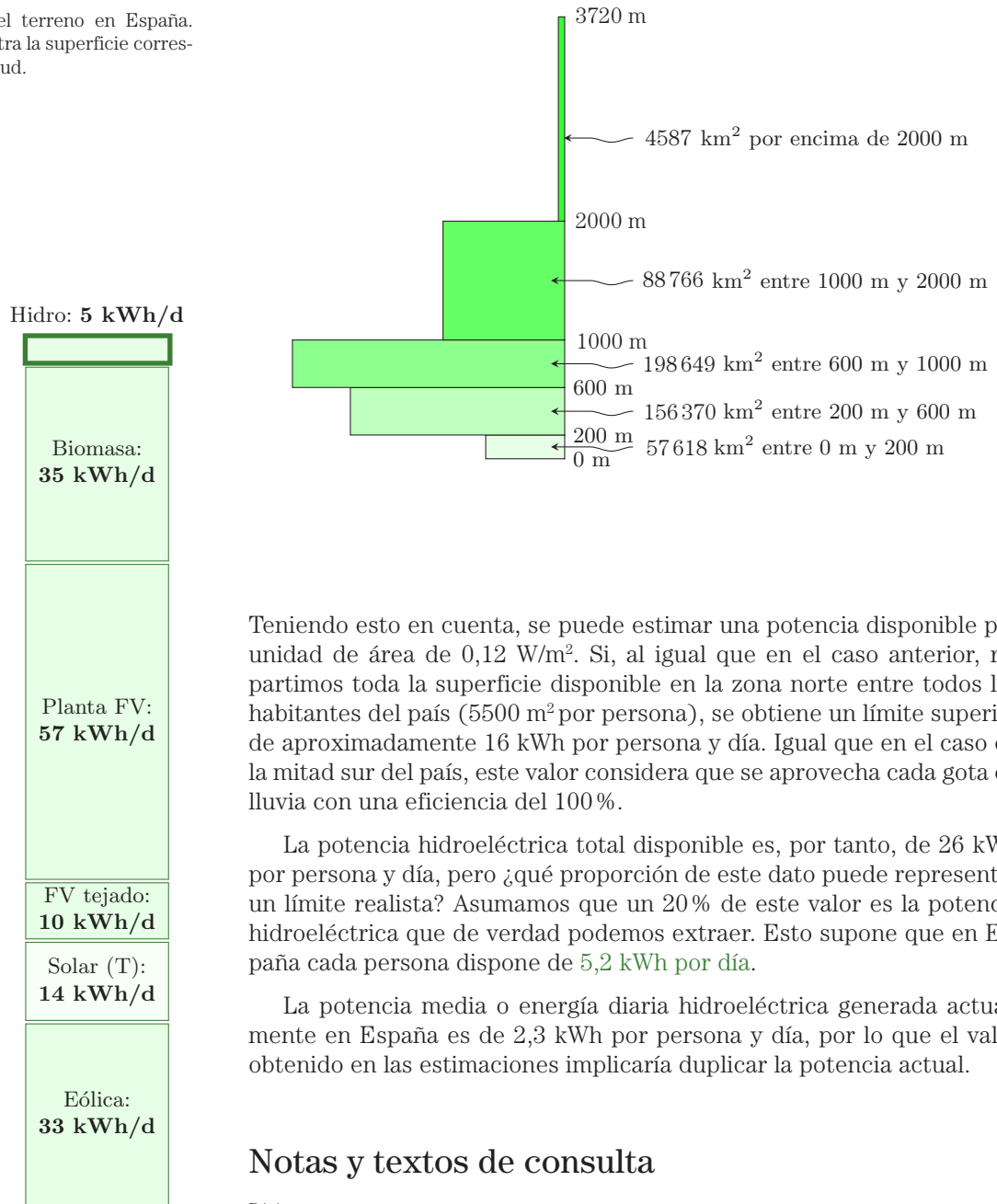


Figura 8.2: Zonas norte y sur de España clasificadas en función de las precipitaciones medias de cada comunidad autónoma.

Figura 8.3: Altitud del terreno en España. Cada rectángulo muestra la superficie correspondiente a dicha altitud.



Teniendo esto en cuenta, se puede estimar una potencia disponible por unidad de área de $0,12 \text{ W/m}^2$. Si, al igual que en el caso anterior, repartimos toda la superficie disponible en la zona norte entre todos los habitantes del país (5500 m^2 por persona), se obtiene un límite superior de aproximadamente 16 kWh por persona y día. Igual que en el caso de la mitad sur del país, este valor considera que se aprovecha cada gota de lluvia con una eficiencia del 100 %.

La potencia hidroeléctrica total disponible es, por tanto, de 26 kWh por persona y día, pero ¿qué proporción de este dato puede representar un límite realista? Asumamos que un 20 % de este valor es la potencia hidroeléctrica que de verdad podemos extraer. Esto supone que en España cada persona dispone de **$5,2 \text{ kWh}$ por día**.

La potencia media o energía diaria hidroeléctrica generada actualmente en España es de $2,3 \text{ kWh}$ por persona y día, por lo que el valor obtenido en las estimaciones implicaría duplicar la potencia actual.

Notas y textos de consulta

Página

83 *Los datos de precipitaciones anuales* han sido obtenidos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Los datos relativos a superficies y altitudes se han obtenido a partir de los datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Figura 8.4: La máxima producción que podríamos obtener aprovechando los recursos hídricos es 5 kWh/p/d .

- 84 *Teniendo esto en cuenta, se puede estimar una potencia disponible por unidad de área de $0,12 \text{ W/m}^2$.* Para comprobar las estimaciones realizadas, se pueden comparar las mismas con los datos de la central hidroeléctrica de Villarino, en Almendra (Salamanca). La cuenca vertiente de dicha central es de 7100 km^2 y las precipitaciones anuales en la localidad ascienden a 825 mm . Sabiendo que la central tiene un salto de 410 m , se obtiene un valor de potencia disponible de $0,11 \text{ W/m}^2$. Se puede también comprobar si la estimación del 20% se acerca a la realidad. La central de Villarino produce 1376 GWh anuales, lo que, teniendo en cuenta la superficie de su cuenca vertiente, nos da una potencia media producida de $0,02 \text{ W/m}^2$. Este valor supone aproximadamente el 20% de la potencia teórica disponible. La superficie del embalse de la Almendra, que alimenta esta central, es de $86,5 \text{ km}^2$, por lo que la central hidroeléctrica en sí produce una potencia media por unidad de área de $1,8 \text{ W/m}^2$.
- 84 *La potencia media o energía diaria hidroeléctrica generada actualmente en España es de $2,3 \text{ kWh}$ por persona y día.* En 2016, las centrales hidráulicas de toda España produjeron 39053 GWh , según el informe anual de Red Eléctrica, con un total de 20354 MW instalados. Estos datos convierten a la energía hidráulica en la tercera fuente de energía del país (por detrás de la nuclear y la eólica) en términos de producción anual. En cuanto a capacidad instalada, los 20354 MW instalados la convierten en la tercera fuente por detrás del ciclo combinado (26670 MW) y la eólica (23020 MW) [62].

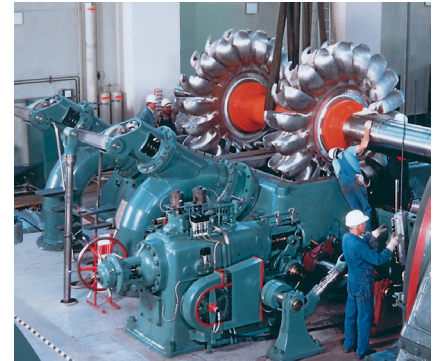


Figura 8.5: Montaje de turbinas hidráulicas.

Capítulo 9

Luz

Iluminación en casa y en el trabajo

En una vivienda normal las bombillas más potentes son de, aproximadamente, 200 W, mientras que las lámparas que tenemos en la mesilla de noche son de 40 W. En el caso de las viejas bombillas incandescentes, la mayoría de esta potencia se convierte en calor en vez de en luz. Utilizando luces fluorescentes podemos lograr la misma iluminación reduciendo el consumo a una cuarta parte y, en el caso de utilizar bombillas de led, se puede lograr un consumo siete veces menor que con la bombilla tradicional.

¿Cuánto consume una persona media para iluminar su casa? En un hogar español hay una media de 22 bombillas, de las que 8 son incandescentes, 13 de bajo consumo y 1 fluorescente. El consumo eléctrico medio por hogar destinado a iluminación es de 410 kWh/año. Este consumo, aplicado a un hogar típico de 2 personas, proporciona un consumo de 0,6 kWh por persona y día. Si suponemos que cada persona, además, trabaja en un lugar en el que todos comparten equitativamente la iluminación, podemos estimar que el consumo en el lugar de trabajo es de 1 kWh/día por persona, lo cual hace un consumo total de 1,6 kWh/día por persona.

Alumbrado público y luces de tráfico

¿Nos hemos planteado alguna vez cuánto consume el alumbrado público? Según datos del IDAE, en España existen un total de 8044680 puntos de luz que consumen 5247 GWh/año. Esto supone un consumo por persona y día de 0,3 kWh, que, sumado al cálculo realizado para el consumo residencial y del trabajo, nos da un valor aproximado de **2 kWh/día por persona**.

Tengamos también en cuenta las luces de tráfico. En España hay colocados aproximadamente 300 000 semáforos, de los cuales podemos

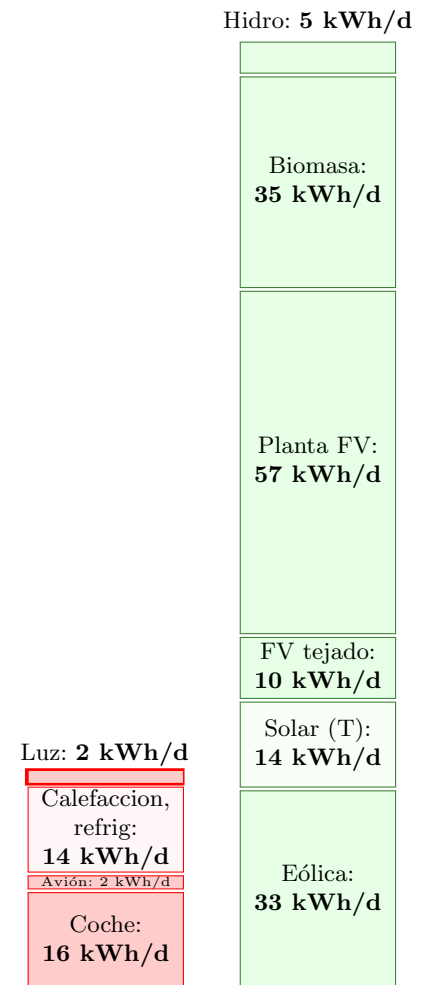


Figura 9.1: Consumo en iluminación: 2 kWh por día y persona.

suponer que dos terceras partes son de óptica led. Un semáforo de óptica tradicional consume aproximadamente 1230 kWh/año, mientras que uno de led tiene un consumo de 270 kWh/año. El consumo total es, por tanto, de 177 GWh/año que, repartidos entre todas las personas, nos da un consumo de 0,01 kWh/día por persona, que resulta despreciable frente al valor obtenido anteriormente.

Luces del coche

Conducir con las luces encendidas supone un consumo extra de energía. Pero ¿cuánto supone ese incremento en el consumo? Supongamos que un coche con las luces encendidas consume 100 W de potencia eléctrica. Esas bombillas se alimentan a través de un alternador cuya eficiencia es del 60 %, que, a su vez, es alimentado por un motor de combustión que tiene una eficiencia cercana al 30 %, por lo que el consumo final de esas bombillas se dispara hasta los 555 W. En España hay aproximadamente 22 millones de coches, que se utilizan durante 200 horas al año. Si asumimos que una cuarta parte de ese tiempo se circula con las luces encendidas, obtenemos un consumo de 0,03 kWh/día por persona.

A modo comparativo, un coche con motor de combustión cuyo consumo sea de 6 litros/100 km tiene un consumo equivalente de 58 kWh/100 km que, circulando a una velocidad media de 47,8 km/h, nos da una potencia media de 27,5 kW. Por tanto, el hecho de tener las luces encendidas supone un incremento en el consumo del 2 %. Para el caso de un coche eléctrico, cuyo consumo medio es de 15 kWh/100 km, la potencia media es de 7 kW. Añadir 100 W de consumo supone igualmente un incremento del 2 %.

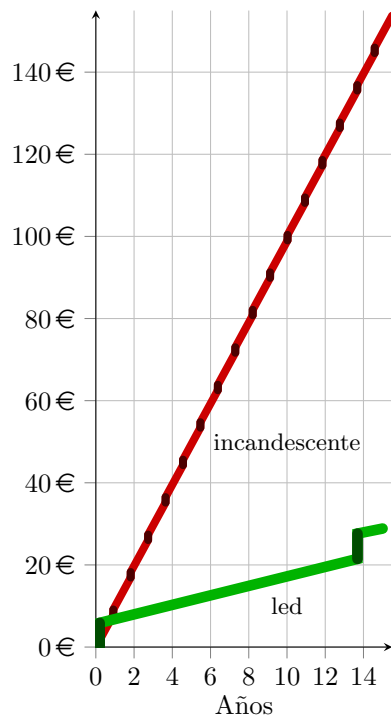


Figura 9.2: Coste total de utilizar una bombilla incandescente de 60 W durante 3 horas diarias, comparado con reemplazarla ahora por una bombilla de led Philips de 8 W. Suposiciones: el precio medio de la electricidad es de 17 céntimos por kWh; cada bombilla incandescente cuesta 1€; cada bombilla de led cuesta 6€.

El precio de las bombillas led

A lo largo del libro se intenta no entrar a valorar aspectos económicos, pero en el caso de las bombillas haremos una excepción. Una bombilla led estándar de Philips de 8 W dice iluminar tanto como una incandescente de 60 W. Además, su duración es de 15 000 horas (o, lo que es lo mismo, 13 años funcionando 3 horas diarias) y se puede comprar por algo menos de 6€. Por contra, una bombilla incandescente de poco más de 1€ dura aproximadamente 1000 horas. En un periodo de 13 años podemos elegir, por tanto, gastar nuestro dinero en comprar 16 bombillas incandescentes y consumir 854 kWh de electricidad (lo que supondría unos 140 €) o comprar una única bombilla led y consumir 114 kWh, gastándonos aproximadamente 20 €.

¿Debería esperar hasta que se funda la bombilla incandescente para cambiarla?

Cambiarla antes de tiempo parece un gasto innecesario, ¿no? Ya que he pagado por ella, ¿por qué no utilizarla hasta que se funda? Pero, viendo la comparativa de la Figura 9.2, la respuesta es clara: *seguir utilizando una bombilla incandescente es malgastar el dinero*. Si encuentras una bombilla led que cumpla los requisitos y tenga un buen precio, cambia la bombilla vieja lo antes posible.

¿Y qué ocurre con las lámparas fluorescentes?

Durante muchos años, la utilización de lámparas fluorescentes ha sido la alternativa a las bombillas incandescentes. Su bajo consumo (similar al de algunas lámparas led), la mejora en su circuitería auxiliar (sustitución de balastos inductivos y cebadores por circuitos electrónicos más eficientes) y su precio reducido las convertían en una opción atractiva, que incluso se resistía a la llegada del led. Sin embargo, las continuas mejoras en las bombillas led en los últimos años han hecho que estos fluorescentes también comiencen a ser desplazados. Pero ¿por qué? ¿No eran los fluorescentes baratos y eficientes? Comparemos la bombilla led analizada antes con una compacta fluorescente equivalente, la Philips Tornado de 12 W, que ofrece 745 lúmenes. Esta bombilla tiene un ratio de 62 lm/W, mientras que la bombilla led nos daba 805 lúmenes (un ratio de 100 lm/W). Si comparamos el precio de ambas, la bombilla led es un 20% más cara que la fluorescente (6€ es el precio de la bombilla led frente a los 5€ que cuesta la bombilla fluorescente), pero su vida útil es un 50% mayor (15 000 horas para la bombilla led frente a las 10 000 de la fluorescente compacta). Esto no solo es una reducción de coste en cuanto al propio precio de la lámpara, sino que es especialmente ventajoso en espacios donde se requiere de personal especializado cada vez que hay que cambiar una lámpara, como en las luminarias de garajes o alumbrado público. Además, la lámpara led es más beneficiosa para el medio ambiente al no contener mercurio ni otros metales pesados.

Mitos

«No tiene sentido cambiar mis bombillas por unas de bajo consumo. La energía “perdida” se convierte en calor que sirve para calentar mi casa, así que en realidad no se pierde».

Este mito será abordado en el Capítulo 11.

Tabla 9.1: Eficiencias de las bombillas disponibles comercialmente.

Tipo de bombilla	Eficiencia lum/W
Incandescente	10-15
Halógena	15-25
Fluorescente	50-95
Led	30-150
Sodio	80-200



Figura 9.3: Philips Tornado fluorescente de 12 W (izquierda) y la bombilla de led equivalente de 8 W (derecha). Foto de Philips.

Notas y textos de consulta

Página

- 87 *El consumo eléctrico medio por hogar destinado a iluminación es de 410 kWh/año.* En 2011 el IDAE publicó el informe del proyecto SECH-SPAHOU-SEC, en el que se analizaba el consumo energético del sector residencial en España [59].
- 87 *En España hay colocados aproximadamente 300 000 semáforos, de los cuales podemos suponer que dos terceras partes son de óptica led.* Entre 2008 y 2011 se sustituyeron aproximadamente 100 000 semáforos por otros de óptica led, dentro del Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España promovido por el IDAE [63]. Dicho plan de acción contemplaba un segundo programa de ayudas para continuar con su sustitución, pero fue cancelado en 2012 [64]. A pesar de eso, prácticamente toda reposición de semáforos en España ha ido evolucionando de forma natural a la tecnología led, por lo que es probable que los que queden de óptica tradicional sean testimoniales. Aun así se ha decidido realizar un cálculo conservador y estimar que un tercio de los semáforos siguen siendo de óptica tradicional.
- 88 *...un alternador cuya eficiencia es del 60%.* Mientras que los generadores utilizados para la producción de electricidad tienen rendimientos en torno al 95%, los alternadores utilizados en automoción ofrecen rendimientos mucho peores. Esto ocurre porque sus características constructivas son diferentes, ya que en el caso de los alternadores de coche el rendimiento pasa a un segundo plano frente a su precio y su robustez para trabajar en ambientes mucho más duros que en el caso de un generador (altas temperaturas, movimiento, vibraciones, polvo, etc.). No obstante, ya existen alternadores en el mercado con rendimientos cercanos al 80%. [www.emp-corp.com/products/advanced/Power450/].

Capítulo 10

Viento marino

Mire vuestra merced, respondió Sancho, que aquellos que allí se parecen no son gigantes, sino molinos de viento, y lo que en ellos parecen brazos son las aspas, que volteadas del viento hacen andar la piedra del molino.

Bien parece, respondió Don Quijote, que no estás cursado en esto de las aventuras; ellos son gigantes, y si tienes miedo quítate de ahí, y ponte en oración en el espacio que yo voy a entrar con ellos en fiera y desigual batalla.

Diálogo entre Don Quijote de la Mancha y su escudero Sancho Panza (Miguel de Cervantes, *El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha*).

En el mar, el viento es más fuerte y estable que en tierra. De esta forma, el viento marino proporciona mayor potencia por unidad de área que el viento terrestre. Supongamos que una potencia por unidad de área de 2 W/m^2 (50 % superior a nuestra estimación de $1,3 \text{ W/m}^2$ para la eólica terrestre) es una buena aproximación para los parques eólicos marinos en España.

Para poder calcular el potencial de generación, necesitamos conocer el área que podríamos cubrir con turbinas eólicas. Normalmente, se distingue entre eólica marina de baja profundidad (cuando la profundidad del mar es menor de 30 metros), de profundidad media (hasta 60 m) y de gran profundidad (más de 60 metros). La eólica marina de baja profundidad, frente a la creencia generalizada, comienza a ser rentable a día de hoy. De hecho, en 2017, dos empresas se comprometieron a la construcción de un parque eólico marino en el mar del Norte renunciando a las ayudas estatales; el primero que se construye en estas condiciones en el mundo, batiendo todas las previsiones realizadas sobre la reducción de costes de esta tecnología. En cambio, la eólica marina de gran profundidad requiere estructuras flotantes para su instalación y todavía tiene un largo camino que recorrer para abaratar sus costes.

A lo largo del capítulo a la eólica marina se le llamará también eólica offshore.



Figura 10.1: En la figura superior se muestra el montaje de un aerogenerador marino en el parque eólico de Greater Gabbard, Inglaterra. En la imagen inferior, el de Sheringham Shoal de 317 MW, Inglaterra. Foto de CHPV.



Figura 10.2: Estructuras empleadas para anclar los aerogeneradores al fondo marino.

Eólica marina de baja profundidad

Por simplificar la clasificación realizada anteriormente, se van a agrupar las categorías de media y baja profundidad, ya que en aguas de profundidad inferior a 60 metros la tendencia general es la de anclar los aerogeneradores al fondo del mar mediante estructuras rígidas.

Si consideramos como útil la zona de mar hasta una distancia máxima de la costa española de 200 km, resulta que solo un 4,4% de estas aguas tiene una profundidad inferior a los 60 m (en verde en la Figura 10.3). Esto es aproximadamente 23 000 km², similar a la superficie de la Comunidad Valenciana.

Para calcular la potencia media disponible en estas aguas poco profundas hay que multiplicar la potencia por unidad de área (2 W/m^2) por la superficie de costa disponible (23 000 km²), obteniendo un valor de 46 GW, o 24 kWh por día y persona. Sin embargo, una gran parte de estas zonas no son aprovechables. La necesidad de corredores comerciales y zonas de pesca, así como el impacto negativo en el turismo que tendría situar estos aerogeneradores cerca de la costa (donde se encuentran las aguas poco profundas), nos hace reducir la superficie máxima a ocupar a una décima parte. De este modo, la máxima potencia que se podría obtener de la eólica marina de aguas poco profundas sería de **2,4 kWh por persona y día**.

Para generar 2,4 kWh por persona y día, habría que instalar 1315 turbinas de 10 MW cada una a lo largo de la costa.

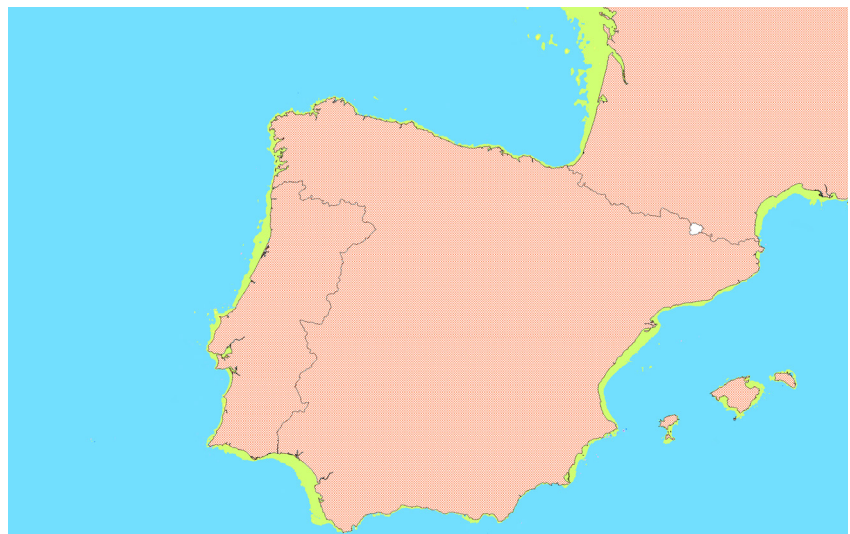


Figura 10.3: Aguas de la península ibérica e islas Baleares con una profundidad inferior a 60 metros, en verde, y mayor de 60 m, en azul [65].

Para ilustrar la complejidad que entraña la instalación de aerogeneradores en el mar, debido a los efectos corrosivos del agua marina, pondremos el ejemplo de Horns Rev, un parque eólico marino danés. Las 80 turbinas instaladas en este parque tuvieron que ser desmanteladas y reparadas tras 18 meses de exposición al ambiente salino. En otro parque inglés, Kentish Flats, tuvieron problemas similares en las multiplicadoras (engranajes del aerogenerador), teniendo que remplazar un tercio de las mismas en los 18 primeros meses. Afortunadamente, estos problemas ya se han superado y, a día de hoy, son cosa del pasado gracias a las mejoras en los materiales empleados.

Eólica marina de gran profundidad

Dentro de la zona considerada útil (hasta 200 km de la costa) la superficie con profundidades superiores a 60 m es de 490 000 km², una superficie comparable al tamaño de España (506 000 km²). Asumiendo, de nuevo, una potencia por unidad de área de 2 W/m², la eólica offshore podría proporcionar una potencia media de 980 GW o, lo que es lo mismo, 511 kWh por persona y día si se llenase toda esta superficie con aerogeneradores. Debemos dejar corredores para el comercio, así como zonas de pesca. Tomemos un 5% de esta superficie, por hacernos una idea, una superficie inferior a la de Galicia.

El resultado: si un área algo inferior a la superficie de Galicia se cubriese de aerogeneradores en aguas con profundidades superiores a los 60 m, podríamos generar **26 kWh por persona y día**.

En este caso, sería necesaria la instalación de 14000 turbinas de 10 MW. Añadiremos esta cantidad de energía generada a la pila verde, Figura 10.4, sabiendo, que a día de hoy, el coste de la eólica flotante es muy superior al de la eólica de baja profundidad.

Algunas comparaciones y costes

¿Cómo va nuestra carrera entre producción y consumo? Añadiendo la eólica marina a nuestra pila de generación, la pila verde mantiene su liderazgo de manera holgada.

Algo que queremos destacar de esta carrera es el siguiente contraste: lo *fácil* que es añadir consumos importantes y lo *difícil* que es incrementar la producción. Conforme lees este párrafo, puede que empieces a sentir algo de frío, si es invierno, o puede que algo de calor, si es



Figura 10.4: Conclusión del Capítulo 10: la máxima generación de la eólica marina en España es 2,4 kWh al día por persona en aguas de baja profundidad y de 26 kWh al día por persona en aguas de gran profundidad.



Figura 10.5: Vista aérea de la planta Norih Hoyle. Foto de Wikipedia Commons (*Parrot of Doom*).

verano, y subas el termostato de casa o bajas la temperatura del aire acondicionado. Es así de simple añadir un consumo extra de 10 kWh por persona y día. Sin embargo, si queremos generar 10 kWh por día y persona con energías renovables, tendríamos que instalar unos 10 paneles fotovoltaicos de 250 W cada uno en nuestro tejado.

Para generar 28,4 kWh por persona y día con aerogeneradores en el mar, necesitaríamos unas 14 millones de toneladas de acero y hormigón, algo más de un cuarto de tonelada por persona si lo repartimos entre todos los españoles. La producción mundial de acero es de 1200 millones de toneladas anuales, lo que equivale a 0,2 toneladas por persona. Durante la Segunda Guerra Mundial, los astilleros americanos construyeron 2751 *Liberty ships* (barcos de la libertad). Cada uno de estos barcos contenía 7000 toneladas de acero, esto es un total de 19 millones de toneladas de acero, o 0,1 toneladas por americano. De esta forma, la utilización de 14 millones de toneladas en aerogeneradores no estaría fuera de escala en cuanto a factibilidad, pero, sin duda, no se trata de una tarea fácil y requeriría varios años. Construir tantas turbinas eólicas es tan complicado como construir los *Liberty ships*.

De acuerdo con el Plan de Energías Renovables 2011-2020 para España, se preveía la instalación de 750 MW de eólica offshore para el año 2020. Estos aerogeneradores producirían 1900 GWh al año, o lo que es lo mismo 0,11 kWh por persona y día. Viendo la potencia instalada en el año 2017 (solo un aerogenerador experimental), se puede afirmar, sin riesgo a equivocarnos, que este objetivo no se va a cumplir. De hecho, no parece que exista voluntad desde las instituciones para alcanzarlo. Por este motivo, continuar analizando la cantidad de acero y hormigón que sería necesaria para la construcción de estos molinos de viento no tiene especial interés. Mientras tanto, en el mar del Norte, el parque eólico marino flotante más grande del mundo, formado por 6 turbinas eólicas de 5 MW, será construido en un proyecto en el que participará la empresa germano-española Siemens-Gamesa. Buenas noticias para una tecnología que puede ayudar a marcar la diferencia en nuestro territorio debido a la escasez de zonas con profundidades inferiores a los 60 metros.

Coste para los pájaros

¿Matan los aerogeneradores un número enorme de pájaros? Los parques eólicos reciben en ocasiones mala propaganda por matar a especies protegidas. Compartimos totalmente las preocupaciones de organizaciones como BirdLife International por el bienestar de las especies

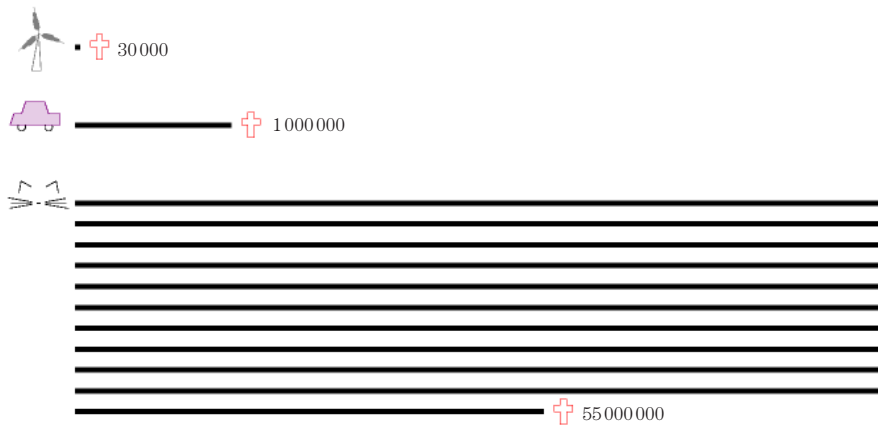


Figura 10.6: Muertes anuales de pájaros en Dinamarca por las turbinas eólicas y los coches, y muertes anuales de pájaros en Inglaterra causadas por los gatos domésticos. Datos tomados del libro del Ecologista Escéptico [66]. Por colisiones con ventanas mueren un número similar al que matan los gatos.

protegidas. Pero pensamos, como siempre, que es importante hacer las cuentas. Para ello, nos basaremos en un estudio realizado en Dinamarca, en el que se estimaba que los aerogeneradores mataban 30 000 pájaros al año (de hecho, la mayoría de estudios estima entre 3 y 20 muertes de pájaros por cada MW y año; en España correspondería a entre 100 000 y 500 000 muertes al año aproximadamente). ¡Terrible! ¡Prohibamos los aerogeneradores! También se calculó que el tráfico mata a un millón de pájaros al año en Dinamarca. ¡Horrible, 30 veces más! Y, sin embargo, nadie se plantea prohibirlo. En Inglaterra, 55 millones de pájaros mueren cada año a manos de los gatos domésticos; los datos están puestos en perspectiva en la Figura 10.6. Bien es cierto que el tipo de pájaros que mata un gato (pequeñas aves, algunas enfermas o débiles, según algún defensor de los gatos) no es el mismo que las grandes aves, como buitres o águilas, que suelen caer bajo las aspas de los aerogeneradores y cuya especie puede estar en peligro. Sin duda, es necesario cuestionar la correcta localización de los aerogeneradores, monitorizar las muertes de aves que producen y tomar medidas para minimizar estos impactos. Pero, de hecho, todo esto ya se hace y se ha llegado a prohibir la instalación de parques en zonas de paso de aves migratorias o en hábitats de aves en peligro. Por otro lado, existen ya aerogeneradores que detectan aves y las ahuyentan e, incluso, se detienen cuando las ven aproximarse.

Basándonos únicamente en las emociones, nos gustaría vivir en un país sin coches, sin aerogeneradores y con muchos gatos y pájaros. Pero lo que realmente queremos es que las decisiones sobre los coches y los aerogeneradores se tomen de forma racional y cuidadosa y no basándonos solamente en las emociones. Seguramente necesitemos los aerogeneradores, como también necesitamos los coches.

Notas y textos de consulta

Página

- 91 *Supongamos que una potencia por unidad de área de 2 W/m^2 (50 % superior a nuestra estimación de $1,3 \text{ W/m}^2$ para la eólica terrestre) es una buena aproximación para los parques eólicos marinos en España.* De acuerdo con el Atlas Eólico de España [67], el 56 % de las zonas aptas para la eólica marina en la costa española (aquellas sin restricciones medioambientales) presentan una velocidad media de viento superior a los 6,5 m/s a 80 metros de altura. Con esta velocidad media de viento y, tras realizar las cuentas explicadas en el Apéndice B, se obtiene una potencia media por unidad de área de $2,8 \text{ W/m}^2$.

Tabla 10.1: Proyectos de parques eólicos marinos en construcción y ayudas estatales recibidas.

Proyecto	Potencia (MW)	Ayuda (€/MWh)	Fecha subasta	Fecha de finalización
Horns Rev 3	400	103	2015	2018
Borssele I+II	700	72,7	2016	2021
Vesterhav N & S	350	63,8	2016	2020
Kriegers Flak	600	49,9	2016	2020
Borssele III+IV	700	54,5	2017	2020
Borkum Riffgrund II	240	60	2017	2024-2025
He Dreiht	900	0	2017	2024-2025
Gode Wind III	110	0	2017	2024-2025
OWP West	240	0	2017	2024-2025

- 91 *La eólica marina de baja profundidad, frente a la creencia generalizada, comienza a ser rentable a día de hoy.* Para demostrar esto nos apoyaremos en los datos sobre los últimos proyectos de parques eólicos y las ayudas que requieren por MWh producido. Se puede comprobar que los tres últimos proyectos licitados competirán frente al resto de tecnologías sin ayudas estatales, como se recoge en la Tabla 10.1.
- 92 *...consideramos como útil la zona de mar hasta una distancia máxima a la costa española de 200 km.* En un artículo académico [68], en el que se habla de las tendencias de la eólica en el Reino Unido, se consideran proyectos eólicos marinos de cara al futuro con una distancia de hasta 250 km a la costa, por lo que considerar aprovechables 200 km en el caso de España no está fuera de alcance.
- 92 *Para generar 2,4 kWh por persona y día, habría que instalar 1315 turbinas de 10 MW cada una a lo largo de la costa.* Si suponemos un factor de capacidad del 35 % para la eólica marina, y suponiendo que la potencia pico de cada turbina eólica instalada es de 10 MW, la potencia media generada por cada máquina sería de 3,5 MW. Esto implica que para poder generar una potencia media de 4,6 GW sería necesario instalar 1315 turbinas eólicas.
- 93 *Horns Rev.* Las dificultades de esta planta de 160 MW en Jutland se describen en un informe escrito por J. A. Halkema [69]. Cuando funciona correctamente, el factor de capacidad de esta planta es de 0,43 y su potencia por unidad de área es de $2,6 \text{ W/m}^2$.
- 94 *Liberty ships.* Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Liberty_ship.



Figura 10.7: Parque eólico situado en el mar del Norte. Foto de Andy Dingley.

Capítulo 11

Electrodomésticos

En este capítulo nos ocuparemos de los electrodomésticos típicos de una cocina, así como de los dispositivos electrónicos que usamos tanto en casa como en el trabajo, tales como televisor, ordenador, etc. Estimaremos la energía consumida cuando se utilizan o cuando se cargan, pero no aquella utilizada para su fabricación, que será analizada en el Capítulo 15.

Electrodomésticos de cocina

Los electrodomésticos que más potencia consumen son en general los que generan calor, y estos se encuentran generalmente en la cocina (lavadora, lavavajillas, horno, vitrocerámica, etc.), si bien su consumo energético dependerá del tiempo que se utilicen. De hecho, el frigorífico, aún teniendo una baja potencia, tiene un consumo muy alto debido a que está conectado ininterrumpidamente. Vayamos por partes.

Frigorífico y congelador

Un frigorífico eficiente, como el mostrado en la Figura 11.1, consume 20 W de media, esto es, más o menos, 0,5 kWh al día. Si además tuviéramos un arcón congelador, este consumiría unos 90 W de media o, lo que es lo mismo, 2,2 kWh al día.

Vitrocerámica, horno, microondas, cafeteras...

Una cafetera de cápsulas puede preparar varios cafés en cuestión de minutos. Estas cafeteras, que están tan de moda últimamente, tienen una potencia de 1,5 kW. Si se preparan 6 cafés diarios, equivale a



Frigorífico combinado:
20 W de media (A+++)

Microondas:
1400 W pico



Figura 11.1: Consumo eléctrico de un aparato que calienta y otro que enfría. Foto de Bosch.

Tabla 11.1: Valores de consumo energético para aparatos que generan tanto frío como calor en una casa.

Aparato	Potencia	Tiempo al día	Energía al día
Para cocinar			
- cafetera cap.	1,5 kW	1/10 h	0,15 kWh/d
- microondas	1,4 kW	1/3 h	0,5 kWh/d
- vitrocerámica	3,2 kW	1 h	3,2 kWh/d
- horno eléctrico	1,8 kW	1/2 h	0,9 kWh/d
Para lavar			
- lavadora	1 kW	1 h	1 kWh/d
- secadora	2 kW	0,5 h	1 kWh/d
- lavavajillas	1 kW	1 h	1 kWh/d
Para enfriar			
- frigorífico	0,02 kW	24 h	0,5 kWh/d
- congelador	0,09 kW	24 h	2,2 kWh/d

0,15 kWh al día. (De aquí en adelante referiremos los consumos a cada hogar, suponiendo que en cada casa viven 2 personas).

El fuego pequeño de las vitrocerámicas tiene la misma potencia que una tostadora, 1 kW. Los fuegos más grandes llegan hasta los 2,2 kW. Si utilizamos estos dos fuegos a máxima potencia durante una hora cada día, supondrá un consumo de **3,2 kWh al día**.

En los microondas, suele aparecer la potencia indicada en la parte frontal, junto a los botones. En el microondas de la Figura 11.1 están seleccionados 750 W, aunque realmente el consumo suele ser mayor, llegando hasta los 1,4 kW. Si utilizamos el microondas unos 20 minutos diarios, el consumo será de **0,5 kWh al día**. Un horno convencional consume más, alrededor de 1,8 kW, si lo encendemos a tope. Si lo utilizamos todos los días durante media hora, supondrá un consumo de **0,9 kWh al día**.

Lavadora y lavavajillas

Una lavadora y un lavavajillas consumen alrededor de 1 kW cada uno cuando están funcionando. Supongamos que tenemos en casa una lavadora de 7 kg de carga máxima y la hacemos funcionar cada dos días en un programa de dos horas [70]. También tenemos una secadora de condensación de 2 kW y cada secado dura una hora (aunque en el mercado

ya existen secadoras con tecnologías de bomba de calor que son más eficientes) y un lavavajillas de tamaño medio de 1 kW de potencia. Los consumos de este apartado ascienden a **3 kWh al día**.

Sumando todas las estimaciones de la tabla, excluyendo el arcón congelador, calculamos unas necesidades de:

$$\frac{0,15 + 0,5 + 3,2 + 0,9 + 1 + 1 + 1 + 0,5}{2} \approx 4 \text{ kWh por persona y día.} \quad (11.1)$$

Electrodomésticos cocina: **4 kWh/d**



Figura 11.2: El consumo energético de los electrodomésticos en la cocina es aproximadamente 4 kWh al día por persona.

Dispositivos electrónicos

La preocupación sobre el consumo fantasma de los dispositivos electrónicos ha aumentado durante los últimos años. Pero ¿qué es el consumo fantasma? Se denomina así al consumo eléctrico de cualquier aparato que está enchufado a la red aunque no se esté utilizando. Si nos ponemos a pensar, todos tenemos en casa productos así: un cargador de *smartphone* enchufado, una televisión en *standby*, la fuente de alimentación de un ordenador...

Según publicaba el diario *20 minutos* en 2012:

El consumo fantasma «roba» anualmente entre el 7 y el 11 % de la electricidad en los hogares españoles.

Unos años más tarde, *elEconomista.es* lanzaba el siguiente aviso:

El 68% de las pymes españolas registran consumos fantasmas de energía.

Y el diario *Expansión* afirmaba:

Si tenemos en cuenta que cada kWh tiene un precio de entre 0,13 y 0,15 euros, se puede calcular fácilmente que, de media, **te estás gastando entre 32 y 58 euros al año en consumo fantasma**.

De lo publicado acerca de este tipo de consumo, uno puede deducir que es casi tan peligroso para la sociedad como Darth Vader. Pero ¿cómo de peligroso es exactamente?



Figura 11.3: Tres cargadores de teléfono móvil enchufados a la red, cuando no están cargando el teléfono, registran un consumo inferior a 1 W.

La verdad acerca de los cargadores

Un cargador de teléfono móvil, cuando nos lo dejamos enchufado sin conectar el teléfono, consume aproximadamente 0,5 W, lo que supone un consumo de **0,01 kWh al día**. Teniendo en cuenta que el consumo energético medio en España es de 85 kWh al día por persona, desenchufar el cargador supondría un ahorro del 0,01 % en el consumo. ¿Sirve de algo, entonces, desenchufarlo? No lo creemos. De hecho, estar todo el día pendiente de desconectar el cargador es como achicar agua en el Titanic utilizando una cucharilla. Está bien tenerlo en cuenta, pero hay que poner en perspectiva lo insignificante que es este gesto. Para ilustrarlo pondremos un par de ejemplos:

Toda la energía ahorrada al desenchufar el cargador durante un día es equivalente a la consumida en *un segundo* cuando conduces el coche.

Toda la energía ahorrada al desenchufar el cargador durante un año es equivalente a la consumida al darte un baño de agua caliente.

Podemos admitir que los cargadores más viejos consumen algo más. Si al tocarlos están calientes, puede que estén consumiendo entre 1 y 3 W. En este último caso, el cargador tendría un consumo de 0,07 kWh al día, lo que supone un gasto total de 4,5€ al año. Aunque desenchufarlo es una buena idea, este consumo representa una porción muy pequeña de la energía total consumida.

Dicho esto, vamos a dejar ya de achicar agua del Titanic usando una cucharilla. Analicemos dónde se está consumiendo electricidad realmente.



Figura 11.4: Esta televisión LED tiene un consumo de 83 W en funcionamiento, y de 17 W cuando la dejamos en standby. El gasto que supone dejarla en standby es de 0,4 kWh/d. Asumiendo que el coste de la electricidad es de 17 cts. €/kWh, dejar la televisión en standby nos supone 25€ al año.

Dispositivos que realmente consumen

En la Tabla 11.2 podemos observar, en vatios, el consumo de múltiples dispositivos. La primera columna muestra el consumo cuando el dispositivo se está utilizando, por ejemplo cuando un equipo de sonido está reproduciendo música. La segunda columna muestra el consumo cuando el dispositivo está encendido, pero no está haciendo nada. Llama la atención el hecho de que una impresora láser consuma 17 W solo por estar encendida –¡Aproximadamente lo mismo que el consumo medio de un frigorífico nuevo!– La tercera columna muestra el consumo del dispositivo cuando este está en standby. La cuarta muestra el consumo cuando el dispositivo está completamente apagado, pero sigue conectado a la red. Para facilitar la interpretación de la tabla, hay que

Dispositivo	Consumo de potencia (W)			
	encendido y en uso	encendido sin uso	<i>standby</i>	apagado
Ordenador y periféricos:				
torre	80	55		2
pantalla LCD	34		2	1
proyector	150		5	
impresora láser	500	17	8	
módem	9			
Ordenador portátil	16	9		0,5
Reproductor MP3	2			
Mini-cadena	9,1		3	
Amplificador	13			
Home Cinema	7	7	4	
Reproductor DVD	7	6	3	
Televisión	100		10	
Decodificador	6		5	
Xbox	160		2,4	
Sony Playstation	190		2	
Nintendo Wii	18		2	
Teléfono inalámbrico		1,7		
Cargador de móvil	5	5		
Aspiradora	1600			

Tabla 11.2: Consumo de potencia de varios dispositivos. 40 W de consumo equivalen a 1 kWh/d.

tener en cuenta que un consumo de 40 W equivale a 1 kWh/día, por lo que podemos asumir que cada vatio de consumo permanente equivale a un gasto de 1,5 € al año (asumiendo que el precio de la electricidad es de 0,17 €/kWh).

Los dispositivos con mayor consumo son los ordenadores, sus pantallas, y las televisiones, cuyo consumo llega a los 100 W cuando están encendidas. Los dispositivos de entretenimiento, como los equipos de música y los reproductores multimedia rondan los 10 W de consumo. Hay que tener en cuenta que un reproductor de DVD puede costar 30€ en la tienda, pero, si lo dejas enchufado todo el tiempo, te costará otros 9€ al año. Algunos equipos y los periféricos de los ordenadores consumen varios vatios incluso cuando están apagados, *gracias* a sus transformadores. La única forma de estar seguro de que el dispositivo está realmente apagado es desconectarlo del enchufe.

Alimentando los almacenes de la era de la información

De acuerdo con lo publicado en 2016 por el Laboratorio Berkeley (EE.UU.) [71], los servidores de los centros de datos de Estados Unidos consumieron en 2014 aproximadamente 70 000 GWh, lo que supone un gasto de **0,6 kWh por día y estadounidense**, este consumo representa casi el 2 % del consumo de electricidad del país.

A modo de resumen, podríamos decir que el consumo dependerá de cuántos dispositivos tengas en casa o en el trabajo. Si estos dispositivos se mantienen enchufados todo el día, el consumo puede llegar fácilmente a los **2 kWh/d**. Sumados a los electrodomésticos de cocina, en total consumimos unos **6 kWh/d**.

Mitos

«No tiene sentido desconectar las lámparas, televisores y cargadores de móvil durante el invierno. La energía “perdida” se transforma en calor que calienta la casa, por lo que realmente no se pierde».

Este mito es *verdadero* para unas pocas personas (y solo durante el invierno), pero *falso* para la inmensa mayoría.

En el caso de que tu vivienda se caliente utilizando calefactores eléctricos tradicionales, sí, da prácticamente lo mismo calentarla así que con las pérdidas de los dispositivos electrónicos. Pero, si estás en esta situación, lo que deberías hacer realmente es cambiar la forma en la que calientas tu casa. La electricidad es un tipo de energía de alta calidad, mientras que el calor es una energía de baja calidad. *Es un desperdicio transformar electricidad en calor*. Si solo logras una unidad de calor a partir de una unidad de electricidad, estás malgastando esa electricidad. Las bombas de calor son capaces de entregar 3 o 4 unidades de calor por cada unidad de electricidad utilizada. Estos dispositivos funcionan como un frigorífico invertido, bombeando calor dentro de tu casa a partir del aire del exterior, este tema se abordará en el Capítulo 21.

Para el resto de personas, cuya casa se calienta a partir de gas o biogás, es mejor idea evitar utilizar dispositivos eléctricos como fuente de calor para tu vivienda, al menos mientras nuestra electricidad provenga de combustibles fósiles. ¿Por qué? Porque cuando utilizas electricidad que proviene de estos combustibles, más de la mitad de la energía del combustible se pierde en las torres de refrigeración de las centrales eléctricas, y una vez se ha producido la electricidad se pierde aproximadamente el 8 % en las líneas de transmisión. Si utilizas directamente



Figura 11.5: Resumen de este capítulo, el consumo de los electrodomésticos en casa y en el trabajo es de 6 kWh/p/d.

estos combustibles para generar calor y evitas el paso intermedio para obtener electricidad, se consigue aprovechar mejor la energía que contienen.

Notas y textos de consulta

Página

- 100 *Un horno convencional consume más, alrededor de 1,8 kW.* Obviamente existe una amplia gama de hornos en el mercado, al igual que del resto de electrodomésticos señalados en este capítulo. La mayoría de hornos, por ejemplo, tienen una potencia máxima de entre 1,8 kW y 2,2 kW. El que se ha considerado aquí es el Balay 3HB506XM.
- 100 *El consumo de una secadora de condensación es de 2 kW.* Al igual que ocurría con el horno, existe una gran variedad de este tipo de electrodomésticos. La secadora seleccionada en este estudio es de condensación y consume 2 kW (Bosch WTG86209EE). Sin embargo, esta misma compañía dispone de secadoras con tecnología de bomba de calor con un consumo mucho más reducido, de tan solo 0,8 kW.
- 104 *...los servidores de los centros de datos de Estados Unidos consumieron en 2014 aproximadamente 70 000 GWh.* El consumo de los centros de datos se incrementó un 4% entre 2010 y 2014, lo que supone un incremento muy pequeño si se compara con el 24% de aumento entre 2005 y 2010 o el incremento de 90% ocurrido en los años 2000-2005. Se estima que para el año 2020 el consumo eléctrico de los centros de datos sea de 73 000 GWh. Se calcula que utilizando diferentes estrategias de eficiencia en estos centros de datos, se podría lograr una reducción del consumo del 45%. La información se ha obtenido del informe «United States data center energy usage report» [72].

Capítulo 12

Olas

La energía de las olas, o energía undimotriz, es una energía prometedora en muchos países. En el caso de España, el litoral cantábrico, la costa atlántica gallega y las islas Canarias tienen el mayor potencial.

Antes de nada, aclaremos cómo se forman las olas: *el sol genera el viento y el viento genera las olas*.

La mayor parte de la luz solar que llega a nuestro planeta calienta los océanos, que a su vez calientan el aire sobre ellos y producen vapor de agua. Debido a las diferentes densidades entre el aire caliente y el aire frío, el aire caliente asciende, enfriándose según se eleva y haciendo que el agua, con el tiempo, se condense formando las nubes y la lluvia. En el punto más alto, el aire se enfría, aún más, por la helada negrura del espacio.

Debido a su mayor densidad, el aire frío vuelve a descender. De esta manera, el sol se comporta como una gran bomba que mueve el aire en grandes corrientes de convección. Desde nuestro punto de vista, en la superficie, dichas corrientes convectivas crean los vientos. Cuando el viento irrumpe contra el mar abierto, genera las olas. Así, el viento es energía solar de segunda mano y las olas son energía solar de tercera mano. (Las olas que rompen en la playa no tienen nada que ver con las mareas).

En aguas abiertas las olas se generan siempre que la velocidad del viento es mayor que unos 0,5 m/s. Las crestas de las olas se mueven aproximadamente a la velocidad del viento que las genera, y en la misma dirección. La *longitud de onda* de las olas (la distancia entre crestas) y el *periodo* (el tiempo entre crestas) dependen de la velocidad del viento. Por otro lado, cuanto mayor sea el tiempo durante el que sopla el viento, y mayor sea la extensión sobre la que incide, mayor es la *altura* de las olas generadas. Así, dado que los vientos que prevalecen en el Atlántico van de oeste a este, las olas que llegan a las costas europeas del Atlántico son, a menudo, especialmente grandes. Las olas de la costa este española, bañadas por el mar Mediterráneo, son normalmente mu-



Figura 12.1: La energía de las olas se conoce como energía undimotriz.

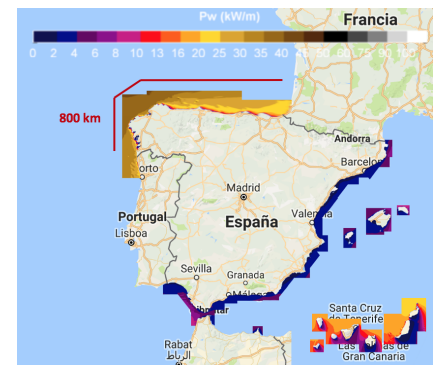


Figura 12.2: Potencia media anual del oleaje en las costas españolas [73].

cho más pequeñas, por lo que nos centraremos en estimar el potencial undimotriz en el litoral cantábrico y la costa atlántica gallega, las de mayor potencial seguidas por las del litoral canario.

Las olas tienen buena memoria, y continuarán manteniendo la misma dirección durante días, incluso después de que cese de soplar el viento, hasta que choquen contra algo. En mares donde la dirección del viento cambia frecuentemente, las olas surgidas debidas a vientos con diferentes direcciones forman un batiburrillo superpuesto, viajando en diferentes direcciones.

Si las olas que viajan en una determinada dirección se encuentran con objetos que absorben su energía, como una fila de islas con playas arenosas, entonces los mares más allá del objeto son más calmados. Los objetos crean una sombra y hay menos energía en las olas que pasan. Así, mientras que la luz del sol proporciona potencia por unidad de *área*, las olas proporcionan potencia por unidad de *longitud* de costa. Dicho de otra forma, hay que tener en cuenta que no puedes extraer energía de las olas a dos kilómetros de la costa y a un kilómetro de la costa. O bueno, puedes intentarlo, pero la instalación a dos kilómetros de la costa absorberá la energía que le habría llegado a la instalación a un kilómetro, y no se volverá a generar. Se necesitan miles de kilómetros para que el viento genere olas grandes.

Podemos encontrar un límite superior en la máxima potencia concebible que se podría obtener de las olas, estimando la potencia por unidad de longitud de costa expuesta y multiplicando dicho valor por la longitud de costa. Ignoramos la pregunta sobre qué dispositivo extraerá toda esta potencia, y empezamos a hacer el cálculo de cuánta potencia se generará.

La potencia de las olas que llegan al litoral cantábrico y a la costa atlántica gallega se ha cuantificado: tienen una potencia media anual de 30 kW/m. ¡Esto parece mucha potencia! Si cada ciudadano tuviera un metro de costa y pudiera obtener los 30 kW, habría energía de sobra para satisfacer la demanda moderna. Sin embargo, *nuestra población es muy grande* y no hay costa suficiente para que cada uno tenga su propio metro.

Tal y como muestra el mapa de la página 107, España cuenta con 800 km de costa cantábrica y atlántica gallega (las de mayor potencial), lo cual representa 1/55 m por persona. Por tanto, la potencia undimotriz bruta que llega es de 13,1 kWh por día por persona. Si extraemos toda esta potencia, el mar en la costa sería tan llano como un estanque. Además, los sistemas reales no son capaces de extraer toda la energía

y algo se pierde inevitablemente en la conversión de energía mecánica a eléctrica. Supongamos que excelentes dispositivos de extracción de energía undimotriz tienen una eficiencia del 50 % al convertir la energía de las olas en electricidad, y que somos capaces de colocar dichos dispositivos a lo largo de 400 km de las costas cantábrica y atlántica gallega. Esto significaría que podemos extraer el 25 % del límite teórico, o lo que es lo mismo **3,3 kWh por día y persona**. Hay que recalcar que estamos haciendo, intencionadamente, unas suposiciones algo extremas para fomentar esta fuente renovable. Sospechamos que la suposición de que podríamos tener *la mitad de la costa cantábrica y atlántica gallega* con absorbedores de energía undimotriz le parecerá a muchos lectores algo imposible.

¿Cómo se comparan los números supuestos en este cálculo con la tecnología actual? Podemos comparar estos datos con la primera central comercial del mundo, situada en Mutriku (País Vasco). Esta central, empleando la tecnología denominada columna de agua oscilante (OWC, *Oscillating Water Column*), tiene una potencia nominal de 3 kW/m. Si empleamos este dato en el cálculo anterior, la potencia suministrada por 400 km de costa se reduce a **0,65 kWh por día y persona**. Sin embargo, aunque esta central es pionera en el mundo, está situada cerca de la costa, donde el potencial de las olas es menor. Si consideramos, en cambio, el dispositivo Pelamis de la Figura 12.3, diseñado para aguas profundas y que se probó en las costas de Portugal, se podrían conseguir 6 kW/m, lo que nos daría una potencia de **1,3 kWh por día y persona**. Tomemos para nuestra estimación un valor intermedio: **1 kWh por día y persona**. Así, mientras que esta tecnología puede resultar útil para pequeñas comunidades en islas remotas, sospechamos que no jugará un papel esencial en las renovables españolas, por lo que no la añadiremos a nuestra pila de generación renovable. Sin embargo, sí que podría resultar de gran utilidad en el caso de Canarias, ya que se trata de un sistema eléctrico aislado con un buen potencial undimotriz.

¿Cuál es el peso de un Pelamis y cuánto acero contiene? Una serpiente con una potencia máxima de 750 kW pesa 700 toneladas, incluyendo 350 toneladas de lastre, por lo que contiene unas 350 toneladas de acero. Esto supone un ratio peso/potencia de aproximadamente 500 kg por kW (pico). Podemos comparar este valor con los requerimientos de acero de la eólica offshore: una turbina offshore con una potencia máxima de 3 MW pesa 500 toneladas, incluyendo la cimentación, lo que supone un ratio peso/potencia de unos 170 kg por kW, un tercio de la máquina undimotriz. El Pelamis es un primer prototipo y, presumiblemente, con mayor inversión y desarrollo en la tecnología undimotriz, el ratio peso/potencia bajará.



Figura 12.3: Un Pelamis es un dispositivo con forma de serpiente marina y dividido en cuatro partes, utilizado para absorber la energía de las olas. Se orienta encarando las olas que llegan. Las olas hacen que la serpiente se flexione y estos movimientos son soportados por generadores hidráulicos. El pico de potencia de una serpiente es de 750 kW. En la mejor localización del océano Atlántico cada serpiente propocionaría 300 kW de media.



Figura 12.4: Miembros de APERNA (Asociación para la Promoción de las Energías Renovables en Navarra) en la central undimotriz de Mutriku (País Vasco).

Notas y textos de consulta

Página

- 107 *Las olas se generan siempre que la velocidad del viento es mayor que unos 0,5 m/s. Las crestas de las olas se mueven aproximadamente a la velocidad del viento que las genera.* La teoría más simple de generación de las olas [74] sugiere que, para olas pequeñas, la cresta de la ola se mueve aproximadamente a la mitad de la velocidad del viento que las genera. Sin embargo, se han realizado medidas que confirman que cuanto más tiempo sopla el viento, la longitud de onda de las olas dominantes presentes es mayor, y mayor es su velocidad. La velocidad característica de los mares totalmente desarrollados es casi igual a la velocidad del viento a 20 m sobre la superficie [75].
- 107 *Las olas de la costa este española, bañadas por el mar Mediterráneo, son normalmente mucho más pequeñas.* Mientras que la potencia media anual de las olas del mar Cantábrico y la costa atlántica gallega es de 30 kW/m, en el mar Mediterráneo, a pesar de tener unas latitudes muy prometedoras, al ser un mar cerrado, la potencia media desciende a unos 4 kW/m. Esta diferencia se hace mayor incluso en invierno, cuando en la costa cantábrica se llega a valores de 50 kW/m, mientras que la costa mediterránea apenas cambia.
- 108 *La potencia de las olas que llegan al litoral cantábrico y la costa atlántica gallega se ha cuantificando: tienen una potencia media anual de 30 kW/m.* En el Apéndice F se explica cómo podemos estimar esta potencia empleando una serie de datos sobre las olas. Este número se basa en el estudio que llevó a cabo el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHC), por encargo del IDAE, para el Plan de Energías Renovables 2011-2020 [73]. En el caso de la costa cantábrica y atlántica gallega, los datos se corresponden también con la literatura acerca de la potencia undimotriz en el océano Atlántico [75, 76, 77], donde se establece que «el recurso a gran escala del océano Atlántico Noreste, desde Islandia al norte de Portugal, tiene un recurso neto de 40-50 MW/km, de los cuales 20-30 MW/km son potencialmente extraíbles desde el punto de vista económico». En cualquier punto del océano abierto, se pueden distinguir tres tipos de potencias por unidad de longitud: la potencia total que pasa por un punto en todas las direcciones; la potencia neta interceptada por un dispositivo direccional orientado en la dirección óptima; y la potencia por unidad de costa, que tiene en cuenta la desalineación entre la orientación óptima y la dirección del colector y la costa. Por ejemplo, en Portugal la orientación óptima es la noroeste, mientras que la costa está orientada al oeste.
- 108 *Los sistemas reales no son capaces de extraer toda la energía y algo se pierde inevitablemente en la conversión de energía mecánica a eléctrica.* La primera máquina undimotriz conectada a red en el Reino Unido, LIMPET en Islay, es un buen ejemplo de estas pérdidas. Cuando se diseñó, su eficiencia de conversión de energía undimotriz a electricidad estaba estimada en 48% y la potencia media se predijo en 200 kW. Sin embargo, las pérdidas en el sistema de captación, los volantes de inercia y los componentes eléctricos hicieron que la potencia media fuese de 21 kW, únicamente un 10% de lo estimado [78].

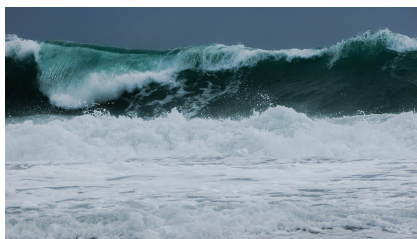


Figura 12.5: Olas, fuente de energía undimotriz.

Capítulo 13

Alimentos y agricultura

La Tierra proporciona lo suficiente para satisfacer las necesidades de todos los hombres, pero no la codicia de cada hombre.

Gandhi

Hemos debatido en el Capítulo 6 cuánta energía sostenible se podría obtener de la vegetación; en este capítulo hablaremos de cuánta energía se consume actualmente para obtener nuestro pan de cada día.

Una persona moderadamente activa con un peso de 65 kg consume alimentos con un contenido energético de 2600 «calorías» cada día. Una «caloría», en el ámbito alimenticio, es realmente 1000 calorías químicas (1 kcal). Por lo tanto, 2600 «calorías» al día corresponden a aproximadamente 3 kWh al día. La mayor parte de esta energía se escapa del cuerpo como calor, por lo que una de las funciones de una persona corriente es actuar como un calentador con una potencia ligeramente superior a 100 W, la potencia de entre 5 y 6 bombillas de bajo consumo. Pon 10 personas en un cuarto pequeño y frío y podrás apagar el calefactor de 1 kW.

¿Cuánta energía consumimos realmente para obtener los 3 kWh diarios? Si ampliamos nuestro punto de vista para incluir el inevitable coste de producir la comida, nos damos cuenta de que nuestra huella energética es sustancialmente mayor. Todo depende de si somos veganos, vegetarianos o carnívoros.

Los veganos, inevitablemente, tienen la huella más pequeña: **3 kWh al día**, procedentes de las plantas que comen.

Coste energético de beber leche

Si bebemos medio litro de leche al día, ¿cuánta energía requiere su producción? Una vaca lechera produce 20 litros de leche al día. Por lo



Figura 13.1: Una tortilla de patata.

Mínimo: **3 kWh/d**

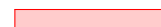


Figura 13.2: Consumo mínimo de alimentos que necesita una persona.

Leche y queso: **1,2 kWh/d**

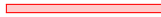


Figura 13.3: Consumo de medio litro de leche y 50 g de queso.

tanto, nuestro medio litro al día requiere 1/40 de una vaca. Espera, también comemos queso. Para hacer 1 kg de queso de Tetilla se requieren aproximadamente 10l de leche. En consecuencia, consumir 50g de queso al día requiere la producción de 0,5l. ¿Y cuánta energía hace falta para criar una vaca? Si una vaca, que pesa 450 kg, tiene los mismos requerimientos por kilogramo que un humano (con 65 kg requiere 3 kWh al día), entonces la vaca necesita aproximadamente 21 kWh/d. ¿Te hace sentir incómodo esta extrapolación de los humanos a las vacas? Vamos a comparar estos números: www.dairyaustralia.com.au dice que una vaca lactante de 450 kg necesita 85 MJ/d, que son 24 kWh/d. Magnífico, ¡nuestra aproximación no se encontraba tan lejos! Por lo tanto, 1/20 de vaca tiene un consumo energético de **1,2 kWh al día**, esta será la energía diaria que requiere nuestro consumo de queso y leche. Este valor ignora otros costes energéticos relacionados con la cría y cuidado de la vaca para que produzca leche, o los costes de convertir la leche en queso, o aquellos derivados de transportar la leche y el queso hasta nosotros. Trataremos algunos de estos costes en el transporte y en los supermercados en el Capítulo 15.

Huevos

Huevos: **1 kWh/d**

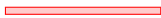


Figura 13.4: Consumo de dos huevos al día.

Una gallina ponedora come aproximadamente 110 gramos de alimento al día. Si asumimos que el alimento para gallinas tiene un contenido en energía de metabolización de 3,3 kWh por kilogramo, eso supone un consumo de energía de 0,4 kWh al día por gallina. Las gallinas ponen una media de 290 huevos al año. Por lo tanto, comer dos huevos al día requiere una energía de **1 kWh al día**. Cada huevo contiene 80 kcal, que es aproximadamente 0,1 kWh. Por lo tanto, desde un punto de vista energético, la producción de huevos tiene una eficiencia del 20%.

Coste energético de comer carne

Vamos a suponer que un buen comedor de carne come unos 251 g al día, que es el consumo cárnico de un americano medio (los españoles comemos 140 g diarios de carne). Para calcular la energía requerida para mantener a los animales mientras se crían, necesitamos saber el tiempo que están vivos, consumiendo energía, hasta que nos los comemos. ¿Pollo, cerdo o ternera?

¿Pollo, señor? Cada pollo que te comes ha estado cacareando durante, aproximadamente, 50 días. Por lo tanto, el consumo de 140 g diarios

de pollo requiere aproximadamente 7 kg de pollo vivo preparándose para ir a la cazuela. Y esos 7 kg de pollo consumen energía.

¿Cerdo, señora? Los cerdos se revuelcan en el barro durante más tiempo: 400 días desde que nacen hasta que se convierten en beicon. El consumo de 140 g diarios de cerdo requiere aproximadamente 56 kg de cerdo vivo preparándose para la cazuela.

¿Ternera? La producción de carne de ternera requiere el mayor tiempo de espera. Se necesitan, aproximadamente, 1000 días para obtener un filete. Por lo tanto, el consumo de 140 g diarios de ternera requiere de 140 kg de vaca viva preparándose para la cazuela.

Para condensar todas estas ideas en un único número, vamos a asumir que los 140 g diarios de carne que consume un español medio están formados por cantidades iguales de pollo, cerdo y ternera. Este hábito de comer carne necesita mantener vivos 2 kg de pollo, 19 kg de cerdo y 47 kg de ternera. Esto hace un total de 68 kg de carne, o 102 kg de animal, ya que aproximadamente un tercio del animal son huesos y vísceras, y dos tercios se convierten en carne. Si los 102 kg de animal tienen los mismos requerimientos energéticos que un humano, cuyos 65 kg consumen 3 kWh/d, la potencia requerida para dar respuesta al hábito carnívoro es:

$$102 \text{ kg} \times \frac{3 \text{ kWh/d}}{65 \text{ kg}} \simeq 5 \text{ kWh/d.} \quad (13.1)$$

Nos hemos tomado la libertad fisiológica de asumir que «los animales son igual que los humanos». Una estimación más precisa sobre la energía requerida por los pollos se puede encontrar en las notas finales de este capítulo. Pero no importa, ya que únicamente queremos una estimación aproximada, y aquí está. Podemos suponer que un consumidor típico obtiene los 3 kWh diarios que necesita para sobrevivir de las siguientes fuentes: 2 kWh de frutas y verduras, 0,5 kWh de lácteos (medio litro de leche y 50 g de queso), 0,2 kWh de huevos (2 huevos diarios) y 0,3 kWh de carne (140 g diarios). Tal como hemos calculado antes, la energía necesaria para obtener estos alimentos es $2 + 1,2 + 1 + 5 \simeq 9,2 \text{ kWh al día}$.

Este número no incluye ninguna energía relacionada con los costes asociados con la agricultura, fertilización, procesado, refrigeración y transporte de la comida. Estimaremos algunos de estos costes aquí y otros en el Capítulo 15.

Carne: **5 kWh/d**



Figura 13.5: Comer carne requiere energía extra, ya que tenemos que alimentar a los animales de los que luego nos vamos a alimentar.



Figura 13.6: Cosechadora de zonas boscosas para obtener alimentos. Fotografía de Tirso Berrueta.

¿Suponen estos cálculos un argumento a favor de la dieta mediterránea, basada en un menor consumo energético? Depende de donde se alimenten los animales. Si pensamos en las empinadas colinas y montañas del Pirineo, por ejemplo, ¿podría ser esta tierra utilizada para algo más que pasto? Estos pastizales pueden utilizarse para alimentar ovejas, pero difícilmente podrían emplearse de otra forma para ayudar en la alimentación humana. Se podría pensar que estas pendientes verdes son como plantaciones de biocombustible sin ningún mantenimiento, donde las ovejas actuarían como máquinas automatizadas de recolección. Las pérdidas energéticas entre la luz solar y la carne de cordero son grandes, pero probablemente no haya otra forma de capturar la luz solar en aquellos lugares. Argumentos similares podrían hacerse a favor del consumo de carne en lugares como los matorrales de África y las praderas de Australia, y a favor del consumo de lácteos en India, donde millones de vacas se alimentan con subproductos de arroz y cultivos de maíz.

Por otro lado, cuando los animales se crían en jaulas y se alimentan con grano que los humanos podrían haber comido, no hay ninguna duda de que sería energéticamente mucho más eficiente suprimir los intermediarios y alimentar directamente a los humanos con el grano.

Fertilizantes y otros costes en la agricultura

La potencia asociada al uso de fertilizantes en Europa es aproximadamente de **2 kWh por día y persona**. De acuerdo con el informe «Medidas de Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura» realizado por el IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía), la agricultura consumió en el año 2012 en España **2,5 kWh por día y persona**, correspondientes al consumo de la maquinaria agrícola y al regadío.

Por lo tanto, si sumamos el consumo de la agricultura al de la alimentación obtenemos

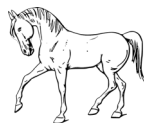
$$9,2 \text{ kWh/d} + 2,5 \text{ kWh/d} = 11,7 \text{ kWh/d} \approx 12 \text{ kWh/d}. \quad (13.2)$$



2 kWh/d



9 kWh/d



17 kWh/d

Figura 13.7: La energía diaria necesaria para obtener la comida de los animales de compañía.

Coste energético de Pelusa, Pancho y Trueno

¡Mascotas! ¿Estás al cuidado de un perro, un gato o un caballo?

Aproximadamente hay 2,5 millones de gatos en España. Vamos a asumir que cuidas de uno de ellos. ¿Cuál es el coste energético de Pelusa? Si come 50 g de carne al día (pollo, cerdo o ternera), entonces los cálculos

de la última sección dicen que la energía requerida para obtener la comida de Pelusa es de **2 kWh al día**. Un gato vegetariano podría necesitar algo menos.

De la misma manera, si tu perro Pancho come 200 g de carne al día, y una cantidad de carbohidratos de 1 kWh al día, la energía diaria requerida para obtener su comida es de aproximadamente **9 kWh al día**.

El caballo Trueno pesa aproximadamente 400 kg y consume **17 kWh al día**.

Mitos

«Escuché que la huella energética de los alimentos es tan grande que “es mejor conducir que caminar”».

En la inmensa mayoría de las situaciones esto es falso. Sin embargo, en última instancia, depende de tu dieta. Es posible encontrar comida cuya huella energética debida a los combustibles fósiles que se usan en su preparación sea mayor que la energía ofrecida al humano. Una bolsa de patatas fritas, por ejemplo, tiene una energía incorporada de 1,4 kWh de combustibles fósiles por cada kWh de energía química ingerida. La energía incorporada de la carne es mayor. Según un estudio de la Universidad de Exeter, Reino Unido, una dieta típica tiene una energía incorporada de, aproximadamente, 6 kWh por cada kWh ingerido. Para ver si conducir un coche emplea menos energía que caminar, tenemos que saber la eficiencia de cada uno de ellos. El coche del Capítulo 3 tenía un coste energético de 70 kWh por cada 100 km. Andar emplea una energía neta de 3,6 kWh por cada 100 km, 19 veces menos. Por lo tanto, si te alimentaras exclusivamente de comida con una huella mayor que 19 kWh por cada kWh (por lo general la huella es mucho menor), entonces sí, el coste energético de desplazarte en un vehículo impulsado por combustibles fósiles es menor que ir caminando por tu cuenta. Pero si tienes una dieta típica, que incorpora 6 kWh por cada kWh ingerido, entonces la afirmación de que «es mejor conducir que caminar» es un mito. Caminar emplea un tercio de la energía que necesita un coche con un solo ocupante.

Notas y textos de consulta

Página

111 *Una vaca lechera produce 20 litros de leche al día*. En 2013 había 856 800 vacas en España que producían un total de 6368 millones de litros de leche al año [79].

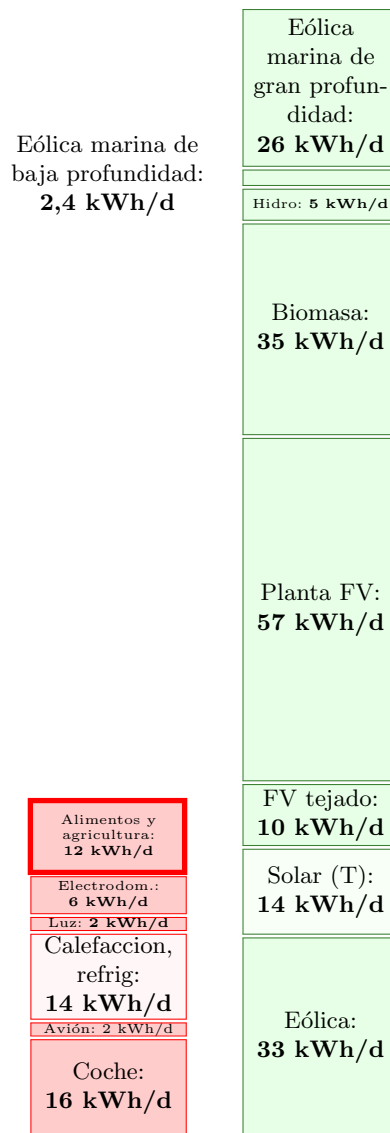


Figura 13.8: Resumen del capítulo: la comida y la agricultura requieren 12 kWh/p/d.

- 112 *Gallina*. Una gallina ponedora adulta (20 semanas) pesa 1,5 o 1,6 kg. Su alimentación tiene un contenido energético de 2850 kcal por kg, que es 3,3 kWh por kg, y su consumo alimenticio asciende a 340 g por semana cuando tiene 6 semanas, y a 500 g semanales cuando tiene 20 semanas. Una vez que comienza a poner huevos, necesita 110 g al día.
La alimentación de los pollos tiene un contenido energético de 3,7 kWh por kg. El consumo energético es 400-450 kcal al día por gallina (0,5 kWh/d por gallina), con un peso típico de 2 kg. Un pollo que pesa 2,95 kg consume un total de 5,32 kg de alimentos. Por lo tanto, la energía incorporada de una gallina es aproximadamente 6,7 kWh por kg de animal, o 10 kWh por kg ingerido de carne. Si hubiésemos utilizado este número en vez de la aproximación empleada, la contribución energética del pollo habría crecido un poco. Sin embargo, teniendo en cuenta que la huella energética de una dieta de carne mixta está dominada por la ternera, realmente no importa que los pollos estén subestimados. Fuentes: www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923, [80], y www.statistics.gov.uk/statbase/datasets2.asp.
- 113 *Se necesitan, aproximadamente, 1000 días para obtener un filete*. 33 meses desde la concepción hasta el matadero: 9 meses de gestación y 24 meses de crianza. Fuente: www.shabdenparkfarm.com/farming/cattle.htm
- 113 *...vamos a asumir que los 140 g diarios de carne que consume un español medio están formados por cantidades iguales de pollo, cerdo y ternera*. Esto es bastante menor que el consumo medio americano, que es de 251 g al día, formados por 108 g de pollo, 81 g de vaca y 62 g de cerdo [80].
- 114 *La potencia asociada al uso de fertilizantes en Europa es aproximadamente de 2 kWh por día y persona*. En 1998-1999, el Oeste de Europa empleaba 17,6 Mt anuales de fertilizantes: 10 Mt de nitratos, 3,5 Mt de fosfatos y 4,1 Mt de potasa. Estos fertilizantes tienen una huella energética de 21,7; 4,9 y 3,8 kWh por kilogramo respectivamente. Compartiendo esta energía entre 375 millones de personas, obtenemos una huella energética de 1,8 kWh al día por persona. Fuentes: [81, 82].
- 115 *Una bolsa de patatas fritas, por ejemplo, tiene una energía incorporada de 1,4 kWh de combustibles fósiles por cada kWh de energía química ingerida*. Hemos estimado esta energía a partir de la huella de carbón de una bolsa de patatas fritas: 75 g de CO₂ para una bolsa estándar de 35 g. De esta huella, el 44% está asociado a la agricultura, el 30% con el procesado, el 15% con el embalaje y el 11% restante con el transporte, venta y eliminación de desechos. La energía química dada al consumidor es 770 kJ. Por lo tanto, esta comida tiene una huella de carbono de 350 g por kWh. Asumiendo que la mayoría de esta huella de carbono es de los combustibles fósiles, con 250 g CO₂ por kWh la huella energética de las patatas fritas es de 1,4 kWh de combustible fósil por cada kWh de energía química ingerida.
- 115 *Andar emplea una energía neta de 3,6 kWh por cada 100 km*. Un humano andando emplea un total de 6,6 kWh por cada 100 km [83]; hemos restado la energía en reposo para obtener la huella energética de andar [84].

Lectura adicional: [85]

Capítulo 14

Mareas

La Luna y la Tierra realizan una danza giratoria y acrobática alrededor del Sol. Juntas dan la vuelta al Sol una vez al año, girando al mismo tiempo sobre sí mismas cada 28 días. La Luna también gira sobre sí misma cada 28 días, de modo que siempre muestra la misma cara a su pareja de baile, la Tierra. La diva Tierra no le devuelve el cumplido; ella realiza acrobacias una vez al día. Esta danza se mantiene gracias a la fuerza de la gravedad: cada parte de la Tierra, la Luna y el Sol se ve atraída por el resto de partes de la Tierra, la Luna y el Sol. La suma de todas estas fuerzas es *casi* la que se requiere para mantener esta giratoria danza en curso. Sin embargo, hay pequeños desequilibrios entre las fuerzas gravitacionales y las fuerzas requeridas para mantener la danza. Son estos desequilibrios los que dan lugar a las mareas.

Los desequilibrios asociados con el giro entre la Luna y la Tierra son aproximadamente tres veces más grandes que los desequilibrios asociados con la danza más lenta de la Tierra alrededor del Sol, por lo que el tamaño de las mareas varía con la fase de la Luna, es decir, según la alineación de la Luna, la Tierra y el Sol. Con luna llena y luna nueva (cuando la Luna y el Sol están alineados con la Tierra) los desequilibrios se refuerzan el uno al otro, por lo que se originan grandes mareas cada dos semanas, conocidas como *mareas vivas*. En los intermedios cuartos menguantes y crecientes, los desequilibrios se anulan parcialmente y las mareas son más pequeñas; estas pequeñas mareas se conocen como *mareas muertas*. Las mareas vivas tienen aproximadamente el doble de amplitud que las mareas muertas: las pleamares vivas son el doble de altas respecto al nivel medio del mar que las pleamares muertas, las bajamares vivas son el doble de bajas que las bajamares muertas, y las corrientes de marea son el doble de grandes en las mareas vivas que en las muertas.

¿Por qué hay dos pleamares y dos bajamares por día? Bien, si la Tierra fuera una esfera perfecta, como una bola de billar cubierta por profundos océanos, el efecto del giro Tierra-Luna sería deformar el agua hacia, y en sentido contrario, a la Luna, dando lugar a una forma como de balón de rugby (Figura 14.1). Alguien que viva en el ecuador de esta Tierra con

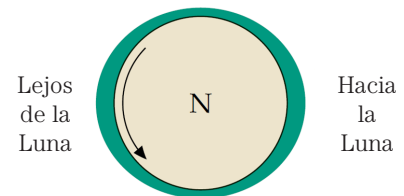


Figura 14.1: Un océano cubriendo una Tierra con forma de bola de billar. Estamos mirando hacia abajo, al polo norte, y la Luna está a 60 cm a la derecha de la página. La Tierra gira una vez al día dentro de una «carcasa» con forma de balón de rugby. Los océanos se estiran hacia, y en sentido contrario, a la Luna, ya que las fuerzas gravitacionales provenientes de la Luna no igualan perfectamente la fuerza centrípeta necesaria para mantener a la Tierra y a la Luna girando alrededor de su centro común de gravedad. Alguien situado en el ecuador (girando según indica la flecha) experimentará dos mareas altas y dos mareas bajas por día.

forma de bola de billar, dando una vuelta por día dentro de la capa protectora de agua, notaría el agua subir y bajar dos veces al día: arriba cuando pasa debajo de la nariz del balón de rugby, y abajo cuando pasa por su base. Esta sencilla explicación difiere un poco de la realidad. En realidad, la Tierra no es regular, y no está uniformemente cubierta por agua (tal y como os habréis dado cuenta). Las dos jorobas de agua no pueden moverse rápidamente alrededor de la Tierra porque los océanos no son lo suficientemente profundos y los continentes están de por medio. El verdadero comportamiento de las mareas es, de hecho, mucho más complicado. En un gran cuerpo de agua, como el océano Atlántico, las crestas y los valles de las mareas se forman, pero como no pueden moverse alrededor de la Tierra, hacen la siguiente gran acción: se mueven alrededor del perímetro del océano. En el Atlántico norte hay dos crestas y dos valles, circulando por el océano en una dirección antihoraria una vez al día. Aquí en España estas crestas y valles del Atlántico se ven atenuadas por la placa continental. Las crestas y los valles consecutivos están separados 6 horas. O para ser más preciso, 6 horas y cuarto, ya que la Luna sale cada 25 horas y no cada 24. Si nos referimos al mar Mediterráneo, estas crestas y valles apenas son perceptibles debido al carácter cerrado de este mar.

La velocidad a la que las crestas y los valles viajan varía con la profundidad. Así, cuanto menos profundidad hay, más despacio viajan las crestas y los valles, y más grandes se hacen. En mar abierto, las mareas solo tienen 30 o 60 centímetros. Sin embargo, en los estuarios europeos, el rango de mareas puede ser de hasta cuatro metros. En el hemisferio norte, la fuerza de Coriolis (una fuerza, asociada con la rotación de la Tierra, que actúa solo en objetos en movimiento) provoca que todas las crestas y los valles tiendan a aproximarse a la orilla derecha. Por ejemplo, las mareas son mayores en Cádiz que en Huelva. De igual modo, las crestas y los valles entran al mar Cantábrico por la estaca de Bares (A Coruña), recorren todo el litoral cantábrico, y rinden sus respetos a Francia.

La energía mareomotriz a veces se llama energía lunar, ya que está provocada principalmente por la Luna. Gran parte de la energía mareomotriz, sin embargo, proviene realmente de la energía de rotación de la Tierra. La Tierra está gradualmente frenándose.

Por tanto, ¿cuánta energía mareomotriz podemos usar?, y ¿cuánta potencia podemos extraer?

Potencia mareomotriz

Cuando se piensa en energía mareomotriz, lo normal es pensar en una poza artificial al lado del mar, con una rueda hidráulica que se accio-

na cuando la poza se llena o se vacía, Figura 14.2 y Figura 14.3. El Apéndice G muestra cómo estimar la potencia disponible en dichas pozas de marea. Asumiendo un rango de 4 m, un rango típico en muchos estuarios europeos, la máxima potencia de una poza artificial de marea que se llena rápidamente con marea alta y se vacía rápidamente con marea baja, generando potencia en ambas direcciones, es de aproximadamente 3 W/m^2 . Esta es una potencia por unidad de área un 50% mayor que la de un parque eólico marino. Y ya sabemos lo grandes que tienen que ser los parques offshore para marcar la diferencia. Tienen que tener el tamaño de una comunidad autónoma media. Por lo que, de igual manera, para hacer que las pozas de marea sean capaces de producir energía comparable al consumo total español, necesitaríamos una superficie de pozas de marea con un área similar a una comunidad autónoma.

Lamentablemente, en España no contamos con pozas naturales de esas dimensiones. Los estuarios de nuestros ríos son mucho más pequeños que, por ejemplo, los disponibles en Gran Bretaña. Por tanto, apenas contamos con localizaciones en las que colocar generadores y extraer una cantidad significativa de energía. Los generadores que necesitaríamos poner se parecen a molinos de viento sumergidos. Pero dado que la densidad del agua es casi 1000 veces la del aire, la potencia de un flujo de agua es 1000 veces mayor que la potencia del viento a la misma velocidad. Volveremos con los parques mareomotrices en un momento, pero antes analicemos el recurso mareomotriz con el que cuenta España cada día.

El recurso de las mareas

Al contrario que en otros países europeos, como Gran Bretaña o Francia, en España no tenemos la suerte de poder contar con un importante recurso mareomotriz. Una buena parte de nuestra costa está bañada por el mar Mediterráneo, un tranquilo mar, perfecto para disfrutar en vacaciones; pero en el que, por su carácter cerrado, apenas se nota el efecto de las mareas (el rango de marea es de menos de medio metro). En el océano Atlántico y el mar Cantábrico, en cambio, las mareas sí que son apreciables. Analicemos ahora cuánto podríamos llegar a generar mediante tres tecnologías que se pueden emplear: los parques de corriente de marea, las presas o pozas de marea y las lagunas de marea.

Parques de corriente de marea

Una forma de extraer la energía de las mareas es construir parques mareomotrices, del mismo modo que tenemos los parques eólicos. El



Figura 14.2: Alumnos de la Escuela Municipal de Música Luis Morondo de Barañáin (Navarra) visitando el molino de mareas de Santa Olaja, situado en Arnuelo, al fondo de la ría de Quejo (Cantabria).

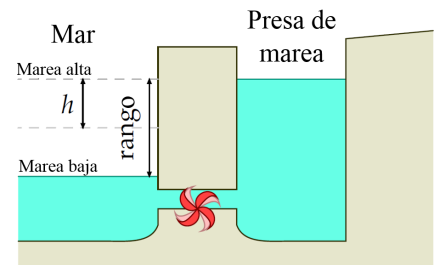


Figura 14.3: Una poza artificial de marea. La poza se llenó en marea alta, y ahora es marea baja. Dejamos salir el agua a través del generador eléctrico para convertir la energía potencial del agua en electricidad.

Tabla 14.1: Densidad de potencia (potencia por unidad de área) de las pozas de marea, asumiendo generación tanto en el ascenso como en el descenso de la marea.

Rango de marea	Densidad de potencia
2 m	1 W/m^2
4 m	3 W/m^2
6 m	7 W/m^2
8 m	13 W/m^2

primer ejemplo de un generador sumergido, o generador de «corriente de marea», conectado a la red fue una turbina de 300 kW instalada en 2003 cerca de la ciudad noruega de Hammerfest, en Noruega. La turbina se instaló a una profundidad de 50 metros y demostró tener una capacidad de producción de más de 600 MWh al año. De todos modos, estos datos son los de una turbina aislada. Aunque sí que se ha planificado un parque mareomotriz en Escocia, todavía no existe ninguna localización en la que se haya instalado más de una turbina, por lo que tendremos que confiar en la física y las suposiciones para predecir cuánta potencia pueden generar los parques mareomotrices. Asumiendo que las reglas de disposición de un parque mareomotriz son similares a las de un parque eólico, y que la eficiencia de las turbinas mareomotrices será como la de las mejores turbinas de viento, la Tabla 14.2 muestra la potencia por unidad de área de un parque mareomotriz para varias corrientes de marea.

Tabla 14.2: Densidad de potencia de un parque mareomotriz (en vatios por metro cuadrado de suelo marino) como función de la velocidad de flujo. (1 nudo = 1 milla náutica por hora = 0,514 m/s).

Velocidad		Densidad de potencia (W/m ²)
(m/s)	(nudos)	
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

En España, el lugar donde tienen lugar las mayores corrientes de marea es el estrecho de Gibraltar, donde se tienen unas velocidades de entre 0,5 y 1,5 m/s, por lo que las densidades de potencia que se podrían alcanzar son de 1 a 27 W/m². Un valor medio muy típico es 7 W/m². Estos valores los podemos comparar con la densidad de potencia de los parques eólicos (2-3 W/m²) y de las plantas solares fotovoltaicas (5-20 W/m²).

A pesar de la alta densidad de potencia respecto a otras tecnologías, en el Apéndice G se ha estimado que en el estrecho de Gibraltar se podría extraer 0,04 kWh/d/persona, una contribución despreciable para las pilas de generación y consumo.

Presas

Las presas de marea son una tecnología probada. La famosa presa de La Rance en Francia, donde el rango de marea tiene un alucinante promedio de 8 metros, ha producido una potencia media de 60 MW desde 1966. En España no tenemos la suerte de contar con rangos de marea tan altos. En el mar Mediterráneo, el rango de mareas apenas llega a medio metro de altura. Es en el océano Atlántico y el mar Cantábrico donde tenemos un mayor rango: en mareas vivas tenemos un rango medio de 4 m y de 2 m en mareas muertas. Si miramos la Tabla 14.1, podemos ver que, teóricamente, con este rango de marea se tiene una densidad de potencia de 3 W/m². El problema que tenemos en España es que no tenemos estuarios lo suficientemente grandes y, por tanto, no disponemos de la superficie necesaria para que la energía mareomotriz tenga una aportación considerable en el esquema de generación de energía

renovable. Por poner cifras a esta justificación, cojamos, por ejemplo, dos de las rías más conocidas de Galicia: la ría de Arousa y la ría de Pontevedra. Entre ambas, conseguimos una superficie de, aproximadamente, 300 km². Si consideramos una densidad de potencia de 3 W/m², generaríamos 0,9 GW o, lo que es lo mismo, 0,47 kWh por persona y día en mareas vivas, una cantidad despreciable, ya que solo se producirá unas dos veces al mes. Para rematar estos cálculos, debemos tener en cuenta que los datos teóricos asumen que el agua entra en un único pulso en el pico de la marea alta y sale en un único pulso en marea baja. Sin embargo, en la práctica, tanto el flujo de entrada como el de salida se reparten a lo largo de unas pocas horas, lo que reduce un poco la potencia suministrada. Además, las actuales propuestas de presas de marea solo generan energía en una única dirección, lo que reduce la energía suministrada en otro 50%. La generación total sería de 0,23 kWh/p/d. Una aportación que no debe tomarse en cuenta. De hecho, ni aun sumando todas las rías y estuarios disponibles se podría conseguir una superficie suficiente como para poder considerar la aportación de esta tecnología. No añadiremos nada a nuestra pila de generación en este capítulo.

Lagunas de marea

Las lagunas de marea se crean al construir paredes en el mar; pueden considerarse algo así como estuarios artificiales. Las condiciones que se necesitan para construir estas lagunas son que el agua sea poco profunda y que el rango de marea sea grande. En este caso se trata de una economía de escala: las lagunas de marea grandes generan electricidad más barata que las pequeñas.

Si se construyen dos lagunas en un mismo lugar, se puede usar un truco para incrementar la energía suministrada y para permitir generarla bajo demanda en cualquier momento, independientemente del estado de la marea. Una laguna puede denominarse la laguna «alta», y la otra, la laguna «baja». Con marea baja, algo de energía generada al vaciar la laguna alta puede usarse para bombear agua *fuera* de la laguna baja, haciendo que su nivel sea más bajo que el nivel del agua. La energía que se necesita para disminuir el nivel de la laguna baja se recupera después, con intereses, en marea alta, cuando se genera energía al dejar pasar el agua de la laguna alta a la baja. De igual modo, se puede bombear más agua a la laguna alta cuando hay marea alta, usando la energía generada por la laguna baja. Da igual el estado de la marea en el que estemos, una laguna o la otra será capaz de generar energía. Este par de lagunas de marea también podría trabajar como una instalación de almacenamiento por bombeo, almacenando el exceso de energía de la red.

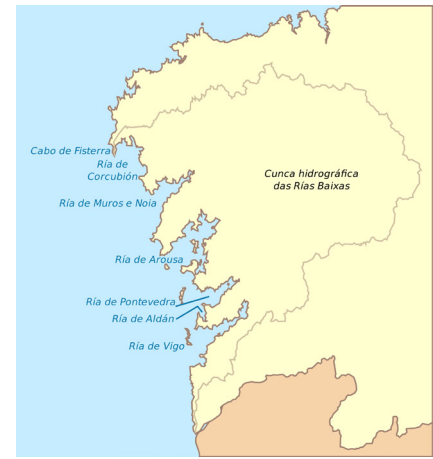


Figura 14.4: Rías Baixas (Galicia), donde se pueden apreciar las rías de Arousa y Pontevedra. Imagen original de Edoarado distribuida bajo licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported, disponible en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rias_baixas_ES.svg.

No obstante, despreciaremos la aportación que se podría conseguir con esta tecnología, ya que en el océano Atlántico y el mar Cantábrico la profundidad es considerable y el rango de marea no es suficiente como para causar un aporte importante.

Bellezas de la marea

Si sumamos todo, obtenemos que, gracias a las mareas, podríamos obtener algo así como **0,27 kWh/d por persona**. Dada su magnitud y que solo se produciría en marea alta, no consideraremos la energía mareomotriz en las pilas. De todos modos, sí que realizaremos un análisis de las ventajas que podría llegar a aportar.

La energía mareomotriz apenas se ha empleado a escala industrial, por lo que es difícil saber cuáles son los retos económicos y tecnológicos que pueden aparecer en la construcción y mantenimiento de las turbinas mareomotrices –¿corrosión, acumulación de limo, enredo de desechos marinos?– Pero aún así, hay varios aspectos positivos acerca de la tecnología mareomotriz:

1. Las mareas son completamente predecibles; al contrario que el viento y el sol, la energía mareomotriz es una renovable en la que uno puede confiar; funciona todo el día y toda la noche durante todo el año; además, usando lagunas de marea, se puede almacenar energía y suministrarla bajo demanda.
2. Las mareas no se producen en todos los lugares a la vez, sino que van progresando poco a poco creando una diferencia en los momentos en los que se produce la marea alta o baja; esto es algo positivo, ya que un conjunto de parques mareomotrices podría proporcionar una contribución más constante a la red eléctrica que un único parque; no obstante, siempre será una contribución que variará con la fase de la Luna.
3. La potencia mareomotriz durará millones de años.
4. Además, como la densidad de potencia de un flujo típico de marea es mayor que la densidad de potencia del viento típico, una turbina mareomotriz de 1 MW es más pequeña que una turbina de viento de la misma potencia; por lo que, probablemente, las turbinas mareomotrices lleguen a ser más baratas que las de viento.
5. La vida debajo de las olas es tranquila; no hay nada parecido a tormentas anormales de marea; por lo que, al contrario que las turbinas de viento, que requieren un gran coste ingenieril para soportar raras tormentas de viento, las turbinas de debajo del agua no requieren grandes factores de seguridad en su diseño.

6. Los humanos viven principalmente en la Tierra y no pueden ver qué hay debajo del mar, por lo que las objeciones al impacto visual de las turbinas mareomotrices deberían ser menores que las objeciones a las turbinas de viento.

Mitos

«La energía mareomotriz, aunque verde y limpia, no puede considerarse renovable. Extraer energía de las mareas disminuye la velocidad de rotación de la Tierra. Definitivamente, no podemos usar la energía mareomotriz a largo plazo».

Falso. Las mareas naturales ya reducen la velocidad de rotación de la Tierra. La pérdida natural de energía de rotación es aproximadamente 3TW [86]. Debido a la fricción natural de las mareas, cada siglo, el día se alarga 2,3 milisegundos. Muchos sistemas de extracción de energía mareomotriz están simplemente extrayendo la energía que se perdería por fricción de todos modos. Pero incluso si *fuera posible doblar* la energía extraída del sistema Tierra-Luna, la energía mareomotriz aún duraría más de mil millones de años.

Notas y textos de consulta

Página

- 119 *...la potencia disponible en dichas pozas de marea.* La potencia por unidad de área de una poza de marea se calcula en el Apéndice G (pág. 399).
- 120 *La Rance* generó 16 TWh durante 30 años. Esto supone una potencia media de 60 MW (su potencia pico es de 240 MW). El rango de marea asciende a 13,5 m, la superficie afectada es 22 km² y la presa tiene 750 m de longitud. Densidad de potencia media: 2,7 W/m². Fuente: EDF.
- 120 *Rangos de marea.* En el mar Mediterráneo el rango de marea apenas llega a medio metro, mientras que en el océano Atlántico y mar Cantábrico tenemos un rango medio de 4 m en mareas vivas y 2 m en mareas muertas. Fuente: [87].

Capítulo 15

Fabricación y transporte

Dicho de forma sencilla, si no reorientamos nuestros sistemas de extracción y producción y nuestra forma de distribuir, consumir y desechar cosas –lo que suele llamar el modelo take-make-waste– la economía, tal cual es, matará el planeta.

Annie Leonard

(The Story of Stuff, dirigido por Louis Fox)

Fabricación de objetos

Uno de los mayores sumideros de energía en el mundo «desarrollado» es la fabricación de objetos. En su ciclo de vida natural, los objetos pasan a través de tres etapas. En la primera, se muestra un producto nuevo en un atractivo embalaje encima de la estantería de una tienda. En esta etapa, los productos se denominan «bienes». Tan pronto como el producto se lleva a casa y pierde su embalaje, sufre una transformación; pasa de ser «bien» a su segunda forma: «desorden». El desorden vive con su dueño por un periodo de meses o incluso años. Durante este periodo, el desorden es mayoritariamente ignorado por su dueño, quien está en las tiendas comprando más «bienes». Finalmente, por arte de magia, el desorden se transforma en su última forma: «basura». Para el ojo inexperto, puede ser difícil distinguir esta «basura» del «bien» tan deseado que era antes. Sin embargo, en esta etapa, el perspicaz dueño paga al basurero para que se lleve las cosas.

Supongamos que queremos calcular todo el coste energético de un producto a lo largo de toda su vida, quizás con el objetivo de diseñar productos más eficientes. Esto se llama análisis del ciclo de vida. Convencionalmente, el coste energético de cualquier producto a lo largo de



Figura 15.1: Imagen del colectivo contrapublicista español ConsumeHastaMorir.

Tabla 15.1: Energía incorporada de algunos materiales.

Energía incorporada (kWh por kg)	
Combustible fósil	10
Madera	5
Papel	10
Vidrio	7
Plástico PET	30
Aluminio	40
Acero	6

su ciclo de vida, desde un secador a un barco de crucero, se divide en cuatro fases:

- **Fase M: Conseguir la materia prima.** Esta fase implica excavar la tierra para obtener los minerales, fundirlos, purificarlos y modificar su forma para convertirlos en piezas de fabricación: plásticos, vidrios, metales y cerámicos, por ejemplo. El coste energético de esta fase incluye los costes de transportar las materias primas a su futuro destino.
- **Fase P: Producción.** En esta fase, se procesa la materia prima y se convierte en el producto final. La empresa en donde se fabrican los secadores de pelo, moldeando sus elegantes líneas y uniendo sus componentes, emplea luz y calor. El coste energético de esta fase incluye el embalaje y más transporte.
- **Fase U: Uso.** Los secadores de pelo y los barcos de crucero emplean energía cuando se usan. Este consumo energético ya se ha analizado en otros capítulos a lo largo del libro.
- **Fase E: Eliminación.** Esta fase incluye el coste energético de poner los objetos de nuevo en el interior de la tierra (vertedero) y de limpiar toda la contaminación asociada con dichos objetos.



Una lata: **0,6 kWh**

Envases ligeros: **1,5 kWh/d/p**

Figura 15.2: Fabricar una lata de aluminio supone el consumo de 0,6 kWh. La energía diaria asociada a envases y otros embalajes por un español medio es de 1,5 kWh/d.

Para estimar la energía que requiere el ciclo de vida de un producto debemos calcular el coste energético de las cuatro fases y sumar todos ellos. Normalmente, una de las cuatro fases domina el total de dicho coste, por lo que para obtener una estimación razonable del total, necesitamos estimaciones precisas únicamente del coste de las fases dominantes. Si deseamos rediseñar un producto para reducir su coste energético total, debemos centrarnos en el coste de la fase dominante, asegurándonos de que el ahorro en esa fase no supone incrementos en el coste energético de las otras fases.

Envases ligeros

En lugar de estimar en detalle la energía que requiere la producción y transporte de todos los productos, vamos a analizar los objetos más representativos: recipientes de bebida, electrodomésticos, ordenadores, pilas, propaganda y cosas más grandes como coches y casas. Este capítulo se centra en los costes energéticos de las fases M y P. Estos costes energéticos son a veces llamados energía «incorporada» a los objetos –nombre confuso, ya que normalmente la energía no está literalmente incorporada en el objeto, sino que incluye toda la energía utilizada en

el proceso de fabricación desde la extracción de la materia prima hasta la entrega al consumidor—. Lo bueno de analizar toda esta energía «incorporada» a los objetos que compramos es que podemos hacernos una idea de la energía que usa toda la industria solo estudiando estos objetos que conocemos bien, sin pararnos a estudiar el consumo de las fábricas intermedias que procesan las materias primas.

Las latas de aluminio son unas grandes consumidoras de energía. Para este producto, la fase de conseguir la materia prima (Fase M) es la que domina. La producción de metales requiere mucha energía, especialmente el aluminio. Fabricar una lata de aluminio consume 0,6 kWh.

Por otro lado, una botella de agua de 500 ml hecha de plástico PET (que pesa 25 g) presenta una energía incorporada de 0,7 kWh. ¡Tanto como una lata de aluminio!

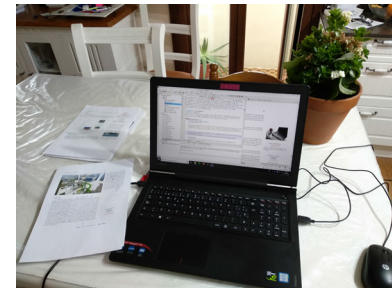
En general, el español medio tira a la basura cada día unos 150 gramos de envases ligeros (latas, botellas, plásticos, brics, etc.). El contenido de energía incorporada en los envoltorios se encuentra entre 5 y 40 kWh por kilogramo a medida que vamos desde el papel hasta los plásticos y las latas de aluminio. Tomando el contenido típico de energía incorporada como 10 kWh/kg, deducimos que la huella energética diaria del empaquetado es de **1,5 kWh/p/d**. Algo de esta energía incorporada puede ser recuperada con la incineración de residuos, tal y como discutiremos en el Capítulo 27.

Vidrio

En cuanto al vidrio, aunque es más pesado, su uso no es tan elevado. En España se estima que cada persona tira 65 gramos de vidrio al día. Con un coste de producción de unos 7 kWh/kg, supone un consumo de **0,5 kWh/p/d**.

Electrodomésticos y electrónica

Fabricar un ordenador personal supone un consumo energético total de 1500 kWh. Por lo tanto, si compras un ordenador nuevo cada cuatro años, se corresponde con un consumo de **1 kWh al día**. En general, los electrodomésticos tienen un coste energético de fabricación de en torno a 1500 kWh. En el hogar tenemos unos 8 grandes electrodomésticos (lavadora, lavavajillas, horno, frigorífico, microondas, campana, TV y ordenador por ejemplo) y otros más pequeños con un coste energético menor, como tostadora, batidora, etc. Por facilitar las



Fabricar un ordenador: **1 kWh/d**

Fabricar electrodomésticos:
6 kWh/d/p

Figura 15.3: Fabricar un ordenador, que se le supone una vida de cuatro años, conlleva un coste energético de 1 kWh/d. Todos los electrodomésticos que poseemos suman unos 6 kWh/d/p. Foto de Javier Samanes.

cuentas, pongamos que tenemos el equivalente a 10 grandes electrodomésticos en casa que, compartidos entre dos personas, se corresponde con 5 electrodomésticos para cada uno. Además tenemos ordenador en el trabajo, móvil y otros *gadgets*. Pongamos que en total cada persona tiene el equivalente a 9 electrodomésticos y pongamos que en valor medio tienen una vida útil de 6 años. Esto equivale a un consumo por persona de 6 kWh/d.

Pilas

El coste energético de fabricar una pila AA de níquel-cadmio recargable, que almacena 0,001 kWh de energía eléctrica y tiene una masa de 25 g, es de 1,4 kWh. Si el coste energético de las pilas desechables es similar, usar dos pilas AA al mes consumiría aproximadamente 0,1 kWh/d. Por lo tanto, el coste de las pilas es despreciable en comparación con nuestra gran pila de consumo y no lo tendremos en cuenta.

En todo este libro nos limitamos a realizar un análisis energético, dejando al margen otros temas como el medio ambiente. Sin embargo, en relación con las pilas, nos parece necesario destacar que, aunque el consumo energético asociado a su uso sea pequeño, contienen productos de alta toxicidad que convierten a las pilas de un solo uso en un importante problema medioambiental.

Ropa

Podemos estimar el coste energético de la ropa partiendo de que cada español tira entre 7 y 10 kg de ropa al año. Considerando un contenido energético de 20 kWh/kg, podemos estimar que usamos unos 0,5 kWh/p/d. Esto no es mucho energéticamente, pero cabe recordar, de forma similar que con las pilas, que el mayor problema de usar demasiada ropa es la gran cantidad de agua que se utiliza para su fabricación y la gran cantidad de desechos tóxicos que produce esta industria.

Periódicos, revistas y propaganda impresa

Un folleto de propaganda de un supermercado de 20 hojas distribuido gratuitamente en nuestros buzones pesa 80 g. El periódico gratuito de 25 hojas repartido mensualmente pesa 100 g.

Este torrente de material de lectura y propaganda que llega a nuestros buzones contiene energía, además también necesita energía para ser producido y entregado en nuestras casas. El papel tiene una energía incorporada de 10 kWh por kilogramo. Por lo tanto, la energía **asociada** a recibir un total de 100g de papel al día de revistas, periódicos, propaganda (el equivalente a recibir diariamente el periódico gratuito) es aproximadamente de **1 kWh al día**.

El reciclado de papel podría ahorrar la mitad de la energía de fabricación; mientras que la incineración de residuos o la quema del papel en casa podría hacer uso, en forma de calor, de toda la energía que este contiene.

Productos más grandes

El artículo más grande que la mayoría de personas compra es una casa. En el Apéndice H hemos estimado el coste energético de construir una casa nueva. Asumiendo que reemplazamos las casas cada 100 años, el coste energético diario estimado es de 2,3 kWh/d. Este es el coste energético de construir la envolvente de la casa: solo los cimientos, los ladrillos, las tejas y las vigas del techo. Si la ocupación media de una casa es de 2,3 personas, la potencia media al construir una casa es de **1 kWh por persona y día**.

¿Y qué pasa con un coche, o con una carretera? Algunos de nosotros poseemos un coche, pero normalmente compartimos la carretera. La energía incorporada de un coche nuevo es de 76 000 kWh, por lo tanto, comprar un coche nuevo cada 15 años supone un coste energético de **14 kWh al día**. Teniendo en cuenta que solo hay un coche por cada dos españoles, podríamos rebajar esta cifra a la mitad, pero, si incluimos toda la flota de vehículos (motos, camionetas, autobuses, etc., sumados a los coches son unos 32 millones), podemos dejar esta cifra en unos **10 kWh por persona y día**.

El análisis del ciclo de vida de una carretera realizado por Treloar, Love y Crawford [88] estima que la construcción de una carretera australiana cuesta 7600 kWh por metro (una carretera de hormigón armado), y que, incluyendo los costes de mantenimiento, el coste energético total a lo largo de 40 años es de 35 000 kWh por metro. Vamos a convertirlo en un número aproximado para el coste energético de las carreteras españolas. La Red de Carreteras del Estado está formada por 26 300 km de carretera. Asumiendo un coste de 35 000 kWh por metro cada 40 años, el coste de las carreteras es de **1,4 kWh/d/p**.

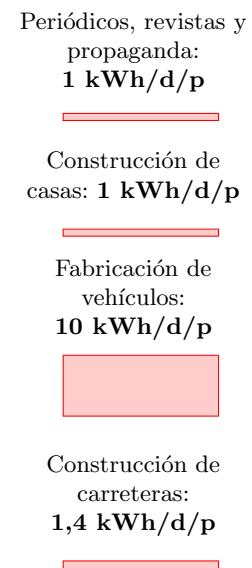


Figura 15.4: Coste energético de algunas «cosas».

Figura 15.5: La alcachofa, verdura cultivada en Navarra, transportada a 500 km para ser consumida en Barcelona.



Transporte por
carretera:
12 kWh/d



Figura 15.6: El coste energético de transportar productos por carretera en España es de 12 kWh por día y persona.

Transporte
marítimo: **5 kWh/d**



Figura 15.7: El coste energético de transportar productos por mar en España es de 5 kWh por día y por persona.



Figura 15.8: Barco mercante. El transporte por agua requiere energía porque los barcos producen olas. Sin embargo, es muy eficiente energéticamente hablando.

Transporte de objetos

El transporte de carga se mide en toneladas-kilómetros (t-km). Si una tonelada de verduras se transporta a 500 kilómetros (Figura 15.5) entonces diremos que se ha realizado un transporte de carga de 500 t-km.

Cuando el barco mercante de la Figura 15.8 transporta 50 000 t de carga a una distancia de 10 000 km, realiza 500 millones t-km de transporte de carga. La intensidad energética de este barco mercante para transportar esta carga es de 0,015 kWh por t-km. A continuación, veremos que el transporte de objetos mediante barco mercante es mucho más eficiente que el transporte por carretera. Estas intensidades energéticas se muestran en la Figura 15.9.

Transporte por carretera

En 2014, el transporte de mercancías en España ascendió a 196 000 millones de t-km. Teniendo en cuenta la población española, este transporte de mercancías supone 12 t-km por día y persona, un coste energético diario de **12 kWh/d/p**, asumiendo una intensidad energética de 1 kWh por t-km.

Transporte marítimo

En 2016, pasaron 509 millones de toneladas de carga por los puertos españoles. Tomando como referencia el estudio realizado por el Tyndall Centre sobre el cambio climático, se estima que en España el coste energético diario del transporte marítimo es de **5 kWh/d por persona**.

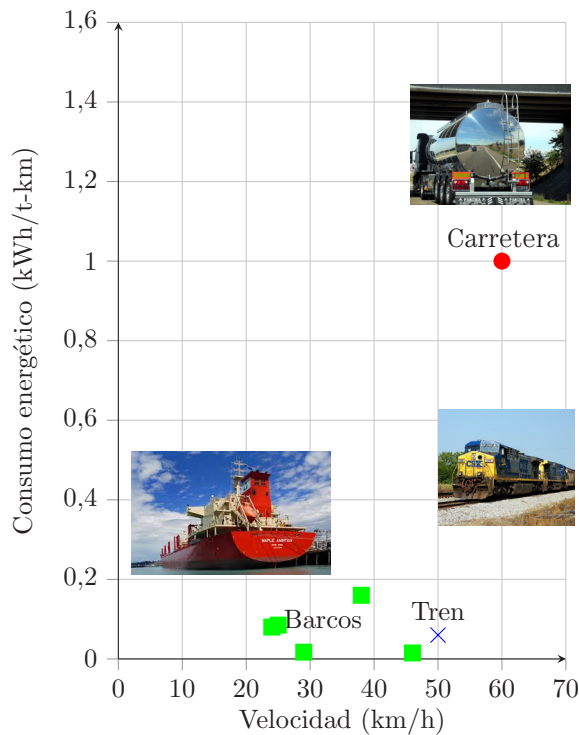


Figura 15.9: Requerimientos energéticos de diferentes formas de transporte de mercancías. El eje vertical muestra la energía consumida en kWh por t-km neta (esto es, la energía por t-km sin incluir el peso del vehículo). Mirar también la Figura 20.17 (pág. 177) en donde se muestran los requerimientos energéticos para transportar pasajeros.

Transporte aéreo

El transporte aéreo movió 1065 millones de t-km en España durante el año 2016, algo más de 0,06 t-km por día y persona. Tomando el consumo del transporte aéreo igual a 1,2 kWh por t-km (ver Apéndice C) se obtiene un consumo energético diario de **0,075 kWh/d y persona**.

Transporte ferroviario

En España, el transporte ferroviario representó en el año 2016 el 4,7% del transporte total, frente al 17,9% de media en Europa. Esto son 10644 millones de t-km, que, repartidas entre todos los españoles, son 0,6 t-km por día y persona. El coste energético medio del transporte ferroviario fue, en 2016, de 0,064 t-km, lo que nos da una potencia media de **0,04 kWh/d por persona**.

Agua: desalación, entrega y
tratamiento: **0,3 kWh/d**

Suministro y tratamiento del agua

Aunque no lo parezca, utilizamos mucha agua: en torno a 160l se consumen por día y persona en España. En consecuencia, producimos 160l de aguas residuales que hay que tratar. El coste de bombear agua alrededor del país y de tratar nuestras aguas residuales es aproximadamente de **0,16 kWh/d por persona**.

Desalación

La utilización de la desalación para potabilizar agua se remonta en España a 1964, con la puesta en marcha de la desaladora de Lanzarote. Se trataba de una planta dual, que generaba simultáneamente agua desalada y energía eléctrica, con una capacidad de desalación de 2000 m³/d y una potencia eléctrica de 2000 MW. Pocos años después, entraron en servicio las plantas de Ceuta (1969) y Las Palmas de Gran Canaria (1970), que con sus 10 000 m³/d significaba la entrada de la desalación a gran escala en el país. Todas estas plantas desaladoras utilizaban la tecnología de destilación multietapa, un proceso actualmente no empleado debido a su alto coste energético.

Figura 15.10: Bastidores de ósmosis inversa de la desaladora de Ceuta. La capacidad actual de la planta es de 32 000 m³/d tras la ampliación realizada por Cadagua en 2016. De esta forma, queda totalmente garantizado el abastecimiento de agua potable de la Ciudad Autónoma de Ceuta, incluso en los momentos de mayor sequía [89].



La primera planta de ósmosis inversa para agua de mar se instaló, nuevamente, en Lanzarote en 1984, con una capacidad de 500 m³/d. Poco después, en 1986, se construyó la planta de Lanzarote II, con una capacidad de 7500 m³/d. Los avances en el desarrollo de las membranas entre los años 1980 y 2000, así como la incorporación de recuperadores de energía, que se inició a comienzos de 1990, permitieron reducir casi a la mitad el consumo energético, lo que incentivó la construcción de nuevas plantas desaladoras a lo largo del litoral español, que presentan una capacidad actual de 2 hm³/d. Se estima que el coste energético actual de la desalación por ósmosis inversa es de aproximadamente 3,5 kWh/m³, por lo tanto, un consumo diario de 160l requiere 0,6 kWh/d. Como ya sabemos, no desalamos todo el agua que consumimos, aunque, cada vez más, se desala agua para riego, por lo que el consumo energético real es de unos 0,15 kWh/d por persona.

Mercados minoristas

Los supermercados españoles consumen aproximadamente 7,4 TWh de electricidad al año. Repartiendo este valor con 46 millones de felices compradores, supone una potencia de 0,5 kWh/d.

Supermercados:
0,5 kWh/d

Importación y exportación

En el Apéndice H se estudia la importancia de los productos importados en España, a partir de su peso. Dejando de lado los combustibles, importamos algo más de 2 toneladas de mercancía al año por persona, de las cuales, aproximadamente, 1 tonelada son productos procesados y fabricados, como coches, maquinaria o equipos eléctricos y electrónicos. Esto supone aproximadamente 3 kg por día y persona de artículos fabricados. Estos bienes son principalmente fabricados con materiales cuya producción requiere al menos 10 kWh de energía por kilogramo de producto. Por lo tanto, estimamos que esta pila de coches, frigoríficos, microondas, ordenadores, fotocopiadoras y televisores tienen una energía diaria incorporada de, al menos, 30 kWh por día y persona. Pero también se ve que el valor económico de las exportaciones españolas es prácticamente igual al de las importaciones (excluyendo combustibles). Por lo tanto, no añadiremos ningún coste energético por los productos importados. No obstante, es posible que los productos importados (metales y otras materias primas) tengan un mayor contenido energético que los productos exportados y el valor que aquí atribuimos a la fabricación tenga que ser revisado.

Eólica marina de
baja profundidad:
2,4 kWh/d

Transporte mercancías: 18 kWh/d
Fabricación: 25 kWh/d
Alimentos y agricultura: 12 kWh/d
Electrodom.: 6 kWh/d
Luz: 2 kWh/d
Calefacción, refrig: 14 kWh/d
Avión: 2 kWh/d
Coche: 16 kWh/d

Eólica marina de gran profun- didad: 26 kWh/d
Hidro: 5 kWh/d
Biomasa: 35 kWh/d
Planta FV: 57 kWh/d
FV tejado: 10 kWh/d
Solar (T): 14 kWh/d
Eólica: 33 kWh/d

En resumen, sumando los kWh/p/d de envases (2), electrodomésticos (6), pilas (0,1), ropa (0,5), papel (1), carreteras (1,4), coches (10) y casas (1) hemos llegado a 22 kWh/p/d. Se han quedado sin analizar muchos productos, pero por separado no hemos encontrado ningún otro objeto que suponga demasiada energía incorporada. Por si acaso, añadiremos 3 kWh/d/p y redondearemos nuestra cifra de consumo energético debido a la producción de bienes hasta **25 kWh por día y persona** más **18 kWh por día y persona** para su transporte por mar, carretera, tubería y almacenamiento de comida en los supermercados.

Notas y textos de consulta

Página

- 127 *Fabricar una lata de aluminio consume 0,6 kWh.* La masa de una lata es de 15 g. Las estimaciones del coste energético total de la fabricación de aluminio varían desde 60 MJ/kg a 300 MJ/kg. El dato que hemos utilizado es el ofrecido por The Aluminum Association: 150 MJ por kilogramo (40 kWh/kg).
- 127 *Una botella de agua de 500 ml hecha de plástico PET (que pesa 25 g) presenta una energía incorporada de 0,7 kWh.* Fuente: informe técnico sobre la energía incorporada [90] –La energía incorporada en el PET es de 30 kWh por kilogramo–.
- 127 *En general, el español medio tira a la basura cada día unos 150 gramos de envases ligeros.* En España se reciclaron 1,4 millones de toneladas de envases ligeros, que representan el 77 % del total según un estudio de Ecoembes. Esto se corresponde con 108 gr por persona y día. En el texto se ha ampliado esta cifra a 150 gr porque es posible que no esté todo contabilizado (no todos los envases son registrados por Ecoembes) y en estos casos es mejor ponerse en el peor caso. Fuente: [91].
- 127 *En España se estima que cada persona tira 65 gramos de vidrio al día.* Fuente: [92].
- 127 *Fabricar un ordenador personal supone un consumo energético total de 1500 kWh.* La fabricación de un ordenador requiere (en energía y materia prima) el equivalente aproximado a 11 veces su peso en combustibles fósiles. Los frigoríficos requieren entre 1 y 2 veces su peso. Los coches requieren también entre 1 y 2 veces su peso. Fuentes: [93, 94].
- 127 *En general, los electrodomésticos tienen un coste energético de fabricación de en torno a 1500 kWh.* La cifra oscila entre 300 y 2000 kWh, pero los más representativos (ordenador, lavavajillas, lavadora) oscilan entre 1000 y 2000 kWh. Fuente: [95].
- 128 *El coste energético de fabricar una pila AA de níquel-cadmio recargable, que almacena 0,001 kWh de energía eléctrica y tiene una masa de 25 g, es de 1,4 kWh.* Fuente: [96].
- 128 *Podemos estimar el uso energético de la ropa partiendo de que cada español tira entre 7 y 10 kg de ropa al año.* Fuente: [97].
- 129 *El papel tiene una energía incorporada de 10 kWh por kilogramo.* La fabricación de periódicos desde la madera virgen, supone un coste energético aproximado de 5 kWh/kg, y el papel tiene un contenido energético similar al de la madera, aproximadamente 5 kWh/kg [98, 99]. Los costes energéticos varían

Figura 15.11: Producir nuestros productos cuesta al menos 25 kWh/d. Transportarlos, 18 kWh/d.

según fábricas y según países. 5 kWh/kg es el valor para una fábrica de papel sueca. En un artículo científico de 1973 [100] se estimaba que las medidas de eficiencia podrían reducir el coste a aproximadamente 3,2 kWh/kg. Un estudio más reciente del análisis del ciclo de vida completo [101] estima que el coste energético neto de la producción de papel de prensa en Estados Unidos desde la madera virgen, empleando una mezcla típica de relleno e incineración, es de 12 kWh/kg; mientras que el coste energético de producir papel de prensa desde material reciclado es de 6 kWh/kg.

- 129 *La energía incorporada de un coche nuevo es de 76 000 kWh.* Fuente: [102]. Otro informe técnico [103] menciona valores menores: 30 500 kWh para el coste energético del ciclo de vida de un coche. Una de las razones por las que existe esta diferencia puede ser debido a que el último valor del análisis del ciclo de vida asume que el vehículo es reciclado, por lo tanto el coste neto de los materiales se ve reducido.
- 129 *La Red de Carreteras del Estado está formada por 26 300 km de carretera.* Fuente: [104].
- 129 *Teniendo en cuenta que solo hay un coche por cada dos españoles, podríamos rebajar esta cifra a la mitad, pero si incluimos toda la flota de vehículos (motos, camionetas, autobuses, etc., sumados a los coches son unos 32 millones) [...].* Fuente: DGT [105].
- 130 *La intensidad energética de este barco mercante para transportar esta carga es de 0,015 kWh por t-km.* El Ever Uberty, longitud de 285 m y envergadura de 40 m, tiene una capacidad de 4948 TEUs, un peso muerto de 63 000 toneladas y una velocidad de servicio de 25 nudos; la potencia media suministrada por el motor es de 44 MW. Un TEU tiene el tamaño de un contenedor pequeño de 20 pies, aproximadamente 40 m³. La mayoría de los contenedores que se ven hoy en día son de 40 pies, la dimensión de 2 TEU. Un contenedor de 40 pies pesa 4 t y puede contener 26 t de género. Asumiendo que la eficiencia del motor es del 50 %, el consumo energético es de 0,015 kWh de energía química por t-km.
- 131 *El transporte aéreo movió 1065 millones de t-km en España durante el año 2016.* Fuente: Banco Mundial <https://datos.bancomundial.org/>.
- 131 *En España, el transporte ferroviario representó en el año 2016 el 4,7 % del transporte total, frente al 17,9 % de media en Europa. Esto son 10 644 millones de t-km, que, repartidas entre todos los españoles, son 0,6 t-km por día y persona. El coste energético medio del transporte ferroviario fue, en 2016, de 0,064 t-km.* Estos datos se han obtenido del informe publicado en el año 2016 bajo el título «Observatorio del Ferrocarril en España» y publicado por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- 131 **Figura 15.9.** El consumo energético de los barcos. Los cinco cuadrados de la figura son un barco mercante (46 km/h), un buque de carga seca (24 km/h), un petrolero (29 km/h), un buque de navegación interior (25 km/h) y el NS Savannah (39 km/h).

Buque de carga seca, 0,08 kWh/t-km. Un buque con una capacidad de grano de 5200 m³ transporta 3360 toneladas de peso muerto (el tonelaje del peso muerto es la masa que el buque puede transportar). Viaja a una velocidad de 13 kn (24 km/h) y su único motor de 2 MW consume 186 g de gasolina por kWh de energía entregada (eficiencia del 42 %).

Petrolero. Un petrolero moderno emplea 0,017 kWh/t-km. Peso de la carga: 40 000 t. Capacidad: 47 000 m³. Motor principal: 11,2 MW de potencia. Velocidad a 8,2 MW: 15,5 kn (29 km/h). La energía contenida en el petrolero

es de 520 millones de kWh. Por lo tanto, el 1% de la energía del petróleo es empleada en el transporte del mismo si recorre un cuarto de la Tierra (10 000 km).

Ferri. La compañía de transporte Wilhelmsen ofrece transporte de vehículos con un coste energético entre 0,028 kWh/t-km y 0,5 kWh/t-km.

Fuente: IDAE <http://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/servicios/abastecimiento-y-depuracion-de-agua>.

- 132 *El coste de bombear agua alrededor del país y de tratar nuestras aguas residuales es aproximadamente de 0,16 kWh/d por persona.* En España la demanda de abastecimiento de agua para uso humano se estima en una horquilla entre los 160 y los 180 litros por persona y día. En total, para el conjunto del país se estima un caudal de agua de abastecimiento urbano de 3730 hm³ anuales y un volumen de agua residual tratada de 4450 hm³, justificándose la diferencia en que, aunque no toda el agua abastecida finaliza en un desagüe canalizado hacia la EDAR, la depuradora recibe también aguas de lluvia y de otros posibles efluentes. La energía asociada a estos tratamientos se estima para captación, abastecimiento y distribución de agua urbana y supone un consumo de electricidad en bombeo de 447 GWh/año, y en depuración supone un consumo de electricidad de 2225 GWh/año. Repartiendo este consumo de energía entre todos los españoles, obtenemos los 0,16 kWh/d por persona. Fuente: IDAE <http://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/servicios/abastecimiento-y-depuracion-de-agua>.
- 133 *Como ya sabemos, no desalamos todo el agua que consumimos, aunque, cada vez más, se desala agua para riego, por lo que el consumo energético real es de unos 0,15 kWh/d por persona.* «Los datos más recientes sobre la producción de agua desalada en España establecen una horquilla de entre 1,5 y 2 hm³/día (influye en la variación de la demanda la pluviometría anual) para las casi 1000 desaladoras existentes. Asumiendo la producción mínima de 1,5 hm³/día, y un consumo medio por ósmosis de 4,3 kWh/m³, cifra a la que hay que añadir otros 0,6 kWh/m³ por la captación y pre/pos tratamientos del agua, totaliza un consumo energético de 7,3 GWh/día y una potencia de demanda de 306 MW. Estimando una producción de 24 h/día durante 365 días/año, el consumo de electricidad en desalación se eleva a 2460 GWh/año». Fuente: IDAE, www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/servicios/abastecimiento-y-depuracion-de-agua.
- 133 *Los supermercados españoles consumen aproximadamente 7,4 TWh de electricidad al año.* Se estima que existe una superficie total aproximada de establecimientos de 12,6 millones de m² [106] y el consumo energético de los supermercados se estima en 587,5 kWh/m² según el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía).

Capítulo 16

Geotermia

Se conoce como *geotermia* a la energía térmica que se puede extraer de la Tierra. Esta energía se divide en dos grandes bloques. Por una parte, está la energía absorbida y almacenada por el terreno como consecuencia de la radiación solar, que se puede extraer después de la capa más superficial de la corteza terrestre. Esta energía geotérmica es de baja temperatura y se puede utilizar en sistemas de calefacción, como se explica en el Capítulo 21. Por otra parte, está el calor que realmente proviene del interior del planeta. En los puntos en los que la corteza terrestre es fina se pueden conseguir temperaturas lo suficientemente elevadas como para generar electricidad. En este capítulo analizaremos únicamente esta segunda forma de energía geotérmica.

La energía geotérmica del interior de la Tierra proviene de dos fuentes: de la descomposición radioactiva de la corteza terrestre y del calor que asciende desde el núcleo a través del manto. El calor del núcleo está ahí porque la Tierra estaba al rojo vivo, y todavía se está enfriando y solidificando. El calor del núcleo también se está recargando por la fricción de las mareas: la Tierra se flexiona debido a los campos gravitatorios de la Luna y el Sol, del mismo modo que una naranja cambia su forma si la apretamos y la hacemos rodar entre las manos.

La geotermia es una energía renovable atractiva porque está «siempre», al contrario que otras renovables que dependen del tiempo. Si construyésemos plantas geotérmicas, se podrían conectar o desconectar para seguir a la demanda energética.

Pero ¿cuánta geotermia tenemos a nuestra disposición? Hay dos tipos de fuentes geotérmicas: lugares concretos en los que la temperatura de la corteza terrestre es anormalmente elevada, típicamente asociados a actividad volcánica, como las islas Canarias (Figura 16.3); y ubicaciones normales en las que también se puede extraer energía del suelo, aunque no tan cómodamente.

La ubicación idónea para generar electricidad a partir de la geotermia es una de estas zonas concretas con altas temperaturas en el sub-

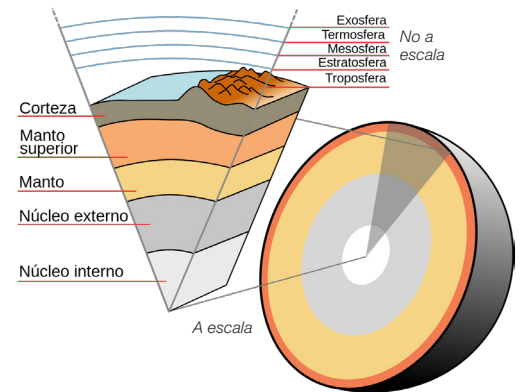


Figura 16.1: Sección de la Tierra.



Figura 16.2: Situación de las islas Canarias. Imagen obtenida de Google y Digital Globe obtenidas de Google Maps.

Figura 16.3: Las islas Canarias son un escenario perfecto para aprovechar el calor de la Tierra, ya que su potencial geotérmico es enorme. Foto de Verónica Martínez.



suelo, sin embargo, en España, esta situación se produce únicamente en Canarias, terreno que, además, está protegido por su interés natural. Por lo tanto, para estimar el potencial de generación a partir de la geotermia asumiremos que la totalidad del recurso proviene de localizaciones ordinarias.

La dificultad de producir energía geotérmica sostenible reside en la velocidad a la que el calor viaja a través de las rocas sólidas, ya que ésta limita el ritmo al que se puede extraer el calor de forma sostenible desde el interior de la Tierra, que se encuentra al rojo vivo. Es como intentar beber un granizado con una pajita. Al sorber de la pajita, te puedes llenar la boca de líquido frío. Sin embargo, si sigues aspirando, te das cuenta de que estás sorbiendo aire. En este punto has extraído todo el líquido del hielo que se encontraba alrededor de la punta de la pajita. Por lo tanto, la velocidad con que has sorbido no ha sido sostenible.

Si insertas un pajita en un agujero de 15 kilómetros de profundidad en la Tierra, te darás cuenta de que ahí abajo se está caliente, lo suficientemente caliente como para hervir agua. Por lo tanto, podrías insertar dos pajitas e introducir agua fría por una pajita, mientras que la extraes caliente por la otra. Así, estarás succionando vapor, que puede servir para operar una planta de generación eléctrica convencional. ¿Tendríamos energía ilimitada? No. Pasado un tiempo, tu succión de calor habrá reducido la temperatura de la roca, por lo que no estarías absorbiendo

de manera sostenible. Ahora, tienes un largo periodo de espera hasta que la roca de la punta de tus pajitas se caliente de nuevo. Una posible actitud para afrontar este problema es tratar el calor geotérmico como actualmente se hace con los combustibles fósiles: son una fuente para ser explotada, no son recolectados de una manera sostenible. Vivir del calor geotérmico de esta manera podría ser mejor para el planeta que vivir insosteniblemente de los combustibles fósiles; pero quizás sería solo otra medida que nos daría otros 100 años de vida insostenible. En este libro estamos más interesados en energía sostenible, tal y como el título indica; por lo tanto, vamos a hacer cálculos.

Potencia geotérmica que puede ser sostenible para siempre

En primer lugar, imagina extraer energía geotérmica de manera sostenible al insertar pajitas a una profundidad apropiada y succionando suavemente. Esta succión se hará de tal manera que las rocas al final de nuestras pajitas no se enfríen. Esto significa succionar a un ritmo natural, el ritmo al que el calor fluye naturalmente hacia el exterior de la Tierra.

Como hemos dicho antes, la energía geotérmica proviene de dos fuentes: de la descomposición radioactiva de la corteza terrestre y del calor que atraviesa el manto desde el núcleo. En una placa continental típica, el flujo de calor que atraviesa el manto desde el núcleo hasta el exterior es aproximadamente de 10 mW/m^2 . El flujo de calor en la superficie es de 50 mW/m^2 . Por lo tanto, la descomposición radioactiva añade 40 mW/m^2 al flujo de calor proveniente del centro de la Tierra.

De este modo, en un emplazamiento típico, la máxima potencia que se puede extraer por unidad de área es 50 mW/m^2 . Pero esta potencia no es potencia de alto nivel térmico, sino de bajo nivel, que está siendo emitida al ambiente. Probablemente queramos producir electricidad, por lo que tendremos que agujerear la Tierra, ya que el calor solo es útil si proviene de una fuente con mayor temperatura que el ambiente. La temperatura aumenta con la profundidad, como muestra la Figura 16.4, alcanzando una temperatura de aproximadamente 500°C a una profundidad de 40 km. Entre la superficie, donde el flujo de calor es mayor pero la temperatura de la roca es muy baja, y 40 km de profundidad, donde las rocas están más calientes pero el flujo de calor es 5 veces menor (ya que no se dispone del calor producido en la corteza por la descomposición radioactiva), hay una profundidad óptima a la que debemos succionar. Esta profundidad depende del tipo de succión y de la planta de genera-

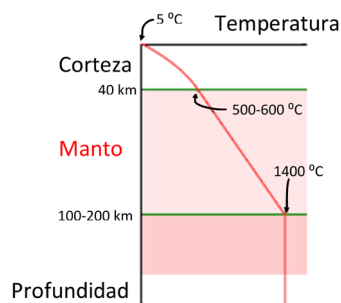


Figura 16.4: Perfil de temperatura en una placa continental típica.

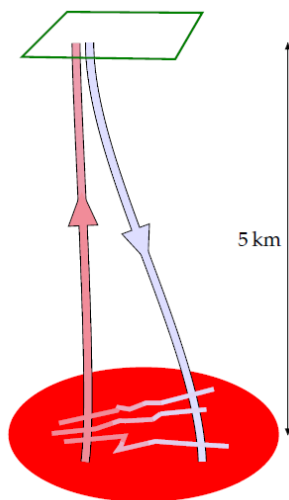


Figura 16.5: Sistema geotérmico estimulado de roca caliente seca. Se perfora y presuriza un pozo para crear fracturas. En el extremo de la zona fracturada se perfora un segundo pozo. Entonces, se bombea agua fría a través de un pozo y se succiona agua caliente (incluso vapor) por el otro.

ción que utilicemos. Podemos calcular la potencia máxima tras decidir la profundidad de succión. Así mismo, vamos a hacer la suposición optimista de que se dispone de un generador ideal que convierte todo el calor en electricidad, y que las perforaciones a cualquier profundidad son fáciles de realizar y gratis.

Viendo el perfil de temperaturas mostrado en la Figura 16.4, hemos calculado que la profundidad óptima son 15 km. Ante estas condiciones, un motor térmico ideal podría ofrecer 17 mW/m^2 . Con una densidad de población de 92 personas por kilómetro cuadrado, podríamos obtener **5 kWh por persona y día** si se utilizase toda la superficie del país.

Este es un escenario ideal, sostenible a largo plazo, ignorando los puntos calientes, asumiendo plantas de generación ideales, que se explota el 100 % de la superficie del país y que las perforaciones son fáciles y gratuitas. Fíjate que estamos suponiendo que es posible perforar agujeros de 15 km de profundidad, mientras que el agujero más profundo de la historia de la humanidad, el pozo de Kola, en Rusia, realizado con el objetivo de alcanzar la capa más profunda posible de la Tierra, mide 13 km. Los pozos más profundos que se hacen habitualmente son los destinados a la extracción de petróleo. Un pozo petrolero suele llegar a unos 3 km de profundidad. El más profundo, perforado en Uruguay, alcanzaba los 6 km; profundidades todas ellas lejos de los 15 km asumidos para el cálculo de la geotermia. Dado que el potencial ideal no es muy elevado y que el actual nivel tecnológico está lejos de permitir este aprovechamiento geotérmico, no lo incluimos en la pila verde.

Potencia geotérmica como minería

La otra estrategia geotérmica es tratar el calor como un recurso minero. En los «sistemas geotérmicos estimulados» destinados a aprovechar el calor de las rocas calientes secas (Figura 16.5), primero perforamos a una profundidad de 5 o 10 km y luego fracturamos las rocas bombeando agua a muy alta presión en su interior (este paso puede crear terremotos, lo que no es plato de buen gusto para los lugareños). Después, perforamos un segundo pozo en el extremo de la zona fracturada. De esta manera, bombeamos agua por un pozo y extraemos agua supercalentada, o vapor, del otro. Este vapor se puede utilizar para generar electricidad o para entregar calor.

¿Cuál es el recurso disponible de roca caliente en España? En España, hasta la fecha, no se ha instalado ninguna planta de generación eléctrica de origen geotérmico. En los años 2009 y 2010, se realizaron estudios para estimar el recurso geotérmico disponible en España. Las

islas Canarias se distinguen del resto del territorio peninsular español por la presencia de un recurso geotérmico de alta temperatura dada su naturaleza volcánica. En la península, el potencial de aprovechamiento del recurso geotérmico es menor, ya que las altas temperaturas se encuentran en profundidades mucho mayores, un factor que está directamente relacionado con los costes de instalación de las plantas.

Algunas fuentes estiman que la potencia geotérmica instalada en España para la producción de electricidad alcanzará un valor de 15 MW en 2020, situada en su totalidad en las islas Canarias. Teniendo en cuenta esta estimación y la población española, la potencia geotérmica podría ser de **0,008 kWh/d por persona**. Esta cantidad es tan pequeña que no la incorporaremos a nuestra pila de generación.

Notas y textos de consulta

Página

- 139 *El flujo de calor en la superficie es de 50 mW/m²*. El Instituto Tecnológico de Massachussets dice que la media son 59 mW/m², con un rango en Estados Unidos entre 25 mW/m² y 150 mW/m² [107]. Shepherd dice 63 mW/m² [86].
- 140 *En España, hasta la fecha, no se ha instalado ninguna planta de generación eléctrica de origen geotérmico*. Fuente: [108].
- 141 *Algunas fuentes estiman que la potencia geotérmica instalada en España para la producción de electricidad alcanzará un valor de 15 MW*. Fuente: [108].

Capítulo 17

Servicios públicos

Cada arma que se fabrica, cada barco de guerra que se bota, cada misil que se lanza significa, en última instancia, un robo a los que tienen hambre y no son alimentados, a los que tienen frío y no son arropados.

Este mundo armado no solo gasta dinero. Está gastando también el sudor de sus trabajadores, el ingenio de sus científicos, la esperanza de sus hijos.

Dwight D. Eisenhower
(Presidente estadounidense, abril, 1953)

El coste energético de la «defensa»

Intentemos estimar cuánta energía gastamos en nuestras fuerzas armadas. En 2015, la parte del presupuesto total del Gobierno central español que se destinó a defensa fue de un 5,7% (que supone un total de 12 715 millones de euros). Como aproximación, podemos suponer que un 10% de esos 12 715 millones de euros se destina a energía, adquirida a un precio medio de 0,08€/kWh. Teniendo en cuenta todos estos valores, se obtiene que un total de 16 TWh anuales se destinan a defensa: para fabricar munición y bombas; para fabricar artefactos que lanzan esa munición y esas bombas, y para desplegar las tropas. Este consumo es de casi **1 kWh por persona y día**.

El coste de la defensa nuclear

El desembolso económico de los Estados Unidos para la fabricación y el despliegue de armas nucleares entre 1945 y 1996 fue de 5,5 billones de dólares (con su valor en 1996).



Figura 17.1: El tanque de un tanque puede albergar unos 1000 l de gasoil.

Este gasto en armas nucleares durante todo el periodo es superior al gasto conjunto en educación, agricultura, empleo y servicios sociales, recursos naturales y medio ambiente, ciencia, espacio y tecnología, desarrollo comunitario y regional (incluyendo la asistencia en desastres), cuerpos policiales y producción y regulación energética.

Si, otra vez, suponemos que el 10% de todo este desembolso se corresponde con el gasto energético y asumimos un precio de la energía de 0,08€/kWh, vemos que el coste energético de tener armas nucleares fue de 26 000 kWh por estadounidense, o 1,4 kWh al día por estadounidense (repartido entre los 250 millones de estadounidenses en 51 años).

¿Qué cantidad de energía se habría liberado si todas estas armas nucleares se hubieran utilizado? La energía de las armas termonucleares más potentes desarrolladas por Estados Unidos y la Unión Soviética se mide en megatoneladas de trinitrotolueno, TNT). La explosión de una tonelada de TNT se corresponde con una energía de 1200 kWh. La bomba que destruyó Hiroshima tenía una energía de 15 kilotoneladas (18 millones de kWh). Una bomba de un megatón libera una energía de 1200 millones de kWh. Si se lanzara sobre una ciudad de un millón de habitantes, esta bomba repartiría 1200 kWh de energía a cada persona, equivalente a 120 l de petróleo por persona. La bomba termonuclear más grande jamás construida es la bomba del Zar, probada por la Unión Soviética en 1961, y tenía un poder de 50 megatoneladas. Teóricamente se pueden construir bombas de más de 1000 megatoneladas, pero a día de hoy se consideran ineficientes. En lugar de eso, un misil balístico intercontinental suele cargar varias bombas de racimo de alrededor de 1,5 megatoneladas. La energía total del arsenal nuclear de Estados Unidos a día de hoy se estima en 3300 megatoneladas, contenida en 6600 cabezas nucleares [109]. Hace unos años, durante la carrera nuclear que tuvo lugar tras el fin de la Segunda Guerra Mundial, el arsenal nuclear de Estados Unidos ascendía a 20 000 megatoneladas. Aquellas bombas, si hubiesen sido utilizadas, habrían liberado una energía de aproximadamente 100 000 kWh por ciudadano estadounidense, que es equivalente a 9 kWh al día por persona *durante 30 años*, cantidad equivalente a la generación actual de los 99 reactores nucleares estadounidenses juntos (9 kWh/p/d en 2016).

Coste energético de fabricar material nuclear para bombas

Los principales materiales nucleares son el plutonio, del cual Estados Unidos ha fabricado 104t; y uranio altamente enriquecido (HEU del in-

glés: *high-enriched uranium*), del cual Estados Unidos ha producido 994 t. Para fabricar estos materiales también se utiliza energía.

Las instalaciones más eficientes de producción de plutonio requieren 24 000 kWh de calor para producir 1 gramo de plutonio. Por lo tanto, el coste energético de producir esas 104 t de plutonio (1945-1996) fue de, al menos, 2,5 billones de kWh que corresponde a un consumo de 0,5 kWh al día por persona (si repartimos la energía total entre 250 millones de ciudadanos estadounidenses).

El principal gasto energético al fabricar HEU es el relacionado con el enriquecimiento. Se requiere energía para separar los átomos ^{235}U y ^{238}U en el uranio natural para crear un producto final que es más rico en ^{235}U . La producción estadounidense de 994 t de uranio enriquecido (entre 1945 y 1996) tuvo un coste energético de, aproximadamente, 0,1 kWh al día por persona.

Hay gente que defiende esta industria nuclear porque crea muchos puestos de trabajo, pero como afirmó el humorista británico Marcus Brigstocke, refiriéndose al programa nuclear Trident del gobierno del Reino Unido:

«Trident crea empleo». Bueno, también lo crea revestir los colegios con amianto, pero eso no significa que debemos hacerlo.

Marcus Brigstocke

Universidades

Según una entrevista a Javier Benayas en el periódico *Expansión*, quien fue secretario de la Comisión de Calidad Ambiental, Sostenibilidad y Prevención de Riesgos de la Conferencia de Rectores de las Universidades Españolas, el consumo medio por estudiante universitario es de 1200 kWh de energía eléctrica cada año. Como el sistema universitario tiene aproximadamente un millón y medio de estudiantes, el gasto total eléctrico anual es de 1800 millones de kWh. Si repartimos esta cantidad entre el total de la población española, supone 0,1 kWh al día por persona. Supongamos que el gasto energético de gas para calefacción es el mismo que el eléctrico que acabamos de calcular, de modo que podremos estimar el gasto total energético, no solo el correspondiente a la electricidad. Así, el gasto total asciende a 0,2 kWh al día por persona.

Como vemos, la educación superior y la investigación tienen un coste energético muy inferior al que tiene el juego defensivo de la guerra.

Desde luego que hay otros muchos servicios públicos que consumen energía de los que podríamos hablar (tren, metro, autobús urbano, escuelas, hospitales, polideportivos, etc.), pero empiezan a ser casi despreciables (inferiores a 1 kWh/p/d). Con el ánimo de mantener una visión clara

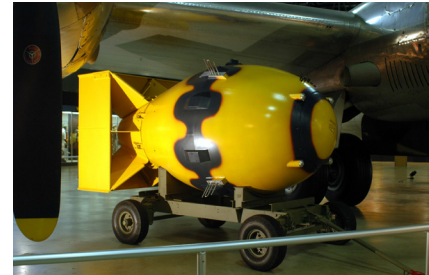


Figura 17.2: «Fat Man». Bomba nuclear similar a la lanzada sobre Nagasaki (Japón) el 9 de agosto de 1945, casi al final de la Segunda Guerra Mundial. Imagen de las Fuerzas Aéreas de EE.UU.

del problema y focalizar en sus grandes componentes, dejamos estos y otros consumos fuera del análisis y damos por cerrada la carrera entre la pila roja y la pila verde.

Notas y textos de consulta

Página

- 143 *...presupuesto total del Gobierno central español que se destinó a defensa...* El coste del gasto militar en España así como el porcentaje del PIB destinado a esta partida en 2015 han sido extraídos de la página web del Banco Mundial [110], con datos del Instituto Internacional de Investigación para la Paz de Estocolmo. Para suponer la fracción de esa cantidad que se corresponde con gasto energético se ha utilizado el porcentaje del PIB gastado en energía en Navarra en el año 2015 [111].
- 143 *El desembolso económico de los Estados Unidos para la fabricación y el despliegue de armas nucleares entre 1945 y 1996 fue de 5,5 billones de dólares (con su valor en 1996).* Esta información está recogida en un libro titulado *Atomic Audit: The Cost and Consequences of U.S. Nuclear Weapons since 1940* y que resume el propio autor en un artículo de la organización NTI (Nuclear Threat Initiative) [109].
- 145 *El coste energético de producir esas 104 t de plutonio...* Ver [112].
- 145 *La producción estadounidense de 994 t de uranio enriquecido...* El uranio en su estado natural contiene un 0,7% del isótopo ^{235}U . En las centrales nucleares es necesario utilizar uranio enriquecido desde ese 0,7% hasta un 3-5%. A este producto se le conoce como uranio de bajo enriquecimiento (LEU del inglés *low-enriched uranium*). Sin embargo, para la fabricación de armas nucleares es necesario enriquecer el uranio hasta un 90% (HEU, uranio altamente enriquecido, del inglés *high-enriched uranium*). Para medir el gasto energético que se necesita realizar en ambos procesos, la industria nuclear utiliza la unidad de trabajo de separación (SWU en inglés: *Separative Work Unit*). Para producir 1 kg de ^{235}U en forma de HEU se requieren 232 SWU mientras que para obtener 1 kg de ^{235}U como LEU se necesitan 151 SWU. El mercado de los combustibles nucleares valoraba el SWU en aproximadamente 160\$. Actualmente se emplean dos métodos diferentes para este enriquecimiento del uranio: difusión gaseosa y gas centrifugado. El proceso de difusión gaseosa consume alrededor de 2500 kWh por cada SWU, mientras que las modernas plantas que emplean el método del gas centrifugado requieren únicamente 50 kWh por cada SWU [113]. La producción estadounidense de 994 t de uranio altamente enriquecido costó 230 millones de SWU, de donde podemos obtener el valor de 0,1 kWh al día por persona (suponiendo 250 millones de ciudadanos americanos y usando el dato de 2500 kWh/SWU como el coste del enriquecimiento por difusión).
- 145 *Así, el gasto total asciende a 0,2 kWh al día por persona.* El consumo eléctrico medio por estudiante se ha extraído de la entrevista realizada a Javier Benayas, antiguo secretario de la Comisión de Calidad Ambiental, Sostenibilidad y Prevención de Riesgos de la Conferencia de Rectores de las Universidades Españolas [114]. Para estimar el consumo total se han analizado los datos de la Universidad de Zaragoza, en la que el consumo energético correspondiente al gas natural es prácticamente el mismo que el consumo de la parte eléctrica [115].

Capítulo 18

¿Podemos vivir de las energías renovables?

La pila roja suma, hasta el momento, **95 kWh por persona y día**, mientras que la pila verde suma algo más de **182 kWh por persona y día**. ¡Una carrera favorable para las energías renovables! Pero, por favor, acordaos de que para calcular nuestra pila de producción hemos dejado de lado todas las restricciones económicas, medioambientales y sociales. Además, algunas de nuestras instalaciones renovables serán incompatibles entre sí: las huertas fotovoltaicas que ocupen un 1,5% de la superficie de España podrán entrar en conflicto con las semillas energéticas que ocupan el 38%.

Pero aunque la carrera sea favorable a las energías renovables, no significa que nuestro elevado consumo esté justificado. Por ejemplo, si consideramos que la eólica marina flotante no es una buena opción, por ser una tecnología poco madura a día de hoy, perdemos 26 kWh por persona y día. Además, incluso si nuestra pila verde supera a la roja con esta pérdida, no significa que podamos cubrir con energías renovables toda nuestra demanda. No puedes encender la televisión con comida de gato, de la misma manera que no puedes alimentar a tu gato con una turbina eólica. Existen diferentes formas de energía: química, eléctrica, cinética o calor, por ejemplo. Para nuestro plan sostenible necesitamos que coincidan la forma y las cantidades de energía que se generan y se consumen. Transformar la energía de una forma a otra, de química a eléctrica, en una central térmica de combustibles fósiles, o de eléctrica a química, como en una fábrica que obtenga hidrógeno a partir del agua, implica unas pérdidas importantes de energía útil. Volveremos a este detalle importante en el Capítulo 27, en el que describiremos algunos planes energéticos que contribuyen a marcar la diferencia.

Aquí reflexionaremos sobre nuestras estimaciones de producción y consumo, comparándolas con las estimaciones realizadas por otros y con las medias oficiales. También hablaremos sobre la cantidad de energía que sería factible generar en un país como España.

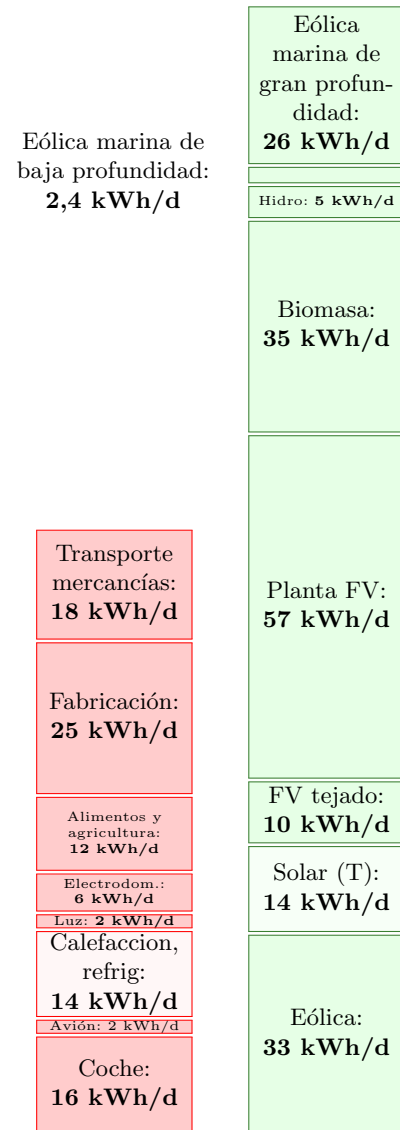


Figura 18.1: Así queda la carrera entre la generación y el consumo una vez que se han añadido todas las renovables.

Las cuestiones que afrontaremos en este capítulo son:

1. ¿Es el tamaño de la pila roja el correcto? ¿Cuál es el consumo *medio* en España? Miraremos los datos oficiales del consumo energético en España y otros países.
2. ¿Hemos sido injustos con las renovables infravalorando su potencial? Compararemos las estimaciones en la pila verde con las estimaciones publicadas por organizaciones como el MINETAD (Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital) y Greenpeace.
3. ¿Qué pasa con la pila verde cuando se tienen en cuenta restricciones sociales y económicas?

Reflexiones rojas

Nuestra estimación del consumo típico de una persona en la Figura 18.1 ha alcanzado **95 kWh por persona y día**. Lo cierto es que mucha gente utiliza esta cantidad de energía cada día, y que muchos otros aspiran a alcanzar este nivel. El americano *medio* consume **220 kWh al día**. Si todos aumentáramos nuestro consumo al nivel americano, la carrera entre generación y consumo se decantaría del lado del consumo y, definitivamente, muchos países con mayor densidad de población que España serían incapaces de abastecerse con energía renovable.

¿Qué hay del consumo medio europeo y del español? El consumo medio europeo de «energía primaria» (es decir, la energía contenida en los combustibles fósiles, más el viento, el sol y la hidroelectricidad) por persona y día es de **112 kWh por persona y día**. El consumo medio en España es de **85 kWh por persona y día**, según los datos del IDAE de 2017.

Estas medias oficiales dejan de lado dos importantes flujos de energía. El primero es la energía involucrada en la fabricación de *cosas* importadas (la energía gastada en producir estas cosas no se tiene para nada en cuenta). Por lo general, los países desarrollados importan materias primas y exportan productos acabados con mayor valor añadido. De esta forma, a pesar de que en el Capítulo 15 se ha dicho que las importaciones y las exportaciones son similares en términos económicos, es previsible que las importaciones sean superiores a las exportaciones en peso, y en términos energéticos. Podemos suponer que la diferencia entre las importaciones y las exportaciones es de unos 10 kWh/día y persona. En segundo lugar, las estimaciones oficiales de «energía primaria consumida» incluyen solo los flujos energéticos industriales, como por ejemplo combustibles fósiles e hidroelectricidad, pero no considera la energía incluida en la comida: energía que fue inicialmente capturada

por la fotosíntesis de las plantas. En nuestros cálculos, estimamos que la energía en la comida es de 12 kWh/p/d. Con estas consideraciones, eliminaríamos de nuestra pila de consumo 22 kWh/p/d, por lo que nos quedaríamos en 74 kWh/p/d. Al hacer estas correcciones nuestra estimación para el consumo está por debajo de la media oficial de energía primaria, que en España es de 85 kWh/p/d. ¿A qué se debe esta diferencia?

Al calcular en la pila roja nuestras estimaciones para el consumo, hemos tendido a ignorar las pérdidas de energía al convertirla de una forma a otra y transportarla de un sitio a otro. Por ejemplo, la estimación para el «coche» cubría solo la energía del petróleo, pero no la energía utilizada en las refinerías que lo procesan, ni tampoco la que se gasta en transportarlo desde el lugar donde se extrae hasta donde se procesa, y desde allí hasta las gasolineras donde se distribuye el combustible. Del mismo modo, al producir electricidad a partir de combustibles fósiles, una parte importante de esta energía se pierde. Las pérdidas por conversiones en las centrales eléctricas suponen aproximadamente el 14% de la energía primaria total en España. Las pérdidas en las líneas de transmisión eléctrica son aproximadamente el 1,4% de la energía primaria total consumida. El cómputo oficial tiene en cuenta la energía inicial antes de las conversiones. De esta forma, las estimaciones que hemos realizado a lo largo del libro no hay que compararlas con la media nacional del consumo de energía primaria, sino con la media nacional de «energía final consumida».

Antes de comparar nuestra estimación con la media oficial, realicemos la última corrección en nuestras pilas. En el Capítulo 15 estimamos que transportar las cosas tenía un coste energético de 18 kWh/p/d. Este consumo se asociaba principalmente al transporte por carretera (12 kWh/p/d) y al transporte marítimo (5 kWh/p/d). Sin embargo, como es de suponer, no todo este consumo se produce en nuestro país, ya que los camiones que realicen rutas internacionales también repostarán en nuestros países vecinos, mientras que los barcos lo harán en puertos alrededor de todo el mundo. Además las estadísticas del IDAE no tienen en cuenta el transporte marítimo oficial. De este modo eliminaremos el consumo correspondiente al barco de nuestros cálculos. En cuanto al transporte de mercancías por carretera, computaremos para nuestro país únicamente la mitad del coste energético: 6 kWh/p/d. De este modo el transporte de mercancías y pasajeros supone un consumo de 25 kWh/p/d, muy cercano al oficial (Tabla 18.1). Estas dos correcciones suponen reducir el **consumo de energía final a 63 kWh/p/d**. ¿Es este número razonable? De acuerdo con el IDAE, el consumo de energía final en España en 2017 fue de 57 kWh/p/d, ¡muy cercano a nuestra estimación!

Mientras construíamos nuestra pila roja, hemos intentado imaginar la energía que consumía una persona típica, obteniendo un número muy

Tabla 18.1: Energía empleada en los distintos modos de transporte en España en 2017.

Transporte de mercancías y pasajeros	
Carretera	19 kWh/p/d
Ferrocarril	0,2 kWh/p/d
Marítimo interior	0,4 kWh/p/d
Aéreo	4,2 kWh/p/d
Otros	0,2 kWh/p/d
TOTAL	24 kWh/p/d

IDAE	Nuestros cálculos
Otros: 15,6 %	Otros: 11,9 %
Industria: 23,2 %	Industria: 24,2 %
Residencial: 18,5 %	Residencial: 23,6 %
Transporte: 42,7 %	Transporte: 40,3 %

Figura 18.2: Consumo de energía final en el año 2017 desglosado según su uso de acuerdo con el IDAE [116], a la izquierda, y nuestros cálculos, a la derecha.

cercano al real. Sin embargo, ¿ha desviado esta forma de calcular nuestra percepción de la importancia de cada una de las distintas actividades? Echemos un vistazo a los números oficiales. La Figura 18.2 muestra los porcentajes oficiales del uso de la energía final en España en el año 2017, comparándolos con los correspondientes a nuestras estimaciones.

El IDAE agrupa el consumo de energía en cuatro grandes categorías: transporte, residencial, industria y otros. Los consumos calculados a lo largo del libro se pueden clasificar en cada uno de estos grandes grupos. De esta forma, en transporte agruparemos los consumos del coche, vuelos y el correspondiente a transportar cosas. En residencial contaremos parte del consumo de luz (0,6 kWh/p/d, ya que el resto del consumo se realiza en el trabajo), calefacción, refrigeración (la parte correspondiente al consumo de viviendas: 10 kWh/p/d) y el consumo de los electrodomésticos en el hogar (4 kWh/p/d). En industria clasificaremos el apartado cosas restándole los 10 kWh/p/d correspondientes a las importaciones. Por último, en otros clasificaremos las partes restantes de luz, calefacción y refrigeración y electrodomésticos correspondientes al trabajo. Como se puede comprobar, los porcentajes obtenidos mediante nuestras estimaciones se corresponden muy bien con los datos oficiales. Todo esto nos permite concluir que no hemos perdido la perspectiva de las actividades que más energía consumen y que, por lo tanto, podemos seguir con nuestro libro sabiendo que los cálculos son coherentes.

Prestemos algo más de atención al transporte, ya que es el principal consumo. Con nuestros cálculos, hemos podido comprobar que recorrer todos los días en coche una distancia de 44 km consume una energía similar a realizar un vuelo intercontinental al año. La Tabla 18.1 muestra la importancia relativa de los distintos modos de transporte en el balance nacional. Queda claro que, en la media nacional, la aviación representa un consumo mucho menor que el transporte por carretera.

¿Cómo es el consumo de energía primaria de España comparado con el de otros países? La Figura 18.3 muestra el consumo de muchos países y regiones frente a su producto interior bruto (PIB). Existe una correlación evidente entre el consumo energético y el PIB de cada país: cuanto más alto es el PIB per cápita, más energía consume. Podemos ver en la figura que España se encuentra cerca de otros países europeos (cuadrados azules), como Italia o Reino Unido, países con un PIB elevado y consumos más moderados que economías similares de otros continentes.

La conclusión que podemos sacar es que España es un país típico europeo y que, por lo tanto, es un buen ejemplo para plantearse la siguiente cuestión: ¿cómo puede un país con una calidad de vida alta conseguir su energía de forma sostenible?

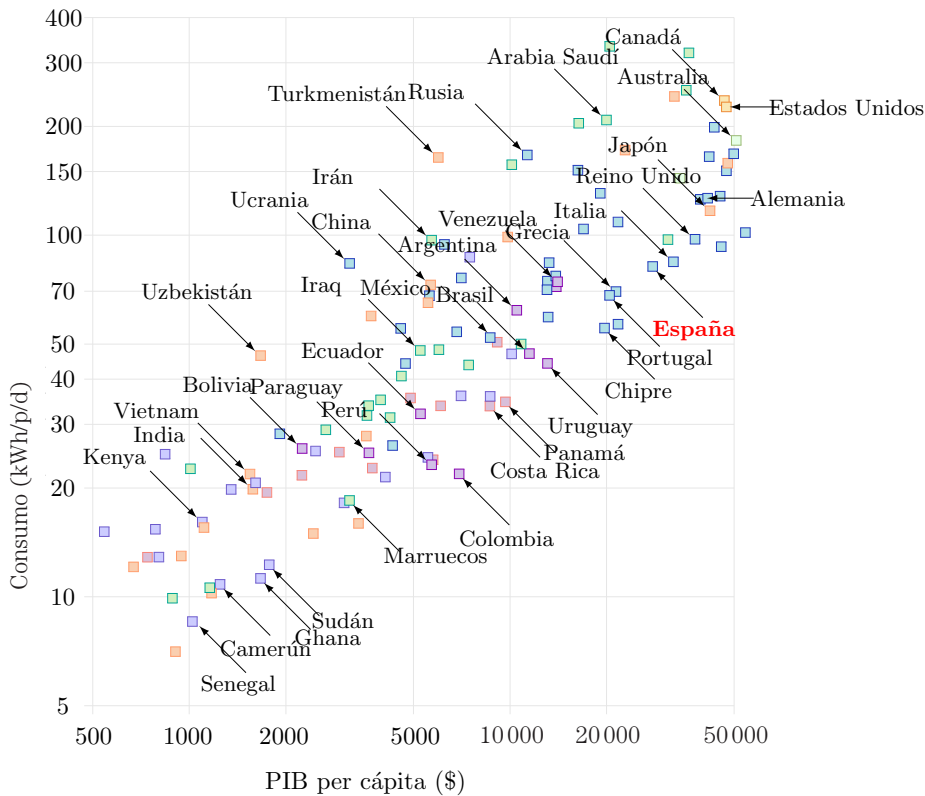


Figura 18.3: Energía consumida por día y por persona frente al producto interior bruto per capita en dólares americanos. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos del informe «Climate Data Explorer» de 2017, del Instituto Mundial de Recursos (World Resources Institute).

Reflexiones verdes

Hasta ahora, hemos ido comprobando que España posee unos recursos renovables muy buenos, especialmente en el caso de la energía solar. Pero ¿hemos sido demasiado benévolo con las energías renovables?, o, por el contrario, ¿hemos pecado de pesimistas a la hora de estimar la posible generación? Para responder a estas preguntas, vamos a comparar nuestros cálculos con las estimaciones para nuestro país publicadas en otros dos estudios. Pero antes de comparar estos números entre sí, veamos brevemente de qué fuentes se tratan y cuál era el objetivo de cada estudio.

- El Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital (MINETAD) publicó en el año 2011 el «Informe de sostenibilidad ambiental del Plan de Energías Renovables 2011-2020». En el anexo IV de este informe se realiza una evaluación del potencial de generación de las fuentes de energía renovable en España. Las estimaciones en este informe han de entenderse como techos máximos de generación.

- **Greenpeace** en su informe «Renovables 2050», publicado en 2005, realizó un análisis detallado del potencial de generación de las renovables en el territorio español peninsular. De nuevo, esta estimación, al igual que la anterior, ha de entenderse como un techo de generación.

Comparando las estimaciones de ambas entidades con las nuestras, Figura 18.4, podemos concluir que para nada hemos sobrevalorado las energías renovables, ya que en los otros dos cálculos la generación renovable supera con creces la que habíamos calculado nosotros. En el caso de la estimación del MINETAD, la generación renovable es casi 5 veces superior a la nuestra, mientras que en los cálculos de Greenpeace es algo más de tres veces. ¿Significa esto que hemos sido demasiado duros con las energías renovables? Si se consultan estos dos informes, podemos comprobar que las diferencias en el potencial de generación se deben, principalmente, al área que se decide cubrir en cada caso con una determinada fuente de generación renovable, y no al recurso estimado. Especialmente llamativo es el caso del potencial de generación solar en ambos informes, en los cuales han dado un gran peso a la generación solar termoeléctrica (ya volveremos a esta tecnología más adelante). Puede sorprender que en este libro se haya elegido la solar fotovoltaica frente a la solar termoeléctrica como la principal tecnología solar, pero esta diferencia atiende a la evolución de costes de ambas tecnologías. A día de hoy, la solar fotovoltaica tiene un coste mucho menor que la termoeléctrica, a diferencia de lo que ocurría cuando los anteriores informes fueron publicados. En cualquier caso, España es uno de los países europeos con mejor recurso solar, y eso explica que sea la principal fuente de generación renovable. Definitivamente, es una tecnología capaz de marcar la diferencia. En cualquier caso, debemos mantener la calma ante estos buenos números que acabamos de plantear, ahora mismo ya somos conscientes de la industrialización del terreno que sería necesaria para conseguir estos niveles de generación.

Otro informe interesante es el publicado recientemente por un grupo de investigadores, liderados por Mark Jacobson, en el que se analiza la posibilidad de que más de 139 países satisfagan con energías renovables sus niveles de consumo actuales. En este artículo no se proporcionan techos de generación, sino una combinación de fuentes renovables que permiten alcanzar el consumo oficial en estos países que, en el caso de España, es de 85 kWh por persona y día. Para los que estéis interesados en conseguir más información, podéis acudir al texto original [117]. En cualquier caso, a estas alturas ya os podéis imaginar la respuesta para España: sí se puede abastecer el consumo energético actual con renovables.

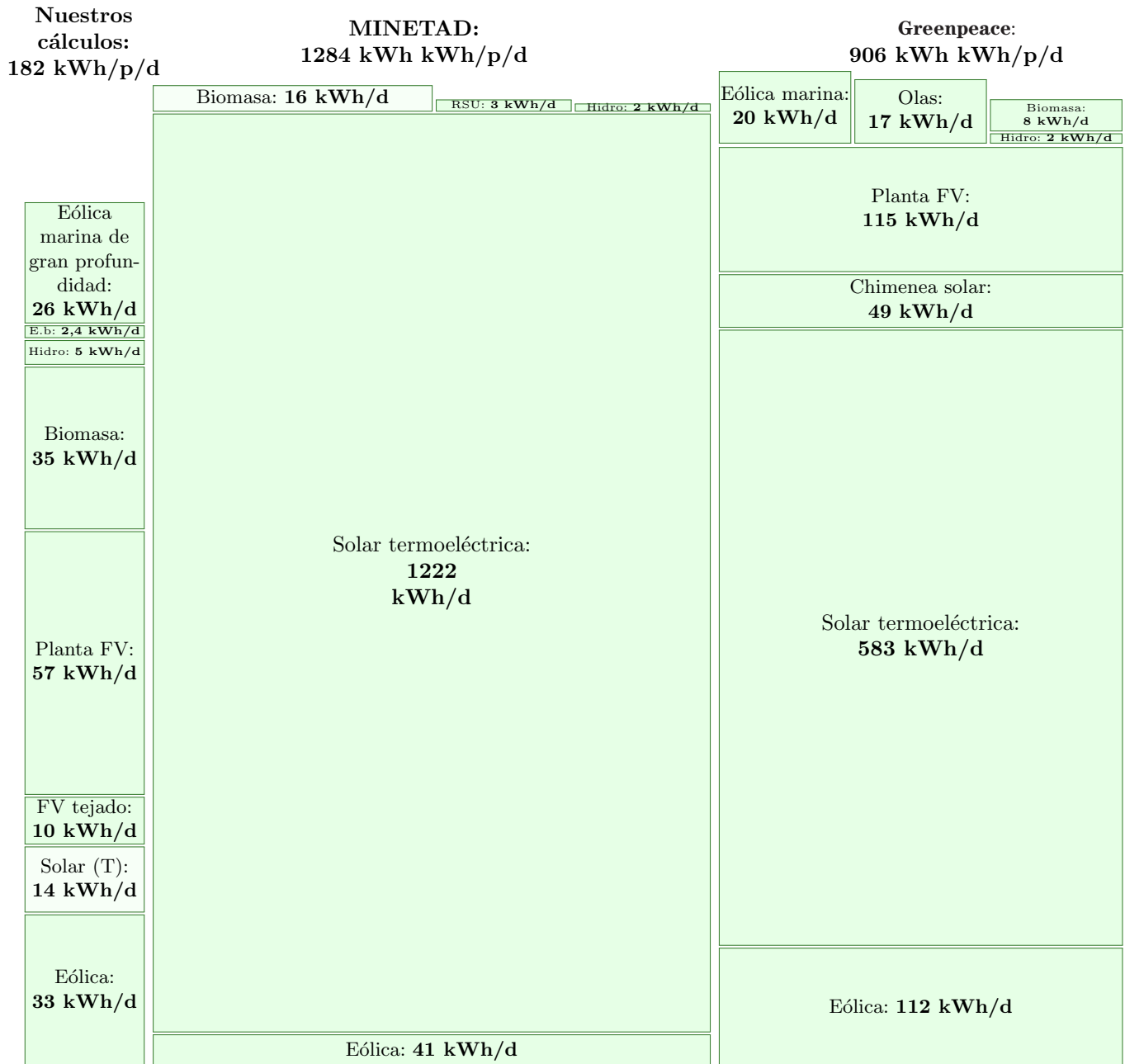


Figura 18.4: Comparación de las estimaciones sobre la generación renovable por persona y día elaboradas en este libro con los cálculos realizados por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital de España (MINETAD) y por Greenpeace.

La Europa renovable

Hay gente que hace la siguiente reflexión: «seguramente, en el pasado, la gente vivía abasteciéndose únicamente con energías renovables». Esto era cierto hasta la revolución industrial, pero hay que tener en cuenta dos aspectos que eran totalmente diferentes en esa época: el estilo de vida y la densidad de población.

Si retrocedemos 400 años en el calendario, Europa vivía básicamente de energías renovables: principalmente de la madera y las semillas, de la caza y pesca, y haciendo uso, en menor medida, del viento, de las mareas y de la energía del agua. Se estima que una persona de media consumía 20 kWh por día. La cantidad de madera usada era de 4 kg al día por persona, lo que significa que una persona necesitaba 1 hectárea (10 000 m²) de bosque. El área por persona en Europa en el año 1700 era de 52 000 m². En las regiones con mayor densidad de población, el área por persona era de 17 500 m² de tierra arable, pastos y bosques. Hoy en día, el área por persona es de apenas 4000 m², por lo que, aunque volviésemos al estilo de vida de la Edad Media y reforestásemos completamente el campo, no podríamos vivir de forma sostenible. Nuestra densidad de población es demasiado elevada. En cualquier caso, incluso en tiempos anteriores, el término *renovable* no ha sido necesariamente sinónimo de *sostenible*. Desde el principio de los tiempos el ser humano ha sido responsable de grandes deforestaciones por la necesidad de madera para obtener calor y ha contribuido, incansable, a la extinción de la mayoría de grandes mamíferos [118]. Llevamos esta voracidad en los genes. De ahí la necesidad de luchar por un uso sostenible del planeta.

Las ambiciones verdes se enfrentan a la realidad social



Figura 18.5: A veces los proyectos a gran escala de renovables suscitan rechazo en parte de la sociedad. Foto de Javier Samanes.

Aunque la Figura 18.1 muestra el gran potencial de las renovables en España, no es fácil que lleguemos a abastecernos de forma sostenible; al menos no con el consumo y los hábitos de vida actuales. Esta afirmación está en parte apoyada en el rechazo social que los proyectos a gran escala de renovables generan en parte de la sociedad. Recojamos algunas de estas opiniones:

- ¿Parques eólicos? No, estropean el paisaje y además son perjudiciales para las aves.
- ¿Solar fotovoltaica? Está bien, pero solo en los tejados de las casas, no estoy dispuesto a cubrir una superficie similar a la que ocupan las carreteras.

¿Biomasa?	Solo con los residuos de agricultura y la maleza limpiada del bosque.
¿Hidroelectricidad?	De acuerdo, pero solo pequeña hidráulica, ya que la gran hidráulica daña irreversiblemente el ecosistema.
¿Eólica offshore?	Ni en broma, ¿que pasará con el turismo si dañamos el paisaje del litoral?
¿Undimotriz y geotermia?	No, demasiado caras y poco maduras.

Después de estas objeciones sociales, la máxima producción renovable se vería reducida a 47 kWh/p/d, como se muestra en la parte derecha de la Figura 18.6, quedando la generación por debajo del consumo.

Estamos llegando ya al final de la primera parte de este libro. Al comenzar asumimos que queríamos deshacernos de los combustibles fósiles por alguna (o por todas) las razones enumeradas en el Capítulo 1: cambio climático, seguridad de suministro o cualquier otra que sea vuestra motivación. La Figura 18.7 muestra la energía que obtenemos a día de hoy de las renovables: representan un 14% del consumo total, todavía muy lejos de nuestro objetivo.

Las dos conclusiones que podemos sacar de esta primera parte del libro son:

1. *Para marcar la diferencia, las instalaciones renovables tienen que ser a escala nacional.* Si queremos que el viento haga una contribución significativa, debemos construir parques eólicos que ocupen una superficie algo mayor que la comunidad de Aragón. Para que la solar fotovoltaica marque la diferencia como una tecnología en la que confiar en esta transición energética, debemos cubrir un área superior a la que ocupan todas las carreteras españolas. Para que la biomasa juegue un papel relevante debería cubrir el 40% del territorio nacional.

Las instalaciones renovables serán forzosamente a gran escala, debido a lo difuso que es el recurso renovable. La Tabla 18.2 resume las potencias por unidad de superficie estimadas para España en esta primera parte.

2. *No va a ser sencillo conseguir una transición a una España 100% renovable.* Más aún cuando en la segunda parte de este libro se hable de la intermitencia de las fuentes renovables, ¿cómo cubriremos la demanda cuando no haya viento o tengamos varios días consecutivos nublados?

Tabla 18.2: Densidad media de potencia de los recursos renovables en España.

Potencia por unidad de área	
Viento	1,3 W/m ²
Viento offshore	2 W/m ²
Mareas	3 W/m ²
Fotovoltaica	4–18 W/m ²
Plantas	0,25–2 W/m ²
Agua lluvia (mitad norte)	0,12 W/m ²
Geotermia	0,017 W/m ²

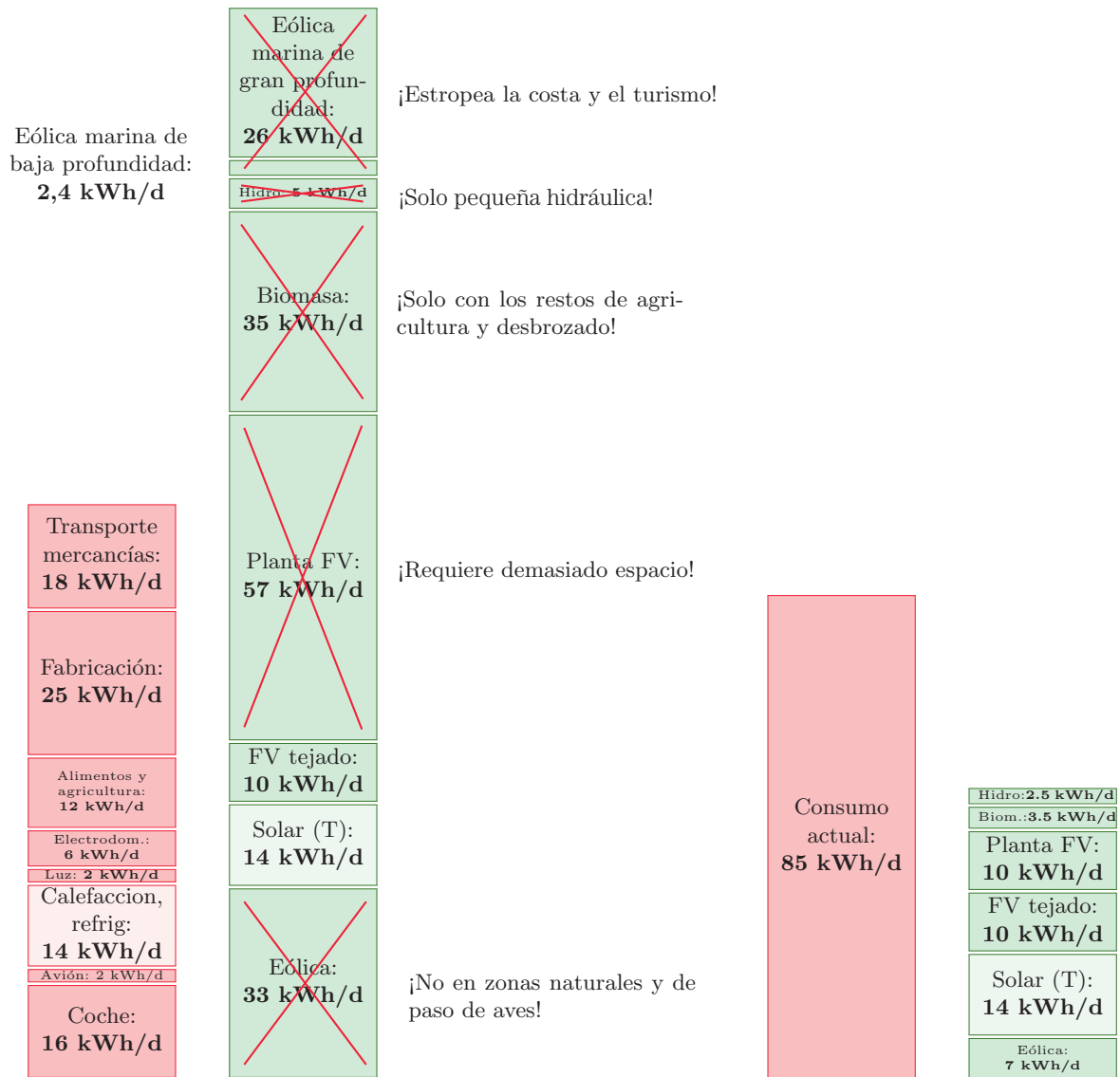


Figura 18.6: Posible escenario de generación renovable tras la consulta pública.

Después de la consulta pública. Tras tener en cuenta todas las críticas que reciben las renovables, plantear una generación renovable de **47 kWh por persona y día** ya es bastante optimista. El consumo, a su izquierda, es el promedio oficial de **85 kWh por persona y día**, el consumo medio de un ciudadano sin tener en cuenta las importaciones y la energía solar correspondiente a la producción de alimentos.

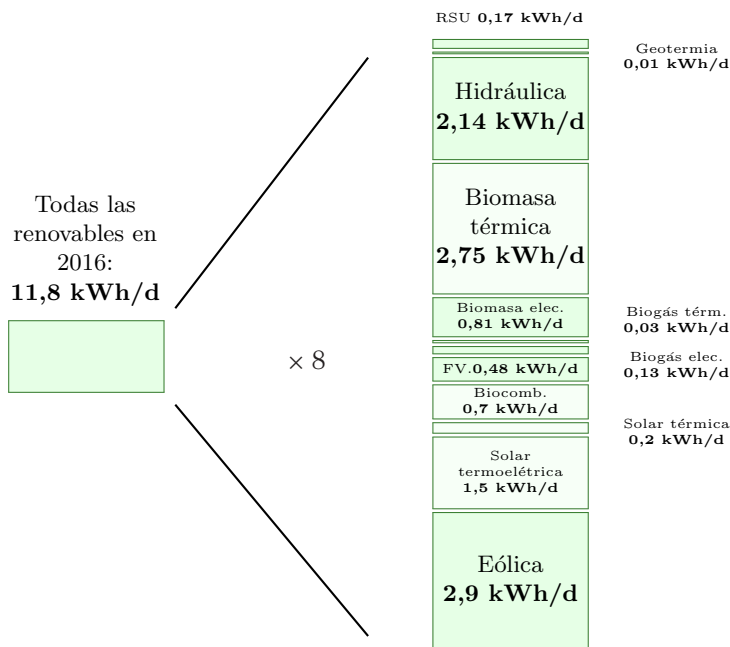


Figura 18.7: Producción de renovables en España durante el año 2016. Las unidades son las mismas de siempre: kWh por persona y día. A la derecha las renovables están amplificadas x8. Datos obtenidos del IDAE [116]. El dato de generación solar termoeléctrica viene dado en potencia media térmica. En realidad, esta se emplea en su totalidad para generar electricidad, generando, de acuerdo con los datos de Red Eléctrica de España, 0,3 kWh/p/d. RSU son las siglas de Residuos Sólidos Urbanos.

En la segunda parte de este libro, no solo trataremos de ver alternativas que nos permitirán solventar los problemas que han ido surgiendo en esta primera parte, sino que también revisaremos posibles medidas para aumentar la eficiencia de nuestros consumos, con el objetivo de reducir nuestras necesidades energéticas. Este es el primer paso a tener en cuenta para conseguir alcanzar la sostenibilidad.

Notas y textos de consulta

Página

- 149 *Las pérdidas por conversiones en las centrales eléctricas suponen aproximadamente el 14% de la energía primaria en España.* Una buena forma de obtener este dato es acudir al diagrama de Sankey, en el cual se representan todos los flujos de energía para el país seleccionado. En el caso de España las pérdidas en la conversión eléctrica durante el año 2017 fueron del 14%, mientras que las de transporte de electricidad en las líneas fueron del 1,4%. En total, contando pérdidas en las transformaciones, transporte y autoconsumos, el 30% de la energía primaria se pierde. Ver Figura 18.8. Datos adicionales en la fuente original.
- 154 *Se estima que una persona de media consumía 20 kWh por día [en la Edad Media].* Fuente: [119].

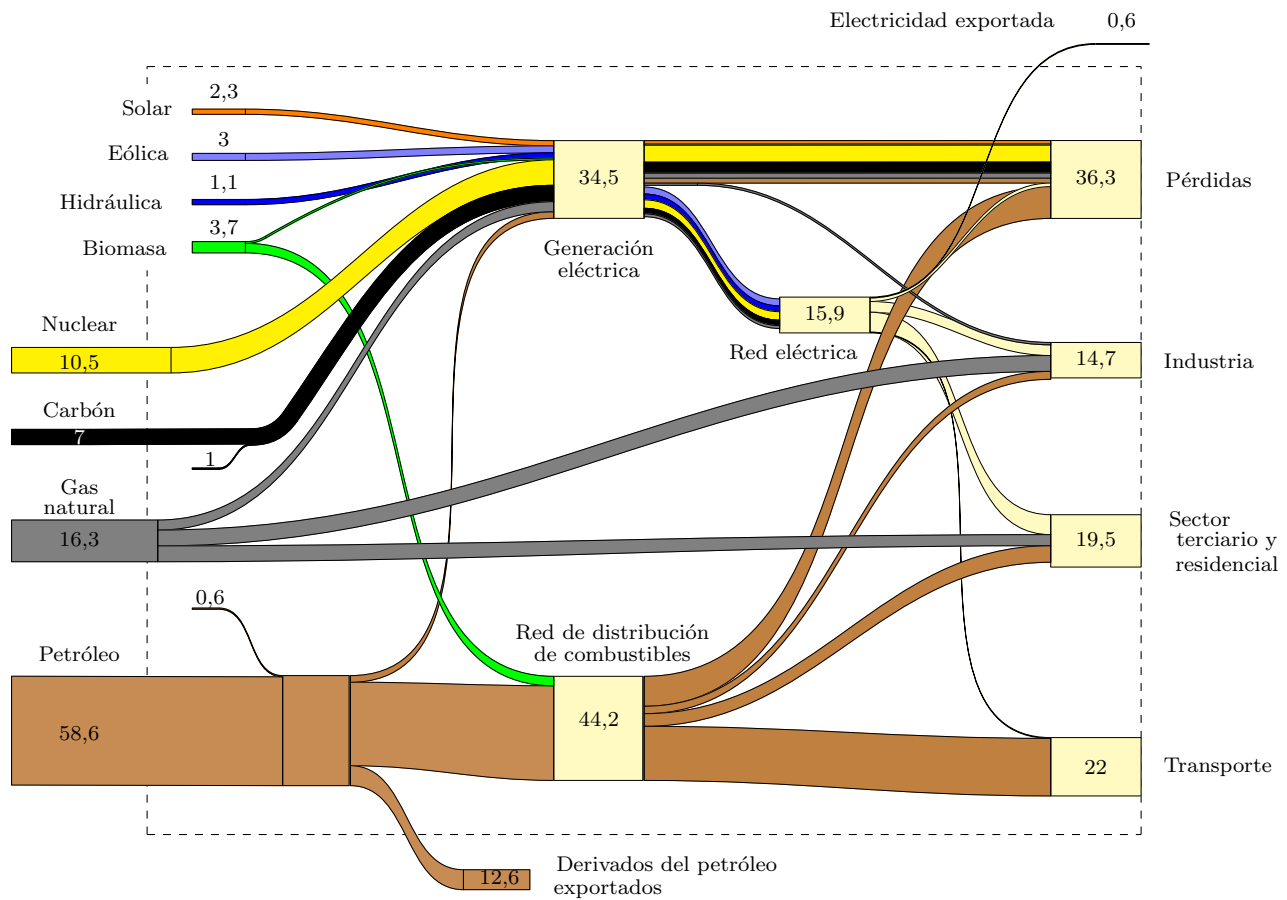


Figura 18.8: Diagrama de Sankey representando el flujo de la energía en España durante el año 2017 en kWh/p/d. Fuente de datos: Cátedra BP de Energía y Sostenibilidad, Universidad Pontificia de Comillas.

Parte II

Marcando la diferencia

Capítulo 19

Muchos pocos suman poco

Ya hemos visto que el estilo de vida que tenemos actualmente en España difícilmente se puede mantener a base de energías renovables, a menos que se cubran grandes áreas rurales y marítimas. Así que, ¿qué opciones nos quedan si queremos deshacernos de los combustibles fósiles y vivir de forma sostenible? Podemos equilibrar este sistema a base de reducir la demanda, incrementar el suministro renovable o, por supuesto, combinar ambas.

Pero no te hagas ilusiones. Para conseguir nuestro objetivo de deshacernos de los combustibles fósiles, estas reducciones de demanda y aumentos de generación tienen que ser *grandes*. No te despistes con el mito «muchos pocos suman mucho». *Si todo el mundo hace un poco, conseguiremos poco*. Debemos hacer mucho. Lo que hace falta son cambios *grandes* en la demanda y en el suministro.

«Pero seguro que si todos los 750 millones de europeos hacemos un poco, conseguiremos mucho». No. Estos «si todos» son unas máquinas de multiplicar que hacen que las cosas pequeñas *suenen* grandes. Estas máquinas «si todos» permiten construir inspiradoras frases del tipo «si todo el mundo hiciera X, conseguiríamos suficiente energía / agua / gas para hacer Y», donde Y suena muy impresionante. ¿Sorprende que Y suene grande? Por supuesto que no. Hemos conseguido Y multiplicando X por el número de personas involucradas: ¡750 millones! Veamos un ejemplo: este es un consejo dado a través de la plataforma online *twenergy*, una iniciativa de la empresa Endesa por la eficiencia y la sostenibilidad, según reza la propia página web en su cabecera:

Desconecta el cargador de móvil cuando no lo estés usando [...] si el 10% de usuarios de móvil desconectaran el cargador se ahorraría el equivalente al consumo de 60 000 hogares europeos en un año.

¿60 000? ¡Oh! ¡Cuántos hogares! ¡Apaga los cargadores! 60 000 es un montón, pero la comparación sensata de esta cantidad es el número total de casas que participan en nuestro enunciado, es decir, el 10% de

Como decía Stefan George, «ya vuestro número es un crimen»: el crimen de una sociedad en la que la población creciente agrava la lucha por la existencia.

José Ortega y Gasset

El crecimiento de la población mundial durante los próximos veinticinco años [...] es el problema fundamental de nuestra existencia.

Naciones Unidas

La democracia no puede sobrevivir a la superpoblación. La dignidad humana no puede sobrevivir a la superpoblación.

Isaac Asimov

220 millones, o 22 millones de hogares. 60 000 solo es un 0,25 % de los 22 millones de hogares. Así que, aunque la frase mencionada es verdad, sería mejor expresarla como:

Si dejas tu cargador de móvil enchufado, este usa un 0,25 % del consumo eléctrico de tu hogar.

¿Y si todo el mundo lo hace?

Si todo el mundo deja su cargador de móvil enchufado, esos cargadores usan un 0,25 % del consumo eléctrico de sus hogares.

El consumo de los cargadores de móviles es un tema muy recurrente en los medios de comunicación. En marzo de 2018 se publicaron sendas noticias en Andro4all [120] y en *20minutos.es* [121] que calificaban este consumo de energía como «realmente significativo», basando su argumentación en que, «si los habitantes de todo el mundo desenchufaran sus cargadores de móvil, se ahorraría la energía consumida por los 33 países del mundo con menor consumo».

La máquina de multiplicar «si todos» no sirve, ya que desvía la atención de la gente a 22 millones de pececillos en lugar de a 22 millones de tiburones. El mantra «pequeños cambios producen grandes resultados» no sirve de nada cuando se aplica al cambio climático y a la energía. Puede ser verdad que «mucha gente haciendo un poco suman mucho», si todos esos «pocos» se focalizan en un solo «mucho» –por ejemplo, si un millón de personas donan 10 € a una víctima de un accidente, entonces la víctima recibe 10 millones de €–. Eso es mucho. Pero la energía es una cosa muy diferente. Todos usamos energía. Así que, para conseguir una «gran diferencia» en el consumo total de energía, necesitas que casi todo el mundo haga un «gran cambio» en su propio consumo.

Por tanto, lo que hace falta son cambios *grandes* tanto en la demanda como en el suministro. La demanda se puede reducir de tres formas:

- Reduciendo la población.
- Cambiando nuestro estilo de vida.
- Manteniendo nuestro estilo de vida, pero reduciendo sus necesidades energéticas mediante «eficiencia» y «tecnología».

El suministro puede aumentarse también de tres formas:

- Podríamos librarnos de los combustibles fósiles desarrollando la tecnología del «carbón limpio». ¡Ups! El carbón es un combustible fósil. Bueno, no importa, vamos a darle una vuelta a esta idea. Si utilizamos el carbón de forma «sostenible» (enseguida definiremos

sostenible), ¿cuánta potencia nos podría ofrecer? Si no nos preocupa la sostenibilidad y nos centramos únicamente en la «seguridad del suministro», ¿nos ofrece esto el carbón?

- Podríamos invertir en fisión nuclear. ¿Es sostenible la actual tecnología nuclear? ¿Es al menos una solución temporal que puede durar unos 100 años?
- Podemos comprar, pedir o robar energía renovable de otros países; pero teniendo en cuenta que muchos países europeos, con mayor densidad de población que España, estarán en una situación peor que la nuestra y no tendrán energía renovable de sobra; y teniendo también en cuenta que utilizar energía renovable de otros países no hace que se reduzca mágicamente el número de centrales que hacen falta. Por tanto, si compramos energía renovable de otros países para evitar construir plantas de producción del tamaño de Murcia en nuestro país, alguien tendrá que construir centrales, aproximadamente del tamaño de Murcia, en esos otros países.

En los próximos seis capítulos hablaremos, primero, de cómo reducir nuestra demanda y, después, de cómo incrementar el suministro para cubrir esa demanda reducida, aunque todavía «enorme». En estos capítulos no vamos a mencionar *todas* las buenas ideas. Solo hablaremos sobre las ideas *grandes*.

España esquemática

Para simplificar y focalizar esta discusión sobre la reducción de la demanda, proponemos trabajar con un esquema del consumo energético de España, omitiendo muchos detalles con el fin de centrarnos en la situación global. Nuestra España esquemática consume solo tres tipos de energía: calor, transporte y electricidad. El consumo de calor de la España esquemática es de 18 kWh al día por persona (actualmente suministrado por combustibles fósiles); el consumo por transporte es de 35 kWh por persona y día (actualmente suministrado por combustibles fósiles), y el consumo eléctrico es de 16 kWh(e) por persona y día. El 60% de la electricidad se generó en el año 2016 con combustibles fósiles, y la eficiencia de conversión de combustibles fósiles a electricidad es del 40%, por lo que en la actual España esquemática se necesitan 25 kWh/p/d de combustibles fósiles para suministrar 16 kWh/p/d eléctricos. Esta simplificación ignora algunos detalles relativamente grandes, como la agricultura y la industria, y el consumo energético implícito en los productos importados. Pero nos gustaría poder tener una conversa-

ción *ágil* sobre las principales acciones que debemos llevar a cabo para librarnos de los combustibles fósiles. Calor, transporte y electricidad suponen más de la mitad de nuestro consumo energético total, por lo que, si diseñamos un plan que convierta el calor, el transporte y la electricidad en sostenibles, habremos dado un importante paso hacia un plan más detallado con resultados interesantes.

Tras estas simplificaciones, nuestra discusión sobre la reducción de la demanda tendrá tres partes. Primero, ¿cómo podemos reducir la demanda energética y eliminar los combustibles fósiles del transporte? Este es el tema del Capítulo 20. Segundo, ¿cómo podemos reducir la demanda energética y eliminar los combustibles fósiles de la calefacción? Este es el tema del Capítulo 21. ¿Y la electricidad? En el Capítulo 22 discutiremos sobre la eficiencia en el consumo eléctrico.

Por otro lado, analizaremos tres opciones de suministro –carbón limpio, nuclear y las renovables de otra gente– en el Capítulo 23, el Capítulo 24 y el Capítulo 25, respectivamente. Por último, en el Capítulo 26 se habla de cómo hacer frente a las fluctuaciones en la demanda y en la producción renovable.

Una vez que hayamos desgranado las opciones de reducción de la demanda y aumento de la generación, en los Capítulos 27 y 28 comentaremos varias formas de agrupar estos planes y conseguir el suministro para la calefacción, el transporte y la electricidad de nuestro esquema de España.

Podríamos dedicar muchas páginas a discutir «50 cosas que puedes hacer para vivir de forma más sostenible», pero este enfoque esquemático, que nos permite centrarnos en los tres peces más grandes, nos traerá políticas energéticas más productivas.

¿Y qué pasa con las «cosas»? Según hemos visto en la Parte I, ¡la energía implícita en las cosas que importamos puede ser el pez más grande de todos! Sí, quizás ese pez sea un tiburón ballena. Pero dejemos a un lado el intentar desfosilizar ese pez y centrémonos en los peces sobre los que tenemos un control directo.

Así que, vamos allá: hablemos sobre calefacción, transporte y electricidad.

Para el lector impaciente

¿Estás deseoso de conocer el final de la historia ya mismo? Aquí te adelantamos un breve resumen de la Parte II.

Primero, electrificamos el transporte. Esta electrificación consigue tanto librar al transporte de combustibles fósiles como hacerlo más eficiente. (Por supuesto, la electrificación hace que aumente nuestra demanda de electricidad verde).

Segundo, para complementar la calefacción solar térmica, electrificamos la mayor parte de los calentadores de aire y agua de los edificios utilizando *bombas de calor*, que son cuatro veces más eficientes que los calentadores eléctricos tradicionales. Esta electrificación aumenta más todavía la demanda de electricidad verde.

Tercero, abastecemos toda la demanda de electricidad a partir de tres fuentes: nuestras propias renovables, quizás una pequeña parte de carbón y gas, que consideraremos sostenible, y quizás nuclear.

También tendremos en cuenta que otros países de nuestro entorno, especialmente en el centro de Europa, reciben menor radiación solar y tienen densidades de población superiores, por lo que necesitarán importar energía renovable de otros países. La energía solar que nos sobra a los países del sur y la conseguida en los desiertos es la opción más factible. Siempre y cuando se construyan colaboraciones internacionales pacíficas, la energía solar tiene potencial técnico real para proporcionarnos a nosotros, a ellos y a todos 125 kWh al día por persona.

¿Alguna pregunta? Sigue leyendo.

Capítulo 20

Mejorando el transporte

Aproximadamente destinamos al transporte un tercio de toda la energía que empleamos. ¿Puede la *tecnología* llevar a cabo una reducción en este consumo? En este capítulo exploraremos las diversas opciones que tenemos para tratar de conseguir dos objetivos: alcanzar la mayor reducción posible en la energía que se gasta en el transporte, y eliminar el empleo de combustibles fósiles en dicho sector.

El transporte ya ha sido analizado en tres de nuestros capítulos de consumo: en el Capítulo 3 (Coches), el Capítulo 5 (Aviones) y el Capítulo 15 (Transporte de mercancías por carretera y por mar). Tenemos, por tanto, dos tipos de transporte que abordar: el transporte de pasajeros y el de mercancías. Nuestra unidad para el primer tipo es el pasajero-kilómetro (p-km). Es decir, si un coche lleva a un pasajero a otro lugar situado a 100 km, estará realizando un transporte de 100 p-km. Si, por ejemplo, lleva a cuatro pasajeros hasta el mismo punto, habrá entregado 400 p-km. De igual manera, nuestra unidad para el transporte de mercancías es la tonelada-kilómetro (t-km). Si un camión transporta una carga de 5 toneladas durante una distancia de 100 km, habrá entregado un total de 500 t-km de mercancías. Mediremos el consumo energético del transporte de personas en «kWh por 100 pasajeros-kilómetro» y el consumo energético del transporte de mercancías en «kWh por tonelada-kilómetro».

Comenzaremos este capítulo hablando sobre cómo reducir el consumo energético del transporte terrestre. Para entender cómo conseguir esta reducción es necesario entender primero cómo se emplea la energía en este tipo de transporte. A continuación se presentan tres conceptos clave, que se explican con más detalle en el Apéndice A.

1. En viajes de corta distancia, con múltiples arranques y paradas, la energía se destina principalmente a acelerar a los vehículos y a sus ocupantes. Las estrategias para consumir menos en este tipo de transporte consistirían, por tanto, en pesar menos y aumentar la distancia entre las paradas. El freno regenerativo, que es ca-



Figura 20.1: El punto de partida de este capítulo: un tractor urbano de lujo. Un coche nuevo en España tiene un consumo urbano de combustible de 6l a los 100km, que se corresponde con un consumo energético aproximado de **60kWh por cada 100km**. ¿Podemos mejorarlo? Foto de Wikimedia Commons (*TheSupermat*).

paz de capturar energía mientras se desacelera, puede contribuir también a este ahorro. Además, también ayuda moverse *más despacio* y moverse *menos*.

2. En los viajes más largos, donde se alcanza una velocidad constante, ya sea en tren o en coche, la mayor parte de la energía se emplea en hacer que el aire se deslice alrededor del vehículo, ya que solo tienes que acelerar el vehículo una vez. Las estrategias clave para reducir el consumo en este caso pasarían por *moverse más despacio*, *moverse menos* y utilizar vehículos *largos y finos*.
3. En todos los medios de transporte existe una cadena de conversión de energía: se toma energía de algún tipo de combustible y se emplea para empujar al vehículo hacia delante. Esta cadena, inevitablemente, tiene ineficiencias. En un coche tradicional de combustión (que emplee combustibles fósiles) solo el 25 % de la energía que contiene el combustible se emplea en este empuje, el otro 75 % se pierde en forma de calor. Por eso, una última estrategia para consumir menos energía sería conseguir que esta cadena de conversiones fuera más eficiente.

Todas estas observaciones nos llevan a seis principios en el diseño y uso de los vehículos para conseguir un transporte terrestre más eficiente, y son: a) reducción del área frontal por pasajero; b) reducción del peso del vehículo por pasajero; c) a la hora de viajar, tratar de hacerlo a una velocidad lo más constante posible, evitando usar los frenos; d) viajar más despacio; e) viajar menos, y f) utilizar una cadena de conversión energética más eficiente. Ahora analizaremos una gran variedad de formas de acercarnos a estos principios.



Figura 20.2: El coche del Equipo UMH gasta únicamente 0,6kWh por cada 100km. Foto cedida por el Equipo UMH.

Cómo rodar mejor

Un dato estadístico ampliamente citado dice algo así como que «solo el 1 % de la energía que se utiliza en un coche se emplea realmente para mover al conductor». De ser cierta esta conclusión, ¿podríamos, siendo un poco inteligentes, hacer que los coches fueran 100 veces más eficientes? La respuesta es sí, casi, pero solo si fuéramos capaces de aplicar, hasta el extremo, los principios de diseño y uso de los vehículos mencionados arriba.

Una demostración de este diseño extremo de vehículos son los llamados eco-coches, que tienen un área frontal muy reducida y muy

poco peso y que, además, si tienen que batir algún récord de bajo consumo, se mueven a velocidades constantes muy bajas. El Equipo UMH, de la Universitat Miguel Hernández de Elche, lleva años diseñando y construyendo coches, como el de la Figura 20.2, con el que han conseguido batir el récord de España en prototipos de combustión interna de bajo consumo, con 1555 km por litro de gasolina (**0,6 kWh a los 100 km**). Con un peso inferior a 50 kg, y sin superar la altura de un cono de tráfico, es capaz de acomodar a un conductor adolescente en su interior.

Pero seguro que el conductor del coche de la Figura 20.1 podría detectar un cambio en «apariencia, sensaciones y rendimiento» si se lo cambiamos por el coche de bajo consumo del Equipo UMH y le obligamos a mantenerse a una velocidad de 25 km/h. Por tanto, la idea de que podemos conseguir coches energéticamente 100 veces más eficientes es un mito. Volveremos más adelante al reto de construir coches más eficientes. Pero, primero, veamos otras formas de satisfacer los principios para un transporte terrestre más eficiente.

La Figura 20.3 muestra un vehículo para varios pasajeros que es, por lo menos, 25 veces más eficiente que el típico coche de gasolina. Se trata de la bicicleta, cuyo rendimiento (en términos de energía consumida por distancia) es poco mayor que el prototipo de bajo consumo descrito unas líneas más arriba. Su velocidad es la misma, tiene una masa inferior (ya que el ciclista sustituye al tanque de gasolina y al motor) y el área frontal efectiva es mayor, en este caso porque el ciclista es menos aerodinámico que la carrocería del coche del Equipo UMH.

La Figura 20.4 nos muestra otro posible sustituto al coche de gasolina tradicional: un tren, que tiene un consumo energético (si viaja completamente lleno) de aproximadamente **4 kWh por cada 100 pasajeros-km**. A diferencia del prototipo de bajo consumo y de la bicicleta, los trenes son capaces de conseguir eficiencias sorprendentes sin tener que viajar despacio y sin tener un bajo peso por pasajero. Este medio de transporte compensa su alta velocidad y elevado peso exprimiendo el principio de poca área frontal por persona. Así como un ciclista y un coche típico tienen un área frontal efectiva de aproximadamente $0,8 \text{ m}^2$ y $0,5 \text{ m}^2$ respectivamente, el AVE que circula entre Madrid y Zaragoza tiene un área frontal de tan solo $0,03 \text{ m}^2$ por pasajero.

¡Ups! Acabamos de sacar un tema desagradable, la posibilidad de compartir un medio de transporte con «toda esa gente horrible». Bueno, abordemos la cuestión y preguntémosnos: ¿Cuánto podría reducirse el consumo si pasáramos de vehículos personales devoradores de combustible a un transporte público perfectamente integrado?



Figura 20.3: «Bebé a bordo». Este medio de transporte tiene un coste energético de **1,6 kWh por cada 100 pasajeros-km**. Foto de FaceMePLS.



Figura 20.4: Este tren, a una velocidad de 140 km/h, consume aproximadamente **4 kWh por cada 100 pasajeros-km** si viaja completamente lleno. Foto de RENFE.

Figura 20.5: Algunos medios de transporte público, indicando sus consumos energéticos, considerando el caso más favorable, es decir, cuando van completamente llenos. El metro, un tren de alta velocidad, un autobús urbano y el SeaBus de Vancouver.



2,5 kWh por 100 p-km, cuando va lleno.



4 kWh por 100 p-km, cuando va lleno.



6 kWh por 100 p-km, cuando va lleno.



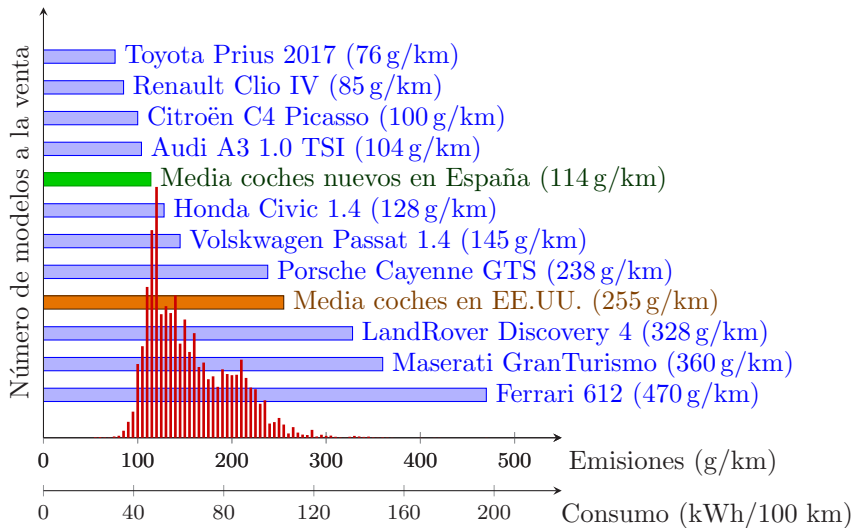
21 kWh por 100 p-km, cuando va lleno.

Transporte público

En el mejor de los casos, el transporte público compartido es mucho más eficiente, energéticamente hablando, que conducir coches de forma individual. Un autobús urbano, alimentado con diésel, transportando 50 pasajeros y recorriendo casi 3 km por cada litro de combustible a una velocidad media de 14 km/h, emplea **6 kWh por cada 100 pasajeros-km** –10 veces mejor que un coche individual–. El SeaBus, este ferri que lleva pasajeros entre el centro de la ciudad canadiense de Vancouver y la zona norte, tiene un coste de transporte de 83 kWh por cada km, con una velocidad media de 13,5 km/h. Puede llevar en cada viaje a un total de 400 personas, por lo que el consumo energético del transporte de pasajeros, cuando va lleno, es de **21 kWh por 100 p-km**. El metro de Madrid, en las horas punta, tiene un consumo de **2,5 kWh por 100 p-km** –13 veces menor que los coches individuales–. Incluso los trenes de alta velocidad, que violan dos de nuestros principios de eficiencia energética, ya que viajan al doble de velocidad que un coche y pesan varias toneladas, son mucho más eficientes: si el tren eléctrico de alta velocidad va lleno, su coste energético es de **4 kWh por 100 p-km** –es decir, 15 veces menor que el consumo de los coches–.



Figura 20.6: La mayor parte del tiempo los medios de transporte público no van completamente llenos.



Sin embargo, tenemos que ser realistas en nuestro planteamiento. Muchos de los trenes, autobuses y metros no circulan siempre llenos (ver Figura 20.6). Por tanto, el coste energético *medio* del transporte público es mayor que las cifras mencionadas (que se correspondían con los casos más favorables). Entonces, ¿cuál es el consumo *medio* del sistema de transporte público?, y ¿cuál sería una valoración realista de lo bueno que podría ser?

Teniendo en cuenta la ocupación media que los distintos vehículos de la flota del transporte público tienen en las ciudades, su consumo aumenta hasta valores de **15 kWh por 100 p-km** en el caso de las líneas de metro, de **12,6 kWh por 100 p-km** para los trenes de cercanías o de **30 kWh por 100 p-km** en el caso de los autobuses urbanos.

En resumen, el transporte público (en especial los trenes eléctricos, tranvías y autobuses) parece ser una manera prometedora para transportar pasajeros, quizás entre cinco y diez veces más eficiente que los coches en términos de energía consumida por pasajero-km. Sin embargo, si la gente requiere la flexibilidad de un coche privado, ¿cuáles son nuestras otras opciones?

Coches particulares: tecnología, legislación e incentivos

El consumo de energía de los coches particulares se *puede* reducir. La amplia gama de eficiencias energéticas de los diferentes modelos de coches a la venta es prueba de ello. En 2016 podías comprarte en España

Figura 20.7: Contaminación de carbono, expresada en gramos de CO₂ emitidos por km, de una selección de coches a la venta en España en 2016. En el eje horizontal se muestra la tasa de emisión y la altura del histograma rojo indica el número de modelos a la venta con esas emisiones. El segundo eje horizontal muestra el consumo combinado de estos modelos, suponiendo que se emiten 250 g CO₂ al consumir 1 kWh de energía química. Datos obtenidos del IDAE.



Figura 20.8: Ventajas para los vehículos eléctricos en algunos aparcamientos de Pamplona: carga gratuita y plaza reservada. Foto de Miguel Araiz.



Figura 20.9: Los coches monstruosamente grandes son lo suficientemente altos como para tapar completamente la visión y visibilidad de los peatones a los coches más pequeños.



Figura 20.10: Unas cuantas bicicletas aparcadas delante de la estación de tren de Osnabrück, Alemania. Foto de Miguel Araiz.



Figura 20.11: Mientras tanto, en España... Un carril bici en Pamplona que te lleva a ningún sitio. Foto de Miguel Araiz.

un Renault Clio que consume alrededor de 34 kWh cada 100 km o un Porsche Cayenne que emplea más de 95 kWh a los 100 km (ver Figura 20.7). El hecho de que la gente *compre* alegremente coches de todo el abanico disponible es prueba también de que necesitamos incentivos adicionales y otro tipo de legislación para animar a estos consumidores a que *elijan* coches más eficientes. Hay varias formas de convencer a la gente para que escojan antes un Renault Clio que un devorador de combustible como es el Porsche Cayenne: subiendo los precios de los combustibles, aumentando las tasas sobre los nuevos vehículos proporcionalmente al consumo durante la vida útil de cada coche, incrementando el impuesto de circulación a aquellos vehículos devoradores de combustible, con ventajas en los aparcamientos para los coches más eficientes (ver Figura 20.8) o racionando los combustibles. Todas estas medidas son impopulares, al menos para algunos votantes. Una mejor estrategia legislativa podría ser la de imponer la eficiencia energética de forma razonable, en lugar de continuar permitiendo que los consumidores puedan elegir entre un tipo de vehículos y otros. Por ejemplo, se podría simplemente prohibir a partir de una fecha la venta de cualquier tipo de vehículo cuyo consumo fuera superior a los 80 kWh a los 100 km, y después de un tiempo, reducir ese techo hasta los 60 kWh a los 100 km, y más adelante hasta 40 kWh a los 100 km y así sucesivamente. De forma alternativa, para dejar que los consumidores puedan elegir, la regulación podría darse sobre los fabricantes de coches quienes tendrían que reducir el consumo *medio* de energía de todos los vehículos que vendieran. Con una regulación mayor sobre el peso y el área frontal de los coches, se conseguiría de forma simultánea una reducción en el consumo de combustible y una mayor seguridad para los otros usuarios de la carretera (ver Figura 20.9).

La gente hoy en día elige su coche para llamar la atención y estar *a la moda*. Una legislación mucho más severa en términos de eficiencia no tendría por qué estar reñida con la moda. Podrías elegir cualquier color de coche, siempre que fuera «verde».

Mientras esperamos a que los políticos y los votantes se pongan de acuerdo para legislar a favor de coches más eficientes, ¿qué otras opciones tenemos?

Bicicletas

Nuestra recomendación favorita es la de proveer a la ciudadanía con excelentes servicios para las bicicletas, así como una legislación acorde con este medio de transporte (reducción de los límites de velocidad o regulaciones de circulación en favor de los ciclistas, por ejemplo). Si los

servicios de transporte en las ciudades se adecuan para las bicicletas, los ciudadanos empezarán a utilizar cada vez más este medio de locomoción, tal y como pone de manifiesto la gran cantidad de bicicletas aparcadas en las inmediaciones de la estación de tren de la ciudad alemana de Osnabrück (Figura 20.10). Desgraciadamente, los servicios ciclistas en alguna ciudades españolas (Figura 20.11) todavía no están igualados al estándar alemán.

Por suerte, hay otras ciudades que sí apuestan por este tipo de movilidad. En Zaragoza, desde 2008, cuentan con un servicio de transporte público basado en el uso compartido de la bicicleta. El servicio, denominado «Bizi», cuenta actualmente con 1300 bicicletas repartidas en las 130 estaciones distribuidas por toda la ciudad (ver Figura 20.12). Aunque no fue el primer servicio de este tipo que se incluyó en las ciudades españolas, sí que se ha convertido en uno de los más utilizados por los ciudadanos hoy en día, solo por detrás de ciudades como Barcelona o Valencia. Pagando una cuota anual de algo más de 30€ los usuarios pueden coger una de las bicicletas de cualquier estación y recorrer con ellas un trayecto de 30 minutos como máximo. Si se sobrepasa ese tiempo, se aplica un recargo extra. Servicios como este son cada vez más habituales en las grandes ciudades del país. Algunas, como Madrid con el servicio BiciMAD, incluyen bicicletas eléctricas que proporcionan una asistencia al pedaleo.

Otras oportunidades legislativas

Los límites de velocidad son un arma sencilla con la que se podría jugar. Por regla general, los coches que circulan más despacio consumen menos energía (ver el Apéndice A). Con un poco de práctica, los conductores podrían aprender a circular de manera más eficiente: utilizando menos el acelerador y el freno o usando siempre la marcha más alta se puede conseguir una reducción de un 20% en el consumo de combustible.

Otra forma de disminuir el consumo de combustible es reduciendo las congestiones de tráfico. Parar y arrancar; acelerar y frenar son formas mucho menos eficientes de desplazarse que hacerlo con una conducción más suave. Además, una forma muy fácil de malgastar el combustible es pasar mucho tiempo con el motor al ralentí mientras el coche está parado. Y no nos podemos olvidar del problema de contaminación que todas estas situaciones provocan y que tiene un impacto directo sobre la salud de la población.

Los atascos ocurren cuando hay demasiados vehículos en las carreteras. Por lo tanto, una manera sencilla de reducir esta congestión sería la



Figura 20.12: Estación de bicicletas del servicio de transporte público Bizi en Zaragoza. Foto del servicio Bizi.



Figura 20.13: Con atascos como este, es más rápido caminar. Foto de *Photopin*.

de concentrar a varios pasajeros en menos vehículos, por ejemplo, utilizando el autobús en vez de coches particulares. Una forma llamativa de reflexionar sobre este cambio es la de calcular el área de carretera necesaria en ambos medios de transporte. Consideremos una carretera principal al borde del atasco donde la velocidad deseada sería de 100 km/h. La distancia de seguridad entre dos coches que circulan por el mismo carril a esa velocidad es de 77 m. Si asumimos que hay un coche cada 80 m y que cada vehículo lleva a 1,6 pasajeros, entonces, al concentrar a 40 personas en un único autobús, podríamos liberar ¡2 km de carretera!

Las congestiones de tráfico se pueden reducir facilitando buenas alternativas (carriles bici, transporte público) y, también, cobrando un cargo extra a aquellos usuarios de las carreteras que contribuyan a los atascos.

Mejorando los coches

Si asumimos que, en el mundo desarrollado, el amor que existe por los coches no va a desaparecer, ¿qué tecnologías podrían lograr un ahorro significativo de energía? Alcanzar unos ahorros de un 10% o un 20% es relativamente sencillo, ya hemos hablado sobre cómo conseguirlos haciendo los coches más ligeros y más pequeños. Pero ¿existe realmente alguna tecnología que pueda incrementar radicalmente la eficiencia de la cadena de conversión energética? (Recuerda que en un coche tradicional de gasolina el 75% de la energía se transforma en calor y se libera a través del radiador). ¿Y qué hay del objetivo de abandonar los combustibles fósiles?

En esta sección discutiremos sobre cinco tecnologías: frenos regenerativos, coches híbridos, coches eléctricos, coches de aire comprimido y coches de hidrógeno.

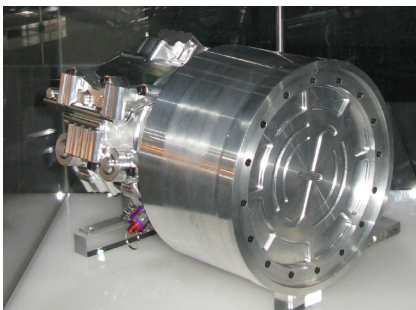


Figura 20.14: Un sistema de freno regenerativo basado en los volantes de inercia de la empresa Flybrid.

Frenos regenerativos

Existen cuatro formas de capturar la energía de un coche que está desacelerando.

1. Un generador eléctrico acoplado a las ruedas puede cargar una batería eléctrica o un supercondensador.
2. Motores hidráulicos movidos por las ruedas pueden generar aire comprimido que se almacene en un pequeño contenedor.
3. La energía se puede almacenar en un volante de inercia.

4. La energía del frenado se puede almacenar como energía potencial si se subiera al vehículo por una rampa cuando quisiéramos frenarlo. Esta energía gravitatoria es muy inflexible, ya que supondría disponer de rampas en lugares específicos. Esta es una opción mucho más útil en los trenes. De hecho, es un principio que se emplea en la línea Victoria del metro de Londres. Cada estación está situada en una plataforma elevada con respecto al resto del recorrido, de forma que los trenes que llegan a los andenes se frenan automáticamente debido a la pendiente, y, de igual manera, se aceleran al salir de la estación. Este diseño supone un ahorro de energía de un 5 % y hace que los trenes circulen un 9 % más rápido.

El frenado regenerativo eléctrico (que emplea una batería donde se almacena la energía eléctrica generada) es capaz de rescatar alrededor del 50 % de la energía de un coche en la fase de frenado, pudiéndose alcanzar una reducción de entre un 20 y un 35 % en el coste energético de la conducción por ciudad.

Los sistemas regenerativos basados en volantes de inercia y los que emplean sistemas hidráulicos son algo más eficientes que los basados en baterías eléctricas, logrando rescatar al menos un 70 % de la energía de frenado.

Los sistemas hidráulicos y los volantes de inercia son formas prometedoras de manejar el frenado regenerativo, ya que sistemas relativamente pequeños son capaces de lidiar con grandes cantidades de potencia. Un volante de inercia como el de la Figura 20.14 que pesa solamente 24 kg, diseñado para el almacenamiento de energía en coches de competición, puede almacenar 400 kJ (0,1 kWh) de energía, suficiente para acelerar un coche tradicional hasta casi los 100 km/h, y puede aceptar o entregar una potencia de 60 kW. Una batería eléctrica capaz de entregar toda esa cantidad de potencia pesaría alrededor de 100 kg. Así que, a menos que ya lleves una batería a bordo, un sistema de freno regenerativo eléctrico debería usar probablemente supercondensadores que almacenen esa energía de frenado. Los supercondensadores tienen una capacidad de almacenamiento y entrega de potencia similar a los volantes de inercia.

Coches híbridos

En los coches híbridos, como en el Toyota Prius de la Figura 20.15, se combinan al menos dos motores alimentados con diferente tipo de energía para mover las ruedas. Habitualmente, cuando se habla de co-



Figura 20.15: Un Toyota Prius. Foto de Karlis Dambrans.

che híbrido, se hace referencia a un vehículo que combina un motor de combustión interna, bien sea de gasolina o diésel, con un motor eléctrico más eficiente y que obtiene la electricidad necesaria para su funcionamiento de la frenada regenerativa, al soltar el freno del acelerador y cuando el motor de combustión entrega potencia de más. Según los fabricantes, estas tecnologías combinadas consiguen reducir el consumo de combustible entre un 30 y un 35 %. Como muestra el gráfico de la Figura 20.7, el Toyota Prius emite 76 g de CO₂ por km, menos que un coche medio en España, 114 g/km. Sin embargo, también hay otros coches que no son híbridos y que consiguen emitir menos que la media, como el Renault Clio, 85 g/km.

Existen también los llamados híbridos enchufables que, a diferencia del coche híbrido comentado en el párrafo anterior, permiten conectarse a una toma de corriente para recargar la batería y así no depender únicamente de la frenada regenerativa para obtener electricidad. De esta forma, se puede reducir el consumo y, por tanto, las emisiones en hasta un 65 %.

Estas reducciones de consumo son realmente sorprendentes, y cada vez más marcas de coches están comercializando modelos híbridos. Sin embargo, no es suficiente para alcanzar la idea inicial que propusimos en este libro de abandonar el uso de combustibles fósiles o, al menos, reducir su uso en un 90 %. Así que, ¿podemos conseguir este objetivo sin volver a la bicicleta?

Vehículos eléctricos

Aunque existen coches eléctricos desde hace muchos años (como el Flocken Elektrowagen de 1888), no fue hasta finales del siglo XX cuando se empezó a desarrollar este tipo de transporte tal y como se conoce hoy en día. Fue precisamente la preocupación por la contaminación del aire lo que llevó a la CARB (California Air Resources Board) a dictar el Mandato del Vehículo de Cero Emisiones, que impulsó la creación del modelo EV1 de la marca General Motors en 1996. Un vehículo completamente eléctrico de 1400 kg, con un motor de 139 CV (102 kW), que contaba con baterías de plomo-ácido de 16,5 kWh, otorgándole una autonomía de 113 km. La última versión de este modelo llegó a tener una autonomía de más de 220 km, un valor cercano a las que se están consiguiendo en la actualidad. Sin embargo, en 1999 General Motors consideró que el coche eléctrico no tenía futuro y decidió no solo dejar de producir este vehículo, sino también destruir todas las unidades que había fabricado hasta la fecha (ver Figura 20.16).



Figura 20.16: Cuando General Motors decidió acabar con su modelo EV1, optó por aplastar todos los coches que tenía hasta la fecha. Foto de Plug In America.

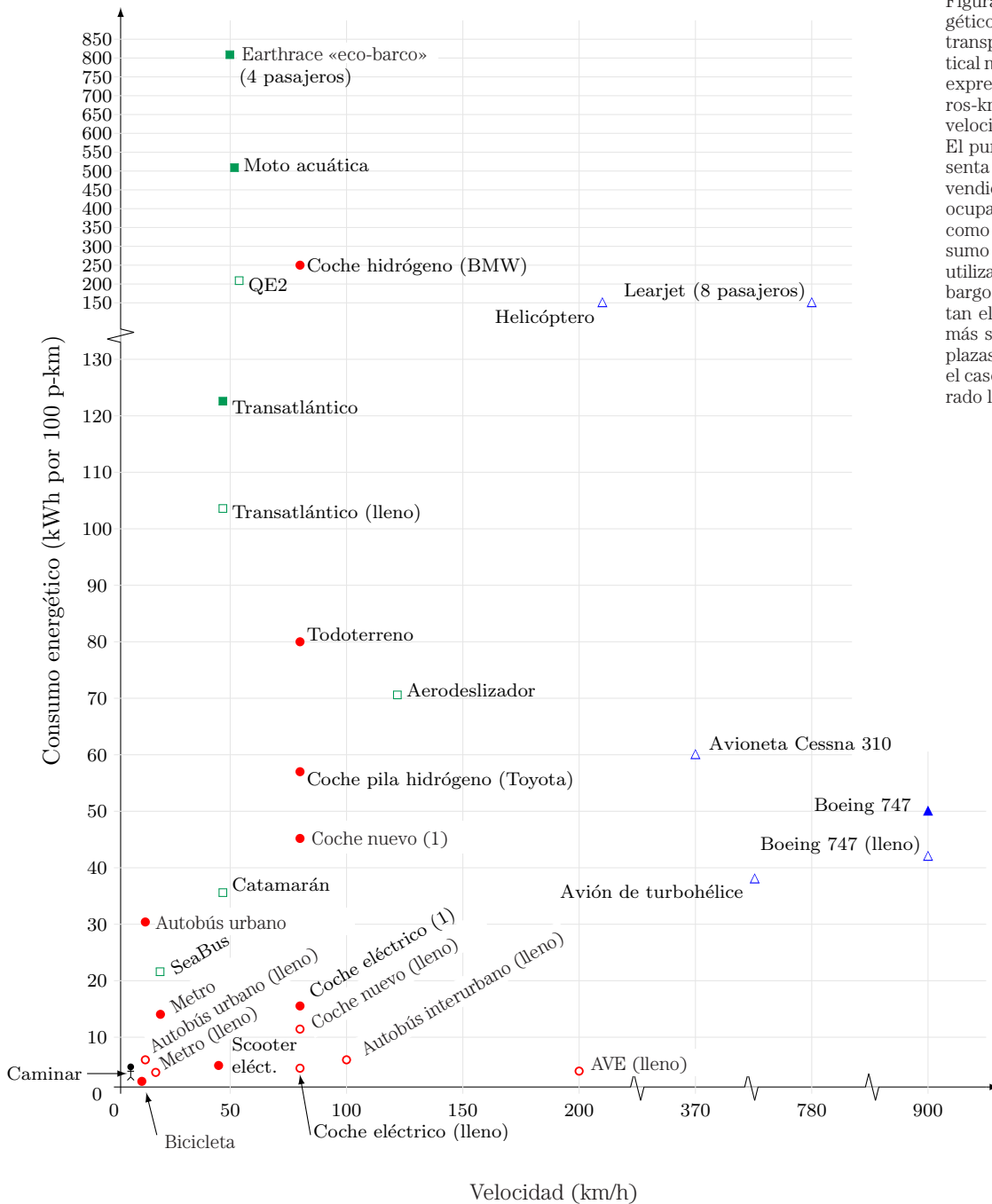


Figura 20.17: Requerimientos energéticos de diferentes medios de transporte de pasajeros. El eje vertical muestra el consumo energético expresado en kWh por 100 pasajeros-km. El eje horizontal indica la velocidad de cada medio en km/h. El punto «Coche nuevo (1)» representa el consumo del coche medio vendido en España con un único ocupante. Las marcas rellenas, como en este caso, muestran el consumo real del vehículo tal y como se utilizan de forma habitual, sin embargo, las marcas vacías representan el consumo suponiendo un uso más sostenible, ocupando todas las plazas disponibles del vehículo. En el caso de caminar no se ha considerado la huella de los alimentos.

Afortunadamente, no todas las empresas consideraron que el coche eléctrico no tenía su nicho de mercado y algunas decidieron apostar por el desarrollo de vehículos de este tipo. Es el caso de la empresa californiana Tesla Motors que ha demostrado la viabilidad de este producto creando varios modelos de coches puramente eléctricos, con prestaciones que nada tienen que envidiar a los tradicionales vehículos de combustión interna. Por ejemplo, su primer modelo, el Tesla Roadster, cuenta con un motor de 185 kW (248 CV) que le permite pasar de 0 a 100 km/h en tan solo 3,9 segundos. Este coche utiliza baterías de iones de litio de 53 kWh que le permiten circular sin recargas durante 360 km. Y no hace falta buscar coches tan exclusivos, otras marcas más habituales en las carreteras españolas como Renault o Nissan también tienen sus modelos eléctricos de berlinas como son el ZOE y el Leaf, respectivamente, con autonomías de entre 300 y 400 km.

Cada vez son más las empresas que disponen de una versión eléctrica de sus modelos. Hemos mirado las cifras de funcionamiento de muchos vehículos eléctricos –que hemos enumerado en las notas finales de este capítulo– y podríamos resumirlas en que los coches eléctricos son capaces de funcionar con un coste energético de, aproximadamente, **15 kWh a los 100 km**. Esto es cuatro veces mejor que nuestro coche de combustión de referencia y significativamente más eficiente que cualquier vehículo híbrido. ¡Bravo! Aunque la autonomía sea uno de los aspectos que más preocupe de la movilidad eléctrica, la realidad es que no necesitamos viajar más de 12 km de media para llegar al trabajo todos los días, por lo que cualquiera de las opciones disponibles en el mercado serviría para satisfacer esta necesidad diaria.

Este instante de celebración parece el momento oportuno para disfrutar del gráfico resumen de este capítulo, la Figura 20.17, que muestra las necesidades energéticas de todos los medios de transporte que se han comentado y varios que están por debatir.

No obstante, cuando se habla de vehículos eléctricos, alguna gente menciona supuestos cálculos que demuestran que la ampliación que requeriría la red eléctrica para alimentar a todos los vehículos es tan grande que hace inviable la electrificación de toda la flota. ¿Tenemos infraestructura suficiente para electrificar el transporte? Hagamos un cálculo rápido.

En primer lugar, teniendo en cuenta que vivimos en la era de las comunicaciones, que los desplazamientos urbanos diarios utilizan una pequeña porción de la batería del vehículo y que solo usamos el coche un 3% del tiempo (el otro 97% está aparcado), es razonable suponer que la mayor parte de las cargas de vehículos eléctricos serán controladas, de forma que se realizarán cuando el consumo eléctrico sea más bajo (por las noches y los fines de semana) o cuando se genere energía renovable.

Según datos del IDAE (Tabla 18.1), empleamos 18,3 kWh/p/d en transporte por carretera. En este cálculo asumiremos que la eficiencia de un motor de combustión es del 25 %, mientras que la del sistema de transporte eléctrico, carga y descarga de las baterías, es del 80 %. Por lo tanto, necesitamos generar

$$18,3 \text{ kWh/p/d} \times 0,25 \times \frac{1}{0,8} \simeq 6 \text{ kWh/p/d} \quad (20.1)$$

de electricidad.

Comparemos estos 6 kWh/p/d con la energía eléctrica consumida a lo largo de una semana típica, por ejemplo la del 19 de noviembre de 2018, que se muestra en la Figura 20.18. Dado que en este caso nos interesa analizar la potencia instantánea consumida, representamos en el eje vertical kW/p, en lugar de kWh/p/d. Como el día tiene 24 horas, un consumo constante de 1 kW/p sería equivalente a 24 kWh/p/d.

Vamos a suponer, en esta aproximación, que se desea tener una demanda lo más homogénea posible, aunque puede que en una situación más realista se deseen cargar los vehículos en los períodos con más viento o con más sol; o que se desee compensar las variaciones bruscas de generación renovable (como se desarrolla en el Capítulo 26, pág. 241). Estos cálculos, a pesar de su simplicidad, muestran que la potencia que debería gestionar la red eléctrica está totalmente dentro de su funcionamiento habitual: 0,9 kW/p es menor que el máximo histórico de 1 kW/p que tuvo lugar en diciembre de 2007 y, por supuesto, está lejos de la potencia de generación instalada (2,1 kW/p).

Indudablemente, la electrificación del transporte requerirá de algunos cambios en la red eléctrica (por ejemplo, habrá que dotar de redes de más potencia a los garajes y, quizás, a algunas zonas de las ciudades). Sin embargo, considerando que la electrificación del transporte es un proceso que va a durar varios años, estos cambios no deberían inquietarnos demasiado, ya que son de pequeña envergadura comparados con la red eléctrica de la que disponemos actualmente.

Vale, esta carrera ha terminado, y ya hemos anunciado dos ganadores: el transporte público y el coche eléctrico. Pero ¿existen otras opciones más allá de la línea de meta? Todavía nos queda por hablar sobre los coches de aire comprimido y los vehículos de hidrógeno. Si alguno de estos resulta ser mejor que el coche eléctrico, no afectará demasiado al panorama a largo plazo. Sea cual sea la tecnología por la que se apueste de entre estas opciones, los vehículos se recargarían con energía procedente de una fuente «verde».

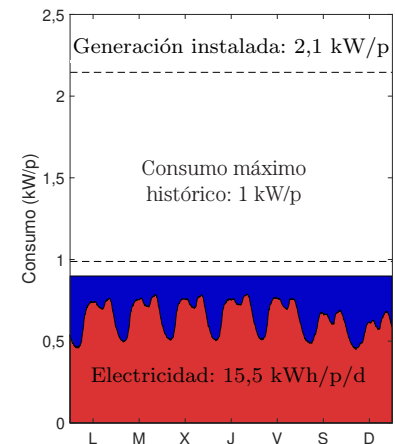


Figura 20.18: La electrificación del transporte no requiere de grandes cambios en la red eléctrica. En la figura se representa en rojo la electricidad consumida en España a lo largo de una semana (desde el 19 hasta el 25 de noviembre de 2018), y en azul, la potencia media adicional que haría falta para el transporte si el 100% de la flota actual fuera eléctrica. Mediante líneas discontinuas se representa la máxima potencia eléctrica consumida en España (fue en diciembre de 2007) y la potencia de generación instalada. Fíjate que, al tratarse de potencia instantánea, las unidades del eje vertical son kW/p.

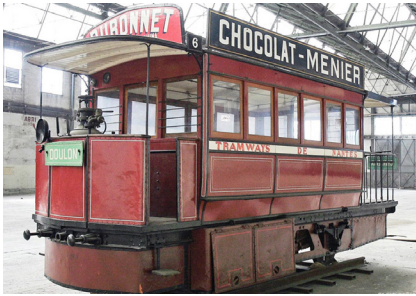


Figura 20.19: Uno de los tranvías de Nantes que funcionaban con aire comprimido. Este es de la marca Mekar. Para producir el aire comprimido se empleaban máquinas de vapor que quemaban carbón. En total era necesario utilizar 4,4kg de carbón (36kWh) por cada vehículo y km, o **115kWh por cada 100 pasajeros y kilómetro**, considerando los tranvías llenos. Foto obtenida de www.escuderia.com.

Coches de aire comprimido

Los vehículos propulsados con aire comprimido no son una idea nueva. Cientos de tranvías impulsados por aire comprimido y agua caliente llenaban las calles de Nantes y París entre 1879 y 1911. La Figura 20.19 muestra uno de estos tranvías y su consumo estimado para la producción del aire comprimido. En términos de eficiencia energética, parece ser que la técnica del aire comprimido para almacenar energía no es tan buena como las baterías eléctricas. Uno de los problemas reside en que, al comprimir el aire, se genera una gran cantidad de *calor* que es probable que no se utilice de forma eficiente; y al expandir ese aire se genera *frío*, otro subproducto, que tampoco se emplea de forma eficiente. Sin embargo, el aire comprimido puede ser superior a las baterías en otros aspectos. Por ejemplo, el aire se puede comprimir miles de veces sin que se desgaste.

En la actualidad hay alguna empresa centrada en el diseño de vehículos que funcionan con aire comprimido. Es el caso de Moteur Développement International (MDI) y su coche urbano AirOne (ver Figura 20.20). Pero no es fácil encontrar las especificaciones de estos modelos, por lo que es difícil afirmar que los vehículos de aire comprimido puedan llegar a competir con las demás tecnologías que sí se están desarrollando de forma masiva. Una de las limitaciones del aire comprimido es que su densidad de energía está solamente entre 11 y 28 Wh por kg, similar a las baterías de plomo-ácido y aproximadamente 10 veces menor que la densidad de energía de las baterías de iones de litio.

Por tanto, la autonomía de los coches de aire comprimido será tan buena como la autonomía de los primeros coches eléctricos. (Por eso, dentro de la gama de productos que desarrolla la empresa MDI, podemos encontrar vehículos que no requieren grandes autonomías: bicicleta, carretillas elevadoras o coches urbanos). Entre las ventajas de los sistemas de almacenamiento con aire comprimido destaca: una mayor vida útil, fabricación más barata y el empleo de una menor cantidad de productos químicos.



Figura 20.20: Modelo de vehículo urbano de MDI. Foto sacada de <https://www.mdi.lu/products>.

Coches de hidrógeno

Otro de los combustibles que se pueden emplear para mover un coche es el hidrógeno, que puede utilizarse en un motor de combustión interna, como los motores que hay en los coches de gasolina; o en vehículos de pila de combustible, generando electricidad para un motor eléctrico. Pero ten en cuenta que el hidrógeno no es una fuente *milagrosa*.

grosa de energía, es, simplemente, un *portador* de energía, como lo son las baterías recargables. Además, es un *portador* bastante ineficiente que cuenta con múltiples inconvenientes prácticos.

La «industria del hidrógeno» recibió apoyo por parte de la revista *Nature* gracias a un artículo en el que se elogiaba al entonces gobernador de California, Arnold Schwarzenegger, por llenar el depósito de un Hummer adaptado para funcionar con hidrógeno (Figura 20.21). El artículo de *Nature* alababa la visión de Arnold de sustituir los «modelos contaminantes» por los coches de hidrógeno utilizando la siguiente cita: «el gobernador es, en la vida real, un héroe del clima». Pero la pregunta esencial que necesitamos contestar es «¿de dónde proviene la *energía* necesaria para *generar* el hidrógeno?» Además, obtener energía de y para el hidrógeno solo puede hacerse de manera ineficiente, al menos con la tecnología de la que disponemos hoy en día.

Aquí van algunos números.

- En el proyecto CUTE (Clean Urban Transport for Europe, Transporte Urbano Limpio para Europa), cuyo objetivo principal era demostrar la viabilidad y fiabilidad de los autobuses con pila de combustible y tecnología de hidrógeno, se comprobó que repostar esos autobuses con hidrógeno suponía entre un 80 % y un 200 % más de energía que hacerlo con diésel.
- Repostar el Hydrogen 7, un coche de combustión interna alimentado por hidrógeno que fabricó BMW en los años 2005-2007, requiere **254 kWh a los 100 km**, un 320 % más energía que el coche medio vendido en España.

Si nuestra misión fuera «dejar de usar combustibles fósiles para el transporte, suponiendo que disponemos de *infinita* cantidad de electricidad verde», entonces, por supuesto, que un derrochador de energía, como es el hidrógeno, podría ser uno de los candidatos (aunque el hidrógeno tiene que enfrentarse también a otros problemas). Sin embargo, *la electricidad verde no es gratuita*. De hecho, conseguir electricidad 100 % verde al nivel del consumo que tenemos actualmente en nuestra sociedad ya está siendo un reto muy duro. El desafío de abandonar los combustibles fósiles es un reto energético. El problema del cambio climático es también un reto energético. Necesitamos centrarnos en soluciones que utilicen menos energía, no en «soluciones» que jusen más! *No conocemos otro medio de transporte terrestre cuyo consumo total de energía sea mayor que el del coche de hidrógeno*. (Únicamente estamos al tanto de un tipo de vehículo con un consumo mayor. Son las motos acuáticas, que emplean alrededor de **500 kWh a los 100 km**; y el Earthrace, un bote de diésel absurdamente llamado el eco-barco, que gasta **800 kWh por cada 100 p-km**).



Figura 20.21: El Hummer H2H: abrazando la revolución sostenible, a la americana. Foto de <http://www.gmhummer.com/hummerspecs/h2h/main.htm>.



Figura 20.22: El barco «ecológico» Earthrace. Foto de David Castor.



Figura 20.23: Un Toyota Mirai, un coche de pila de combustible de hidrógeno con una autonomía de más de 500km. Foto de www.toyota.es.

Los defensores del hidrógeno podrán decir que «el BMW Hydrogen 7 es un primer prototipo, además de un coche de lujo, con mucha potencia; y seguro que la tecnología se vuelve más eficiente». Esperemos que así sea, porque queda mucho por mejorar. El eléctrico Tesla Roadster también fue un primer prototipo, un coche de lujo con mucha potencia. ¡Y es 10 veces más eficiente que el Hydrogen 7! Cada uno es libre de escoger un coche u otro, pero parece que los coches de hidrógeno aún tienen mucho que mejorar. Mira la Figura 20.17, si el eje vertical no estuviera comprimido en la parte superior, el vehículo de hidrógeno no habría cabido en la página.

El otro tipo de vehículos que funcionan con hidrógeno, los de pila de combustible (*fuel cell*, en inglés), sí que son algo más eficientes. Estos mezclan el hidrógeno que almacenan en el depósito con el oxígeno del aire para generar electricidad, gracias a un proceso electroquímico, con el que mueven el motor del coche. Un ejemplo de este tipo de vehículos es el Toyota Mirai, Figura 20.23, con un consumo en forma de hidrógeno de **57 kWh a los 100 km**.

Aunque la cualidad más destacada de estos vehículos sea la de «cero emisiones», es probable que al final se llegue a concluir que los coches de hidrógeno emplean tanta energía como un coche de combustión de gasolina de hoy en día.

Además, podemos enumerar algunos de los problemas del hidrógeno. Es peor medio para almacenar energía que la mayoría de los combustibles líquidos debido a su volumen, ya sea almacenado como gas a alta presión o como líquido (lo que requeriría una temperatura de -253°C). Incluso a una presión de 700 bar (lo que requiere un tanque presurizado muy robusto) su densidad energética (energía por unidad de volumen) es un 22 % de la de la gasolina. El depósito criogénico del BMW Hydrogen 7 pesa 120 kg y almacena 8 kg de hidrógeno. Por no hablar de las fugas que existen en todos los tanques (debido al pequeño tamaño de la partícula de hidrógeno). Si dejaras tu coche de hidrógeno líquido en el parking con el depósito lleno y vuelves dos o tres semanas más tarde, podrías comprobar cómo la mayor parte del hidrógeno se ha esfumado.

Algunas cuestiones sobre los vehículos eléctricos

Se ha visto en este capítulo que los coches eléctricos son energéticamente más eficientes que los coches de combustión. Sin embargo, ¿son mejores también si nuestro objetivo es reducir las emisiones de CO_2 y seguimos generando electricidad con centrales de combustión?

Este es un cálculo bastante sencillo de realizar. Supongamos que un coche eléctrico tiene un consumo energético de 20 kWh(e) a los 100 km. Con el mix de generación actual en España la electricidad tiene una huella de carbono de casi 300 g de CO₂ por kWh(e), por lo que las emisiones de este coche serán de 60 g CO₂ por km, que son menores que las de los mejores modelos de coches de combustión (Figura 20.7). Por lo tanto, podemos concluir que los vehículos eléctricos *ya* son una buena idea, incluso sin tener una generación eléctrica *verde*.

Los coches eléctricos, al igual que los coches de combustión, tienen costes tanto de fabricación como de uso. Puede que los coches eléctricos sean más baratos en su uso, pero, si las baterías no duran demasiado, ¿no deberíamos prestar más atención a los costes de fabricación?

En este libro se hace más hincapié en los aspectos energéticos, dejando en un segundo plano la parte económica. Sin embargo, consideramos que en este punto merece la pena incluir algunos detalles más. La rápida evolución que están teniendo las baterías de litio hace que algunos problemas a los que se les daba mucha importancia hace pocos años ya estén superados.

El coste de las baterías supone una porción significativa del precio total del vehículo, sin embargo, no es tan grande como algunos puedan pensar. El coste de las baterías de litio se está reduciendo drásticamente. Según la Agencia Internacional de la Energía, el coste de fabricación de baterías de litio en 2008 era de 850 €/kWh, y para 2015 ya había bajado hasta los 212 €/kWh. Esto significa una reducción del 75 % en solo ocho años. Además, para el año 2022 se espera que el coste ronde los 100 €/kWh, es decir, que estamos viviendo un espectacular abaratamiento de las baterías para vehículos eléctricos [122].

En cuanto a la duración de estas baterías, uno de los primeros vehículos eléctricos que salió al mercado y el más vendido hasta ahora es el Nissan Leaf. En un estudio sobre la duración de sus baterías, sus autores separan los datos en dos grupos, debido a que Nissan realizó un cambio en sus baterías para comercializar vehículos con mayor autonomía [123]. Tal como se representa en la Figura 20.24 con un punto rojo, Nissan esperaba que las baterías conservaran durante, al menos, cinco años el 80 % de su capacidad inicial. Según se aprecia en la gráfica, la empresa no ha dado todavía con la batería definitiva, ya que aparentemente están envejeciendo más rápido de lo esperado (especialmente la segunda batería que sacaron al mercado). Esto es un gran problema para el vehículo eléctrico, ya que, efectivamente, el reemplazo de una batería supone un desembolso importante.

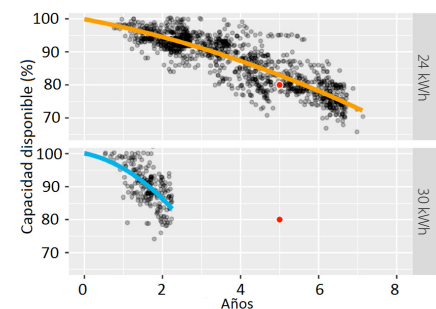


Figura 20.24: Envejecimiento de baterías de Nissan Leaf: datos medidos, línea de tendencia y objetivo mínimo de la empresa con un punto rojo. La gráfica superior corresponde a los primeros vehículos comercializados (baterías de 24 kWh), mientras que la gráfica inferior representa el segundo modelo con una batería de 30 kWh [123].

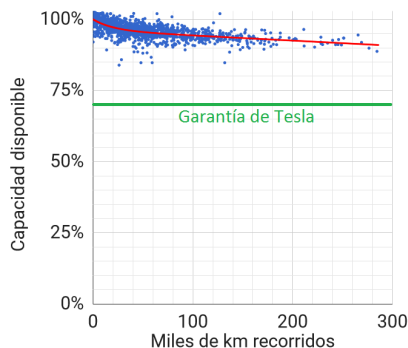


Figura 20.25: Envejecimiento de baterías de Tesla y garantía de la empresa. Los vehículos de esta compañía no requieren de un cambio de batería. Fuente: [124].

Sin embargo, otro conocido fabricante de vehículos eléctricos (Tesla Motors) nos demuestra que es posible diseñar una batería que dure incluso más que el propio coche. Debido a las expectativas que ha creado esta empresa, los usuarios de sus vehículos publican numerosos detalles sobre todos los modelos. Especialmente interesante es una base de datos en la que más de 350 usuarios de Tesla registran el estado de su batería [124]. La evolución de las mismas se muestra en la Figura 20.25. Como se puede observar, hay vehículos que han alcanzado casi los 350.000 km y la capacidad de las baterías sigue en torno al 90%. Aunque algunas baterías están envejeciendo algo más rápido que la media, todas conservan una capacidad sensiblemente superior al 70%, que es la garantía ofrecida por Tesla. Por lo tanto, estas baterías envejecen al mismo ritmo que el resto de componentes del vehículo eléctrico y dejan de suponer un coste adicional para el propietario.

La conclusión que obtenemos de este análisis es que, si algunas empresas ya han dado con la fórmula para construir baterías duraderas a un precio competitivo, el resto de empresas acabará por encontrarla, por lo que es razonable pensar que el reemplazo de baterías no va a ser un problema para el vehículo eléctrico.

Vivo en un sitio cálido. ¿Podría utilizar un coche eléctrico? Necesito conectar el aire acondicionado, un gran devorador de energía eléctrica.

Existe una forma elegante de solucionar este requerimiento: coloca 4 m² de paneles fotovoltaicos en las superficies orientadas hacia arriba del coche eléctrico. Si necesitas aire acondicionado, es probable que el sol esté brillando. Unos paneles fotovoltaicos, con un 20% de eficiencia, generarán hasta 800 W, suficiente para alimentar el sistema de aire acondicionado. Además, estos paneles podrían contribuir también a la carga de la batería del coche cuando esté aparcado.

Vivo en un lugar fresco. ¿Podría utilizar un coche eléctrico? Necesito conectar la calefacción, una gran devoradora de energía eléctrica.

El motor de un coche eléctrico cuando esté funcionando usará de media alrededor de 10 kW, con una eficiencia del 90 al 95%. Parte de las pérdidas de potencia, ese 5 o 10%, se disipará en forma de calor en el propio motor. Quizás se puedan diseñar aquellos coches que van a circular por sitios fríos para que puedan transportar ese calor de pérdidas, que podría ascender a unos 250 o 500 W, hasta el interior del coche y poder emplearlo para desempañar los cristales o calentar a los pasajeros.

¿Son las baterías de iones de litio seguras en caso de accidente?

Las baterías de iones de litio son peligrosas cuando se les provoca un cortocircuito o cuando se sobrecalientan, pero se están fabricando baterías mucho más seguras como las que emplean cátodo de fosfato de hierro, LFP, o ánodo de titanato de litio, LTO. En la actualidad, se está desarrollando una nueva generación de baterías de litio, llamadas de estado sólido por no utilizar un electrolito líquido. Esta tecnología tiene un potencial muy grande, ya que pueden almacenar una cantidad de energía mucho mayor para un determinado volumen. Pero no solo suponen una revolución en cuanto a su densidad energética, sino que también son mucho más seguras que las actuales.

¿Queda suficiente litio para poder construir todas las baterías necesarias de una enorme flota de coches eléctricos?

Las reservas mundiales de litio se estiman en 7,5 millones de toneladas. Una batería de iones de litio contiene un 3 % de litio. Si suponemos que cada vehículo tiene una batería de 40 kWh (un valor típico de un coche eléctrico en la actualidad), necesitaremos 6 kg de litio por vehículo. Por tanto, las reservas estimadas en esos yacimientos serían suficientes para fabricar las baterías de 1250 millones de coches. Este número de coches es el que existe hoy en día en circulación, por lo que la cantidad de litio debería preocuparnos, especialmente si tenemos en cuenta las ambiciones de la fusión nuclear, que pretende devorar litio en sus reactores (Capítulo 24). Todo esto sin tener en cuenta la gran cantidad de dispositivos que también llevan litio en sus baterías.

Existe mucho más litio en el agua marina, por eso quizás los océanos puedan ser unos yacimientos útiles. Sin embargo, el especialista en litio R. Keith Evans dice que «las preocupaciones relativas a la disponibilidad del litio para las baterías de los coches híbridos y eléctricos u otras aplicaciones del futuro son infundadas». De todas formas, existen otras tecnologías de baterías libres de litio que están siendo desarrolladas, como las recargables a base de aire y cinc. Creemos, de verdad, que el vehículo eléctrico es un proyecto muy prometedor.

El futuro de los viajes aéreos

El gigante A380 es, según Airbus, «un avión altamente eficiente». De hecho, quema un 12 % menos de combustible por pasajero que el Boeing 747.

Boeing anuncia también logros similares: su 747-8 Intercontinental es, según la publicidad de la propia compañía, un 15 % más eficiente que el 747-400.



Figura 20.26: Airbus A380.

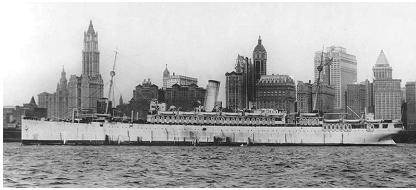


Figura 20.27: TSS Rijndam. Foto de Robert Enrique Muller.



Figura 20.28: NS Savannah, el primer barco de uso comercial que empleaba energía nuclear como forma de propulsión.



Figura 20.29: El rompehielos nuclear Yamal.

Estos avances significativos alcanzados en los últimos años, que pasan por el desarrollo de aviones más ligeros, empleando estructuras de fibra de carbono, y la nueva generación de motores de gran diámetro para aeronaves de media y corta distancia, ponen de manifiesto los esfuerzos que se están realizando en el campo de la aviación para conseguir reducir notablemente el consumo de estos aparatos. No obstante, como se explica en el Apéndice C, los aviones vuelan sometidos a un límite fundamental impuesto por las leyes de la física. Cualquier avión, sea cual sea su tamaño, *tiene* que consumir alrededor de 0,4 kWh de energía por cada tonelada y km para mantenerse en el aire y seguir moviéndose.

Se puede pensar que la forma de resolver el problema de los viajes de larga distancia es volver a la manera en la que se viajaba antes de la aviación: los transatlánticos. Pero si miramos los números..., la triste realidad es que estos transatlánticos utilizan más energía por pasajero y kilómetro que los aviones. El QE2 (Queen Elizabeth 2) emplea cuatro veces más energía que un 747. Vale, pero es un barco de lujo, ¿podemos mejorarlo con embarcaciones de un nivel más bajo? Entre 1952 y 1968, la forma más económica de cruzar el Atlántico era en dos barcos daneses conocidos como los *Economy Twins* (los Gemelos Económicos), el Massdam y el Rijndam. Estos viajaban a una velocidad de 16,5 nudos (30,5 km/h), por lo que ir desde Inglaterra hasta Nueva York costaba 8 días. Su consumo energético, si transportaban 893 pasajeros, era de 103 kWh por 100 p-km. Con una ocupación típica del 85%, el consumo de energía ascendía hasta los **121 kWh por 100 p-km**, más del doble que el consumo de una avioneta. Para ser justos con los barcos, estos no solo gastan esa cantidad de energía debido al transporte, también están dando calefacción, agua caliente, luz y entretenimiento a los pasajeros y a la tripulación durante varios días, pero la energía que se ahorra en casa al estar encerrado en el barco es minúscula comparada con la consumida por el barco, que, en el caso del QE2 es de 3000 kWh por pasajero y día.

Por eso, lamentablemente, no creemos que los barcos vayan a derrotar a los aviones en consumo energético.

¿Y qué hay del transporte de mercancías?

El transporte internacional marítimo de mercancías es, sorprendentemente, un consumidor eficiente de combustibles fósiles, por eso es prioritario abandonar antes el uso de combustibles fósiles en el transporte terrestre. Pero, como ya sabemos, esos combustibles son un recurso limitado y llegará un momento en el que los barcos tendrán que moverse con otro tipo de combustible.

El primer barco alimentado con energía nuclear para el transporte de personas y mercancías fue el NS Savannah, lanzado en 1962 dentro del programa Atoms for Peace del presidente estadounidense Dwight D. Eisenhower (Figura 20.28). Alimentado con un reactor nuclear de 74 MW que era capaz de mover un motor de 15 MW, el Savannah tenía una velocidad de navegación de 21 nudos (39 km/h) y podía transportar 60 pasajeros y 14 000 t de mercancía a lo largo de 500 000 km sin repostar. Esto supone un consumo energético de transporte de 0,14 kWh por t-km, dentro del rango de consumo del transporte marítimo que se muestra en la Figura 15.9 de la página 131.

Existen otros muchos barcos nucleares, tanto de uso militar como de uso civil. Por ejemplo, Rusia tiene diez rompehielos alimentados con reactores nucleares. La Figura 20.29 muestra el rompehielos Yamal, que tiene dos reactores nucleares de 171 MW cada uno, y motores que pueden entregar una potencia de 55 MW.

¡Un momento! No se ha hablado de la levitación magnética

Existen trenes, como el de la Figura 20.30, que se mueven gracias a la levitación magnética. No están ampliamente extendidos, pero ya se han instalado en ciertos puntos del planeta. En la ciudad de Shanghái, la empresa alemana Transrapid, encargada de fabricar el tren Maglev (viene del inglés, *magnetic levitation*), definía su sistema Transrapid Superspeed Maglev como «un modo de transporte sin rival respecto a la emisión de ruido, el consumo de energía y el uso terrestre». En 2015 un tren de levitación magnética batió en Japón el récord de velocidad, alcanzando los 603 km/h.

La levitación magnética es una de las muchas tecnologías que siempre se mencionan cuando la gente debate sobre temas energéticos. En términos de consumo de energía, la comparación con otros trenes de alta velocidad no es, en realidad, tan esperanzadora como se piensa. La propia compañía Transrapid comparaba los consumos de su sistema sin contacto con uno de los trenes de alta velocidad de Alemania, el ICE (InterCityExpress):

	Trenes de alta velocidad comparados a 200 km/h
Transrapid	2,2 kWh por 100 asientos-km
ICE	2,9 kWh por 100 asientos-km



Figura 20.30: El Transrapid, tren de levitación magnética, en una de sus pruebas.

Los principales motivos por los que la levitación magnética es ligeramente mejor que el ICE son: la mayor eficiencia del motor de propulsión magnética, un menor rozamiento con las vías, el bajo peso del propio tren, ya que la mayor parte del sistema de propulsión está en la vía en lugar de en el tren, y el hecho de que pueda llevar a más pasajeros dentro al no necesitarse espacio para los motores.

Notas y textos de consulta

Página

- 169 *Se trata de la bicicleta, cuyo rendimiento (en términos de energía consumida por distancia) es poco mayor que el prototipo de bajo consumo.* Pedalear en una bicicleta individual tiene un consumo de 1,6 kWh a los 100 km, suponiendo una velocidad de 20 km/h. Para más detalles y referencias, ver el Apéndice C.
- 170 *El metro de Madrid.* El vehículo empleado en el metro de Madrid cuenta con 6 coches que suman un total de 160 toneladas en vacío, tiene una velocidad máxima de 80 km/h y es capaz de llevar a 808 pasajeros. Cuando va lleno, en las horas punta, tiene un consumo energético de **2,5 kWh por 100 p-km** [125].
- 170 *Si el tren eléctrico de alta velocidad va lleno, su coste energético es de 4 kWh por 100 p-km.* Este valor, al igual que el del resto de trenes, se ha tomado de la guía sobre el cálculo del consumo energético de trenes del IDAE [125]. Para estimar el consumo energético se ha supuesto el trayecto medio correspondiente a cada uno de los trenes. El modelo de tren de alta velocidad considerado ha sido el AVE Serie 103, que tiene un peso de 425 toneladas y puede alcanzar una velocidad máxima de 350 km/h. Para el consumo real, se ha supuesto una ocupación del 61%. Para el caso del tren de cercanías se ha tomado el modelo S450 empleado por Renfe para este tipo de trayectos, que puede llegar a los 140 km/h de velocidad máxima, tiene dos pisos y pesa 350 toneladas. Su ocupación media es del 33%.
- 172 *...proveer a la ciudadanía con excelentes servicios para las bicicletas...* Existen varios manuales donde se exponen recomendaciones en el diseño de las infraestructuras ciclistas necesarias en las ciudades. El «Manual de Diseño para el Tráfico de Bicicletas» de la CROW (una plataforma tecnológica holandesa centrada en el transporte, infraestructuras y espacios públicos) recomienda establecer los 20 km/h como la velocidad natural para la circulación de bicicletas [126].
- 176 *El Toyota Prius emite 76 g de CO₂ por km, menos que un coche medio en España, 114 gr/km.* Este es el valor medio de las emisiones de CO₂ de los modelos a la venta en España en 2016 [127].
- 178 *No necesitamos viajar más de 12 km de media para llegar al trabajo todos los días.* De media, los madrileños recorren 11,8 km desde sus hogares hasta su lugar de trabajo [128].
- 178 *...muchos vehículos eléctricos...* Hemos enumerado varios modelos de vehículos eléctricos. Los consumos y autonomía de los vehículos se han extraído directamente de los fabricantes. A estas alturas todos sabemos que los valores reales no siempre coinciden con los proporcionados por los fabricantes. Para más información sobre el consumo de los coches ir al Apéndice A.



Figura 20.31: Un Citroën e-Berlingo Multispace. **17,7kWh a los 100km.** Foto de www.citroen.es.



Figura 20.32: Hyundai IONIQ que tiene un consumo de **15,4kWh a los 100km.** Foto de www.motorpasion.com.

BMW i3. Un vehículo eléctrico que tiene una potencia de motor de 150 kW y unas baterías de iones de litio capaces de albergar 28 kWh de energía, lo que le da una autonomía de algo más de 200 km. Su consumo energético es aproximadamente de **12,8 kWh a los 100 km**.

Citröen e-Berlingo Multispace. Es una furgoneta eléctrica pensada para el transporte de mercancías y personas. Dispone de un motor eléctrico de 49 kW de potencia y el fabricante francés promete una autonomía homologada de 170 km. Su consumo energético asciende a los **17,7 kWh por cada 100 km**.

Hyundai IONIQ. Este coche eléctrico puro es capaz de alcanzar los 165 km/h gracias a un motor de 88 kW (120CV). Su batería a base de un polímero de litio de 18 kWh, que se carga completamente en 12 horas, le proporciona una autonomía de unos 120 km. El consumo aproximado de este vehículo es de **15,4 kWh a los 100 km**.

Mercedes-Benz B 250e. Con una batería de iones de litio de 28 kWh y un consumo de alrededor de **16,1 kWh a los 100 km**, la autonomía de este vehículo eléctrico supera los 170 km. Además, gracias a un motor de 132 kW, este coche puede pasar de 0 a 100 km/h en tan solo 7,9 segundos.

Nissan LEAF. Este vehículo es uno de los eléctricos más vendidos del mundo y es probable que su gran autonomía sea una de las razones de ello. Con una batería de iones de litio de 40 kWh y gracias a un consumo de solo **11,5 kWh a los 100 km**, se pueden recorrer casi 400 km sin tener que hacer una recarga.

Opel Ampera-e. Este es un claro competidor del coche anterior, por sus prestaciones y su tamaño. Tiene una velocidad punta de 150 km/h gracias al motor de 150 kW (204CV). Su batería tiene mayor capacidad que la del Nissan LEAF, 60 kWh, pero al tener un consumo algo mayor, **15,7 kWh a los 100 km**, tiene una autonomía similar, cercana a los 400 km.

Renault ZOE. Otro competidor, en este caso de la casa francesa Renault. Esta berlina, compacta y 100% eléctrica también, cuenta con un motor de 68 kW, lo que no le permite pasar de los 135 km/h. Sin embargo, está equipada con una batería de iones de litio de 41 kWh que le otorga una autonomía de unos 300 km. Su consumo está estimado en alrededor de **13,3 kWh por cada 100 km**.

Volkswagen e-Golf ePower. Una variante eléctrica del modelo Golf de la marca alemana, con un motor de 100 kW que le permite pasar de los 0 a los 100 km/h en 9,6 segundos. Dispone de unas baterías de iones de litio de 35,8 kWh que le proporcionan una autonomía de más de 220 km gracias a un consumo de **15,4 kWh a los 100 km**.

Tesla Model X 75D. Este modelo de la marca Tesla Motors cuenta con un motor de 245 kW (333CV), lo que le permite pasar de 0 a 100 km/h en tan solo 6,2 segundos. La velocidad punta que este vehículo eléctrico puede alcanzar es de 210 km/h, y, gracias a sus baterías de iones de litio de 75 kWh de capacidad, está previsto que tenga una autonomía de más de 400 km. El consumo estimado de este modelo es de **15,4 kWh a los 100 km**.

Irizar i2e. En julio de 2017 Irizar se convertía en la primera empresa europea fabricante de autocares y autobuses en poner en circulación un autobús eléctrico urbano. Fue en la ciudad de San Sebastián. Este autobús (ver Fi-



Figura 20.33: Uno de los vehículos eléctricos más vendidos en el mundo, el Nissan LEAF que tiene un consumo de **11,5 kWh a los 100 km** y una autonomía que llega a los 400 km. Foto de www.nissan.es.



Figura 20.34: El Opel Ampera-e, claro competidor del Nissan LEAF. Tiene un consumo de **15,7 kWh a los 100 km** pero una batería de 60 kWh. Foto de www.opel.es.



Figura 20.35: El autobús eléctrico de Irizar tiene un consumo de **170 kWh a los 100 km**, y, gracias a unas baterías de 376 kWh, su autonomía asciende hasta los 250 km. Foto de www.irizar.com.



Figura 20.36: Esta motocicleta de gran potencia tiene un consumo de **7 kWh a los 100 km**. Foto de www.zeromotorcycles.com.

gura 20.35) ofrece una autonomía de entre 200 y 250 km, suficiente para poder circular por la ciudad durante todo el día. (Dependerá, eso sí, de la meteorología y las condiciones del tráfico, pero aseguran que la conducción está garantizada entre 14 y 16 horas.) La potencia nominal del motor es de 230 kW y dispone de unas baterías de 376 kWh. El consumo de este autobús eléctrico ronda los **170 kWh a los 100 km**.

ZERO Motorcycles ZeroS. La marca ZERO Motorcycles comercializa varios modelos de motos eléctricas como la ZeroS, un modelo destacado por su gran autonomía: hasta 145 km en autopista y 288 km en ciudad, donde aprovecha las desaceleraciones para ir cargando la batería. También llama la atención su elevada potencia, ya que dispone de un motor de 45 kW. La capacidad de sus baterías de iones de litio es de 14,4 kWh y el consumo aproximado de estas motos es de **7 kWh a los 100 km**.

Honda EV-neo. También existen motocicletas menos potentes como esta Scooter EV-neo de la marca Honda que cuenta con unas baterías de casi 1 kWh, que le dan una autonomía de 34 km, y un motor de 0,58 kW de potencia. El consumo de esta *scooter* es de **2,9 kWh a los 100 km**.

- 180 *...su densidad de energía está solamente entre 11 y 28 Wh por kg.* Este límite teórico supone una compresión perfectamente isoterma. Si 1 m³ de aire se comprime lentamente para meterlo en un tanque de 51 a una presión de 200 bar, la cantidad de energía almacenada será de 0,16 kWh en 1,2 kg de aire. En la práctica, un tanque de 51 apropiado para tales presiones pesa alrededor de 7,5 kg si está hecho de acero o 2 kg utilizando kevlar o fibra de carbono, y la densidad de energía total que se consigue será de entre 11 y 28 Wh por kg. La densidad energética teórica es la misma, sea cual sea el volumen del depósito.
- 181 *...al entonces gobernador de California, Arnold Schwarzenegger, por llenar el depósito de un Hummer adaptado para funcionar con hidrógeno.* (*Nature*, vol. 438, 24 de noviembre de 2005). No decimos que el hidrógeno no llegue a convertirse *nunca* en una tecnología viable para el transporte, pero se podría ser algo más crítico con esta corriente y no solo mostrar euforia.
- 181 *En el proyecto CUTE [...] se comprobó que repostar esos autobuses con hidrógeno suponía entre un 80% y un 200% más de energía que hacerlo con diésel.* Fuente: [129].
- 181 *Repostar el Hydrogen 7, un coche de combustión interna alimentado por hidrógeno que fabricó BMW [...], requiere 254 kWh a los 100 km.* La mitad del maletero del BMW Hydrogen 7 está ocupada por un tanque de 170l que almacena 8 kg de hidrógeno, que le da un autonomía de 200 km. El poder calorífico del hidrógeno es de 39 kWh/kg, y la mejor manera de obtener ese hidrógeno es con un consumo de 63 kWh/kg (de los cuales 52 kWh provienen de gas natural y 11 kWh de electricidad)[129]. Por tanto, llenar el depósito de 8 kg de este coche tiene un coste energético de 508 kWh, y si ese tanque nos da una autonomía de 200 km, entonces el consumo energético del vehículo será de **254 kWh a los 100 km**.
- 182 *Un ejemplo de este tipo de vehículos es el Toyota Mirai*, que pesa 1850 kg y puede alcanzar una velocidad máxima de 178 km/h gracias a un motor de 154 CV de potencia. Cuenta con un depósito de hidrógeno que le permite almacenar hasta 5 kg a una presión de 700 bar que le proporciona una autonomía de hasta 550 km. Asumiendo el coste de generar hidrógeno (mencionado arriba), el consumo energético de este coche sería de **57 kWh a los 100 km**.

- 186 *Estos avances significativos alcanzados en los últimos años [...] en el campo de la aviación.* Con el desarrollo de estructuras a base de fibra de carbono se ha conseguido fabricar aviones un 20% más ligeros, como el Boeing 787 o el Airbus A350 [130]. Otro avance conseguido es el empleo de motores de gran diámetro para los modelos que cubran distancias medias o cortas, como el A320neo de Airbus, que van a permitir ahorros de hasta un 20% de combustible [131].
- 186 *...dos barcos daneses conocidos como los «Economy Twins», el Massdam y el Rijndam.* Fuentes: <http://www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm>
QE2: <http://www.qe2.org.uk/>
- 187 *Transrapid Superspeed Maglev.* Fuente: <http://www.maglevboard.net>.

Capítulo 21

Calefacción inteligente

En el capítulo anterior aprendimos que la electrificación podría reducir el consumo energético actual del coche hasta una cuarta parte; y que el transporte público y la bicicleta pueden ser 40 veces más eficientes energéticamente que conducir. ¿Qué pasa con la calefacción? ¿Qué ahorro energético pueden ofrecer tanto la tecnología como el estilo de vida?

La potencia empleada para calentar un edificio se obtiene multiplicando tres cantidades:

$$\text{Potencia empleada} = \frac{\text{Diferencia media de temperatura} \times \text{Fugas del edificio}}{\text{Eficiencia del sistema de calefaccion}} \quad (21.1)$$

Vamos a explicar esta fórmula (que se desarrolla en detalle en el Apéndice E) con un ejemplo. Vamos a considerar una casa típica que tiene cuatro habitaciones y está situada en un edificio que fue construido en 1970 (Figura 21.1). La **diferencia media de temperatura** entre el interior y el exterior de la casa depende de cómo esté programado el termostato y del clima. Si el termostato está permanentemente programado a 19°C , la diferencia de temperatura media podría ser de 9°C . Las **fugas del edificio** indican cómo de rápido se escapa el calor a través de las paredes, ventanas y grietas, debido a la diferencia de temperatura existente. A estas fugas a veces se les llama pérdidas de calor del edificio y se miden en kWh al día por grado de diferencia de temperatura. En el Apéndice E se calcula que las fugas de esta casa son de $4,5 \text{ kWh/d}^{\circ}\text{C}$. El producto:

$$\text{Diferencia media de temperatura} \times \text{Fugas del edificio} \quad (21.2)$$

es la velocidad con que el calor se escapa de la casa debido a la conducción y a la ventilación. En este ejemplo, como la diferencia de temperatura media es de 9°C , las pérdidas de calor son:

$$9^{\circ}\text{C} \times 4,5 \text{ kWh/d}^{\circ}\text{C} \simeq 40,5 \text{ kWh/d.} \quad (21.3)$$



Figura 21.1: Edificio de viviendas en Pamplona. Foto de Miguel Araiz.

Finalmente, para calcular la potencia diaria media requerida o, lo que es lo mismo, la energía requerida en un día, dividimos estas pérdidas de calor por la eficiencia del sistema de calefacción. En una casa con una caldera de gas natural de condensación, la eficiencia es del 85 %, por lo tanto:

$$\text{Potencia empleada} = \frac{9^{\circ}\text{C} \times 4,5 \text{ kWh/d}/^{\circ}\text{C}}{0,85} \approx 48 \text{ kWh/d.} \quad (21.4)$$

Esta estimación es mayor que los requerimientos para calentar un espacio estimados en el Capítulo 7 (que era de 18 kWh/d en casa y en el trabajo). Es mayor por varias razones: en primer lugar, esta fórmula asume que la caldera suministra todo el calor, cuando, de hecho, parte del calor procede de aportes accidentales por parte de los ocupantes, los aparatos y el sol. En segundo lugar, en el Capítulo 7 asumimos que una persona mantenía únicamente dos cuartos a 19°C todo el tiempo; sin embargo, mantener una casa entera a esta temperatura todo el tiempo requiere más energía. Además, hay que tener en cuenta que la estimación realizada no es una casa media y que es necesario dividir entre el número de habitantes.

¿Y cómo podríamos reducir la energía empleada para calentar? Viendo la Ecuación 21.1 se pueden plantear las siguientes líneas de actuación:

1. Reducir la **diferencia media de temperatura**. Esto se consigue indicando menor temperatura en los termostatos (o si tienes amigos en los altos cargos, cambiando el clima).
2. Reduciendo las **fugas del edificio**. Esto se consigue mejorando el aislamiento del edificio –por ejemplo con triple acristalamiento, mejores materiales aislantes tanto en paredes como en techos o reduciendo los puentes térmicos–. También se podría demoler el edificio y reemplazarlo por otro mejor aislado; o incluso vivir en un edificio de menor tamaño por persona. (Las fugas tienden a ser mayores cuanto mayor son los metros cuadrados del piso, ya que las áreas de las paredes externas, ventanas y techo tienden a ser mayores también).
3. Mejorar la **eficiencia del sistema de calefacción**. Puedes pensar que un 85 % suena difícil de mejorar, pero realmente lo podemos hacer mucho mejor.
4. Se podría fomentar una mayor entrada de calor proveniente del sol, con lo que se disminuiría el gasto energético de otras fuentes.

Noticias frescas: El termostato

La reducción de la temperatura del termostato (acompañada de jerséis de lana) es difícil de batir cuando se busca la mejor relación calidad-precio. Al reducir la temperatura del termostato, el edificio requiere una menor cantidad de energía, ¡magia! En España, por cada grado que bajes el termostato, las pérdidas de calor se ven reducidas en un 10%. Por ello, reducir la temperatura del termostato de 23°C a 18°C, prácticamente reduciría las pérdidas de calor a la mitad. Gracias a las entradas accidentales de calor en el edificio, el ahorro energético sería todavía mayor.

Sin embargo, desafortunadamente, estas importantes reducciones tienen efectos secundarios. Hay gente que a *reducir la temperatura del termostato* lo llama *cambio en el estilo de vida*, y no les gusta. Haremos algunas sugerencias más adelante acerca de cómo esquivar esta problemática de estilo de vida. Mientras tanto, para demostrar que «el componente más importante en un edificio con calefacción inteligente es el ocupante», se muestra en la Figura 21.2 un estudio en el que se midió el consumo energético de doce casas modernas idénticas. Gracias a este estudio, nos damos cuenta de que, por ejemplo, la familia número 1 presenta el doble de consumo que el del señor y señora Lanas, del número 12. De todos modos, debemos prestar especial atención a los valores: la familia número 1 está gastando 43 kWh al día. Este valor resulta abrumador, ¿no hemos estimado hace un momento que una casa típica consume más? El problema es la casa. Todas las casas modernas que se midieron en el estudio tienen fugas de 2,7 kWh/d/°C. Sin embargo, una casa típica más antigua tiene unas fugas de 4,5 kWh/d/°C.

La guerra de las fugas

¿Qué se puede hacer con las casas viejas que presentan muchas fugas térmicas?, aparte de llamar a la demoledora, por supuesto. La Figura 21.3 muestra estimaciones de los requerimientos de calefacción en unifamiliares, viviendas pareadas y adosadas antiguas, ya que se está haciendo un esfuerzo cada vez mayor en mejorarlas. Añadir aislamiento en el tejado y en las paredes reduce las pérdidas de calor de una casa vieja en un 25%. Gracias a ganancias accidentales de calor, esta reducción del 25% se puede convertir en un consumo de calefacción un 40% menor. ¡Pongamos a prueba estas ideas!

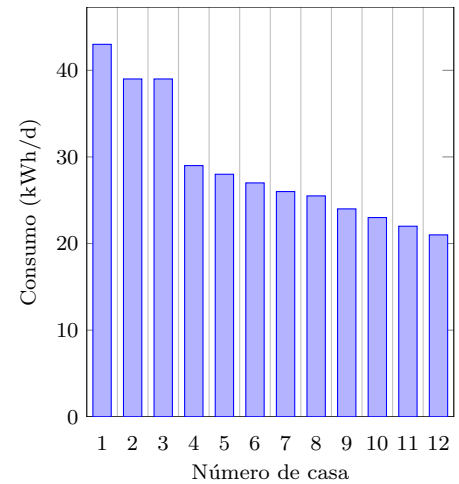
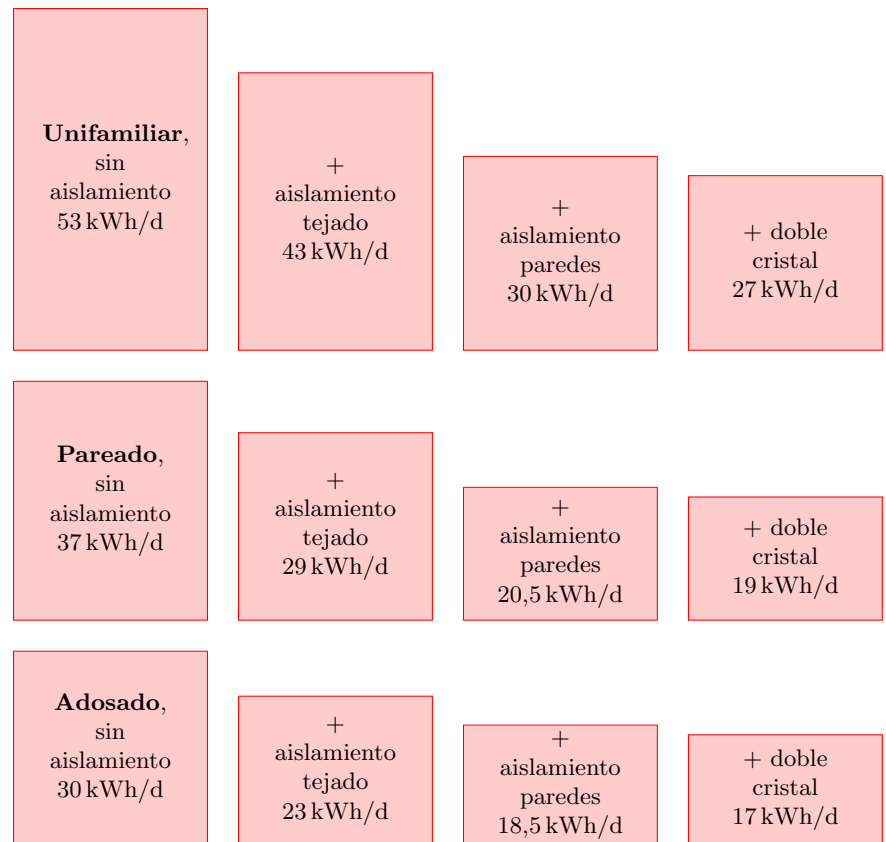


Figura 21.2: Consumo real de doce casas idénticas con idénticos sistemas de calefacción. Todas las casas tienen un tamaño de 86 m² y fueron diseñadas para tener unas fugas de 2,7 kWh/d/°C [132].

Figura 21.3: Estimaciones de los requerimientos energéticos para calentar diferentes tipos de casas [133].



Caso de estudio

Retomemos el ejemplo del piso que tiene cuatro habitaciones y está situado en un edificio construido en 1970. En 2010 se hizo una pequeña reforma en la que se sustituyeron algunos electrodomésticos de la cocina, se aisló la pared del salón que da al norte y se cambiaron las ventanas por unas de marco de aluminio y doble cristal. Estas modificaciones en la casa llevaron a reducir las pérdidas energéticas de 48 kWh/d a aproximadamente 28 kWh/d.

Esta reducción en el consumo energético de 48 a 28 kWh/d no está mal, pero no es suficiente si el objetivo es reducir la huella energética de los combustibles fósiles por debajo de una tonelada de CO₂ al año por persona. 28 kWh/d de gas equivalen a 2 toneladas de CO₂ al año. Para reducir más el consumo energético de calentar nuestras casas será

necesario prestar atención al termostato, ya que, como se ha visto anteriormente, la manipulación del termostato es una solución muy eficaz para conseguir un menor consumo energético.

Como se hicieron dos modificaciones a la vez en la misma obra, es difícil saber cuál de los cambios fue el más importante. Según nuestros cálculos (en el Apéndice E), las mejoras en el aislamiento de las paredes redujeron en $34 \text{ W/}^\circ\text{C}$ las pérdidas al exterior, un 18%; y la modificación de las ventanas supuso una disminución de las fugas al exterior de $19 \text{ W/}^\circ\text{C}$, un 11%. Entre las dos mejoras se redujeron las pérdidas de calor de $186 \text{ W/}^\circ\text{C}$ a $133 \text{ W/}^\circ\text{C}$, reducciones de casi el 30% que modifican el valor inicial de $4,5 \text{ kWh/d/}^\circ\text{C}$ a $3,2 \text{ kWh/d/}^\circ\text{C}$. Sin embargo, esta casa todavía fuga mucho más que cualquier casa moderna. ¡Es muy difícil reducir las fugas de una casa que ya está construida!

Por lo tanto, nuestro principal objetivo llegados a este punto es gestionar astutamente el termostato. ¿Cuál es un valor razonable para fijar el termostato? Muchas personas piensan que una temperatura de 17°C es insoportablemente fría. Los últimos datos publicados por el INE sobre temperatura de los hogares españoles datan de 2008, y situán la temperatura media a la que se fijan los termostatos españoles durante un día invernal en $21,3^\circ\text{C}$. La percepción de confort térmico de una persona depende de qué esté haciendo y de qué haya hecho la hora anterior. Una opción interesante podría ser: no pienses en una temperatura fija. En vez de poner el termostato a un valor fijo, intenta dejarlo a un valor bajo cuando estás fuera de casa o durmiendo (digamos a unos 15°C), y enciéndelo únicamente cuando lo necesites. Es como las luces en una biblioteca. Si te preguntas cuál es el nivel lumínico adecuado en las estanterías, sin ninguna duda contestarás que «tiene que estar lo suficientemente iluminado para leer los títulos de los libros», y con ello tendrás luces encendidas todo el tiempo. Sin embargo, este hecho presupone que debemos fijar el nivel lumínico, y no tenemos por qué hacerlo. Podemos colocar interruptores de luz de tal manera que el lector pueda encenderlos y apagarlos según necesite luz. De igual manera, los termostatos no tienen por qué estar continuamente a 19°C .

Antes de dejar este tema, debemos hablar acerca del aire acondicionado. ¿No te molesta entrar en un edificio en verano y que la temperatura esté fijada a 18°C ? Los dueños de estos edificios los mantienen a temperaturas que en invierno consideramos muy frías. El gobierno japonés recomienda que la temperatura del aire acondicionado en verano sea de 28°C . En 2009 en España se impuso en edificios públicos y locales comerciales una temperatura máxima en invierno de 21°C y mínima en verano de 26°C .



Figura 21.4: Regulador de temperatura colocado en un radiador de la Universidad Pública de Navarra. Foto de Patricia Aranguren.

Mejores edificios

Si puedes construir un edificio nuevo, tienes muchísimas maneras de asegurar que su consumo de calefacción sea mucho menor que el de uno viejo. La Figura 21.2 evidencia que las casas modernas están construidas con mejores estándares de aislamiento que las que se construyeron en los años 40. Sin embargo, los estándares en España podrían ser mucho mejores, como se detalla en el Apéndice E. Las tres ideas para obtener mejores resultados son: (1) tener aislamientos más gruesos en suelos, paredes y techos; (2) asegurar que el edificio está completamente aislado y utiliza ventilación activa para introducir aire puro y eliminar el aire viciado y húmedo, utilizando intercambiadores de calor que recuperan gran parte del calor del aire extraído de los edificios; (3) diseñar el edificio para aprovechar el sol al máximo posible.

El coste energético del calor

Hasta ahora, este capítulo se ha centrado en el **control de la temperatura** y las **fugas térmicas**. Ahora vamos a analizar el tercer factor de la ecuación:

$$\text{Potencia empleada} = \frac{\text{Diferencia media de temperatura} \times \text{Fugas del edificio}}{\text{Eficiencia del sistema de calefaccion}} \quad (21.5)$$

¿Con qué eficiencia se puede generar el calor? ¿Podemos obtener calor de una forma barata? Hoy en día el calor para los edificios españoles se genera principalmente al quemar un combustible fósil, generalmente gas natural, en calderas con eficiencias de entre el 78 % y el 90 %. ¿Podemos reducir el uso de los combustibles fósiles al tiempo que obtenemos calor de una manera más eficiente?

Una tecnología que puede dar respuesta a esta problemática es la denominada «cogeneración» (generación de calor y electricidad combinados –en inglés CHP–), o su otra alternativa, la microcogeneración. A continuación, vamos a describir la cogeneración, aunque, como se verá, no es tan buena idea, ya que existe una tecnología para calentar, denominada bomba de calor, que tiene muchas ventajas y se describirá más adelante.

Cogeneración

La visión habitual de las grandes centrales es que son terriblemente ineficientes, ya que arrojan calor tanto por sus chimeneas como por sus torres de refrigeración. Un análisis más sofisticado reconoce que, para convertir energía térmica en electricidad, inevitablemente tenemos que emitir calor (Figura 21.5). Así es como los motores térmicos trabajan, tiene que existir un sumidero de calor. Sin embargo, ¿por qué no utilizar los edificios como sumideros de calor en vez de torres de refrigeración o ríos o mares? A esta idea se le denomina «cogeneración» y ha sido ampliamente empleada en Europa durante décadas –en muchas ciudades, las grandes centrales de generación eléctrica están conectadas a redes de calor que suministran calefacción a las viviendas–. Los defensores de la versión moderna de cogeneración, la *microcogeneración*, sugieren que, dentro de cada edificio o de pequeños grupos de edificios, se debería instalar una pequeña estación de generación eléctrica, de manera que se podría obtener calor y electricidad para dichos edificios e incluso podrían verter parte de la electricidad a la red eléctrica.

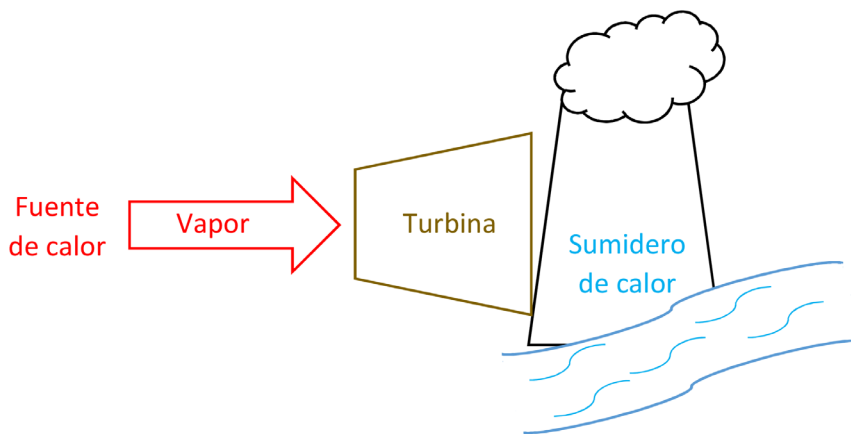
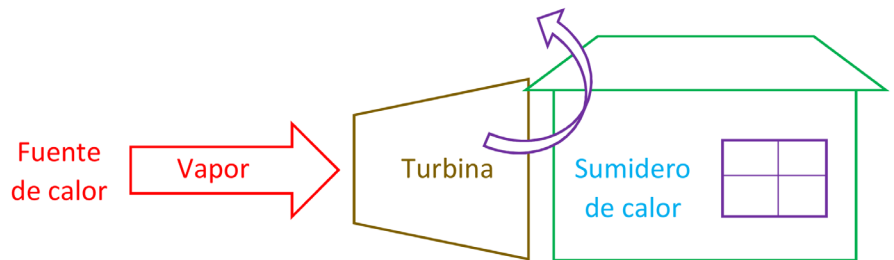


Figura 21.5: Funcionamiento de una planta de generación. Necesita un sumidero de calor para condensar el gas y hacer que la turbina gire. El sumidero de calor suele ser una torre de refrigeración o un río.

Ciertamente, España se encuentra muy retrasada en la utilización de redes urbanas de calefacción y cogeneración. La falta de números dificulta el estudio que, al mismo tiempo, se ve obstaculizado por dos errores habituales. En primer lugar, cuando se comparan dos formas de utilizar los combustibles, se emplea una medida incorrecta de la eficiencia, aquella que considera que la electricidad tiene el mismo valor que el calor. La verdad es que la electricidad es mucho más valiosa que el calor. En segundo lugar, es comúnmente asumido que el calor «resi-

Figura 21.6: Calor y energía combinados. La calefacción urbana absorbe el calor que habría sido emitido al ambiente por la torre de refrigeración.



dual» en una planta de generación de electricidad se puede usar para alguna finalidad útil sin modificar la producción eléctrica de la estación. Lamentablemente, esto tampoco es verdad, como demuestran los números. Entregar calor útil a un consumidor siempre reduce la electricidad producida en cierto grado. La ganancia neta verdadera de la cogeneración es normalmente menor de lo que nos hacen creer.

Un último impedimento para poder realizar una discusión racional de la cogeneración es un mito que últimamente ha crecido y que dice que descentralizar una tecnología de alguna manera la convierte en más verde. Por lo tanto, las grandes plantas de generación eléctrica de combustibles fósiles son «malas», mientras que muchas pequeñas estaciones eléctricas locales son deseables. Sin embargo, si la descentralización fuese una buena idea, la idea de «lo pequeño es bello» debería evidenciarse en los números. La descentralización debería ser capaz de imponerse por sí misma. Y lo que muestran los números es que la generación eléctrica centralizada tiene beneficios tanto económicos como energéticos. Únicamente en los edificios grandes se consiguen beneficios mediante la generación local, y la mejora lograda es aproximadamente del 10 o 20 % del total.

En España se ha fomentado la cogeneración, en particular la de alta eficiencia. Así, en 2017, se produjeron 28 134 GWh por cogeneración, más de un 11 % de la generación eléctrica total. Sin embargo, la cogeneración no es renovable, utiliza combustibles fósiles y nos fuerza a seguir utilizándolos. Por ello, dadas las ventajas de las bombas de calor, dejemos ya la cogeneración alimentada por gas y centrémonos en las bombas de calor.

Bombas de calor

Las bombas de calor son sistemas de refrigeración que trabajan a la inversa. Si tocas la parte de atrás de tu nevera, notarás que está calien-

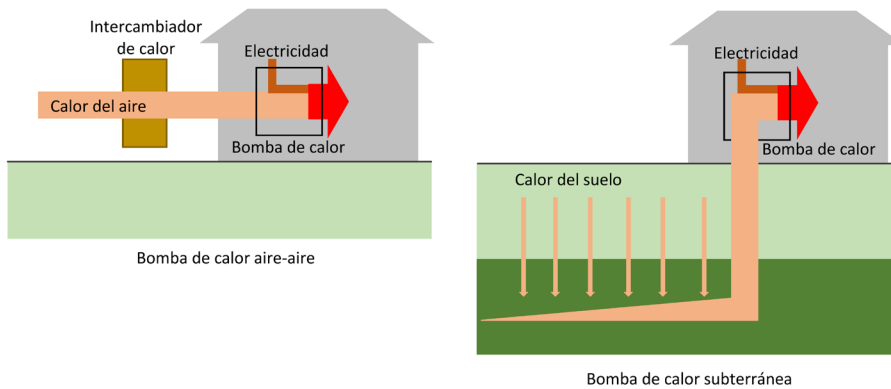


Figura 21.7: Esquemas de bombas de calor.

te. Un sistema de refrigeración mueve calor desde un lugar frío (en una nevera, su interior) a otro más caliente (la cocina). Por lo tanto, una manera de calentar un edificio es emplear un refrigerador del revés: poner el interior del refrigerador en el jardín (y, por lo tanto, enfriar el jardín) y dejar el panel trasero del refrigerador en la cocina calentando de esta forma la casa. Lo que no es tan obvio es que esta idea aparentemente alocada sea una manera eficiente de calentar tu casa. De cada kilovatio de potencia extraído desde la red eléctrica, el refrigerador inverso puede bombear hasta tres kilovatios de calor del jardín, por lo que introduce en tu casa un total de cuatro kilovatios de calor. Por lo tanto, las bombas de calor son aproximadamente cuatro veces más eficientes que una resistencia eléctrica. Mientras que la eficiencia de una resistencia es del 100%, la de una bomba de calor es aproximadamente del 400%. La eficiencia de una bomba de calor es comúnmente denominada coeficiente de operación (COP por sus siglas en inglés). Si la eficiencia es del 400%, su COP es 4.

Hay varias formas de instalar una bomba de calor (Figura 21.7). Una opción es que enfríe el aire en tu jardín utilizando un intercambiador de calor (normalmente una caja blanca de un metro de alto, Figura 21.8). En este caso se llama bomba de calor aire-aire (o aerotermia). Alternativamente, la bomba puede enfriar la tierra empleando grandes lazos de tuberías subterráneas (varias decenas de metros), lo que se conoce como bomba de calor geotérmica. Además, el calor también se puede bombear desde ríos o lagos.

Algunas bombas de calor pueden bombear calor en cualquier dirección (reversibles). Es decir, cuando una bomba de calor aire-aire funciona a la inversa, utiliza electricidad para calentar el aire exterior y enfriar



Figura 21.8: Aparatos interior y exterior de una bomba de calor aire-aire que tiene un coeficiente de operación de 4. Una de estas unidades Fujitsu puede entregar 3,6 kW de calor cuando emplea únicamente 0,845 kW de electricidad. También puede funcionar a la inversa, entregando 2,6 kW de frío cuando consume 0,655 kW eléctricos. Foto de Fujitsu.

el aire en el interior del edificio, siendo en este caso un aire acondicionado. De hecho, muchos equipos de aire acondicionado son realmente bombas de calor trabajando de esta manera. Así mismo, las bombas de calor geotérmicas también pueden trabajar como aire acondicionado. Por lo tanto, se puede usar el mismo equipo para aportar calefacción en invierno y frío en verano.

A veces, la gente dice que las bombas de calor geotérmicas utilizan «energía geotérmica», pero ese no es el nombre adecuado. Como vimos en el Capítulo 16, la energía geotérmica ofrece únicamente un pequeño chorro de potencia por unidad de área (aproximadamente 50 mW/m^2), en la gran mayoría de partes del mundo. Por ello, las bombas de calor no tienen nada que ver con este pequeño chorro, pero aun así se usan para calentar y/o enfriar. Estas bombas de calor simplemente utilizan la tierra como un lugar de donde extraer el calor, o a donde emitirlo. Cuando extraen el calor de manera continuada y estable, este calor se repone gracias al sol.

Todavía tenemos pendientes dos aspectos en este capítulo. Tenemos que comparar las bombas de calor con la tecnología de cogeneración y tenemos que estudiar los límites de las bombas de calor geotérmicas.

Comparación entre bombas de calor y cogeneración

Mucha gente piensa que la cogeneración es la solución evidente. «Obviamente, debemos utilizar el calor desechado por las plantas de generación eléctrica para calentar los edificios antes que tirarlo en las torres de refrigeración». Sin embargo, mirando detalladamente los números que describen el comportamiento de un sistema de cogeneración, hemos llegado a la conclusión de que hay mejores maneras de suministrar electricidad y calefacción a los edificios.

Vamos a construir un diagrama en tres pasos para mostrar la cantidad de energía eléctrica o térmica que se puede suministrar por unidad de energía química. En el eje horizontal del diagrama vamos a representar la eficiencia eléctrica, y en el vertical, la eficiencia térmica (Figuras 21.9 y 21.10).

Solución estándar sin cogeneración

En primer lugar, analizamos en la Figura 21.9 las plantas de generación eléctrica o sistemas de calefacción que generan electricidad o calor exclusivamente.

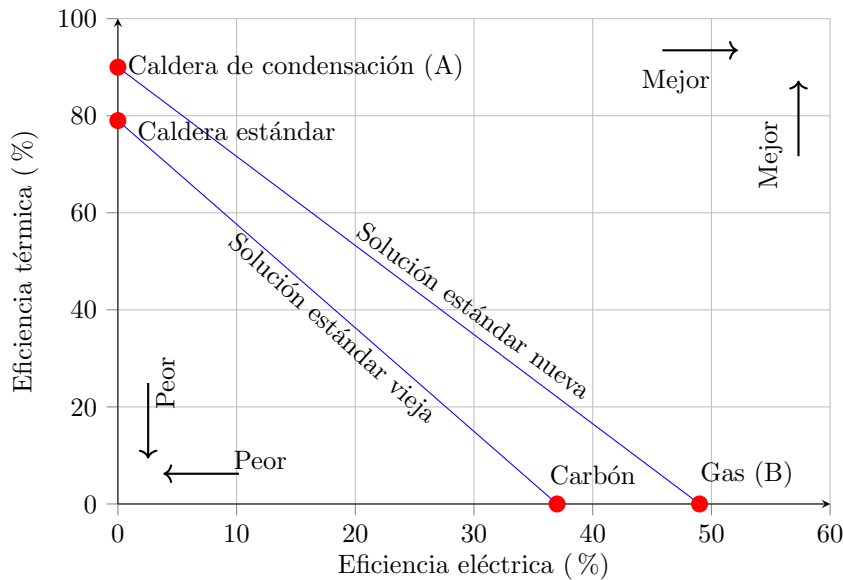


Figura 21.9: Eficiencias de sistemas de generación eléctricos y térmicos.

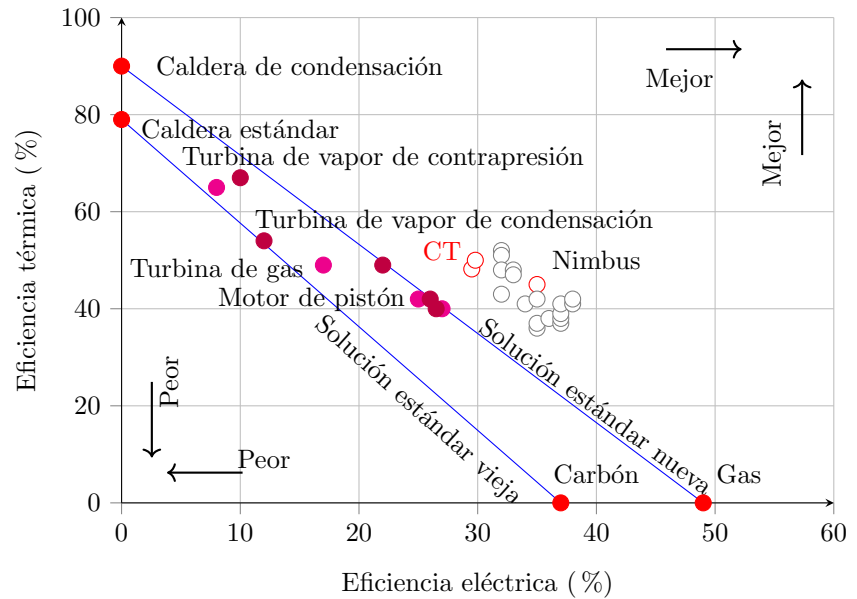
Las calderas de condensación (el punto superior a la izquierda, A) presentan una eficiencia del 90 %, ya que el 10 % del calor se escapa por la chimenea. Las plantas de generación eléctrica de gas, o termoeléctricas, españolas (el punto de abajo a la derecha, B) tienen actualmente una eficiencia del 49 % para convertir la energía química del gas en electricidad. Si deseas cualquier combinación de electricidad y calor generada a partir del gas natural, puedes obtenerla quemando las cantidades adecuadas de gas en la planta de generación eléctrica y en la caldera. Por ello, la nueva solución estándar puede ofrecer cualquier eficiencia eléctrica y térmica situada sobre la línea A-B al generar la electricidad y el calor independientemente, empleando dos instalaciones distintas.

Para ofrecer una perspectiva histórica, el diagrama también muestra la solución de calefacción antigua (una caldera ordinaria sin condensación, con una eficiencia del 79 %) y la forma estándar de generar electricidad hace unas décadas (una planta de generación eléctrica de carbón con una eficiencia aproximada del 37 %).

Cogeneración

Ahora añadiremos la cogeneración a las plantas de generación del diagrama. Estos sistemas obtienen simultáneamente electricidad y calor a partir de la energía química (Figura 21.10).

Figura 21.10: Eficiencias de sistemas de generación eléctricos y térmicos, incluyendo sistemas de cogeneración.



Cada punto relleno muestra el funcionamiento medio de sistemas de cogeneración en España, agrupados por tipo. Los puntos vacíos rojos, etiquetados como «CT», muestran el funcionamiento de sistemas de cogeneración ideales presentados por Carbon Trust. Por el contrario, los puntos vacíos grises, etiquetados como «Nimbus», se obtienen de las especificaciones de los fabricantes de varios productos.

Un dato muy importante a tener en cuenta en este diagrama es que la eficiencia eléctrica de los sistemas de cogeneración es bastante menor que el 49% obtenido por una planta de generación eléctrica de gas. Por lo tanto, el calor no es un producto «gratuito». Aumentar la producción de calor perjudica la producción eléctrica.

Es común englobar los dos números (la eficiencia de la producción eléctrica y la de producción de calor) en una eficiencia única denominada «eficiencia total». Por ejemplo, una turbina de vapor de contrapresión obteniendo un 10% de electricidad y un 66% de calor tendría una eficiencia del 76%. Sin embargo, esta manera de calcular la eficiencia total es confusa. Al fin y al cabo, de esta manera una caldera de condensación con una eficiencia del 90% es «más eficiente» que un sistema de cogeneración. Sin embargo, la realidad es que la energía eléctrica es más valiosa que el calor.

Muchos puntos de cogeneración de este diagrama son superiores a los «viejos estándares de hacer las cosas» (obtener electricidad del car-

bón y calor mediante calderas estándar). Los sistemas de cogeneración ideales son ligeramente superiores a los «nuevos estándares de hacer las cosas» (obtener electricidad del gas y calor de las calderas de condensación). Sin embargo, debemos recordar que esta ligera superioridad presenta desventajas: un sistema de cogeneración únicamente emite calor a los lugares en los que está conectado, mientras que las calderas de condensación se pueden colocar en cualquier lugar con suministro de gas. Comparados con la manera estándar de hacer las cosas, los sistemas de cogeneración no son tan flexibles en la generación de electricidad y calor. Un sistema de cogeneración trabajará en su punto óptimo únicamente cuando suministre una combinación particular de calor y electricidad. Su falta de flexibilidad conduce a ineficiencias, por ejemplo, durante un día de mucho frío en el que se requiere un exceso de calor. En una casa típica, la mayor parte de la electricidad se consume en picos breves que no tienen relación alguna con la demanda de calor. Un último problema con algunos de los sistemas de microcogeneración es que, cuando se demanda excesiva potencia eléctrica, no funcionan de forma adecuada.

Bombas de calor

Finalmente, añadimos al gráfico las bombas de calor, que emplean electricidad de la red para bombear calor del ambiente a los edificios.

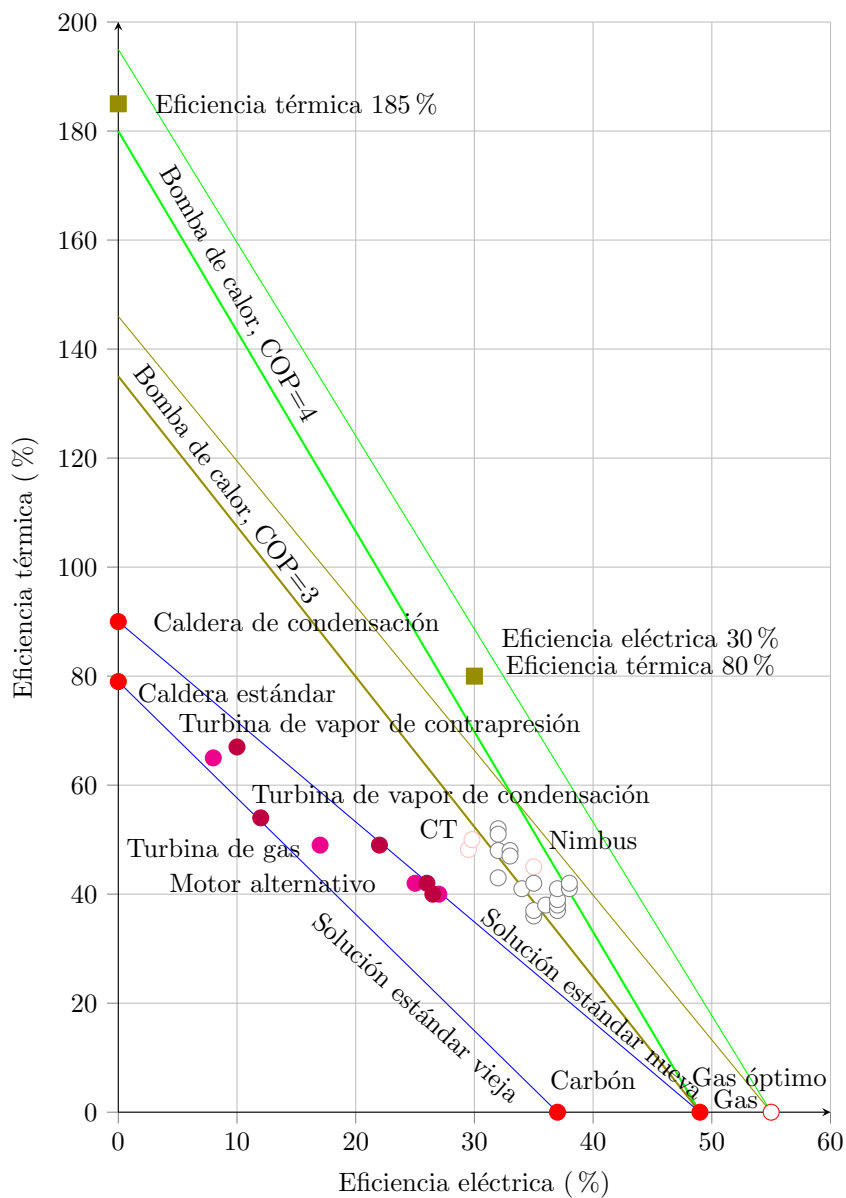
Las rectas verdes empinadas de la Figura 21.11 muestran las combinaciones de electricidad y calor que puedes obtener si las bombas de calor tienen un coeficiente de operación de 3 o 4. Estas rectas se han obtenido asumiendo que la electricidad requerida por las bombas de calor se genera en una planta típica de gas o en una planta de gas de última generación, e incluyendo un 8% de pérdidas en la red eléctrica entre la estación de transformación y el edificio calentado por las bombas de calor. La eficiencia de una planta de gas de última generación es del 55%, asumiendo que trabaja en su punto de funcionamiento óptimo (asumiendo que Carbon Trust y Nimbus hicieron la misma suposición cuando calcularon los valores empleados en este diagrama para los sistemas de cogeneración). En el futuro, las bombas de calor serán probablemente mejores de lo que son hoy en día. En Japón, gracias a la estricta legislación que exige la mejora de la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado, existen bombas de calor con coeficientes de operación de 4,9.

Date cuenta de que las bombas de calor ofrecen sistemas que pueden tener «eficiencias mayores que el 100%». Por ejemplo, la «mejor planta de generación eléctrica de gas», cuya electricidad alimenta a varias bombas de calor, puede obtener una combinación de una eficiencia eléctrica del 30% y una eficiencia térmica del 80%, lo que equivale a

una «eficiencia total» del 110%. ¡Ningún sistema de cogeneración podría obtener dicha eficiencia!

Déjanos explicar esto. Las bombas de calor presentan eficiencias superiores a las calderas de condensación, incluso aunque las bombas de calor se alimenten mediante plantas de generación eléctrica en las que

Figura 21.11: Eficiencia de sistemas de generación eléctricos y térmicos, incluyendo bombas de calor.



se queme gas. Si deseas calentar muchos edificios utilizando gas natural, podrías instalar calderas de condensación, que presentan una eficiencia del 90%; o podrías mandar el mismo gas a una planta de generación eléctrica para que genere electricidad e instalar una bomba de calor alimentada eléctricamente en cada edificio. La eficiencia de la segunda opción estaría entre un 140 y un 185%. Además, no es necesario excavar grandes agujeros en el jardín para instalar bombas de calor geotérmicas para beneficiarse de las ventajas de estos sistemas; las mejores bombas de calor aire-agua (que requieren únicamente una pequeña caja externa, como un aire acondicionado) pueden obtener agua caliente para radiadores normales con un coeficiente de operación por encima de 3. Por otro lado, la bomba de calor de la Figura 21.8 obtiene directamente aire caliente para una oficina.

Por lo tanto, concluimos que, aunque combinar la generación de calor y energía en un mismo sistema puede parecer una buena idea, probablemente no sea la mejor forma de calentar edificios y generar electricidad a partir de gas natural, ya que en esos mismos edificios se podrían instalar bombas de calor aire-aire o geotérmicas. La solución basada en bombas de calor tiene algunas ventajas adicionales que se deberían mencionar: se pueden instalar en cualquier edificio donde haya suministro eléctrico, se pueden utilizar con cualquier fuente de energía eléctrica (¡con renovables también!), por lo que seguirán funcionando cuando se termine el gas natural o su precio ascienda sin límites; y, por último, son sistemas flexibles: se pueden encender y apagar en función de la demanda del edificio.

Tenemos que remarcar que la conclusión de esta comparación no es que los sistemas de cogeneración sean siempre una mala idea. Lo que estamos comparando aquí son diferentes métodos para calentar edificios normales, aquellos que requieren solo calor de bajo nivel térmico. Los sistemas de cogeneración pueden proporcionar calor de más alto nivel térmico para usuarios industriales (a 200°C por ejemplo). En estos escenarios, es poco probable que las bombas de calor puedan competir con los sistemas de cogeneración, ya que presentarían coeficientes de operación más bajos.

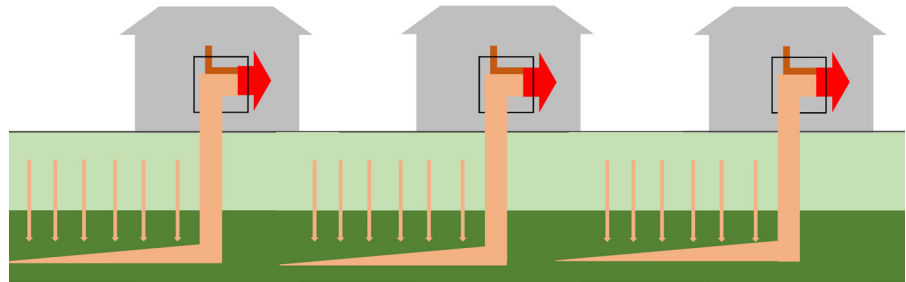
Límites de crecimiento de las bombas de calor

Dado que la temperatura del suelo a unos pocos metros de profundidad se mantiene prácticamente constante a 11°C, ya sea verano o invierno, el suelo es teóricamente mejor sumidero de calor para una bomba de calor que el aire, que en pleno invierno puede estar 10 o 15°C más frío

Tabla 21.1: Área urbana por persona de algunas ciudades según Wikipedia.

Área por persona (m ²)	
Manila	24
Manhattan	37
París	47
Barcelona	63
Buenos Aires	70
Singapur	130
San Francisco	147
Tokio	159
C. de México	168
Madrid	190
Sevilla	204
Moscú	207
Managua	281
Sidney	486

Figura 21.12: ¿Cómo de cerca podemos colocar bombas de calor subterráneas?



que el suelo. Por lo tanto, se recomienda elegir bombas de calor geotérmicas antes que aire-aire cuando sea posible. (Las bombas de calor alcanzan un COP más bajo cuando hay una gran diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, además de que en climas fríos se puede formar hielo en la parte exterior de las bombas de calor aire-aire, impidiendo que funcionen durante los días en los que son más necesarias).

Sin embargo, el suelo no es una fuente ilimitada de calor. El calor absorbido del suelo se debe reponer, y el suelo no es un buen conductor térmico. Si extraemos calor muy rápido del suelo, este se va a enfriar, y la ventaja de utilizar el suelo como fuente de calor para las bombas de calor ya no será tal.

En España, las bombas de calor tienen que introducir calor en los edificios durante el invierno. La fuente última de este calor es el sol, que calienta el suelo gracias a su radiación, y que también calienta el aire que posteriormente cede su calor al suelo. La velocidad a la que el calor se extrae del suelo debe satisfacer dos consignas: no debe reducir excesivamente la temperatura del suelo en invierno, y el calor extraído debe ser, de alguna manera, reponer en verano. Si el calor absorbido por el suelo durante un verano normal no es suficiente para reponer el que se ha extraído durante el invierno, esta renovación se debe realizar de forma activa, por ejemplo, haciendo funcionar al sistema de manera inversa en verano, introduciendo calor en el suelo (y, por lo tanto, ofreciendo aire acondicionado en los edificios en verano).

Vamos a hacer algunos números. ¿Cuánto suelo necesita una bomba de calor geotérmica? Asumamos una densidad de población media para entornos urbanos tomando la densidad de población media en zonas urbanas de Navarra –4444 habitantes por km^2 (225 m^2 por persona)–. ¿Podrían utilizar todos bombas de calor geotérmicas sin reponer activamente el calor en verano? Un cálculo realizado en el Apéndice E (pág. 371) nos da una primera respuesta: no. Si queremos que todo el



Figura 21.13: Central térmica de ciclo combinado de Fuerteventura, Canarias.

mundo pueda extraer calor del suelo para calentar sus casas (a una velocidad de 48 kWh/d), terminaríamos por enfriar notablemente el suelo en invierno. Para evitar este enfriamiento, la velocidad de extracción de calor debe ser inferior a 16 kWh/día por persona. Por lo tanto, si decidimos utilizar bombas de calor geotérmicas, debemos poder emplearlo durante el siguiente invierno. Así que es necesario recargar calor en verano, ya sea utilizando el calor emitido por el aire acondicionado o el calor obtenido de los paneles solares ubicados en el tejado [134]. Como alternativa podríamos usar alguna bomba de calor aire-aire, y entonces seríamos capaces de obtener todo el calor que necesitamos, siempre que dispusiéramos de la electricidad necesaria para hacer funcionar las bombas de calor. En España, la temperatura ambiente en invierno no desciende mucho por debajo de cero, por lo que el funcionamiento de las bombas de calor no es tan malo, al contrario de lo que ocurre en regiones más frías como en el norte de Estados Unidos o Escandinavia.

Nuestra conclusión: ¿podríamos reducir el consumo energético de calefacción? Sí. ¿Podríamos deshacernos de los combustibles fósiles al mismo tiempo? Sí. Sin olvidar los cambios fundamentales que habría que hacer –aislar bien los edificios y jugar con el termostato–, deberíamos ser capaces de reemplazar todos los calentadores basados en combustibles fósiles por bombas de calor alimentadas por electricidad. Claro que para llevar a cabo este plan será necesario generar mayor cantidad de electricidad. Pero, aunque la electricidad extra requerida proviniese de plantas de generación eléctrica de gas, esta opción seguiría siendo mucho más interesante que lo que se hace actualmente, quemar gas para calentar las casas. Las bombas de calor son una tecnología de futuro, nos permitirán calentar nuestros edificios eficientemente con electricidad generada de cualquier manera.

Los detractores de esta tecnología indican que los coeficientes de operación de las bombas de calor aire-aire son malísimos –únicamente 2 o 3–. Pero su información no está actualizada. Si somos cuidadosos y compramos bombas de calor de última generación, podemos obtener eficiencias mucho mejores. El gobierno japonés legisló que la eficiencia de los aparatos de aire acondicionado debía mejorar notablemente y, gracias a este impulso, hoy en día existen bombas de calor aire-aire con coeficientes de operación de 4,9; pudiendo calentar tanto agua como aire.

Otra objeción a las bombas de calor sería «oh, no podemos aprobar que la gente coloque eficientes sistemas de calefacción, porque los podrían utilizar como aire acondicionado en verano». Venga, por supuesto que no estamos a favor de masificar los sistemas de aire acondicionado en regiones climáticas donde no son necesarios, como cualquiera, ¡pero estas bombas de calor son cuatro veces más eficientes que cualquier



Figura 21.14: Campaña realizada en torno al Día Mundial del Ahorro de Energía por parte de la Universidad de Murcia. Esta campaña apuesta por el beneficio que se obtiene a través de la unión de pequeños esfuerzos, como bajar la temperatura del termostato en invierno y subirla en verano. Cada grado que se acerca la temperatura del termostato a la temperatura exterior se traduce en un ahorro en el consumo energético de climatización de hasta el 10 %.

otro método de calefacción para el invierno! ¿Tenemos alguna opción mejor? ¿Pellets? Claro, unas pocas personas pueden quemar madera, pero no hay madera suficiente para que todo el mundo lo haga. Para los habitantes de zonas boscosas, madera. Para el resto, bombas de calor.

Notas y textos de consulta

Página

- 195 *Añadir aislamiento en el tejado y en las paredes reduce las pérdidas de calor de una casa vieja en un 25%.* Fuente: [133].
- 197 *...sitúan la temperatura media a la que se fijan los termostatos españoles durante un día invernal en 21,3°C.* Fuente: [135].
- 199 *España se encuentra muy retrasada en la utilización de redes urbanas de calefacción y cogeneración.* En Dinamarca los sistemas de calefacción urbana suministraron en 1985 el 42% de la calefacción, con calor que se podía transportar hasta 20 km o más en agua caliente presurizada. En el oeste de Alemania 4 millones de habitantes recibieron en 1985 7 kW de calefacción urbana por habitante. Dos tercios de este calor suministrado provenía de plantas de cogeneración. En Vasteras, Suecia, el 98% del calor de la ciudad durante el invierno de 1985 se generó en plantas de cogeneración.
- 201 *...las bombas de calor son aproximadamente cuatro veces más eficientes que una resistencia eléctrica.* Ver www.gshp.org.uk. Algunas bombas de calor ya tienen coeficientes de operación mayores que 4. Existen bombas de calor geotérmicas que se comercializan con coeficientes de operación de 5,4 para enfriar y 4,9 para calentar [136].
- 209 *...existen bombas de calor aire-aire con coeficientes de operación de 4,9.* Bombas de calor con coeficientes de operación de 6,6 son productos disponibles en Japón desde 2006 [137]. El coeficiente de operación de las bombas de calor en Japón mejoró de 3 a 6 en una década gracias a las regulaciones gubernamentales. También existe una bomba de calor aeroterma, la llamada Eco Cute, que calienta agua con un coeficiente de operación de 4,9. Eco Cute llegó al mercado en 2001. www.ecosystem-japan.com.

Lectura adicional sobre bombas de calor:

European Heat Pump Network
ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/
www.kensaengineering.com/
www.heatking.co.uk
www.iceenergy.co.uk

Capítulo 22

Uso eficiente de la electricidad

¿Podemos reducir el consumo de electricidad? Sí, apagar los aparatos que no están en uso es una forma fácil de marcar la diferencia. Además, las bombillas de bajo consumo también te ahorrarán electricidad.

Ya hemos examinado los dispositivos electrónicos en el Capítulo 11. Algunos de ellos no son importantes, pero otros son unos tragones de electricidad impresionantes. La impresora láser de una oficina, estando ahí sin hacer nada, está chupando 17 W, ¡casi 0,5 kWh por día! Un amigo se compró una lámpara de IKEA. Su pésimo adaptador (Figura 22.1) se come 10 W (0,25 kWh por día) independientemente de si la lámpara está encendida o no. Si sumas alguna radio o equipo de música, reproductores de DVD, módems y *routers*, descubrirás que te puedes ahorrar la mitad del consumo eléctrico de tu casa.

De acuerdo con el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), en España el consumo en *standby* es aproximadamente el 7% de la demanda residencial de electricidad. Esto supone que la energía media que se pierde por hogar es de 2 kWh/d. Pero el problema no es el propio *standby*, sino la forma chapucera en la que se implementa el *standby*. Es perfectamente posible hacer sistemas de *standby* que consuman menos de 0,01 W; pero los fabricantes, ahorrándose unos céntimos en los costes de fabricación, están endosando al consumidor unos costes anuales adicionales.

Afortunadamente, en la Unión Europea se han ido introduciendo hojas de ruta para evitar estos consumos inútiles limitando los valores de *standby* de los nuevos equipos. Así, en principio, un dispositivo no puede consumir más de 0,5 W en modo *standby* (o 1 W si tiene pantalla). Si el equipo está conectado a una red de datos, se le permite consumir hasta 3 W, y si es un elemento activo de la red (un router, por ejemplo), hasta 8 W. Según esto, en una casa moderna con 10 equipos eléctricos permanentemente enchufados (pero sin conexión a internet), un router y 5 elementos conectados al router (termostato, televisor, etc.), se consumirían unos 40 W, es decir, 1 kWh/d. En la vivienda de uno de los



Figura 22.1: El pésimo adaptador AC de una lámpara de IKEA. ¡El adaptador usa casi 10 W, incluso cuando la lámpara está apagada!

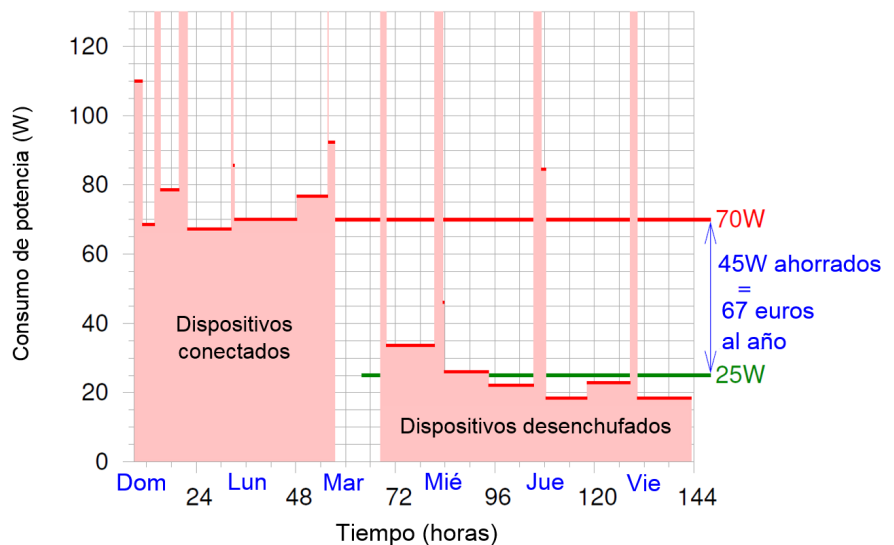
autores de este libro, equipada con dispositivos modernos, se ha medido el consumo de todos estos equipos (consumo nocturno descontando el frigorífico) y es de 35 W, o 0,85 kWh/d. Si, además, se tiene en cuenta que en la casa viven dos personas, el consumo por persona es lógicamente la mitad, 0,42 kWh por persona y día. Así que, mientras se cumplan las normativas, el standby parece que por fin ha dejado de ser un gran problema. Pero cuidado, no bajemos la guardia, aún quedan mucho viejos equipos chupando de la red, veamos otro experimento.

Un experimento en contra del standby

La Figura 22.2 muestra un experimento que hizo David MacKay, el autor de la versión original de este libro, en su casa. Primero, durante dos días, midió el consumo de potencia cuando no estaba en casa o estaba durmiendo. Después, desenchufando todos los aparatos que normalmente dejaba conectados, volvió a medir la potencia durante otros tres días. Descubrió que se ahorra 45 W –lo que supone unos 67 € al año si el kWh cuesta unos 17 céntimos de euro–.

Desde que empezó a prestar atención a su contador, el consumo total de electricidad de David se redujo a la mitad (Figura 22.3). Este ahorro se puede afianzar con el hábito de revisar los contadores cada semana, comprobando así que el consumo en standby ha desaparecido. Si este

Figura 22.2: Eficiencia a la vista. «Medí el consumo de potencia durante una semana en la que estaba prácticamente todo el día en el trabajo, por lo que no tenía casi actividad útil ni durante el día ni durante la noche, excepto el frigorífico. Los pequeños picos de consumo son debidos al microondas, la tostadora, la lavadora o el aspirador. El martes desenchufé la mayoría de mis dispositivos: dos equipos de música, un reproductor de DVD, un módem, un router inalámbrico y un contestador. La línea roja muestra la tendencia del consumo con “nadie-en-casa” antes, y la línea verde muestra el consumo con “nadie-en-casa” después de este cambio. El consumo cayó 45 W, o 1,1 kWh por día». Nota de D. MacKay sobre el experimento que realizó en 2007.



truco mágico se repitiese en todas las casas y puestos de trabajo, podríamos obviamente obtener ahorros sustanciales.

Realmente esperamos que esta especie de actividad de revisión inteligente del contador marque una diferencia. En el esquema de la futura España en 2050, en cambio, hemos asumido que todos esos ahorros de electricidad se cancelan debido al milagro del crecimiento. El crecimiento es uno de los principios de nuestra sociedad: la gente va a ser más rica, y, por tanto, va a tener más dispositivos electrónicos. Las demandas de los cada vez más excepcionales videojuegos fuerza a tener ordenadores más potentes y que, por tanto, consumen más. Los ordenadores de hace un par de décadas se pensaba que eran bastante formidables, pero ahora se consideran inútiles, y se deben cambiar por máquinas más rápidas y potentes.

Notas y textos de consulta

Página

211 **En España el consumo en standby es aproximadamente el 7% de la demanda residencial de electricidad.** Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (2011). Proyecto SECH-SPAHOUSEC.

Para una visión más global, se puede recurrir a la Asociación Internacional de la Energía, ver:

<https://www.iea.org/etp/networkstandby/>

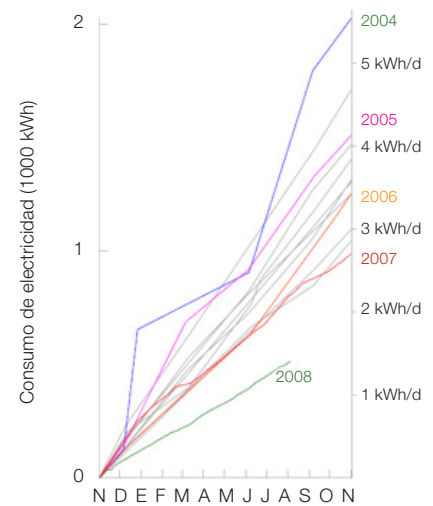


Figura 22.3: «Mi consumo doméstico de electricidad acumulado, en kWh, cada año desde 1993 hasta 2008. Las líneas grises muestran los años desde 1993 hasta 2003. (Estos no los he etiquetado para evitar que la gráfica sea un lío). Las líneas coloreadas muestran del año 2004 en adelante. La escala de la derecha muestra la tasa media de consumo de energía, en kWh por día. El experimento en contra del standby tuvo lugar el 2 de octubre de 2007. La combinación de la eliminación del standby con la instalación de bombillas de bajo consumo disminuyó mi consumo de electricidad de 4 kWh/día a 2 kWh/día». Nota de David MacKay sobre el experimento que realizó en 2007.

Capítulo 23

¿Combustibles fósiles sostenibles?

Si se quiere ser medioambiental, hay que subir los precios, y si se quiere contener los precios, ganar competitividad y crear empleo, no se pueden tener las ambiciones medioambientales que a alguno le gustaría tener.

Álvaro Nadal Belda,
(ministro de Energía, Turismo y Agenda Digital
de España entre 2016 y 2018)

Nuestro feliz progreso actual tiene duración limitada.
William Stanley Jevons (1865)

En los últimos tres capítulos hemos analizado las principales tecnologías y los cambios en el estilo de vida necesarios para reducir el consumo de energía. Hemos visto que podemos reducir a la mitad el consumo en el transporte (y descarbonizarlo) cambiando a vehículos eléctricos. También hemos deducido que podríamos reducir aún más el consumo de calefacción (y descarbonizarlo también) aislando mejor todos los edificios y usando bombas de calor eléctricas en vez de combustibles fósiles. Así que sí, podemos reducir el consumo. De todos modos, encajar este menor consumo con la energía proporcionada por las renovables autóctonas españolas es un reto de gran envergadura (Capítulo 18). Es hora de discutir las opciones no renovables para la generación energética.

Considera las reservas conocidas de combustibles fósiles, que son casi exclusivamente de carbón: 1035 Gt de carbón. Repártelas uniformemente entre 7000 millones de personas, y quémalas de manera «sostenible». ¿A qué nos referimos cuando hablamos de usar un recurso finito de manera «sostenible»? Aquí está la definición arbitraria que usaremos: el ritmo de combustión es «sostenible» si los recursos duran **1000 años**. Una tonelada de carbón contiene 8000 kWh de energía química, por lo que 1035 Gt de carbón repartidas entre 7000 millones de personas durante 1000 años da lugar a **3,25 kWh por persona y día**. Una central térmica de carbón convertiría esta energía química en electricidad con



Figura 23.1: Centrales térmicas de carbón de Compostilla II (León) y de Puentes de García Rodríguez, más conocida como de As Pontes (A Coruña). Se trata de las dos centrales con mayor capacidad en España (1341 MW y 1468 MW, respectivamente). Imágenes originales distribuidas mediante Wikipedia bajo licencia Creative Commons Attribution 2.0 Generic y Creative Commons Attribution-Share alike 3.0 (Silvia Alba y PepedoCouto).

Carbón: **3,25 kWh/d**



Figura 23.2: Posible contribución de los «Combustibles fósiles sostenibles».

una eficiencia de aproximadamente 37% –lo que significa **1,2 kWh(e) por persona y día**–. Sin embargo, si nos interesa el medio ambiente, no usaremos una central térmica convencional. Más bien, elegiremos el «carbón limpio», también conocido como «carbón con captura y almacenamiento de carbono» –una tecnología poco extendida que captura gran parte del dióxido de carbono que se expulsa por la chimenea de gases y los introduce en un depósito enterrado en el suelo–. Limpiar las emisiones de una central térmica de esta manera tiene un coste energético importante –se reduciría la generación eléctrica en un 25% aproximadamente, por lo que un uso «sostenible» de las reservas de carbón daría lugar a solo **1 kWh(e) por persona y día**–.

Este ritmo de combustión «sostenible», 1,14 Gt por año, es mucho menor que la tasa de consumo actual de carbón mundial: 5,5 Gt al año, aunque, afortunadamente, a diferencia del petróleo y del gas natural, esta tasa ya se ha empezado a reducir.

¿Qué ocurre si nos centramos únicamente en España? Se estima que España tiene unas reservas de 1,19 Gt de carbón. Vale, si repartimos estas 1,19 Gt entre los 46 millones de personas, obtenemos 26 t por persona. Si queremos una solución para los próximos 1000 años, esto corresponde a **0,57 kWh por persona y día**. En una central térmica con captura y almacenamiento de carbono, este enfoque sostenible para el carbón español daría lugar a **0,16 kWh(e) por persona y día**.

Nuestra conclusión es clara:

El carbón limpio es solo un parche.

De todos modos, si desarrollamos la tecnología del «carbón limpio» para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, debemos tener cuidado, mientras nos damos palmaditas en la espalda, de hacer las cuentas honestamente. El proceso de quemado de carbón emite gases de efecto invernadero no solo en la central térmica, sino también en la mina. Las minas de carbón tienden a emitir metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono, tanto directamente de las vetas de carbón a medida que se exponen, como posteriormente de las lutitas, esquistos o pizarras carbonosas que se dejan sin extraer. Para una central térmica de carbón convencional, estas emisiones de las minas incrementan la huella ecológica en un 2%, por lo que en las centrales térmicas de carbón «limpio» estas emisiones pueden tener algo de impacto en las cuentas. Hay un problema de contabilidad similar con el gas natural: si, digamos, el 5% del gas natural se escapa en el camino desde el yacimiento hasta la central térmica, entonces esta contaminación accidental de metano es equivalente (en efecto invernadero) a un aumento del 40% en las emisiones de dióxido de carbono de la central.



Figura 23.3: Un camión cargando carbón.

Nuevas tecnologías del carbón

Otra novedosa tecnología para producir electricidad a partir del carbón son las *pilas de combustible de carbón directo*, en inglés *Direct Carbon Fuel Cell*, que convierten el combustible y el aire directamente en electricidad y CO₂, sin necesidad de agua o turbinas de vapor. Esta forma de generar electricidad a partir del carbón se cree que es el doble de eficiente que las centrales térmicas convencionales. Sin embargo, todavía está en una fase de desarrollo muy prematura y son sistemas caros y poco fiables de los que se desconoce la evolución de su funcionamiento a medio plazo.

¿Cuándo se acabará el negocio tal y como lo conocemos?

El economista William Stanley Jevons hizo un cálculo sencillo en 1865, cuando se empezaba a discutir sobre cuánto duraría el carbón en cada país. La tendencia al responder esta pregunta era dividir las reservas estimadas de carbón entre la tasa de consumo del mismo, obteniendo respuestas como «1000 años». Sin embargo, Jevons matizó que el consumo *no* es constante. Históricamente, dicho consumo se había doblado cada 20 años, según aumentaba el progreso. Por tanto, «las reservas divididas entre la tasa de consumo» proporcionan una respuesta incorrecta.

En cambio, Jevons extrapoló el consumo creciente de manera exponencial, y calculó el momento en el que la cantidad total consumida sobrepasaría las reservas estimadas. Esto era un tiempo mucho más corto. Jevons no solo estaba asumiendo que el consumo seguiría creciendo al mismo ritmo, sino que puntualizaba que el crecimiento no era sostenible. De hecho, sus predicciones se cumplieron en el Reino Unido, indicando los inevitables límites de su crecimiento, y el poco tiempo que quedaba antes de que el límite a nivel mundial fuese evidente. Jevons predijo que el final del «progreso» británico llegaría en los 100 años siguientes a 1865. Y estaba en lo cierto. La producción de carbón británico alcanzó su pico en 1910, y para 1965 el Reino Unido ya no era una potencia mundial en este sector.

Realicemos estos cálculos considerando la situación mundial. Desde el año 2013 el consumo mundial de carbón ha experimentado un estancamiento debido a la reducción en la demanda de regiones como Estados Unidos, China y la Unión Europea. Esta reducción viene motivada, en gran medida, por los compromisos medioambientales que han



Figura 23.4: Central térmica de carbón.

adquirido los países a nivel internacional. Las previsiones de la Agencia Internacional de la Energía apuntan a que este estancamiento durará al menos hasta el año 2021. En los próximos años sabremos si este es el límite descrito por Jevons o es un estancamiento transitorio y finalmente volvemos a la misma situación de incremento exponencial. Para este cálculo vamos a considerar una tasa de crecimiento anual del 2%, que es la registrada entre 1930 y 2000 (además, es un valor intermedio entre el estancamiento actual y la tasa anual del 4,5% registrada entre los años 2000 y 2012). En 2017 el consumo de carbón en el mundo fue de 5,5 Gt. Comparándolo con las reservas de 1035 Gt, se podría pensar que «quedan 190 años de carbón». Pero si consideramos que «todo sigue como hasta ahora», lo que significa que el consumo aumentará al 2% anual, obtenemos una respuesta diferente. En este escenario, el carbón se habrá agotado para 2095. Por tanto, es posible que no queden 190 años, sino 78.

Notas y textos de consulta

Página

- 215 *Aquí está la definición arbitraria que usaremos: el ritmo de combustión es «sostenible» si los recursos duran 1000 años.* Como precedente para esta elección, Hansen et al. (2007) consideran que «más de 500 años» es «para siempre» [138].
- 215 *Una tonelada de carbón contiene 8000 kWh de energía química.* Este valor no incluye los costes energéticos de minería, transporte y captura del carbono.
- 216 *Captura y almacenamiento de carbono (CCS).* Hay diferentes tecnologías para la captura y almacenamiento del carbono. Absorber el CO₂ de los gases de escape es una; otra es gasificar el carbón y separar el CO₂ antes de la combustión. Ver [139]. El primer prototipo de central térmica de carbón con CCS comenzó a operar el 9 de septiembre de 2008 y era propiedad de la compañía sueca Vattenfall [140].

- 216 *tasa de consumo actual de carbón mundial: 5,5 Gt.* Dato del informe estadístico de BP publicado en junio de 2018 [141].
- 216 *Se estima que España tiene unas reservas de 1,19 Gt de carbón.* A finales de 2016, las reservas probadas de carbón en España eran de 1,19Gt, según el informe estadístico de BP publicado en junio de 2018 [141].
- 216 *Las minas de carbón tienden a emitir metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono...* Para obtener más información acerca de las emisiones de metano procedentes de la minería del carbón ver www.epa.gov/cmop/, [142, 143]. Las emisiones globales de metano de la minería del carbón son, aproximadamente, 400MtCO₂e al año. Esto equivale al 2% de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la quema de carbón. Por ejemplo, las vetas de carbón de Inglaterra tienen 4,7 m³ por tonelada de carbón [142]. Este metano, si se libera a la atmósfera, tiene un potencial de calentamiento global de aproximadamente el 5% del CO₂ que se emitiría al quemar el carbón.
- 216 *...si, digamos, el 5% del gas natural se escapa en el camino desde el yacimiento hasta la central térmica, entonces esta contaminación accidental de metano es equivalente (en efecto invernadero) a un aumento del 40% en las emisiones de dióxido de carbono de la central...* Una contaminación accidental de metano tiene casi 8 veces más efecto para el calentamiento global que la contaminación de CO₂ que se produciría al quemar dicho metano. Ocho veces, no «23 veces» como se suele mencionar, ya que «23 veces» es el ratio entre masas iguales de metano y CO₂. Cada tonelada de CH₄ da lugar a 2,75 toneladas de CO₂ si se queman. Si se escapan, equivalen a 23 toneladas de CO₂. Y 23/2,75 es 8,4.
- 218 *Las previsiones de la Agencia Internacional de la Energía apuntan a que este estancamiento durará al menos hasta el año 2021.* En su informe anual sobre el carbón [1], la AIE explica que India y otros países del sudeste asiático, como Pakistán y Bangladesh, van a ser los responsables de la progresión de la demanda mundial, al compensar la caída del consumo de carbón en los miembros de la OCDE (Estados Unidos incluido) o en China. El peso relativo del carbón en la energía a escala global se redujo al 27% en 2016, tras el descenso del 1,9% ese año, y caerá todavía más, hasta el 26% en 2022.

Lectura adicional: World Energy Council [144]

Lectura adicional sobre la gasificación del carbón bajo tierra [145]

Capítulo 24

¿Nuclear?

Cometimos el error de agrupar la energía nuclear con las armas nucleares, como si todo lo nuclear fuese diabólico. Creo que esto es un gran error, como si comparásemos la medicina nuclear con las armas nucleares.

Patrick Moore
(antiguo director de Greenpeace Internacional)

La energía nuclear tiene dos versiones. La *fisión* nuclear es la versión que sabemos usar en las centrales; la fisión usa uranio, un elemento excepcionalmente pesado, como combustible. La *fusión* nuclear es la versión que aún no sabemos cómo implementar en las centrales; la fusión usaría elementos ligeros, especialmente hidrógeno, como combustible. Las reacciones de fisión dividen núcleos pesados en núcleos de un tamaño mediano, liberando energía. Las de fusión unen núcleos ligeros para formar núcleos de tamaño mediano, liberando todavía más energía.

Ambos procesos, fisión y fusión, tienen una importante propiedad: la energía nuclear disponible por átomo es aproximadamente un millón de veces mayor que la energía química por átomo que se obtiene quemando los combustibles convencionales. Esto supone que la cantidad de combustible y de residuos con los que hay que lidiar en un reactor nuclear pueden ser hasta un millón de veces menores que los relativos a una central térmica equivalente que funcione con combustibles fósiles.

Vamos a intentar personalizar estas ideas. La masa de combustibles fósiles que consume una «persona media española» es aproximadamente 5,44 kg por día (1,23 kg de carbón, 3,12 kg de petróleo y 1,08 kg de gas natural). Esto significa que cada día se extrae de un yacimiento una cantidad de combustible que pesa algo más que 5 cajas de leche, se transporta, procesa y quema en algún lugar en tu nombre. El consumo de combustibles fósiles de un español medio crea 5 toneladas de dióxido de carbono al año; lo que supone 13 kg al día. En el capítulo anterior hemos desarrollado la idea de capturar este dióxido de carbono que se genera, comprimirlo en forma líquida o sólida, y transportarlo a alguna

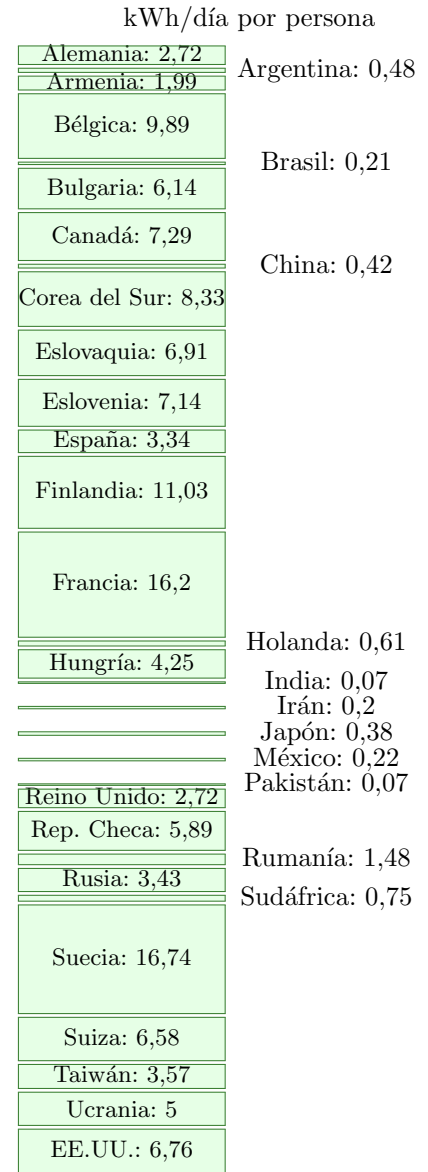


Figura 24.1: Electricidad generada per cápita mediante fisión nuclear en 2016, en kWh por persona y día, en cada uno de los países que cuentan con energía nuclear.

parte para su desecho. Imagina que cada persona fuese responsable de capturar y tratar todo el dióxido de carbono que genera. 13 kg al día supone llenar un saco bastante grande todos los días, con un peso similar a ¡13 cajas de leche!

En cambio, la cantidad de uranio natural que se necesita para obtener la misma cantidad de energía que 5,44 kg de combustibles fósiles, en un reactor de fisión convencional, es de 0,68 gramos; y los residuos resultantes pesan menos de 0,04 gramos. (Por cierto, estos 0,68 gramos de uranio no son una millonésima parte de 5,44 kg al día porque los reactores actuales «quemán» menos del 1 % de uranio). Para suministrar 0,68 g de uranio al día, los mineros de las minas de uranio tendrían que extraer unos 68 g de mineral al día.

De este modo, los flujos de material que entran y salen de los reactores nucleares son pequeños, en comparación con los flujos de combustibles fósiles. «Lo pequeño es hermoso», pero el hecho de que el flujo de residuos nucleares sea pequeño no quiere decir que no sea un problema.

Tabla 24.1: Reservas de uranio. La parte superior de la tabla muestra la suma de los «recursos asegurados» y «recursos deducidos» estimados para los principales países a un coste menor de 115 € por kg de uranio en 2017 [146]. Estos son los recursos estimados en áreas donde se ha explorado. También hay 1,3 millones de toneladas de uranio empobrecido esperando a ser usados, un subproducto de las actividades del uranio.

	Millones de toneladas de uranio
Australia	1,82
Kazajistán	0,84
Canadá	0,51
Rusia	0,49
Namibia	0,44
Sudáfrica	0,32
China	0,29
Níger	0,28
Brasil	0,28
...	...
España	0,017
<hr/>	
Totales en el mundo (convencionales terrestres)	6,1
<hr/>	
Depósitos de fosfato	22
<hr/>	
Agua del mar	4500

Energía nuclear «sostenible» de fisión

La Figura 24.1 muestra la cantidad de electricidad que fue generada a partir de la fisión nuclear en 2016 en cada país.

¿Puede la energía nuclear ser «sostenible»? Dejando a un lado por un momento las cuestiones habituales sobre seguridad y eliminación de residuos, una cuestión clave es si la humanidad podría vivir de la fisión durante generaciones. ¿Cómo de abundantes son los suministros de uranio en el mundo? ¿Se nos acabará el uranio en unas pocas décadas o tenemos suficiente para milenios?

Para estimar la energía «sostenible» del uranio, hemos cogido todo el uranio que se conoce, lo hemos dividido entre los 7000 millones de personas que habitan el planeta y nos hemos preguntado «¿cuánto podemos usar anualmente si tiene que durar 1000 años?».

Tal como se aprecia en la Tabla 24.1, en España disponemos de una cantidad de uranio muy pequeña. En nuestro país se usan cada año 1800 kg de este material para alimentar a los reactores nucleares, por lo que, si mantenemos el ritmo actual de consumo, disponemos de reservas para abastecernos durante 10 años, algo muy alejado de la sostenibilidad. Sin embargo, la extracción de este uranio requeriría la explotación de una mina a cielo abierto en la localidad salmantina de Retortillo, proyecto que actualmente se encuentra paralizado debido a su impacto ambiental y a la oposición de los vecinos.

A nivel mundial la situación es diferente, ya que hay regiones muy ricas en uranio. Además, prácticamente todo el uranio que se puede extraer está en los océanos, no en la tierra: el agua de mar contiene 3,3 mg de uranio por m^3 de agua, lo que supone 4500 millones de toneladas totales. Pensar que el uranio presente en los océanos es «extraíble», es algo impreciso. En primer lugar, porque nadie ha conseguido extraer uranio del mar a escala industrial, y, en segundo lugar, porque la mayor parte de aguas oceánicas son inaccesibles y la esfera rodante oceánica gira una vez cada 1000 años aproximadamente. Por tanto, haremos estimaciones separadas para los dos casos: primero, contabilizando solo uranio de las minas y, segundo, suponiendo que podemos usar también el de los océanos.

El uranio terrestre que se puede extraer a día de hoy a un precio razonable (115 € por kg) es una milésima del total. Si los precios subiesen, los depósitos de fosfato que contienen uranio en bajas concentraciones también serían rentables. Dado que nuestro análisis no es económico, contaremos también el uranio de los fosfatos, lo que da lugar a unos recursos totales de 28 millones de toneladas de uranio.

Actualmente el uranio se fisiona mediante el *método de una etapa*, que obtiene energía únicamente del isótopo ^{235}U (un 0,7% del uranio total), eliminando el ^{238}U restante. Desde hace varias décadas se están intentando desarrollar los *reactores de alimentación rápida*, que utilizan el ^{238}U , obteniendo 60 veces más energía que las centrales tradicionales. Aunque todavía no se ha llegado a dominar esta tecnología, analizaremos sus posibilidades en los siguientes subapartados.

Reactores tradicionales usando uranio terrestre

Una central nuclear tradicional de un **gigavatio** de potencia usa **162 toneladas de uranio al año**. Por tanto, los recursos extraíbles de uranio, repartidos entre los 7000 millones de personas, durarían 1000 años si produjésemos energía nuclear a una velocidad de **0,6 kWh por persona y día**. Esto equivale a la generación de solo 166 centrales nucleares, menos de la mitad de la producción nuclear actual.

Entonces, ¿podemos generar energía nuclear sostenible de esta forma? Según estos cálculos, no. De hecho, con la tasa actual de generación nuclear, los reactores podrían generar electricidad durante algunos cientos de años. Pero si queremos deshacernos de los combustibles fósiles aumentando la generación nuclear, o si permitimos que los estándares de vida aumenten, la duración del uranio conocido sería de unas pocas décadas.



Figura 24.2: Operarios empujando uranio en un reactor de grafito X-10.



Figura 24.3: Central nuclear de Three Mile Island, EE.UU.



Figura 24.4: Establecimiento para el desarrollo de la energía nuclear de Dounreay, Escocia, cuyo objetivo principal entre 1958 y 1998 era el desarrollo de la tecnología de alimentación rápida.

Reactores de alimentación rápida usando uranio terrestre

Si esta tecnología se llegara a desarrollar y fuéramos capaces de extraer del uranio una cantidad de energía 60 veces mayor, podríamos obtener de todo el uranio terrestre **36 kWh por persona y día** durante 1000 años.

Los expertos más pesimistas opinan que los reactores de alimentación rápida «son una tecnología experimental fallida de la que ni siquiera se debería hablar» mientras que otros más optimistas opinan que «podemos y debemos empezar a construir reactores de alimentación rápida ahora mismo». No somos competentes para comentar los riesgos de esta tecnología. Nuestro objetivo es simplemente ayudar a entender los números.

En cualquier caso, estos 36 kWh por persona y día no son suficientes para garantizar la sostenibilidad de esta tecnología.

Reactores tradicionales usando uranio de los océanos

Si la tecnología evolucionara y fuéramos capaces de extraer uranio de los océanos, la energía que podríamos generar con este uranio es de:

$$\frac{4500 \text{ millones de toneladas}}{162 \text{ toneladas de uranio por GW-año}} = 28 \text{ millones de GW-años.} \quad (24.1)$$

¿Cómo de rápido se podría extraer el uranio de los océanos? Los océanos circulan muy despacio: la mitad del agua está en el océano Pacífico, y sus aguas más profundas solo suben a la superficie cada 1600 años. Imaginemos que el 10% del uranio se extrae en ese periodo de 1600 años. Eso supondría una tasa de extracción de 280 000 toneladas al año. En los reactores tradicionales, esto daría lugar a una potencia de:

$$2,8 \text{ millones GW-año}/1600 \text{ años} = 1750 \text{ GW,} \quad (24.2)$$

que, repartidos entre los 7000 millones de personas, supondría **6 kWh por persona y día**. (Actualmente hay 383 GW de reactores nucleares, por lo que esto se corresponde con un incremento de 4 veces la potencia nuclear de hoy en día). Por lo tanto, si se consigue extraer uranio del mar a un precio razonable, los reactores tradicionales serían opción «sostenible».

Reactores de alimentación rápida usando uranio marino

Si los reactores rápidos son 60 veces más eficientes, la misma cantidad de uranio marino daría lugar a **360 kWh por persona y día**. ¡Por fin, un escenario sostenible que supera el consumo actual! Pero únicamente con la ayuda conjunta de dos tecnologías que todavía no se dominan: la extracción de uranio marino y los reactores de alimentación rápida.

Todos estos números están representados en la Figura 24.5.

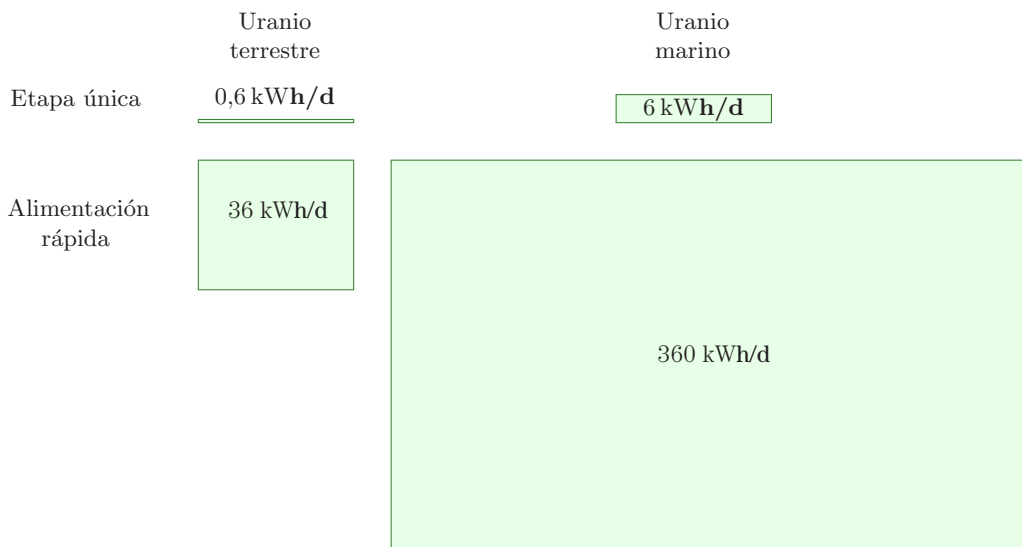


Figura 24.5: Generación «sostenible» del uranio en el mundo. Por comparar, la generación nuclear en el mundo hoy en día es de 0,91 kWh/día por persona. En España este valor es de 3,6 kWh/día por persona y está disminuyendo.

Coste de la limpieza

¿Cuál es el coste de limpiar los emplazamientos nucleares? En España, Enresa (Empresa Nacional de Residuos Radioactivos) es la entidad pública y sin ánimo de lucro responsable de la gestión de los residuos radiactivos. En su último informe, estimaron que gestionar los residuos nucleares y el desmantelamiento de los reactores actuales de aquí a 2070 tendría un coste de 13 100 millones de euros. Considerando que la industria nuclear ha vendido a cada español 3,35 kWh/d durante 40 años, el coste de la empresa estatal es 0,6 céntimos por kWh, valor no tan pequeño si se compara con el precio medio al que los productores de electricidad vendieron su energía en España durante el año 2017, que fue 5,2 céntimos de € por kWh.



Figura 24.6: Las centrales de Vandellòs, España, ocupan menos de 1 km². Foto de Google Maps.

Seguridad

La seguridad de la operación de las centrales nucleares sigue siendo un gran motivo de preocupación a nivel mundial, especialmente después del accidente de Fukushima ocurrido el 11 de marzo de 2011. Este ha sido el peor accidente nuclear desde el de Chernóbil, ocurrido en Ucrania en 1986, y el único que lo iguala en la Escala Internacional de Accidentes Nucleares (accidente mayor, nivel 7). Es uno de los mayores desastres medioambientales de la historia reciente.

La central nuclear de Fukushima entró en funcionamiento en 1971. Contaba con seis reactores nucleares, que juntos constituían uno de los mayores complejos de centrales nucleares del mundo, con una potencia total de 4,7 GW. El 11 de marzo de 2011, a las 14:46 (hora japonesa) se produjo un terremoto magnitud 9,0 en la escala Richter en la costa noroeste de Japón. En ese momento, los reactores que estaban encendidos (1, 2 y 3) se apagaron automáticamente. Al apagarse los reactores, paró la producción de electricidad. Normalmente los reactores usan electricidad del tendido eléctrico para los sistemas de enfriamiento y del cuarto de control, pero la red se había dañado por el terremoto. Los motores de gasóleo de emergencia comenzaron a funcionar normalmente. Sin embargo, al terremoto le siguió un tsunami, que en la zona de la central nuclear alcanzó los 15 metros de altura. El muro de contención de la central medía solo 8 metros y había varios sistemas críticos en zonas inundables. La inundación provocada por la gran ola desencadenó una cascada de fallos tecnológicos, y culminó con la pérdida completa de control sobre la central y sus reactores. El núcleo del reactor se estaba calentando, con el consiguiente riesgo de fusión y explosión.

Debido a la gravedad del accidente, las autoridades declararon el estado de emergencia nuclear y se evacuó la zona. Tras varios días de tensión, no libres de algunas explosiones, se decidió inyectar agua marina y ácido bórico en alguno de los reactores y se controló la situación. En junio de 2011 se confirmó que los tres reactores activos en el momento de la catástrofe habían sufrido la fusión del núcleo.



Figura 24.7: Vista aérea de la central de Fukushima (Japón) antes y después del accidente del año 2011. Imagen de Vimeo (jimbonumber9).

Para intentar controlar este accidente nuclear se realizaron emisiones controladas de gases radiactivos al exterior, para reducir la presión en el recinto de contención. Se desconoce la cantidad de partículas radiactivas emitidas. El domingo 27 de marzo se detectó en el agua del interior de las instalaciones un nivel de radiación cien mil veces por encima de lo normal. Pocos días después del accidente se detectó yodo radiactivo en el agua corriente de Tokio, así como altos niveles de radiactividad en leche producida en las proximidades de la central. Una semana después del accidente se pudieron detectar en California partí-

culas radiactivas procedentes de Japón, que habían atravesado el océano Pacífico, si bien se descartaba que los niveles de radiación detectados fueran peligrosos. El gobierno japonés ha reconocido que la central nuclear no podrá volver a ser operativa y que se desmantelará una vez que se haya controlado el accidente.

Este tipo de experiencias muestran que es imposible garantizar al 100% la seguridad nuclear. Por ello, si se permite que una empresa privada construya y opere una central nuclear, debe haber un estricto control público que nos asegure el cumplimiento de los estándares más seguros. Las medidas de seguridad son extremadamente caras, por lo que las empresas pueden estar tentadas a prescindir de algunos sistemas de seguridad.

¿Qué pasa con la fusión nuclear?

*Dijimos que pondríamos el sol en una caja.
Una idea bonita. El problema es que
no sabemos cómo hacer la caja.*

Sébastien Balibar
(director de Investigación del CNRS)

La fusión nuclear todavía no se puede realizar. Es imprudente asumir que el problema de la fusión *se solucionará*, pero no está de más estimar la potencia que podría suministrarse mediante esta técnica *si* el problema se soluciona. Las dos reacciones de fusión que se consideran más prometedoras son:

- **la reacción DT**, que fusiona deuterio con tritio, formando helio, es la opción más realista; y
- **la reacción DD**, que fusiona deuterio con deuterio; sería el siguiente paso tras conseguir la reacción DT.

El deuterio, un isótopo pesado del hidrógeno que existe de manera natural, se puede obtener del agua del mar; el tritio, un isótopo más pesado del hidrógeno, no se encuentra en la naturaleza en grandes cantidades (porque tiene una vida media de solo 12 años), pero se puede obtener a partir del litio.

ITER es un proyecto internacional para descubrir cómo hacer un reactor de fusión operativo y estable. El prototipo de ITER utilizará la reacción DT. Se prefiere DT respecto a DD debido a que la reacción DT cede más energía y necesita una temperatura de «solo» 100 millones °C

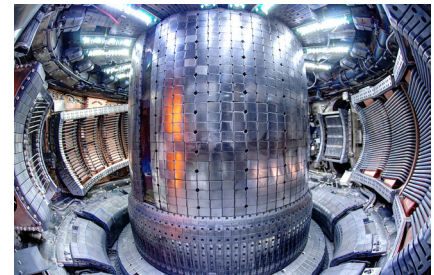


Figura 24.8: Interior de un reactor de fusión experimental. Foto de Robert Mumgaard.

para producirse, mientras que la DD requiere 300 millones °C (la máxima temperatura en el sol es de 15 millones °C). El ITER debería generar su primer plasma en 2025 y realizar las primeras operaciones con deuterio y tritio para el 2035.

Vamos a fantasear, y asumamos que el proyecto ITER tiene éxito. ¿Qué potencia sostenible podría suministrar la fusión? Una central que use la reacción DT, alimentada con litio, se quedaría «sin batería» cuando el litio se acabase. Antes de ese momento, con suerte, la segunda parte de la fantasía habrá llegado: los reactores de fusión que usan solo deuterio.

Llamaremos a estas dos fantasías de fuentes de energía «fusión de litio» y «fusión de deuterio», nombrándolas a partir del combustible principal del que nos preocuparíamos en cada caso. Estimemos la energía que pueden proporcionar estas fuentes.

Fusión de litio

Las reservas mundiales de litio se estiman en 7,5 millones de toneladas en depósitos de mineral. Si todas estas reservas se destinasen a la fusión durante 1000 años, la energía que se podría generar sería de **6,8 kWh por persona y día**.

Hay otra fuente para el litio: el agua del mar, donde hay una concentración de 0,17 ppm. Para producir litio a una tasa de 100 millones de kilogramos al año del agua del mar, se estima que se necesitan 2,5 kWh(e) por gramo de litio. Si los reactores de fusión devuelven 2300 kWh(e) por gramo de litio, se generarían **90 kWh/día por persona** (asumiendo 7000 millones de personas). A esta velocidad de extracción, el litio de los océanos duraría más de un millón de años.

Es verdad que el litio es un metal cada vez más utilizado por la sociedad, especialmente para fabricar las cada vez más necesarias baterías de iones de litio. Por ello, pueden plantearse dudas de si es conveniente destruir el litio disponible en la superficie terrestre mediante reacciones de fusión nuclear. En este sentido, hay que destacar que, si se destruye al ritmo propuesto en estos párrafos, tendríamos litio para 1000 años, tiempo más que suficiente para buscar otras alternativas.

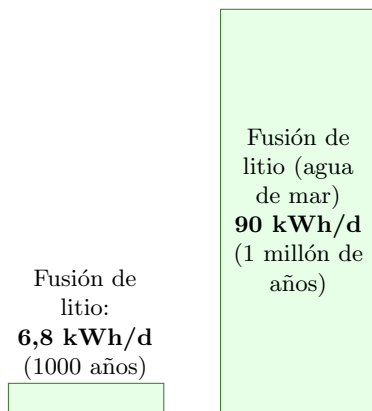


Figura 24.9: La fusión basada en litio, si se usa de manera justa y «sostenible», podría equiparar nuestros niveles actuales de consumo. La extracción de litio de las minas daría lugar a 6,8 kWh/p/d durante 1000 años; el litio extraído del agua del mar podría proporcionar a toda la población mundial 90 kWh/p/d durante más de un millón de años.

Fusión de deuterio

Si imaginamos que los científicos e ingenieros resuelven algún día el gran problema para hacer funcionar la reacción DD, serían muy buenas noticias. Hay 33 g de deuterio en cada tonelada de agua, y la energía que

se cedería al fusionar únicamente un gramo de deuterio es la alucinante cifra de 100 000 kWh. Teniendo en cuenta que la masa de los océanos es de 200 millones de toneladas por persona, podemos deducir que hay suficiente deuterio para abastecer a una población mundial que aumente 10 veces y consuma 30 000 kWh por día (¡eso es más de 100 veces el consumo medio americano!) durante 1 millón de años (Figura 24.10).

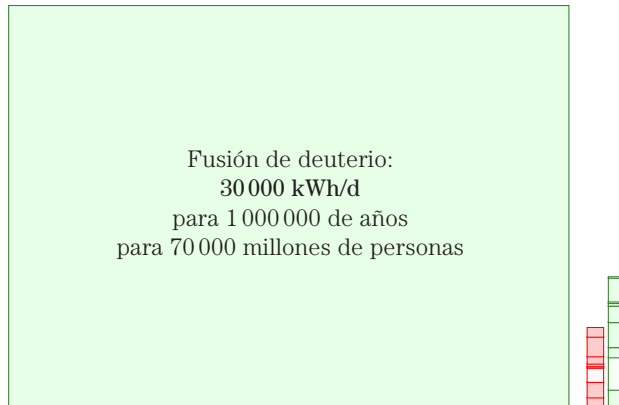


Figura 24.10: La fusión de deuterio, si se consigue desarrollar comercialmente, ofrece suficiente energía sostenible en el mundo para millones de años. La escala de este diagrama se ha reducido en 10 veces en cada dimensión para poder reflejar el potencial de la fusión en esta hoja. Las pilas pequeñas para España roja y verde del Capítulo 18 se representan a la derecha de la imagen para poder hacernos una idea del potencial de la fusión de deuterio.

Notas y textos de consulta

Página

- 221 *Figura 24.1.* Fuente: Asociación Nuclear Mundial [147]. La capacidad total de los reactores nucleares en operación en todo el mundo es de 392 GW(e) que requieren 67 867 toneladas de uranio al año. EE.UU. tiene 99,6 GW, Francia 63,13 GW, Japón 39,95 GW, China 33,6 GW, Rusia 26,86 GW, Corea del Sur 22,5 GW, Canadá 13,5 GW y España 7,1 GW. En 2016 los reactores generaron en todo el mundo 2490 TWh de electricidad, lo que supone una media de 285 GW, o 0,91 kWh por persona y día.
- 223 *Los reactores de alimentación rápida [...] obteniendo 60 veces más energía que las centrales tradicionales.* Fuente: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx>.
- 225 *En su último informe, estimaron que gestionar los residuos nucleares y el desmantelamiento de los reactores actuales de aquí a 2070 tendría un coste de 13 100 millones de euros.* Fuente: *Expansión*. Disponible en: <http://www.expansion.com/empresas/energia/2017/08/31/59a7072a468aebcd5a8b46b3.html>.
- 225 *Considerando que la industria nuclear ha vendido a cada español 3,35 kWh/d durante 40 años.* Fuente: Series Estadísticas Nacionales de Red Eléctrica Española. Disponibles en: <http://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/series-estadisticas/series-estadisticas-nacionales>.
- 226 *La seguridad de la operación de las centrales nucleares sigue siendo un gran motivo de preocupación a nivel mundial...* La seguridad es algo que hay que tener en cuenta siempre, ya que, si una central se descontrola, puede tener

consecuencias gravísimas. Una central nuclear ha de contar con medidas contra cualquier eventualidad, por improbable que parezca, así como con sistemas que detecten el más mínimo problema. Merece la pena contar un problema que se produjo en la Planta Ternal de Reprocesamiento de Óxido THORP en Sellafield (Reino Unido). Esta planta tuvo una fuga de material entre agosto de 2004 y abril de 2005. Durante estos ocho meses, la fuga dejó que **85 000 litros** de uranio enriquecido fluyesen hacia un sumidero equipado con sistemas de seguridad para detectar automáticamente fugas tan pequeñas como **15 litros**. Sin embargo, la fuga no se detectó debido a que los operarios no realizaban las revisiones estipuladas, además de que ignoraban rutinariamente las alarmas de seguridad. Es más, en tres ocasiones a lo largo de estos meses se realizaron mediciones rutinarias en las que se detectó un nivel anormalmente alto de uranio, pero los operarios no tomaron ninguna medida.

En abril de 2005, **22 toneladas** de uranio se habían perdido, y aun así ninguno de los sistemas de detección de fugas lo había detectado. Finalmente, fue el departamento de *contabilidad* quien dio la voz de alarma, cuando se dieron cuenta de que estaban obteniendo un ¡10% menos de uranio del que supuestamente estaban introduciendo! La crítica del inspector jefe de instalaciones nucleares fue fulminante: «La planta estaba operada en una cultura de dejar funcionar a los instrumentos en modo de alarma en vez de preguntarse el por qué de la alarma y rectificar el motivo causante» [148].

- 226 *...especialmente después del accidente de Fukushima ocurrido el 11 de marzo de 2011.* Si quieres saber los detalles sobre este accidente nuclear, te aconsejamos leer el informe del profesor de la Universidad de Illinois Magdi Ragheb titulado «Fukushima earthquake and tsunami station blackout accident» [149].
- 228 *Las reservas mundiales de litio se estiman en 7,5 millones de toneladas en depósitos de mineral.* Los principales yacimientos de litio se encuentran en Bolivia (56,6%), Chile (31,4%) y Estados Unidos (4,3%). www.dnpm.gov.br.
- 228 *Hay otra fuente para el litio: el agua de mar...* Se han investigado múltiples técnicas de extracción [150, 151, 152].
- 228 *Si todas estas reservas se destinasen a la fusión durante 1000 años, la energía que se podría generar sería de 6,8 kWh por persona y día.* La densidad de energía del litio natural es de unos 7500 kWh por gramo [153]. Hay una considerable variación entre las estimaciones de cómo de eficientes serán los reactores de fusión al generar electricidad, variando entre 310 kWh(e)/g [154] y 3400 kWh(e)/g de litio natural [150]. Hemos asumido 2300 kWh(e)/g, basándonos en esta cifra ampliamente citada: «Una central de fusión de 1 GW usará unos 100 kg de deuterio y 3 toneladas de litio natural al año, generando unos 7000 GWh» [155, 156].

Lectura adicional sobre fisión: [157, 158, 159, 160].

Uranium Information Center, www.world-nuclear.org, [161].

Sobre costes: Zaleski [162].

Sobre reactores de alimentación y torio: www.energyfromthorium.com

Sobre fusión: www.fusion.org.uk, www.askmar.com/Fusion.html

Capítulo 25

¿Vivir de las renovables de otros países?

Que el Mediterráneo se convierta en una zona de cooperación o de confrontación en el siglo XXI tendrá una gran importancia estratégica para nuestra seguridad común.

Joschka Fischer
(ministro de Asuntos Exteriores alemán,
febrero de 2004)

En los países del sur de Europa como España, Portugal o Italia tenemos una cantidad suficiente de sol para generar gran parte de la energía que necesitamos, como hemos comentado en el Capítulo 6. Sin embargo, el clima en los países del norte, como en Alemania, Reino Unido, etc., es mucho menos soleado, y su densidad de población es superior a la de España. Por eso tendrían serios problemas para abastecer su consumo energético con energías renovables. (El caso del Reino Unido está detallado en el libro original que ha dado lugar a esta adaptación *Sustainable energy – Without the hot air* escrito por David J. C. Mackay). Si estos países no pueden generar toda su electricidad a partir de las renovables, ¿qué otra opción les queda? Se podrían plantear vivir de las renovables de otra gente. Esto no consiste en que tengan prioridad sobre otros países para usar su energía, claro, pero quizás alguien esté interesado en vendérsela.

La mayor parte de los recursos necesarios para vivir de forma sostenible están relacionados con el uso de la tierra: si quieres utilizar paneles solares, necesitas tierra para ponerlos; si quieres cultivar alimentos, también necesitas tierra. Jared Diamond, en su libro *Colapso*, observa que hay muchos factores que contribuyen al colapso de las civilizaciones, pero identifica una característica común a todos ellos: la densidad de población se hace demasiado alta.

Europa en general y en particular países como Alemania y Reino Unido están en un aprieto porque tienen elevadas densidades de población y los recursos energéticos renovables están distribuidos –tienen densi-

Tabla 25.1: Potencia por unidad de área de las fuentes de generación renovables calculadas en capítulos anteriores.

Potencia por unidad de área	
Eólica	1,3 W/m ²
Eólica marina	2 W/m ²
Mareas	3 W/m ²
Fotovoltaica	4–18 W/m ²
Plantas	0,25–2 W/m ²
Agua lluvia (norte de España)	0,12 W/m ²
Central hidroeléctrica	1,8 W/m ²
Chimenea solar	0,1 W/m ²
Solar de concentración en desiertos	15 W/m ²

dad energética baja (Tabla 25.1)–. Si buscamos ayuda para estos países, deberíamos pensar en territorios que cumplan tres condiciones: a) densidad de población baja; b) superficie grande; y c) una fuente renovable con alta densidad de potencia disponible.

La Tabla 25.2 destaca algunos países muy adecuados para generar energía mediante energías renovables. Por ejemplo, la densidad de población de Mongolia es 45 veces menor que la de España, y su superficie es el triple. Otros países grandes que disponen de mucha superficie por cada uno de sus habitantes son Kazajistán, Arabia Saudí, Argentina y Argelia.

Tabla 25.2: Algunas regiones del planeta ordenadas de menor a mayor densidad de población. Mira el Apéndice J si quieres saber más sobre densidades de población.

Región	Población	Superficie (km ²)	Densidad (hab./km ²)	Área por habitante (m ²)
Mongolia	3 075 647	1 564 120	2,0	508 550
Kazajistán	18 037 646	2 724 902	7,6	151 067
Arabia Saudí	32 938 213	2 149 690	15,3	62 264
Argentina	44 271 041	2 780 400	16,9	62 804
Argelia	41 318 142	2 381 740	17,3	57 644
Mundo	7 569 779 460	134 984 721	56,0	17 832
Irlanda	4 813 608	70 280	69,5	14 600
España	46 572 028	505 940	92,1	10 864
Italia	60 551 416	301 340	201,9	4 977
Alemania	82 695 000	357 380	231,4	4 322
Reino Unido	66 022 273	243 610	271,0	3 690
Japón	126 785 797	378 962	335,4	2 981
Bangladesh	164 669 751	147 630	1 115,4	897
Singapur	5 612 253	719	7 805,6	128

Energía solar. Una tecnología que suma

Una de las energías renovables más prometedoras es la solar, tanto fotovoltaica como de concentración; esta última usa espejos o lentes para concentrar la radiación solar en un punto. Hay muchos tipos de centrales solares de concentración, ya que los espejos pueden tener varias geometrías y existen diferentes tecnologías que se pueden utilizar en el foco caliente para generar electricidad (motores stirling, agua a

presión o sales líquidas, por ejemplo). Asumiremos para facilitar los cálculos, que estas tecnologías generan una media de 15 W/m^2 .

«Toda la energía mundial se podría generar en un cuadrado de 100 km por 100 km en el desierto del Sahara». ¿Es eso cierto? La energía solar en los desiertos genera aproximadamente 15 W/m^2 . Por lo tanto, si no se deja espacio para ninguna otra cosa en ese cuadrado, la potencia producida sería de 150 GW. Este número no coincide con el consumo energético del planeta. Ni siquiera está cerca del actual consumo eléctrico mundial que es de 2500 GW. El consumo energético mundial a día de hoy es de 18000 GW. Por lo tanto, la frase correcta sería que toda la energía mundial se puede generar en un cuadrado de 1000 km por 1000 km situado en el Sahara totalmente lleno de plantas solares. Esto es el doble de la superficie de España. Además, si queremos vivir en un mundo equitativo, deberíamos ser capaces de suministrar más energía de la que consumimos a día de hoy. Para que todos los habitantes del mundo puedan consumir lo que gasta hoy en día un europeo medio (112 kWh/d), nos harían falta *dos* cuadrados de 1000 km de lado en el desierto.

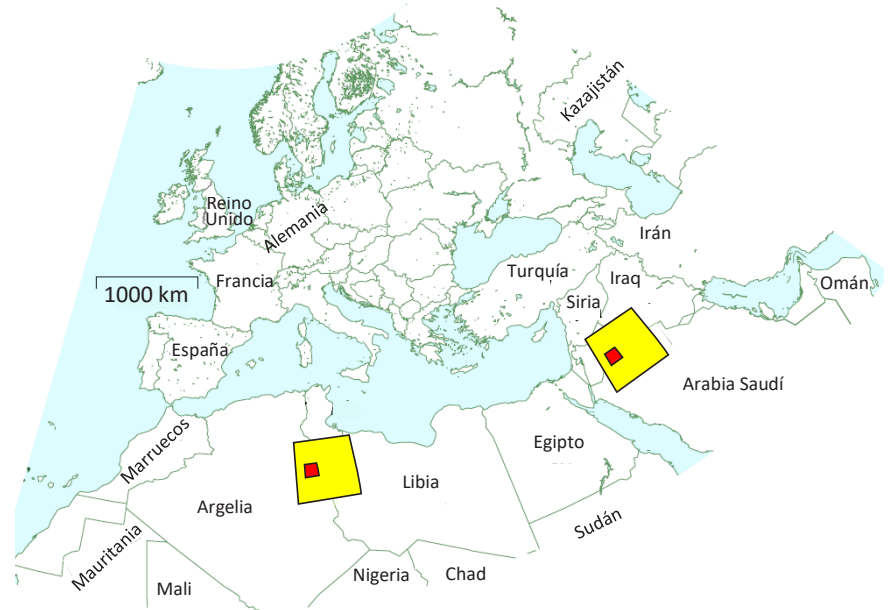
Por suerte, el Sahara no es el único desierto del mundo, por lo que igual es más interesante dividir el mundo en regiones más pequeñas y preguntarnos por el área necesaria en el desierto de cada zona. Centrándonos en Europa, «¿qué área del Sahara nos hace falta para alimentar a *toda la población de Europa y el norte de África* con el consumo de un europeo medio?» Redondeando la población de Europa y África del norte a 1000 millones de personas, el área necesaria se reduce hasta los $275\,000 \text{ km}^2$, lo que equivale a un cuadrado de 525 km por 525 km. Este cuadrado tiene aproximadamente la mitad de superficie que España.

La parte que le tocaría a España de esta área sería equivalente a la que ocupa la provincia de Navarra. En la Figura 25.1 se muestran estos cuadrados. Fíjate que, aunque el cuadrado amarillo parece «pequeño» comparado con África, mide la mitad que España.

El plan de DESERTEC

Una organización llamada DESERTEC [www.desertec.org] está promoviendo el uso de la energía solar de concentración en los soleados países del mediterráneo y líneas de alta tensión en corriente continua (*high-voltage direct current* o HVDC) (Figura 25.2) para transmitir esta electricidad a los nubosos países del norte de Europa. La tecnología de HVDC se viene usando desde 1954 para transmitir energía tanto en líneas aéreas como mediante cables submarinos (como la interconexión

Figura 25.1: Este mapa muestra un cuadrado amarillo de 525 km de lado en África, y otro en Arabia Saudí, Jordania e Iraq. Si estas superficies se cubren completamente con plantas fotovoltaicas, cada cuadrado puede generar energía suficiente para que 1000 millones de personas consuman como lo hace un europeo medio (112 kWh/día). La superficie de cada uno de estos cuadrados es aproximadamente la mitad que la de España. Dentro de cada cuadrado grande, hay otro más pequeño rojo de 113 km de lado, que muestra el área de desierto necesaria para generar mediante plantas fotovoltaicas toda la energía consumida en España (superficie equivalente a la Comunidad Foral de Navarra).



entre Francia y el Reino Unido) e interconexiones subterráneas (como la línea de 64,5 km de longitud terminada de construir en febrero de 2015 y que une España con Francia a través de la parte oriental de los Pirineos). Ya se está usando también para transmitir electricidad a distancias superiores a los 1000 km en Sudáfrica, China, Estados Unidos, Canadá, Brasil y Congo. Una línea de transmisión típica de 500 kV puede transmitir una potencia de 2 GW. Un par de líneas HVDC están transmitiendo 6,3 GW.

Las líneas HVDC tienen dos ventajas importantes frente a las tradicionales líneas de alta tensión alterna. Por una parte, hacen falta menos elementos físicos para construirlas y, por otra, las pérdidas de potencia que tienen lugar al transmitir electricidad son menores. De hecho, las pérdidas de potencia en unas líneas HVDC de 3500 km de longitud, incluyendo la conversión de alterna a continua y de nuevo a alterna, rondan el 15%. Otra ventaja de los sistemas HVDC es que contribuyen a la estabilidad de las redes eléctricas a las que se conectan.

Según los planes de DESERTEC, las primeras áreas que se deberían explotar son las zonas costeras, ya que las centrales de concentración situadas cerca del mar pueden producir agua dulce (valiosa para el consumo humano y para la agricultura) como subproducto del proceso de generación eléctrica.



Figura 25.2: Instalación de un cable submarino, como el proyectado en el proyecto NordLink, comenzado en 2015 y que en 2019 conectará Alemania con Noruega mediante una línea submarina de 623 km de longitud que permitirá transmitir una potencia de 1400 MW. El coste total de este proyecto se estima entre 1500 y 2000 millones de euros. Foto: ABB.

La Tabla 25.3 muestra las estimaciones que hace DESERTEC sobre la potencia que podría ser generada en los países de Europa y norte de África. El «potencial económico» es más que suficiente para suministrar 112 kWh al día a 1000 millones de personas. El potencial costero es suficiente para suministrar 16 kWh al día a 1000 millones de personas.

País	Potencial económico (kWh/p/d)	Potencial costero (kWh/p/d)
Argelia	463	0,2
Libia	383	1,4
Arabia Saudí	342	5,5
Egipto	202	1,4
Iraq	80	0,2
Marruecos	55	0,8
Omán	52	1,4
Siria	27	0
Túnez	25	1
Jordania	18	0
Yemen	14	1,1
Israel	9	1
Emiratos Árabes Unidos	5,5	1,5
Kuwait	4.1	0,4
España	1300	0
Qatar	2,2	0,9
Portugal	0,4	0
Turquía	0,4	0
Total	463 (70 000 GW)	16,4 (650 GW)

Tabla 25.3: Potencial de generación solar en algunos países alrededor de Europa. El «potencial económico» es la energía anual que podría ser generada en lugares adecuados, donde la radiación directa es superior a 2000 kWh/m²/año.

El «potencial costero» es la energía anual que se podría generar en lugares con una altitud inferior a 20 m sobre el nivel del mar. Esta energía tiene un gran potencial para su uso en plantas desalinizadoras.

Los kWh/p/d se han calculado para los 1000 millones de personas entre los que se repartiría esta generación.

Intentemos representar en un mapa cómo quedaría un plan realista. Imagina construir plantas solares, cada una de ellas con un área de 1500 km² (poco menos que el tamaño de los 23 municipios que forman el área metropolitana de Madrid, que abarcan 1740 km²). Llamemos a cada una de estas plantas *mancha*. Imagina que la mitad del área de cada *mancha* se dedica a construir centrales de concentración solar con una densidad de potencia media de 15 W/m², dejando sitio también para la agricultura, edificios, vías de tren, carreteras, tuberías y cables. Si suponemos que habrá pérdidas en la transmisión desde cada *mancha* hasta los consumidores finales, cada *mancha* deberá generar una po-

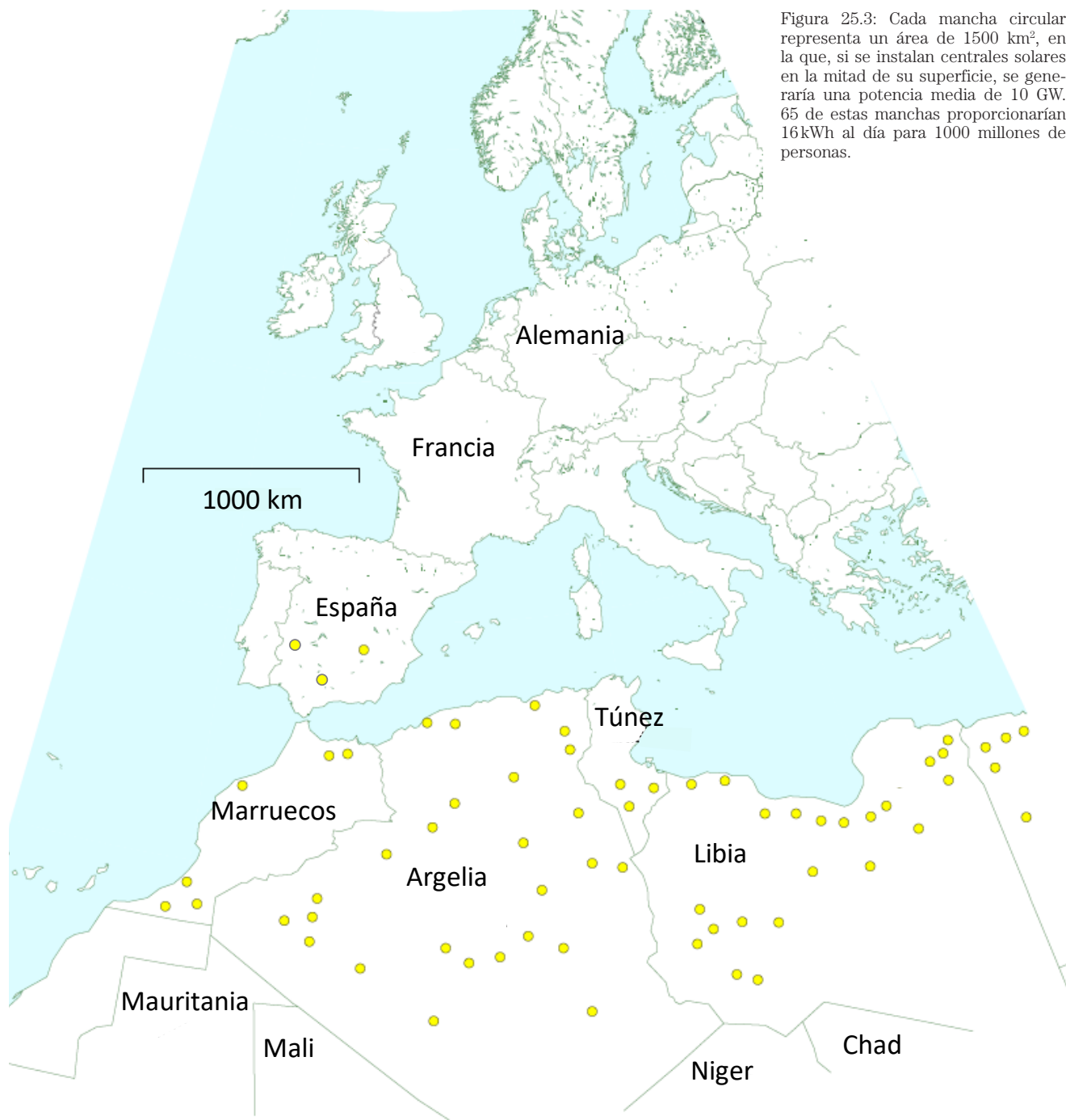


Figura 25.3: Cada mancha circular representa un área de 1500 km², en la que, si se instalan centrales solares en la mitad de su superficie, se generaría una potencia media de 10 GW. 65 de estas manchas proporcionarían 16 kWh al día para 100 millones de personas.

tencia media de 10 GW. En la Figura 25.3 se muestran algunas *manchas* en un mapa, siguiendo su misma escala. Tres de estas *manchas* serían suficientes para proporcionar toda la electricidad consumida en España (16 kWh/d por persona para 46 millones y medio de personas). *Sesenta y cinco manchas* suministrarían a cada uno de los 1000 millones de personas de Europa y el norte de África sus 16 kWh/d correspondientes. La Figura 25.3 muestra 62 *manchas* en el desierto del Sahara y las tres *manchas* correspondientes al consumo español en la zona sur de nuestro país, donde las condiciones de sol también son muy favorables para su instalación.

Fotovoltaica

Una alternativa a las centrales solares de concentración son grandes centrales fotovoltaicas. La tecnología fotovoltaica se ha desarrollado muy rápidamente durante los últimos años y sus precios se han reducido enormemente. El estudio en el que REN21 analiza el estado de las energías renovables cada año [163] sitúa el coste normalizado de la energía fotovoltaica producida en las plantas más rentables de 2016 en valores tan bajos como 5 centavos de dólar por kWh producido. Este coste significa que la energía fotovoltaica es ya competitiva frente a los combustibles fósiles sin necesidad de ninguna subvención ni prima en zonas de alta radiación como los desiertos.

En el Capítulo 6 hemos visto que las plantas fotovoltaicas construidas a base de paneles baratos (eficiencia del 15%) tienen una potencia media de entre 5 y 25 W/m², dependiendo principalmente de la separación entre paneles y de la cantidad de sol disponible. Dada la elevada disponibilidad de sol en los desiertos, podemos considerar una potencia media por unidad de área de 25 W/m², superior a la tecnología de concentración.

Preguntas

¿Cómo puede la fotovoltaica generar mayor potencia por unidad de área (25 W/m²) que la tecnología solar de concentración (15 W/m²)? ¿No debería ser al contrario?

Buena pregunta. La respuesta corta es no. La tecnología solar de concentración no consigue generar mayor potencia por unidad de área. Los captadores de concentración tienen que moverse para seguir la trayectoria solar, ya que, si no, la radiación no se concentraría en el punto



Figura 25.4: Miembros de la asociación de estudiantes Aperia visitando la central termoelectrónica de Gemasolar, en Andalucía, durante una parada de la central por mantenimiento. El exceso de energía térmica producida durante el día en esta central se puede almacenar hasta 15 horas en tanques de sales fundidas, permitiendo un suministro de potencia a la red eléctrica continuo y constante. La central de 17 MW de potencia produce 80 GWh al año. Sus 2650 heliostatos ocupan 200 hectáreas, por lo que la densidad de potencia media por unidad de área es de 5 W/m².



Figura 25.5: Las zonas desérticas ya se usan en la actualidad para instalar grandes plantas fotovoltaicas. Foto extraída de [163].

deseado. Una vez que empiezas a rellenar terreno con seguidores solares, tienes que dejar más espacio entre ellos para que no se hagan sombra los unos a los otros, y, en las horas centrales del día, una buena parte de los rayos solares van a parar a los huecos vacíos.

La razón de ser de la tecnología de concentración es plantear una alternativa a la fotovoltaica. Esto tenía más sentido hace unos años, cuando los paneles fotovoltaicos eran muy caros. Si el precio del terreno es barato en comparación con los captadores, merece la pena ocupar más sitio e instalar menor cantidad de generadores.

Sin embargo, según el informe que la organización REN21 publicó en 2017 [163], actualmente la tecnología fotovoltaica ya es más barata que la de concentración. Además, no se espera que la tecnología de concentración pueda reducir su coste por debajo de la fotovoltaica debido a la mayor cantidad de componentes necesarios para construir un generador. Por lo tanto, es probable que para generar electricidad se use más a menudo la fotovoltaica que la concentración solar.

¿Qué hay de las chimeneas solares?

Una chimenea solar usa la energía solar de una manera muy simple. Se instala una enorme chimenea en el centro de un área cubierta por un tejado transparente de cristal o plástico. Dado que el aire caliente asciende, el aire que se calienta en este colector de calor de tipo invernadero asciende a través de la chimenea, absorbiendo aire frío a través del perímetro del colector solar. La potencia de este aire ascendente se extrae mediante turbinas instaladas en la base de la chimenea. Las chimeneas solares son bastante fáciles de construir, pero no generan mucha potencia por unidad de área. Una planta piloto en Manzanares (Ciudad Real) estuvo en funcionamiento durante 7 años, entre 1982 y 1989. Esta chimenea tenía una altura de 195 m y un diámetro de 10 m, el diámetro del colector era de 240 m y estaba formado por 6000 m² de cristal y 40000 m² de plástico transparente. La energía generada fue de 44 MWh al año, lo que corresponde a una potencia por unidad de área de 0,1 W/m². Téoricamente, cuanto mayor sea el colector y más alta la chimenea, mayor es la densidad de potencia que se consigue con estos dispositivos. Los ingenieros a cargo de la planta de Manzanares calcularon que, en un lugar con una irradiación de 2300 kWh/m² al año (262 W/m²), una torre de 1000 m de altura rodeada por un colector de 7 km de diámetro podría generar 680 GWh al año, una potencia media de 78 MW. Esto equivale a una potencia por unidad de área de 1,6 W/m², que es similar a la densidad de potencia de los parques eólicos en España, y un veinteavo de la que se consigue con plantas fotovoltaicas.



Figura 25.6: Chimenea solar de la planta piloto instalada en Manzanares (1982-1989). Foto de Jumanji Solar.

¿Y si cogemos energía de Islandia, donde la geotermia y la energía hidráulica son tan abundantes?

De hecho, Islandia exporta energía indirectamente, alimentando industrias que fabrican productos con elevados requerimientos energéticos. ¡Islandia produce casi una tonelada de aluminio por ciudadano al año, por ejemplo! Así que, desde el punto de vista de Islandia, esto genera importantes beneficios. ¿Pero puede Islandia salvar a Europa? Sorprendería mucho que la producción energética de Islandia se pudiera escalar tanto como para exportar la electricidad necesaria solo en España. Como punto de comparación, tomemos la conexión eléctrica entre España y Francia, que permite un intercambio máximo de 2,8 GW a través de las cinco líneas de interconexión que cruzan los Pirineos (cuatro de alta tensión tradicional y una de HVDC). Esta capacidad máxima es equivalente a 1,5 kWh por persona y día en España, lo que significa un 10% del consumo eléctrico medio. La potencia eléctrica media generada a partir de la geotermia en Islandia es de 0,6 GW, que es menos del 2% del consumo eléctrico medio español. La potencia eléctrica media generada en Islandia es 2,1 GW, por ello, si Islandia quiere ser capaz de exportar una potencia eléctrica equivalente a la capacidad de nuestra interconexión con Francia, debería *duplicar* su producción eléctrica. Para proporcionar a cada español 2,8 kWh al día (más o menos lo que generan los aerogeneradores instalados actualmente en España), la producción eléctrica en Islandia debería *multiplicarse por 3,5*. Probablemente sea buena idea construir interconexiones con Islandia, pero no esperemos que supongan más que una pequeña ayuda.



Figura 25.7: Central geotérmica de Krafla, al norte de Islandia. Foto de Ásgeir Eggertsson.

Notas y textos de consulta

Página

- 234 *Ya se está usando el HVDC para transmitir electricidad a distancias superiores a los 1000 km en Sudáfrica, China, América, Canadá, Brasil y Congo.* Fuentes: Asplund [164], Bahrman y Johnson [165]. Otra lectura sobre HVDC: Carlsson [166].
- 234 *Las pérdidas de potencia en unas líneas HVDC de 3500 km de longitud, incluyendo la conversión de alterna a continua y de nuevo a alterna, rondan el 15%.* Fuentes: Trieb y Knies [167] y Van Voorthuysen [168].
- 235 *Imagina que la mitad del área de cada mancha se dedica a construir centrales de concentración solar con una densidad de potencia media de 15 W/m².* Trieb y Knies [167], que son grandes defensores de las tecnologías solares de concentración, calculan los siguientes rangos de potencia por unidad de área: captadores cilindro-parabólicos, 14-19 W/m²; Fresnel lineales, 19-28 W/m²; torre con heliostatos, 9-14 W/m²; discos stirling 9-14 W/m².
En marzo de 2007 se inauguró en España la primera central solar térmica de Europa, en Sanlúcar la Mayor, provincia de Sevilla. La planta de 11 MW de potencia



Figura 25.8: Centrales Valle 1 y Valle 2, en Cádiz, formadas por hileras de concentradores solares cilindroparabólicos. Foto de Arvydas Cetyrkovskis.

se conoce como PS10. Durante los siguientes años se instalaron otras centrales de concentración, sobre todo en Andalucía, debido a la gran cantidad de sol de esta zona. La crisis económica provocó un parón en la instalación de todas las tecnologías de generación eléctrica en 2013, y desde ese año no se han puesto en funcionamiento más centrales de este tipo en España. A día de hoy hay unas 50 instalaciones que suman una potencia nominal de 2,3 GW.

Gemasolar (Figura 25.4) es una planta de concentración mediante heliostatos que se puso en funcionamiento en Andalucía durante el año 2011. Ocupa una superficie de unos 2 km² y es capaz de generar una energía anual de 80 GWh [169]. Por lo tanto, la potencia media generada por unidad de área es de 5 W/m². Las centrales de Valle 1 y Valle 2, en Cádiz, también entraron en funcionamiento en el año 2011. En lugar de heliostatos utilizan concentradores cilindroparabólicos y en su medio kilómetro cuadrado de extensión son capaces de generar 145 GWh al año, lo que equivale a 33 W/m², <http://torresolenergy.com/valle-1-valle-2/>.

- 238 *Chimeneas solares*. Fuentes de información: Schlaich J. (2001) [170], Schlaich et al. (2005) [171], Dennis (2006) [172], EnviroMission [173] y Solar Air Tech [174].
- 239 *La potencia eléctrica media generada a partir de la geotermia en Islandia es de 0,6 GW [...]. La potencia eléctrica media generada en Islandia es de 2,1 GW*. Estos son datos de 2015: 13,78 TWh de hidroelectricidad y 5 GWh de electricidad de la geotermia con capacidades de 1,986 GW y 0,665 GW respectivamente. Fuente: Agencia Nacional de Energía Orkustofnun [175].

Lectura adicional: Comisión Europea (2007) [176]; Centro aeroespacial alemán (DLR), Instituto de Termodinámica Técnica, Sección de Análisis de Sistemas y Evaluación de Tecnología (2006) [177]; Solar Millenium [178].

Capítulo 26

Fluctuaciones y almacenamiento

El viento, como fuerza motriz directa, es totalmente inapropiado para las máquinas, ya que, durante las épocas de calma, habría un parón en todo el país. Antes de la era de las máquinas de vapor, los molinos de viento se utilizaban para el drenaje de minas; pero, a pesar de que eran máquinas potentes, también eran muy irregulares, por lo que las minas se inundaban durante las épocas largas de calma, y había que parar la fuerza de trabajo humana.

William Stanley Jevons (1865)

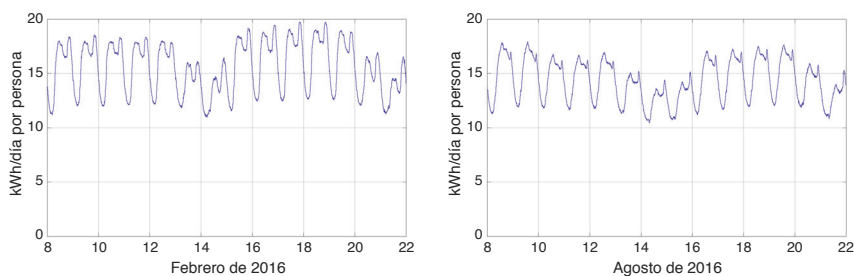


Figura 26.1: Demanda eléctrica en España (en kWh por persona y día) durante dos semanas de invierno y otras dos de verano de 2016. Los máximos picos en enero son alrededor de las 8 de la tarde. Tanto en las semanas de verano como en las de inviernos se aprecian los cinco días laborables. (Si quieres saber el consumo de toda España, recuerda que el límite superior de la gráfica, 20kWh por persona y día, equivale a 40 GW en todo el país).

Si nos deshacemos de los combustibles fósiles y nos lo jugamos todo a las renovables, o todo a la nuclear, o a una mezcla de las dos, podríamos tener problemas. La mayoría de las grandes renovables no son encendibles y apagables. Cuando el viento sopla y sale el sol la energía está ahí para que la cojamos; pero puede que dos horas después ya no haya energía disponible. Las centrales nucleares tampoco están diseñadas para ser encendibles y apagables. Normalmente están encendidas todo el tiempo y se puede aumentar o reducir su potencia de salida si se dispone de varias horas de tiempo. Esto es un problema, ya que en la red

eléctrica la producción y el consumo tienen que ser exactamente iguales todo el tiempo. La red no puede *almacenar* energía. Para poder tener un plan energético que funcione cada minuto de cada día, necesitamos *algo fácilmente encendible y apagable*. Se suele asumir que este *algo* tiene que ser una *fuentes* de energía que se conecte y se desconecte para compensar las fluctuaciones de la generación y el consumo (por ejemplo, ¡una planta de generación a través de combustibles fósiles!). Pero otra alternativa igualmente eficaz para encajar la generación y el consumo sería una *demandas* de energía fácilmente encendible y apagable: un sumidero de energía que pueda conectarse o desconectarse en un abrir y cerrar de ojos.

De cualquier forma, este elemento fácilmente encendible y apagable tiene que ser *grande*, porque la demanda de electricidad varía muchísimo (Figura 26.1). A veces, la demanda cambia bastante en un tiempo de pocos minutos. En este capítulo hablaremos de cómo lidiar con fluctuaciones en la generación y en el consumo sin utilizar combustibles fósiles.

¿Cuánto fluctúan las renovables?

Por mucho que amemos a las renovables, no podemos engañarnos. El viento y el sol son cambiantes.

Los críticos de las renovables dicen:

La energía eólica y la fotovoltaica son intermitentes e impredecibles, así que no pueden contribuir a la seguridad de suministro eléctrico; si instalamos muchos aerogeneradores o muchas plantas fotovoltaicas, tendremos que mantener muchas centrales de ciclo combinado que los reemplacen cuando no haya viento.

Titulares como «Una pérdida de viento provoca una emergencia en la red eléctrica de Texas» refuerzan esta idea. Los partidarios de la energía eólica le quitan hierro al asunto: «Tranquilos, *un* parque eólico puede ser intermitente, pero, si tenemos en cuenta la producción global de parques situados en diferentes zonas, su potencia es mucho menos intermitente».

Veamos los datos reales a ver si conseguimos tener un punto de vista equilibrado. En concreto, vamos a centrarnos en las fluctuaciones eólicas, ya que el viento es más impredecible que el sol. Solo con conocer la posición del sol en el cielo ya se puede calcular un valor máximo y mínimo de energía fotovoltaica producible. Sin embargo, la energía eólica puede ir desde 0 hasta la potencia nominal instalada en función del viento que haya en cada momento.

La Figura 26.2 muestra la potencia eólica generada por todos los parques españoles durante el año 2016. El viento *es* claramente intermitente, incluso si agrupamos un montón de turbinas distribuidas a lo largo de un país. Durante 2016 hubo 45 días en los que los aerogeneradores españoles produjeron menos que el 10% de su capacidad. Además, durante dos de estos días produjeron menos del 5%. En el día con menos viento produjeron un 3,7% de su capacidad.

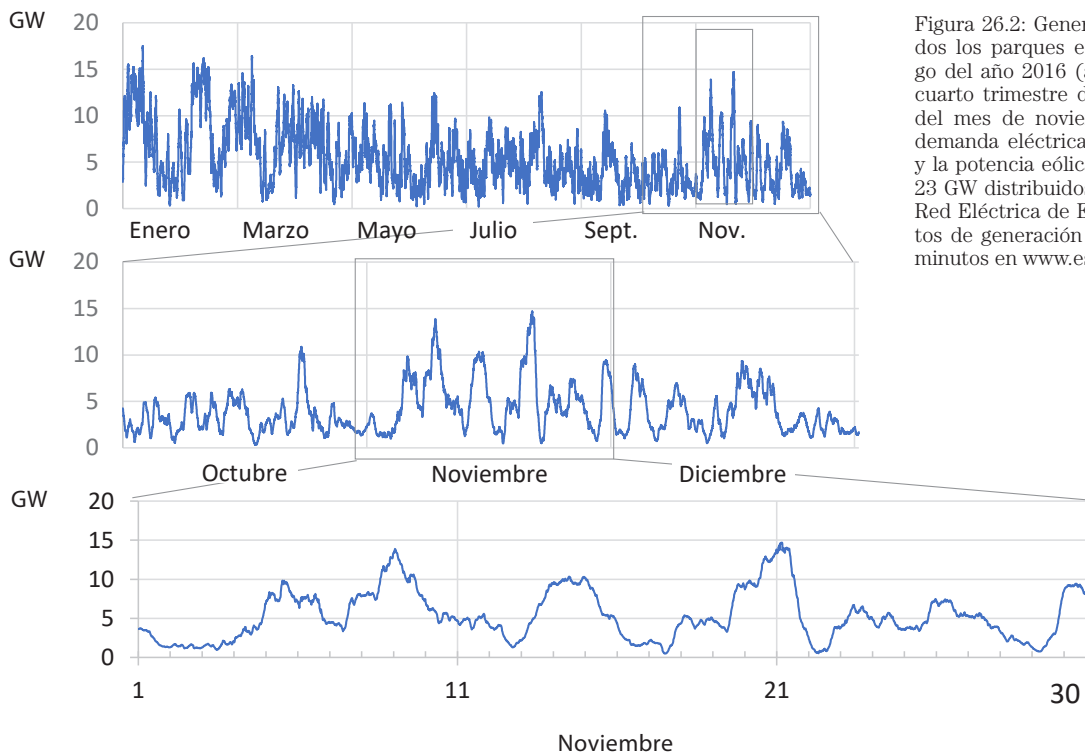


Figura 26.2: Generación total, en GW, de todos los parques eólicos de España a lo largo del año 2016 (arriba); vista ampliada del cuarto trimestre del año (centro), y detalle del mes de noviembre (abajo). El pico de demanda eléctrica en España es de 45 GW, y la potencia eólica instalada en 2016 era de 23 GW distribuidos en 1080 parques eólicos. Red Eléctrica de España proporciona los datos de generación con una frecuencia de 10 minutos en www.esios.ree.es.

Vamos a cuantificar las fluctuaciones en la potencia eólica generada en todo un país. Tendremos que analizar dos cosas: cambios rápidos y períodos de calma de varios días de duración. Veamos una de las fluctuaciones más bruscas del año. El 21 de noviembre de 2016 a las 9 de la mañana los aerogeneradores españoles estaban produciendo una potencia de 14000 MW. Al día siguiente, el 22 de noviembre, a las 7 a. m. la producción se había reducido a 530 MW. Esto significa una pendiente media de 610 MW por hora en un país con una instalación eólica de 23000 MW.

La máxima pendiente se produjo a las 4:30 a. m. del día 22, alcanzando los 1250 MW por hora. (Con pendiente nos referimos a la velocidad a la que la producción de potencia crece o decrece).

Escalemos este hecho a la situación que hemos considerado realista en el Capítulo 18, es decir, generar en España 7 kWh por persona y día a partir de parques eólicos. Para ello es necesaria una potencia media de 14 GW, lo que equivale a disponer de una flota eólica de 56 GW. Por lo tanto, si escalamos una de las máximas pendientes medidas en España en 2016 a 56 GW, podemos imaginar que tendremos pendientes de:

$$1250 \text{ MW/h} \times \frac{56\,000 \text{ MW}}{23\,000 \text{ MW}} = 3100 \text{ MW/h.}$$

Así que necesitamos o bien reemplazar la potencia eólica a una velocidad de 3100 MW/h –avisamos de que eso equivale a poner tres centrales nucleares a plena potencia cada hora–, o bien ser capaces de reducir nuestra demanda a una velocidad de 3100 MW/h.

¿Podríamos cumplir con estos requisitos? Para responder a esta pregunta tendremos que hablar un poco más sobre «gigavatios». Los gigavatios son enormes unidades de potencia para medir consumos y generaciones a nivel de país. Son a un país lo que un kilovatiohora por día es a una persona: una unidad cómoda. El consumo medio de electricidad en España es de 31 GW. Podríamos relacionar estas medidas del país con la unidad personal que estamos usando en este libro: 1 kWh por persona y día equivale a 2 GW a nivel nacional. Por lo tanto, si cada persona consume 16 kWh de electricidad al día, el consumo nacional es de 31 GW.

¿Está una pendiente de **3,1 GW por hora** totalmente fuera de nuestra experiencia? No. Cada mañana, como se muestra en la Figura 26.3, el consumo español aumenta unos 8 GW entre las 6:30 a. m. y las 8:30 a. m. Esto equivale a una pendiente de **4 GW por hora**. Así que nuestros ingenieros se enfrentan cada día con pendientes mayores a 3,1 GW a la hora en la red eléctrica nacional. Una pendiente extra de 3,1 GW por hora provocada por rápidas variaciones en el viento no es una razón de peso para desechar la idea de la instalación masiva de parques eólicos. Es un problema tan grande como otros problemas que los ingenieros ya han resuelto. Simplemente, tenemos que pensar cómo cuadrar una generación cambiante con un consumo también cambiante sin usar combustibles fósiles. No estamos diciendo que el problema de las variaciones del viento *ya* esté resuelto –solo decimos que es un problema del mismo tamaño que otros problemas que ya se han resuelto–.

Vale, antes de empezar a buscar soluciones, tenemos que cuantificar el otro problema del viento: largas calmas. A finales de octubre de 2016,

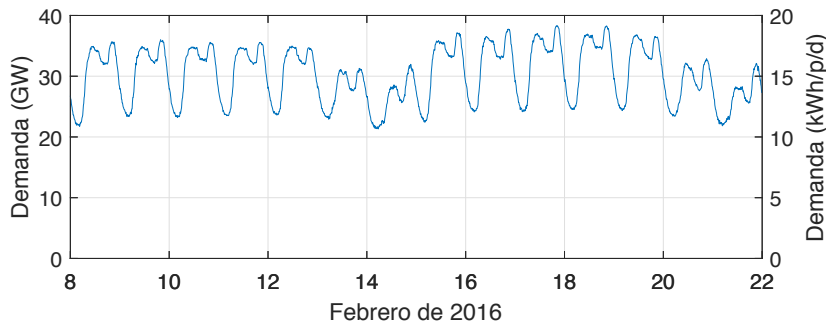


Figura 26.3: Demanda eléctrica en España durante dos semanas del invierno de 2016. Los ejes izquierdo y derecho muestran la demanda en unidades de país (GW) y en unidades de persona (kWh/p/d), respectivamente. Son los mismos datos que los recogidos en la Figura 26.1.

España vivió una calma eólica que duró cuatro días. Esto no fue tan raro, como puedes ver en la Figura 26.2. Se registraron calmas de dos o tres días varias veces durante el año.

Hay dos formas de contrarrestar estas calmas. O somos capaces de almacenar en algún sitio la energía que necesitaremos durante la calma, o, si no, tendremos que reducir nuestra demanda durante este tiempo (o una mezcla de ambas). Supongamos el caso de una calma de cinco días de duración. Si tenemos 56 GW de aerogeneradores generando una potencia media de 14 GW, la cantidad de energía que tenemos que almacenar, o de la que tendremos que prescindir, durante una calma de cinco días es

$$14 \text{ GW} \times (5 \times 24 \text{ h}) = 1700 \text{ GWh.}$$

El gigavatiohora (GWh) es la unidad más cómoda para medir la energía de la naciones. El consumo eléctrico de España es de unos 700 GWh al día.

Para personalizar esta cantidad, un almacenamiento de 1700 GWh a nivel nacional significa 35 kWh por persona. Este almacenamiento energético le permitiría al país funcionar sin 14 GW de electricidad durante 5 días; o, lo que es lo mismo, cada persona dejaría de consumir 7 kWh de electricidad al día durante 5 días.

Hacer frente a calmas y pendientes

Tenemos que resolver dos problemas: calmas (largos períodos con poca producción renovable) y pendientes (cambios rápidos en la generación o en el consumo). Ya hemos cuantificado estos dos problemas suponiendo que España tuviera unos 56 GW de potencia eólica instalada. Para solucionar las calmas debemos almacenar unos 1700 GWh de

electricidad (35 kWh por persona). La pendiente con la que tenemos que convivir es de **3,1 GW por hora** (o 0,07 kW por persona y hora).

Hay dos soluciones y ambas se pueden escalar para afrontar este problema. La primera, es una solución centralizada, y la segunda, descentralizada. La primera solución almacena energía y luego soluciona las fluctuaciones encendiendo y apagando una *fuentes* de energía que las compensa. La segunda solución funciona encendiendo y apagando una parte del *consumo*.

La primera solución son centrales de bombeo. La segunda utiliza las baterías de los coches eléctricos que hemos discutido en el Capítulo 20. Antes de meternos con estas soluciones, vamos a hablar un poco de otras ideas para hacer frente a las pendientes.

Hacer frente a las pendientes desde la generación

Algunas fuentes renovables son encendibles y apagables. Si tuviéramos un montón de potencia renovable fácilmente encendible y apagable, todos los problemas de los que estamos hablando en este capítulo desaparecerían. Países como Noruega y Suecia tienen reservas hidroeléctricas de gran tamaño y altitud que pueden encender y apagar. ¿Cuáles podrían ser las opciones en España?

Primero, España podría tener montones de incineradoras de residuos y centrales de biomasa –centrales de generación que jugarían el papel que juegan ahora los combustibles fósiles–. Diseñar estas centrales para que fueran fácilmente encendibles y apagables tiene sus implicaciones económicas, del mismo modo que tener centrales de combustibles fósiles funcionando solo durante el tiempo en el que no hay energías renovables también tiene sus implicaciones económicas: sus generadores estarán algunas veces ociosos y otras trabajando el doble de duro; además, la mayoría de los generadores son menos eficientes si aumentas y disminuyes su potencia que si mantienes esta a un nivel constante. Vale, dejando al margen los costes, la pregunta es cómo de grande es el recurso encendible y apagable que podríamos conseguir. Si se incinerara toda la basura urbana generada en España (residuos sólidos urbanos o RSU) y una cantidad similar de residuos agrícolas, la potencia media de estas fuentes alcanzaría 2,3 GW. Podríamos construir una capacidad del *doble* de esta potencia construyendo incineradoras capaces de alcanzar los 4,6 GW, teniendo en mente que solo estarán operativas durante la mitad del tiempo. Así serán capaces de generar 4,6 GW durante los períodos de mayor demanda y cero durante las horas valle. Estas centrales podrían diseñarse para que se encendieran o apagarán en una hora, proporcionando unas

rampas de 4,6 GW por hora –pero solo para una diferencia de 4,6 GW entre los niveles superior e inferior–. Esto supone una ayuda, pero no es suficiente para enfrentarnos a las fluctuaciones eólicas de 56 GW.

¿Y la hidroelectricidad? Las centrales hidroeléctricas españolas tienen un factor de carga medio en torno al 20% (22% durante el año 2016), por lo que sí pueden encenderse y apagarse. Además, estas centrales tienen la maravillosa cualidad de que pueden encenderse y apagarse muy rápido. Por ejemplo, la central hidroeléctrica de Cortes-La Muela, ampliada en octubre de 2013, tiene una capacidad de 1700 MW y es capaz de ponerse a plena potencia en solo un minuto. Esto equivale a una pendiente de ¡100 GW por hora en una sola central! Por lo tanto, una flota suficientemente grande de centrales hidráulicas sería capaz de gestionar las pendiente introducidas por enormes plantas eólicas. Hoy en día la capacidad de las centrales hidroeléctricas españolas es ya bastante grande como para poder plantearnos hacer frente al problema de las pendientes (asumiendo que queremos solucionar una pérdida de 56 GW de potencia eólica). De hecho, la potencia total hidráulica instalada en España es de 20 GW.

En cualquier caso, estos 20 GW no son suficientes para solucionar el problema por completo. Necesitamos otras ideas.

Centrales hidráulicas de bombeo

Las centrales hidráulicas de bombeo utilizan electricidad barata para impulsar agua desde un lago al pie de una montaña hasta otro en la parte alta del monte; y luego volver a producir electricidad cuando tiene más valor mediante turbinas, como en una central hidroeléctrica tradicional.

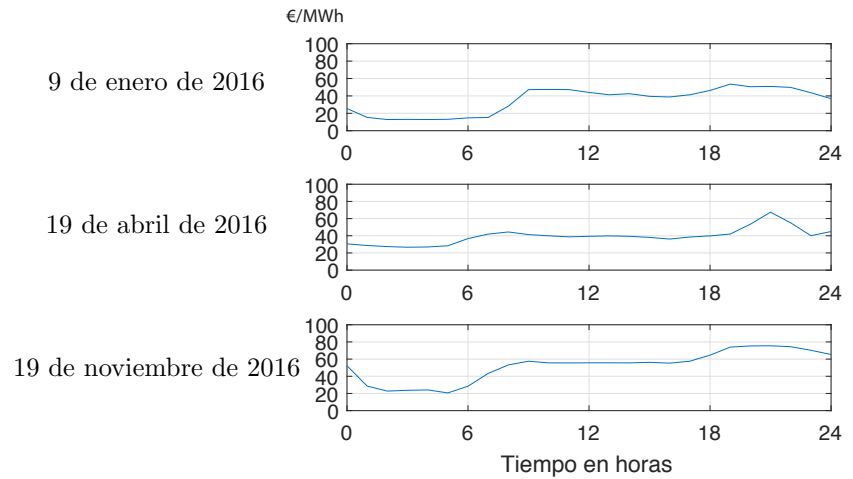
Debido a la gran extensión y al terreno montañoso, España es el país europeo con mayor capacidad de almacenamiento en centrales de bombeo. Las 17 instalaciones que se encuentran en funcionamiento pueden almacenar 1530 GWh en total (la Figura 26.4 es una foto de la más potente de estas 17). Normalmente se usan para almacenar la electricidad que sobra por las noches y, después, devolverla durante el día, especialmente en los momentos de mayor demanda –un buen negocio, tal como se aprecia en la Figura 26.5–. La Muela es una central de bombeo que forma parte de la central hidroeléctrica de Cortes-La Muela que se ha mencionado antes. Esta central juega, además, el papel de aseguradora del sistema eléctrico, ya que es capaz de restablecer la red eléctrica si se da el caso de un apagón general.

La Muela es la reina de las centrales de bombeo españolas. De hecho, es la más potente de todo el continente europeo. Vamos a repasar



Figura 26.4: Central hidroeléctrica de Cortes-La Muela, en la Comunidad Valenciana. Puede almacenar hasta 35 GWh y su potencia total es de 1,7 GW. Foto de Iberdrola.

Figura 26.5: Modelo de negocio de las centrales de bombeo. Precios de la electricidad, en € por MWh, durante tres días de 2016.



sus cifras más importantes. La energía total que puede almacenar es de 35 GWh. El lago superior está 524 m más alto que el inferior, y los 23 millones de m^3 que caben en su estanque superior fluyen a una velocidad máxima de $336 \text{ m}^3/\text{s}$, permitiendo una generación de 1,47 GW durante 24 horas. Su eficiencia de ciclo ronda el 75 %.

Si todas las centrales de bombeo españolas se encendieran al mismo tiempo, producirían una potencia de 5,6 GW. Además, se pueden encender muy rápidamente, contrarrestando cualquier pendiente producida por variaciones en la demanda o en la generación eólica. A pesar de que los 5,6 GW no son suficientes para reemplazar a los 56 GW eólicos que se podrían perder de repente, los 1530 GWh que pueden almacenar se ajustan casi a la perfección a los 1700 GWh necesarios para hacer frente a las calmas eólicas de larga duración. Por lo tanto, tenemos a día de hoy un potencial de almacenamiento que nos podría solucionar buena parte de los problemas que tendrían nuestros 56 GW de energía eólica. Además, el Joint Reseach Center publicó un estudio en el que concluye que España es el país europeo con mayor potencial de almacenamiento por bombeo y que, gracias a nuestra orografía montañosa, se podría instalar hasta 1900 GWh de una forma relativamente sencilla [179]. Otros estudios estiman la potencia que podrían alcanzar estas plantas de bombeo en 13 GW [180].

Realmente, aunque la energía almacenada en las centrales disponibles es elevada, sería necesario aumentar de una forma bastante significativa la potencia máxima que pueden gestionar. La buena noticia es que un aumento en la potencia de una instalación ya existente es bastante más sencillo y menos caro que aumentar la energía que esta almacena, ya que se pueden utilizar los mismos embalses. En cualquier caso, la obra civil que requiere es compleja y la inversión inicial sigue

siendo importante. Un ejemplo de aumento de la potencia se produjo en la ya comentada central de La Muela, en la que se realizó una obra que duró desde el año 2006 hasta el 2013 y que superó los 1200 millones de euros de presupuesto, lo que permitió instalar cuatro grupos reversibles (capaces tanto de bombear como de turbinar agua) y aumentar la potencia de la central en 840 MW.

Gestión de la demanda usando los coches eléctricos

Para almacenar 1700 GWh (35 kWh por persona) y hacer frente a variaciones de hasta 56 GW en la generación (1,2 kW por persona), podríamos pensar en los vehículos eléctricos. Los coches eléctricos que vimos en el Capítulo 20 tienen almacenes de energía de entre 9 kWh y 53 kWh. El parque español actual de turismos consta de 23 millones de vehículos. Si todos ellos fueran coches eléctricos, almacenarían una energía equivalente a ¡20 kWh por persona! Los cargadores típicos de baterías consumen una potencia de entre 2 y 3 kW. Por lo tanto, encender 23 millones de cargadores al mismo tiempo da lugar a un cambio en la demanda de ¡50 GW! La potencia media necesaria para alimentar a toda la flota nacional de vehículos, si todos fueran eléctricos, es de entre 30 y 40 GW. Encajan muy bien, por lo tanto, la adopción de vehículos eléctricos propuesta en el Capítulo 20 y la instalación de 56 GW de capacidad eólica, generando una potencia media de 14 GW.

Esta es una forma de sacarle partido a esta situación: los coches eléctricos se podrían cargar con cargadores inteligentes, en casa o en el trabajo. Estos cargadores inteligentes tendrían acceso a la información sobre el valor de la electricidad en cada momento y a las necesidades del dueño del coche (por ejemplo, «mi coche tiene que estar completamente cargado para las 7 de la mañana del lunes»). El cargador cumplirá los requisitos del usuario de una forma sensata, dejando de consumir electricidad cuando el viento cese o cuando el resto de la demanda aumente. De esta forma los cargadores ayudarían a mantener el equilibrio de la red, servicio que podría ser reconocido mediante un pago establecido.

Coches eléctricos como generadores

Los coches permanecen aparcados un 95% del tiempo (el otro 5% sus propietarios los utilizan para desplazarse). Siguiendo un razonamiento equivalente al mostrado en el Capítulo 20 (pág. 167), si 23 millones de vehículos eléctricos estuvieran dispuestos, en caso de ser necesario, a utilizar sus cargadores para descargar las baterías e inyectar electricidad en la red, considerando 2 kW por vehículo, tendríamos una

capacidad de 43 GW, valor parecido a la máxima demanda de potencia eléctrica de todo el país (45 GW). Incluso si solo un tercio de los vehículos estuvieran conectados y dispuestos al mismo tiempo, sumarían una potencia de 14 GW. Si cada uno de ellos hiciera una donación de emergencia de 2 kWh de energía, que supondría en torno al 5% de la capacidad energética de su batería, la energía proporcionada por toda la flota sería de 15 GWh, que no es nada despreciable.

De hecho, adelantándose a esta necesidad que traerá consigo una red cada vez menos dependiente de los combustibles fósiles, muchos países ya disponen de normativa que exige que los postes de recarga de vehículos eléctricos deben estar preparados para permitir la descarga de las baterías. Ciertamente, las baterías usadas en los vehículos eléctricos envejecen más rápidamente cuantas más veces se cargan y se descargan. Por lo tanto, para que los propietarios de vehículos eléctricos estén dispuestos a prestar sus baterías para este uso, el pago recibido debería contrarrestar el envejecimiento prematuro producido al usar las baterías con este propósito. Como siempre, tendremos que esperar unos años y ver cómo evoluciona esta idea de permitir a los usuarios particulares contribuir al buen funcionamiento de la red eléctrica.

Otras ideas sobre gestión de la demanda y almacenamiento

Hay otras opciones para gestionar la demanda y almacenar energía que repasaremos ahora.

La idea de ir cambiando el ritmo de fabricación de bienes para adaptarse a la generación renovable no es nueva. Algunas plantas de producción de aluminio están situadas cerca de centrales hidroeléctricas; cuanto más llueve, más aluminio producen. Siempre que la energía se use para fabricar algo que se puede almacenar, hay potencial para regular el consumo de esta fábrica de una forma inteligente. Por ejemplo, los sistemas de ósmosis inversa (que se usan para obtener agua dulce a partir de agua salada, véase la pág. 132) son grandes consumidores de electricidad en algunas regiones de España como la costa mediterránea, Andalucía y, especialmente, las islas Canarias, donde es necesario desalar 260 litros por persona y día, consumiendo aproximadamente 1 kWh por persona y día. Otro producto almacenable es el calor. Si, como sugerimos en el Capítulo 21, electrificamos los sistemas de calefacción y refrigeración de los edificios, especialmente el calentamiento de agua y de aire, hay un gran potencial de demanda eléctrica fácilmente encendible y apagable en la red eléctrica. Los edificios bien aislados mantienen el calor durante horas, por lo que hay flexibilidad en el horario de la

calefacción. Además, podríamos tener grandes depósitos térmicos en los edificios y usar bombas de calor para introducir calor en ellos en las horas de abundante electricidad y, después, usar las bombas de calor para llevar el frío o el calor de los depósitos a las zonas donde se requiera.

Controlar la demanda eléctrica de forma automática no es muy difícil. La forma más fácil de hacerlo es que algunos aparatos, como los frigoríficos y congeladores, escuchen la frecuencia de la red. Cuando hay escasez de generación en la red, la frecuencia baja por debajo de los típicos 50 Hz; cuando hay un exceso de generación, aumenta por encima de 50 Hz. (Es exactamente como la dinamo de una bici: cuando enciendes la luz tienes que pedalear más fuerte para proporcionar la potencia extra, si no lo haces, la bici irá un poco más despacio). Se podrían modificar los frigoríficos para que permitan que su temperatura subiera y bajara, solo un poco, en respuesta a los cambios de frecuencia de la red, de tal forma que, sin siquiera poner en riesgo la temperatura de tu mantequilla, tendieran a absorber potencia en los momentos en los que tengan que ayudar a la red.

¿Sería esta gestión de la demanda una ayuda útil para el almacenamiento virtual? ¿Cuánto consumo de potencia suponen los frigoríficos a escala nacional? De media, un frigorífico-congelador eficiente consume en promedio unos 18 W; supongamos que el número de frigoríficos es de unos 20 millones. Entonces, la capacidad de apagar todos los frigoríficos del país durante unos minutos equivaldría a 0,36 GW de ajuste de potencia automático. Esto es bastante potencia eléctrica –alrededor del 1% del total nacional–, y es similar a un incremento repentino de la demanda producido cuando un montón de gente, sincronizada por un televisor, enciende el microondas para hacer palomitas en el descanso de la película del sábado por la tarde. Estos tentempiés televisivos suelen producir incrementos en la demanda de 0,6-0,8 GW, mientras que los tentempiés televisivos asociados con los momentos más sagrados de la temporada (por ejemplo, un Barça-Madrid) pueden producir incrementos en la demanda de más de 2 GW. El apagado automático de todos los frigoríficos prácticamente contrarrestaría estos antojos sincronizados. Estos frigoríficos inteligentes también ayudarían con las fluctuaciones rápidas de potencia eólica.

Para darles más flexibilidad a los gestores de la red eléctrica, que constantemente aumentan y disminuyen la potencia generada por las centrales para que se adapte a la demanda, algunas industrias consumidoras de electricidad tienen contratos especiales que permiten a los gestores del sistema apagar su suministro avisándoles con muy poco tiempo de antelación. Este mecanismo se conoce como el servicio de interrumpibilidad, y, a pesar de que pueda parecer una buena idea, desde el año 2009 no ha sido necesario que ninguna empresa reduzca su consumo eléctrico y sigue costando unos 500 millones de euros anua-

les al conjunto de consumidores eléctricos. Otra solución aplicada en Sudáfrica (donde hay frecuentes cortes eléctricos), es la instalación de sistemas de control de la demanda con radio control en cientos de miles de casas para controlar el aire acondicionado y los calentadores de agua.

La solución danesa

¿Cómo gestiona Dinamarca las intermitencias de sus aerogeneradores? Directamente pagan por usar las instalaciones hidráulicas de otros países como almacenes para su electricidad. Casi toda la energía eólica danesa se exporta a sus vecinos europeos, algunos de los cuales tienen centrales de bombeo que utilizan para mantener el equilibrio. Esa energía almacenada se la venden después a Dinamarca (a un precio superior) cuando el viento ha parado. En definitiva, la eólica danesa aporta energía útil, y el sistema en su conjunto es seguro gracias al almacenamiento hidráulico.

¿Podría adoptar España la solución danesa? Para empezar, necesitaríamos reforzar nuestra conexión con Francia. La potencia que podemos intercambiar a día de hoy con Francia es de 2,8 GW a través de cuatro líneas de alta tensión que atraviesan los Pirineos por su zona este, centro y oeste, además de la recientemente construida línea de corriente continua de alta tensión (HVDC) que atraviesa la parte oriental de los Pirineos a través de un túnel subterráneo. Se espera que en el año 2025 entre en funcionamiento un nuevo enlace con el país galo a través del golfo de Vizcaya. Este enlace submarino, también en HVDC, aumentará la capacidad de intercambio de potencia entre España y Francia hasta los 5 GW.

De todas formas, no lo tenemos tan fácil como Dinamarca, que es un país pequeño al lado de Alemania y de Suecia. En nuestro caso, nuestros vecinos portugueses no pueden ayudarnos demasiado debido a que su país es bastante más pequeño, y Marruecos, por el sur, tampoco es una ayuda interesante, ya que su red eléctrica es débil y no podría gestionar la potencia necesaria. Dado que estamos en una esquina de Europa, Francia es nuestra única posibilidad, y es un país cuya capacidad de encender y apagar generación eléctrica no es muy grande, ya que la energía nuclear supone un 75% de la generación eléctrica francesa.

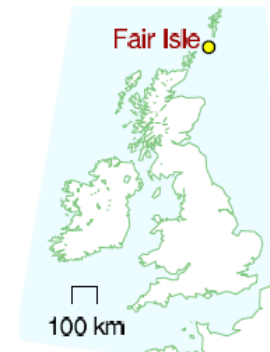
Una solución con dos redes

Una solución radical sería poner la eólica y otras fuentes intermitentes en una segunda red eléctrica, separada de la principal, que se use para alimentar sistemas para los que la seguridad del suministro no sea

esencial, como la calefacción y los cargadores de vehículos eléctricos. Durante 37 años (desde 1982) la isla escocesa Fair Isle (60 habitantes, 5,6 km²) ha tenido *dos* redes eléctricas que distribuyen la potencia generada por dos aerogeneradores y, cuando es necesario, por dos generadores de gasóleo. Una de las redes proporciona los servicios eléctricos estándar, mientras que un segundo cableado lleva electricidad destinada a calefacción. La calefacción se abastece principalmente del exceso de electricidad de los aerogeneradores, que de otra forma habría sido desperdiciada. Unos relés teleprogramables y sensibles a la frecuencia controlan los calentadores de agua y los almacenamientos térmicos individuales instalados en cada uno de los edificios de la isla. La frecuencia de la red se utiliza para informar a los calentadores de cuándo deben encenderse. De hecho, estos aparatos detectan hasta seis niveles de frecuencia, por lo que tienen siete estados diferentes de funcionamiento. En Fair Isle también se ha probado con éxito un almacenamiento de energía cinética (volante de inercia) para almacenar energía durante las fluctuaciones de viento en una escala de unos 20 segundos.

Otras tecnologías de almacenamiento

Hay muchas formas de almacenar energía, y muchos criterios mediante los que analizar cada opción de almacenamiento. En la Figura 26.7 se muestran tres de los criterios más importantes: densidad energética (cuánta energía se puede almacenar por cada kilogramo de almacén), eficiencia (cuánta energía recuperas por cada unidad que habías introducido) y vida útil (cuántos ciclos de carga y descarga energética se pueden realizar antes de que haya que reemplazar el sistema). Otros criterios también importantes son: la máxima velocidad a la que se puede introducir o extraer la energía del almacén, a veces expresado como potencia por kg; el tiempo por el que la energía se mantiene almacenada; y, por supuesto, el coste y seguridad del sistema.



Eólica: 4,1	Calef.: 2,5
Diésel: 1,8	Otros: 2,9

Figura 26.6: Generación y consumo eléctrico en Fair Isle (Escocia), 1995-1996. Los datos están en kWh por persona y día. La producción es mayor que el consumo porque se desecharon 0,6 kWh por persona y día.

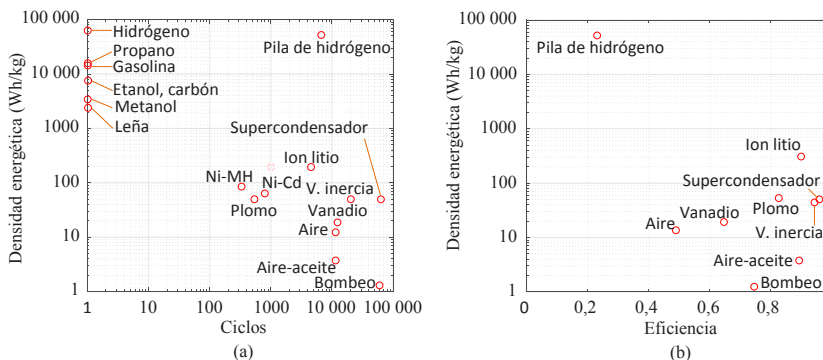


Figura 26.7: Algunas propiedades de los sistemas de almacenamiento y combustibles. (a) Densidad energética (en escala logarítmica) frente a vida útil (en ciclos). (b) Densidad energética frente a eficiencia. Las densidades energéticas no incluyen las masas de los contenedores de los sistemas de almacenamiento, salvo en el caso de «aire» (almacenamiento por aire comprimido). Si se tiene en cuenta la masa de un tanque criogénico para almacenar hidrógeno, su densidad energética se reduce de 39 000 Wh/kg a, aproximadamente, 24 000 Wh/kg.



Figura 26.8: Visita de la asociación Aperna a un banco de ensayos para volantes de inercia en las instalaciones de CEDER, en la provincia de Soria.

Volantes de inercia. En la Figura 26.8 puedes ver un banco de ensayos para volantes de inercia que se encuentra en la provincia de Soria, en las instalaciones de CEDER (Centro de Desarrollo de Energías Renovables), adscrito al Departamento de Energía del CIEMAT. El banco de ensayos permite ensayar volantes tanto de acero como de materiales compuestos a velocidades que pueden alcanzar las 63 000 rpm. Es por eso que el sistema cuenta con varios anillos concéntricos de acero macizo para contener posibles explosiones.

Un volante de inercia diseñado para almacenar energía en un coche de carreras puede almacenar alrededor de 400 kJ (0,1 kWh), y pesa 24 kg (Capítulo 20). Esto equivale a una densidad energética de 4,6 Wh/kg.

Supercondensadores. Los supercondensadores se usan para almacenar pequeñas cantidades de energía eléctrica (hasta 1 kWh) cuando se requieren muchos ciclos de operación y la carga se debe completar rápidamente. Por ejemplo, se suelen elegir supercondensadores en lugar de baterías para el frenado regenerativo de coches y trenes, ya que paran y arrancan muchas veces. Se pueden conseguir supercondensadores con una densidad de energía de 6 Wh/kg.

Baterías de flujo de vanadio. La empresa VRB power systems tiene instalada una batería de vanadio de 12 MWh en la planta eólica de Sorne Hill, en Irlanda, que puede dar una potencia de 32 MW. (VRB son las iniciales, en inglés, de *vanadium redox battery*). Este sistema de almacenamiento es una gran «batería de flujo», una celda redox reversible con un par de tanques llenos de vanadio en diferentes estados químicos.

Tabla 26.1: (a) poderes caloríficos (densidad de energía, por kg y por litro) de algunos combustibles. (b) Densidad energética de algunas baterías.

Combustible	Poder calorífico	
	(kWh/kg)	(kWh/l)
Gasoil	12,7	10,5
Keroseno	12,8	10,3
Gasolina	13	9,6
Etanol	7,9	6,1
Metanol	6,4	4,6
Bioetanol	7,5	6
Carbón	8	
Leña	4,4	
Hidrógeno	39,0	
Gas natural	14,85	0,01

(a)

Tipo de batería	Densidad energética (Wh/kg)	Vida útil (ciclos)
Ni-Cd	45-80	1500
Ni-MH	60-120	300-500
Plomo	30-50	200-300
Iones litio	150-265	500-5000
Polímero litio	120-150	400-700
Alcalinas recargables	80	50

(b)

Este sistema de almacenamiento puede eliminar las fluctuaciones del parque eólico en una escala de minutos, pero el máximo tiempo durante el que puede suministrar un tercio de la potencia del parque (durante una calma) es de una hora.

Una batería de vanadio de 1,5 MWh cuesta 325 000 \$, ocupa 70 m² y pesa 107 toneladas. Esta batería tiene una vida de más de 10 000 ciclos y se puede cargar con la misma potencia que la descarga (al contrario que las baterías de plomo que se cargan 5 veces más despacio). Su eficiencia de ciclo ronda el 70-75%. El volumen requerido para almacenar 20 kWh es 1 m³ de vanadio 2-molar disuelto en ácido sulfúrico (esto equivale a 20 Wh/kg). Así que, para almacenar 10 GWh, harían falta 500 000 m³ (170 piscinas). Por ejemplo, tanques de 2 m de alto ocupando una superficie de 500 m × 500 m.

Escalar las baterías de flujo para que sean equivalentes a una central de bombeo –10 GWh– podría modificar el precio del vanadio a nivel mundial, aunque actualmente no hay un problema de escasez mundial de este material. En 2013 la producción mundial de vanadio fue de 78 000 toneladas. Un sistema de 10 GWh necesita 36 000 toneladas de vanadio, casi la mitad de la producción mundial de 2013. Actualmente el vanadio se produce como un producto secundario de otros procesos, y se calcula que las reservas totales de vanadio son de unas 63 millones de toneladas.

Soluciones «económicas»

En el escenario mundial actual, donde las emisiones de gases de efecto invernadero tienen un precio ridículo, la barrera financiera que tiene que romper el almacenamiento es una fea alternativa: el almacenamiento se puede evitar, simplemente, instalando una central de gas adicional para cubrir la demanda extra; y la potencia sobrante se puede quemar fácilmente en resistencias. Ahora bien, esta solución basada en la quema de combustibles fósiles se aleja mucho de la sostenibilidad que estamos buscando en este libro, por lo que la descartamos de nuestros planes.

Resumen sobre calmas y pendientes

Repasemos nuestras necesidades relativas a calmas y pendientes (después analizaremos el problema de la estacionalidad): nos gustaría poder almacenar o dejar de consumir 1700 GWh, lo que equivale a 35 kWh por persona; y hacer frente a variaciones de hasta 56 GW en la

generación (1,2 kW por persona). Y estas son nuestras opciones: podemos equilibrar la generación y la demanda fluctuante encendiendo y apagando *generadores* eléctricos (incineradoras de residuos y centrales hidroeléctricas, por ejemplo); *almacenando* energía en algún sitio y regenerándola cuando sea necesaria; o encendiendo y apagando la *demanda*.

La opción más prometedora, en términos de escala, es encender y apagar la demanda de los cargadores de coches eléctricos. 23 millones de coches, cada uno de ellos con 40 kWh de batería suman 900 GWh. Si se electrificara también el transporte de mercancías, la capacidad total sería todavía mayor.

Por lo tanto, la generación eólica y los vehículos eléctricos encajan maravillosamente bien. Si vamos aumentando el número de coches eléctricos al mismo ritmo que la generación eólica, aproximadamente 3000 nuevos coches por cada aerogenerador de 3 MW, y si nos aseguramos de que los cargadores de estos vehículos sean inteligentes, esta sinergia ayudaría muchísimo en la gestión de las fluctuaciones eólicas. Si nuestra predicción sobre los coches de hidrógeno no se cumple, y el hidrógeno se convierte en el combustible de la mayoría de los turismos del futuro, la sinergia viento-vehículos eléctricos que acabamos de escribir se podría sustituir perfectamente por viento-hidrógeno. Los aerogeneradores generarían electricidad; y cuando hubiera electricidad sobrante se generaría hidrógeno, que se almacenaría en tanques y se utilizaría más tarde en vehículos de hidrógeno o para otras aplicaciones, como la producción de vidrio.

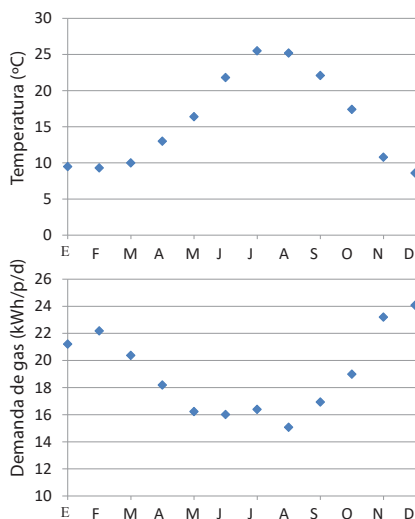


Figura 26.9: Demanda de gas (gráfico inferior) y temperatura media mensual (superior) en España durante el año 2016.

Fluctuaciones estacionales

Las fluctuaciones de generación y demanda con escalas de tiempo más largas son las estacionales. En cuanto a la demanda, la más importante es la de climatización (tanto calefacción como refrigeración de edificios), que tiene sus máximos cada invierno y cada verano. La demanda actual de gas en España aumenta desde un consumo medio de 15 kWh por persona y día en agosto hasta una media de 24 kWh por persona y día en diciembre (Figura 26.9).

Algunas fuentes renovables también tienen fluctuaciones anuales: la potencia solar es mayor en verano y la eólica es menor.

¿Cómo gestionamos estas fluctuaciones tan lentas? Los vehículos eléctricos y las centrales de bombeo no nos van a ayudar a almacenar las

cantidades que necesitamos. Una tecnología útil quizás sea el almacenamiento térmico a largo plazo. Una gran roca o una gran masa de agua puede almacenar toda la necesidad de calefacción de un edificio durante el invierno –discutiremos esta idea más en detalle en el Apéndice E–. En los Países Bajos, el calor que absorben las carreteras en verano se almacena en acuíferos hasta el invierno, cuando es liberado en los edificios mediante bombas de calor.

Otra opción es tener en cuenta estas fluctuaciones en el dimensionado de las plantas de generación renovable. Uno de los puntos fuertes de las dos grandes fuentes de energía renovable (la eólica y la fotovoltaica) es que se complementan bien. Es decir, durante los meses estivales, en los que aumenta la generación fotovoltaica, normalmente se dispone de menos viento. Por otra parte, durante los meses invernales se genera menos energía fotovoltaica pero más eólica. Por lo tanto, si dimensionamos de forma inteligente los parques de generación tanto eólicos como fotovoltaicos, podemos gestionar las variaciones estacionales. Un ejemplo de esta estrategia es el caso alemán, que se representa en la Figura 26.10. A 31 de diciembre de 2017 tenían instalados 55 GW de potencia eólica y 43 GW de fotovoltaica. De esta forma se generaron en 2017 3,4 kWh por persona y día de energía eólica y 1,3 kWh por persona y día de fotovoltaica. Como el clima de invierno es mucho más ventoso que el de verano en este país, el mes en el que menos energía generaron sus aerogeneradores en 2017 fue julio (2,25 kWh por persona y día), que supone solo un 37 % del mes con mayor generación (diciembre, 6 kWh por persona y día). Por su parte, el mes en el que menos fotovoltaica se generó fue diciembre (0,2 kWh por persona y día), solo un 8 % de lo producido en junio (2,3 kWh por persona y día). La suma de estas dos fuentes de energía renovable genera la energía mostrada en la tercera gráfica de la Figura 26.10. De esta forma, durante el mes con menor generación combinada, se genera un 60 % de la energía generada en el mes de mayor generación, mejorándose el 8 % de la fotovoltaica y el 37 % de la eólica.

El caso español lo puedes ver en la Figura 26.11. Se pueden destacar dos diferencias fundamentales con la Figura 26.10. Por una parte, la energía media anual generada por persona y día por las plantas eólicas y fotovoltaicas se reduce desde los 4,6 kWh por persona y día en el caso alemán hasta los 3,3 kWh por persona y día en España. La segunda diferencia es que la generación fotovoltaica tiene una importancia pequeña en comparación con la eólica y no consigue aumentar la generación durante los meses de verano. Si en España se multiplicara por tres la potencia fotovoltaica instalada (generación representada con rectángulos blancos en la Figura 26.11), su efecto sería suficientemente notable como para conseguir un efecto similar al alemán, de forma que el mes

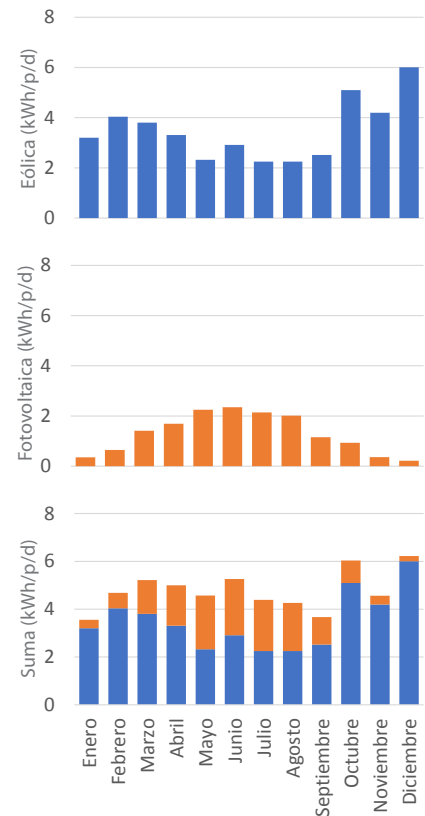


Figura 26.10: Generación mensual de energía eólica (azul) y fotovoltaica (naranja) en Alemania durante el año 2017. La combinación de generación fotovoltaica y eólica consigue reducir la variación anual de la suma de estas dos energías renovables.

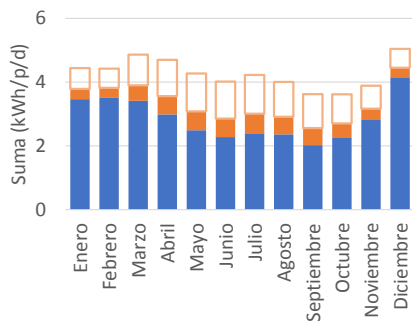


Figura 26.11: Generación mensual de energía eólica (azul) y fotovoltaica (naranja) en España durante el año 2017. La energía generada en los meses de invierno es mayor que la generada en verano. Mediante rectángulos blancos se representa la hipotética generación si se multiplicaran por tres las plantas fotovoltaicas instaladas.

en el que menos energía fotovoltaica y eólica se generara (septiembre) representara un 72% del mejor mes (diciembre).

Por lo tanto, una combinación inteligente de diferentes tipos de energías renovables complementarias también puede contribuir de forma importante a solucionar las fluctuaciones estacionales debidas a los hábitos de consumo y a las variaciones en el clima.

Notas y textos de consulta

Página

242 *«Una pérdida de viento provoca una emergencia en la red eléctrica de Texas»*. [181] De hecho, una correcta interpretación de esta noticia es considerar que este evento, aunque poco común, es un ejemplo del funcionamiento *normal* de la red eléctrica. Como ya se ha explicado, hay clientes industriales cuyo suministro puede interrumpirse si hay una falta de generación eléctrica. La generación eólica cayó en 1,4 GW de golpe, y al mismo tiempo los tejanos aumentaron su demanda en 4,4 GW, provocando exactamente esta carencia de generación que se resuelve desconectando a algunos consumidores industriales. Los clientes desconectables fueron desconectados. Todo funcionó como estaba planeado.

Ahí va otro ejemplo: «La potencia eólica en España supera su propio récord, se mandó desconectar» [182]. El consumo eléctrico medio de España en 2008 (cuando sucedió este evento) era de 31 GW. El martes, 4 de marzo de 2008, nuestros parques eólicos estaban generando 10 GW, lo que representó el 28% del consumo eléctrico peninsular. Se trataba en ese momento de un máximo histórico de generación eólica, y la posible inestabilidad de la red eléctrica asociada a una generación racheada tan elevada llevó al regulador a tomar la decisión de desconectar algunas de las plantas eólicas. Posteriormente se ha probado que porcentajes de generación eólica mucho más elevados no ponen en peligro la red nacional. Por ejemplo, durante la madrugada del 8 de noviembre de 2009 se superó por primera vez el 50% de producción eólica. El máximo histórico de generación eólica en España hasta la fecha es de 17 553 MW (45,9% del total en ese momento), registrado a las 19:27 del 29 de enero de 2015.

243 *...la potencia eólica generada por todos los parques españoles durante el año 2016*. Datos de Red Eléctrica de España [183].

246 *Si se incinerara toda la basura urbana generada en España [...] y una cantidad similar de residuos agrícolas, la potencia media de estas fuentes alcanzaría 2,3 GW*. Según AEVERSU (Asociación de Empresas de Valorización Energética de RSU), en el año 2012 se incineraron en España 2,1 millones de toneladas de RSU, que generaron 1500 GWh de energía eléctrica [184], lo que equivale a una generación de 714 GWh por cada millón de toneladas de RSU incinerada. Sin embargo, parte de esta generación se consume en las propias instalaciones de aprovechamiento de residuos, principalmente para tratar los humos. Si se toman datos de plantas reales, como la de Tera, situada en Barcelona, se comprueba que la generación eléctrica neta por cada tonelada de residuos

quemada es de 500 GWh [185], dato que coincide con la generación media de las plantas estadounidenses según la U. S. Energy Information Administration [186]. Por otra parte, según los datos de Eurostat, la cantidad total de RSU generados en España durante el año 2016 fue de 20,5 millones de toneladas (1,2 kg de basura por persona al día). Por lo tanto, si se incineraran todos estos residuos, más otros 20,5 millones de toneladas de material agrícola se obtendrían:

$$(20,5 + 20,5) \text{ mill. toneladas} \times 500 \frac{\text{GWh}}{\text{mill. toneladas}} = 20\,500 \text{ GWh al año.}$$

Esta producción anual equivale a una potencia media de 2,3 GW.

- 250 *...las islas Canarias, donde es necesario desalar 260 litros por persona y día.* Este archipiélago cuenta con 327 plantas desalinizadoras que producen agua dulce a partir de agua tomada directamente del mar o de manantiales subterráneos salados debido a las filtraciones de agua del mar. En 1964 se instaló en Lanzarote la primera planta desalinizadora de España. Durante los siguientes años, la proliferación de estas plantas ha permitido el asentamiento permanente de una mayor población y la explotación de las islas como destino turístico, tal como reconoce el propio gobierno canario [187]. En un artículo publicado por el Dr. Baltasar Peñate Suárez, jefe del Departamento de Agua del Instituto Tecnológico de Canarias, el volumen de agua a desalar se cuantificó en 200 hm³ al día durante el año 2014, y el consumo energético medio que requieren estas plantas es de 4,5 kWh por cada m³ de agua desalinizada [188]. Estos 200 hm³, repartidos entre los 2 millones de habitantes de Canarias, equivalen a 260 litros de agua por persona y día.
- 251 *Se podrían modificar los frigoríficos para que permitan que su temperatura subiera y bajara, solo un poco, en respuesta a los cambios de frecuencia de la red.* Fuente: [189]. Otros enlaces: www.dynamicdemand.co.uk; www.rltec.com; www.responsiveload.com.
- 252 *Otra solución aplicada en Sudáfrica [...] es la instalación de sistemas de control de la demanda.* Fuente: [190].
- 252 *Casi toda la energía eólica danesa se exporta a sus vecinos europeos.* Fuente: [191].
- 253 *Durante 37 años (desde 1982) la isla escocesa Fair Isle [...] ha tenido dos redes eléctricas.* Fuente: [192].
 Más información sobre Fair Isle en <http://www.fairisle.org.uk/>. Después de 37 años utilizando esta doble red eléctrica, en Fair Isle siguen siendo habituales los cortes en el suministro eléctrico, ya que hay períodos sin viento en los que también se restringe el uso de los generadores diésel, cuyo combustible depende de los viajes del ferri que comunica la isla con Gran Bretaña. Para paliar este problema, en 2017 se acometió un proyecto con un presupuesto de 250 000 \$. Este proyecto incluía la instalación de tres turbinas eólicas de 60 kW, una planta fotovoltaica de 50 kW y una batería que permitía el almacenamiento de la energía generada. Además, se contemplaba ampliar la red de alta tensión a las zonas del norte de la isla [193, 194].
- 253 *Figura 26.7. Eficiencia de sistemas de almacenamiento.* Baterías de iones de litio: eficiencia del 90 % [195, 196]. Baterías de plomo: 85 % [196]. Aire comprimido: 50 % [197]. La información sobre volantes de inercia y supercondensadores se ha obtenido de [198].
 Los sistemas aire-aceite son acumuladores hidráulicos, como los usados para el frenado regenerativo de los camiones. Son sistemas de aire comprimido con eficiencias de ciclo que alcanzan el 90 % y permiten una captura de energía cinética de hasta el 70 % [199].

- 254 *Tabla 26.1.* Fuentes: [200, 201, 195, 202]. Algunos entusiastas del hidrógeno que se han desilusionado con este elemento parece que se están moviendo por la tabla periódica hasta llegar al boro. Plantean quemar boro para generar B_2O_3 , reacción que se puede revertir mediante el uso de electricidad para obtener de nuevo B a partir de B_2O_3 . El boro tiene una densidad energética de 15 000 Wh por kg, que es bastante alta. Sin embargo, se mantiene el mayor problema que presenta el hidrógeno: que la producción del combustible (en este caso boro) presenta una baja eficiencia energética.
- 254 *Baterías de flujo de vanadio.* Fuente: [203]. Producción anual de vanadio: [204].
- 257 *...el calor que absorben las carreteras en verano se almacena en acuíferos hasta el invierno.* Fuente: [205].

Capítulo 27

Cinco planes energéticos para España

Si vamos a acabar con nuestra adicción a los combustibles fósiles, necesitamos un plan de cambio radical. Y el plan tiene que cubrir todas las necesidades energéticas. Y, además, necesita una hoja de ruta política y económica. Estos dos últimos puntos quedan fuera del alcance de este libro, así que discutiremos simplemente los aspectos técnicos del nuevo plan.

Hay muchos planes que pueden cubrir nuestras necesidades. En este capítulo describiremos cinco posibilidades. No se deben tomar estos planes como los recomendados. Nuestra única recomendación es:

El plan debe cubrir todas las necesidades energéticas.

Cada plan consta de dos partes: el consumo y la generación. Para evitar que los planes ocupen demasiado, nos basaremos en una versión simplificada de nuestro país en el que consideramos que se consume energía para tres cosas: transporte, calor y electricidad. Esta es una simplificación drástica, teniendo en cuenta que estamos omitiendo detalles del consumo industrial, agrícola, alimentario, importaciones, etc. Pero esperamos que sea una simplificación útil, que nos permita analizar y comparar distintos planes en un minuto. Más adelante podríamos detallar más estos planes, pero todavía estamos tan lejos del objetivo que creemos que esta versión simplificada es la mejor manera de asimilar los problemas a los que nos enfrentamos.

Presentaremos algunos planes que creemos que son técnicamente posibles de realizar en España para el año 2050. Todos tendrán en común el mismo patrón de consumo. Insistimos en que este no tiene por qué ser el plan correcto ni el único plan. Simplemente se trata de evitar la abrumadora cantidad de planes que podrían surgir a partir de ahora. En cuanto a la parte de la generación de energía, describiremos varios planes utilizando diferentes combinaciones de renovables, «carbón limpio» y nuclear.

La situación actual

La situación actual en nuestra España esquemática es la siguiente. El transporte (para humanos y mercancías) utiliza 23 kWh por persona y día, para lo cual se necesitan unos 29 kWh/p/d de petróleo principalmente. Para calentar agua, habitáculos y procesos industriales, utilizamos 24 kWh por persona y día de gas y otros combustibles (se ha descontado el uso de calor eléctrico). La electricidad consumida en España es de 16 kWh/p/d, proveniente aproximadamente en un 40% de renovables, 40% de combustibles fósiles y 20% de nuclear. Para generarla utilizamos unos 25 kWh de combustibles fósiles y nuclear y unos 7 kWh de energía renovable. De los 25 kWh que utilizamos de combustibles fósiles y nuclear, unos 15 kWh se escapan en forma de calor a través de las torres de refrigeración; y de los 17 kWh de electricidad que logran producirse en total, alrededor de 1 kWh se pierde en forma de calor en el cableado de transporte y distribución. En definitiva, la energía total que utilizamos en España es de unos 85 kWh por persona y día.

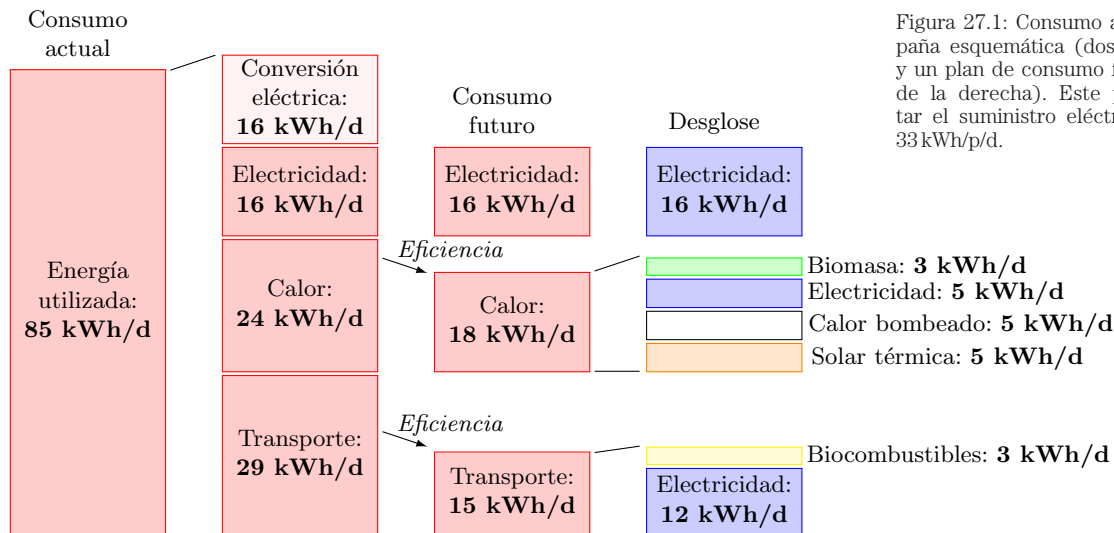


Figura 27.1: Consumo actual en nuestra España esquemática (dos primeras columnas) y un plan de consumo futuro (dos columnas de la derecha). Este plan requiere aumentar el suministro eléctrico de 16 kWh/p/d a 33 kWh/p/d.

Características comunes de los cinco planes

En nuestro futuro país esquemático, el consumo energético se reducirá a 49 kWh/p/d gracias a una mejor eficiencia energética en transporte y en el uso del calor.

En los cinco planes futuros, el transporte será principalmente eléctrico. Los motores eléctricos son mucho más eficientes que los de combustión, así que la energía requerida para el transporte será mucho menor. Además, el transporte público (también mayoritariamente eléctrico) estará mejor integrado y personalizado. Hemos asumido aquí que el coche eléctrico reduce en un 75 % el consumo energético, pero también que el crecimiento económico cancelará buena parte de este ahorro, siendo el consumo del transporte la mitad del actual. Hay algunos medios de transporte que seguirán basándose en los combustibles líquidos, y para ellos generaremos biocombustibles. La energía para todo el transporte será de 12 kWh/p/d de electricidad y de 3 kWh/p/d de biocombustibles. Además, las baterías de los vehículos eléctricos servirán para gestionar las fluctuaciones de la electricidad generada y consumida. El área requerida para conseguir los biocombustibles (cuyo consumo se multiplicaría por más de 4) sería el 8,7 % de todo España (960 m² por persona), asumiendo que el biocombustible viniera de la colza con los rendimientos actuales. Conforme estos rendimientos mejoren, desde el propio cultivo hasta el procesado final, se irá reduciendo el área dedicada a estos cultivos.

En los cinco planes, el calor utilizado se reducirá mejorando el aislamiento de los edificios y realizando una mejor gestión de la temperatura mediante el uso de termostatos inteligentes, educación e *influencers* guaperas que pongan de moda el jersey de lana. Los nuevos edificios (los construidos de 2020 en adelante) se calentarán principalmente por aerotermia y geotermia. Parte del agua caliente y calefacción será suministrada por colectores solares (unos 6 m² por vivienda) y otra parte por bombas de calor y electricidad. Los edificios cercanos a bosques o a cultivos energéticos podrán utilizar biomasa. Por último, parte del calor industrial actualmente generado con combustibles, es previsible que se electrifique. De esta forma la energía requerida para calor se reducirá de los 24 kWh/p/d totales a 13 kWh/p/d, repartidos en 5 kWh/p/d de solar térmica, 5 kWh/p/d de electricidad y 3 kWh/p/d de biomasa.

La biomasa para producir calor (o para cogeneración) vendrá de bosques cercanos y de cultivos energéticos (quizás plantaciones de *Miscanthus* o residuos agrícolas) que cubrirán un área en torno al 2,2 % de España (unos 240 m² por persona). Esto equivale al 5,8 % del área cultivada en España, que es de 4144 m² por persona. Todo ello suponiendo plantaciones con un rendimiento medio de 0,5 W/m² y con unas pérdidas del 30 % en su procesado y transporte. Finalmente, el calor suministrado sería de 3 kWh por persona y día, lo cual supone un leve incremento con respecto al consumo actual de biomasa sólida para calor, que es de 2,8 kWh/p/d.

En todos los planes asumiremos el mismo consumo para electrodomésticos, iluminación, etc., por lo que seguiremos necesitando 16 kWh(e)/p/d de electricidad. Está claro que la eficiencia en iluminación y de ciertos aparatos irá incrementándose, pero el crecimiento económico y los avances tecnológicos harán que cada vez tengamos más aparatos electrónicos en nuestras vidas.

El consumo total de electricidad en este plan aumentará, debido al uso de bombas de calor (5 kWh/p/d) y al transporte (12 kWh/p/d), hasta un total de 33 kWh/p/d. Esto supondría algo más que duplicar la producción actual de electricidad; así que la pregunta final es: ¿de dónde va a venir esta gran cantidad de electricidad? Veamos algunas alternativas. Quizás no todas sean sostenibles, pero sí tendrán en común un bajo nivel de emisiones de carbono.

Producir electricidad a lo grande: componentes

Para producir toda la electricidad necesaria, cada uno de los cinco planes utiliza energía eólica, solar fotovoltaica, hidroeléctrica, incineración de residuos agrícolas y urbanos y algo de tecnologías marinas. Además, se podrá utilizar algo de nuclear, gas y «carbón limpio», es decir, carbón quemado en centrales con captura de CO₂. Cada uno de los planes generará 35 kWh/p/d, que son los mencionados 33 kWh/p/d redondeados hacia arriba para cubrir pérdidas en la distribución.

Como comparación, recordemos que actualmente en España en torno al 83% de la energía primaria utilizada es importada. Actualmente importamos 37 kWh/p/d de petróleo, 17 kWh/p/d de gas, 10 kWh/p/d de uranio y 7 kWh/p/d de carbón (nótese que el carbón nacional utilizado es de tan solo 0,8 kWh/p/d). El uranio no suele considerarse una importación, ya que se puede almacenar, pero, desde luego, no es un recurso nacional, sino comprado (en algún momento) a países extranjeros.

En todos los planes asumiremos que los residuos urbanos se aprovechan para su quema y producción eléctrica. Esto es aproximadamente 1 kg/p/d de residuos, con el que se podría generar 0,5 kWh(e)/p/d. Supongamos que se aprovecha también una cantidad similar de residuos agrícolas, con lo que se duplicaría la energía generada con residuos, alcanzando 1 kWh(e)/p/d. Para llevar a cabo este plan, harían falta unas 100 plantas de 30 MW, como la de TERSA en Sant Adrià de Besòs. Ciudades como Madrid o Barcelona (con alrededor de 5 millones de habitantes) necesitarían unas 10 plantas como esta cada una. Ciudades como Bilbao o Málaga (con alrededor de 1 millón de habitantes) tendrían 2 plantas cada una. En ciudades más pequeñas, se tendrían plantas de

menor potencia; por ejemplo, una ciudad como Pamplona necesitaría una planta de unos 15 MW. Cualquier objeción en cuanto a la dificultad de su puesta en marcha o su toxicidad debería ser, en parte, desmentida, si se observa la Figura 27.2, que muestra la cantidad de residuos urbanos quemados y almacenados en vertederos en distintos países de Europa. En este gráfico se ve cómo entre los países que queman casi toda su basura están Suecia, Dinamarca, Holanda o Suiza, países nada relacionados con problemas de higiene o salud. Por último, un efecto positivo añadido es que, incinerando los residuos, se evitan futuras emisiones de metano de los vertederos.

En todos los planes, la contribución de la hidroeléctrica será la misma. Actualmente está en torno a 2 kWh/p/d, y hemos estimado un potencial de unos 5 kWh/p/d. Vamos a proponer una producción futura de 3 kWh/p/d.

También tendrán en común todos los planes una generación solar termoeléctrica de 0,5 kWh/p/d, casi el doble de la actual.

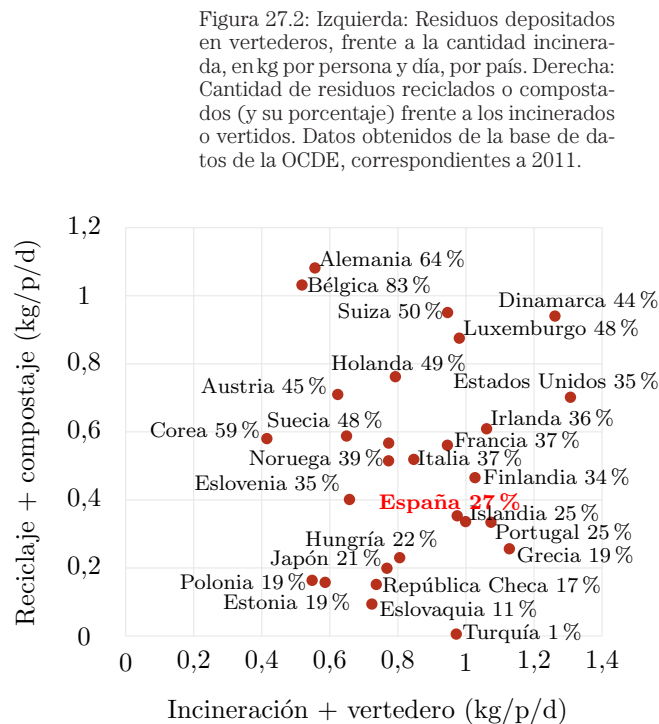
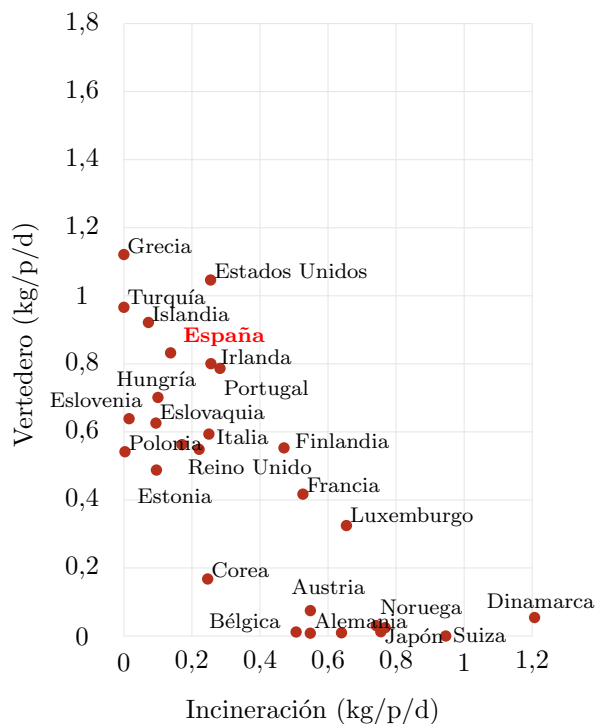


Figura 27.2: Izquierda: Residuos depositados en vertederos, frente a la cantidad incinerada, en kg por persona y día, por país. Derecha: Cantidad de residuos reciclados o compostados (y su porcentaje) frente a los incinerados o vertidos. Datos obtenidos de la base de datos de la OCDE, correspondientes a 2011.

Por último, todos los planes considerarán una generación eléctrica de 0,5 kWh/p/d con biomasa, el doble de lo que se produce actualmente.

Estas cuatro últimas tecnologías (residuos, hidroeléctrica, biomasa y solar termoeléctrica) servirán, en parte, para regular la generación y adaptarla al consumo. En cada plan veremos brevemente algunas estrategias adicionales que podrían utilizarse con este fin.

En estos planes no se mencionarán tecnologías que no tengan un potencial grande en cuanto a producción energética, tales como las mareas, olas o geotermia. Esto no quiere decir que no sean viables, es más, pueden ser muy importantes en algunos sitios (como la geotermia en las islas Canarias). Simplemente, al no aportar una cantidad significativa de energía al total de España, no hacen sino introducir datos extra que pueden desviar la atención del lector de las partes importantes de los planes. Por ello, creemos que es mejor eliminarlas del análisis, aunque sin duda serán parte del futuro mix eléctrico. En cuanto a la cogeneración, que aporta actualmente 1,5 kWh(e)/p/d, aunque no se mencione explícitamente, seguirá teniendo su cabida, y está englobada dentro de la producción con biomasa y residuos.

Producir electricidad a lo grande: Plan R

El plan R, de **R**enovable, es el plan que cabría esperar en este libro. Un plan en el que el 100% de la energía necesaria se genera con renovables. En este plan las tecnologías renovables tendrán un potencial de generación exactamente igual al consumo, lo cual implica almacenar toda la energía que sobre cuando la generación supere al consumo, y ser capaces de devolverla cuando sea necesario. Por ello, además del uso del bombeo, este plan se fundamenta en la capacidad de almacenar energía a lo grande, en baterías y otras tecnologías. Este plan es optimista en cuanto a que espera que las tecnologías de almacenamiento sean baratas y eficientes en un futuro próximo.

En este plan, además de las fuentes comunes a todos los planes, se generarán 13 kWh/p/d de eólica onshore y offshore y 17 kWh/p/d de fotovoltaica, tanto en tejado como en grandes plantas.

Para obtener 13 kWh/p/d de eólica será necesario multiplicar por 4,5 el parque actual, hasta unos 100 GW de potencia, el doble de lo instalado actualmente en Alemania.

En cuanto a la fotovoltaica, necesitaríamos unos 195 GW, lo cual parece irrealizable si se compara con la poca potencia actual en España (tan solo 5,4 GWp), pero es, por ejemplo, 5 veces más de lo actualmente

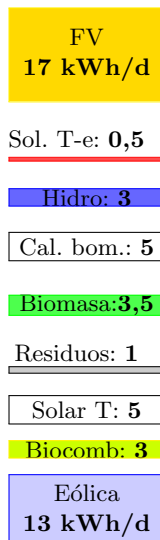


Figura 27.3: Plan R.

instalado en Alemania. Visto desde otra perspectiva, solo requeriría cubrir 50 m² de terreno por persona, es decir, el 0,5% del territorio, no mucho más del espacio disponible en los tejados.

¿Te parece un plan demasiado optimista? Tenemos más.

Producir electricidad a lo grande: Plan C

Este es el plan Conservador. En este plan dejaremos a los viejos productores seguir con su actividad y rentabilizar sus plantas. Las antiguas tecnologías térmicas seguirán aportando al mix eléctrico la misma proporción que actualmente, por lo que se tendrán que construir nuevas plantas de este tipo. Así, la nuclear aportará 7 kWh/p/d, y el gas y el carbón 4 kWh/p/d cada una (energía eléctrica final). Eso sí, pediremos a los del carbón que capturen sus emisiones, pasando a ser «carbón limpio». A los del gas no les pediremos nada, pero este gas podrá ser, en parte, gas sintetizado con renovables, ya sea hidrógeno (el cual podría inyectarse en proporciones de en torno al 10% en la red de gas natural) o metano (el principal componente del gas natural) sintetizado a partir de hidrógeno renovable y el CO₂ capturado de las plantas de carbón (esto es conocido como *power to gas* o P2G). De esta forma ayudarían al almacenamiento y gestión de la energía.

La eólica en este escenario sería de 6 kWh/p/d y la fotovoltaica de 9 kWh/p/d, valores inferiores a los del plan 100% renovable.

Producir electricidad a lo grande: Plan A

De lo visto en el plan anterior, puede provocar cierta controversia el considerar al gas y al «carbón limpio» como fuentes sostenibles. Pero, sin duda, generará más controversia el uso de la energía nuclear. Por ello, para el sector Antinuclear tenemos este plan. Para sustituir los 7 kWh/p/d que generaba la nuclear en el plan anterior, habrá que ampliar las instalaciones eólica y fotovoltaica a 9 kWh/p/d y 13 kWh/p/d respectivamente.

Producir electricidad a lo grande: Plan E

Finalmente proponemos una alternativa 100% renovable y que permite la gestión de la energía sin necesidad de almacenamiento. Este plan consiste en instalar mucha más potencia renovable de la necesaria,

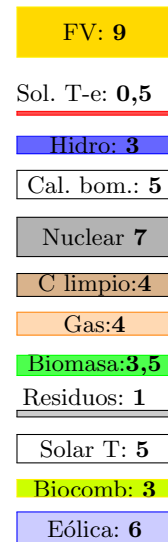


Figura 27.4: Plan C.

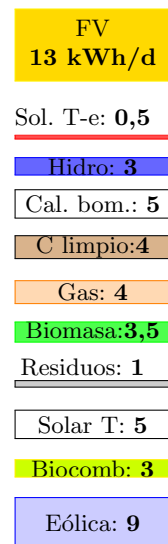


Figura 27.5: Plan A.

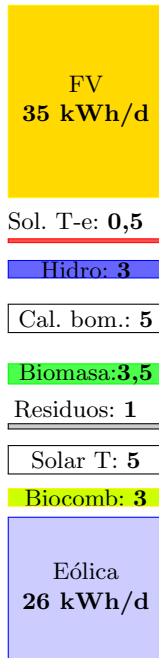


Figura 27.6: Plan E.

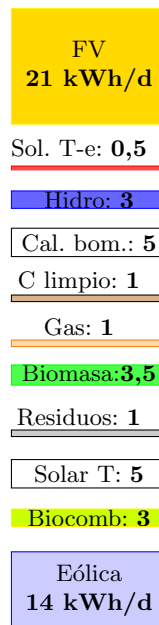


Figura 27.7: Plan I.

con la idea de tener una base de generación más sólida. Eso sí, en este plan se tendrá un gran **E**xcedente de energía. Está basado en el estudio de [206], en el que estimaban que se podía abastecer a una región de EE.UU. con un consumo similar al de España, con un 90 % de renovables no gestionables, siendo el 10 % restante gestionable (renovable o no). Esto requiere instalar una potencia renovable no gestionable que suministre el 180 % del consumo (es decir, casi la mitad de la energía quedaría sin usar, aunque se podría vender si los países fronterizos la quisieran).

Para este plan generaremos 26 kWh/p/d de eólica y 35 kWh/p/d de fotovoltaica. Para ello habría que multiplicar por 9 el parque actual eólico y habría que instalar 10 veces más potencia fotovoltaica que la existente actualmente en Alemania.

Con estas dos fuentes ya tendríamos ese 180 % de la energía cubierta. A pesar de ello, al no tratarse de fuentes gestionables, habría momentos en los que podría haber menos generación que consumo. Para suplir estos vacíos estarían la hidráulica, la biomasa y los residuos que podrían generar energía en estos momentos. También la solar termoelectrónica podría modificar su curva de generación almacenando parte de su producción en forma de calor. Estas fuentes sumarían el 15 % del abastecimiento eléctrico final.

En total, se tendría una generación de 66 kWh/p/d, de los cuales utilizaríamos 35 kWh/p/d; el excedente se vendería o simplemente no se generaría.

Producir electricidad a lo grande: Plan I

Siendo realistas, producir justo el 100 % de renovables y pensar que se va a poder aprovechar todo es muy optimista. Tampoco nos parece viable sobredimensionar la generación tanto como en el plan E, pero ello conllevará usar algo de «carbón limpio» y algo de gas (que en parte será renovable), aunque quizás no utilicemos la nuclear. Por ello, llegamos a este plan **I**ntermedio, en el que distintas y variadas tecnologías aportarán parte de la energía necesaria, en un mix donde habrá capacidad de gestión y donde habrá algo de sobregeneración que, en parte, podrá ser exportada.

En este plan, además de los aportes de la biomasa, solar térmica, residuos e hidráulica comunes a todos los planes, tendremos 14 kWh/p/d de eólica y 21 kWh/p/d de fotovoltaica. Esto nos lleva a tener unos 110 GW de eólica (5 veces lo actualmente instalado en España) y unos 240 GWp

de fotovoltaica (unas 5,8 veces la instalada en Alemania). En total, la energía eléctrica generada en el plan I será de 42 kWh/p/d, un 20% más que la consumida.

Para la gestión tendremos 1 kWh/p/d de «carbón limpio» y 1 kWh/p/d de gas, que en energía es la mitad de lo utilizado ahora, aunque requeriría tener estas plantas a un nivel muy bajo de capacidad, con lo que la potencia instalada sería mucho mayor que si estuvieran a pleno rendimiento todos los días del año.

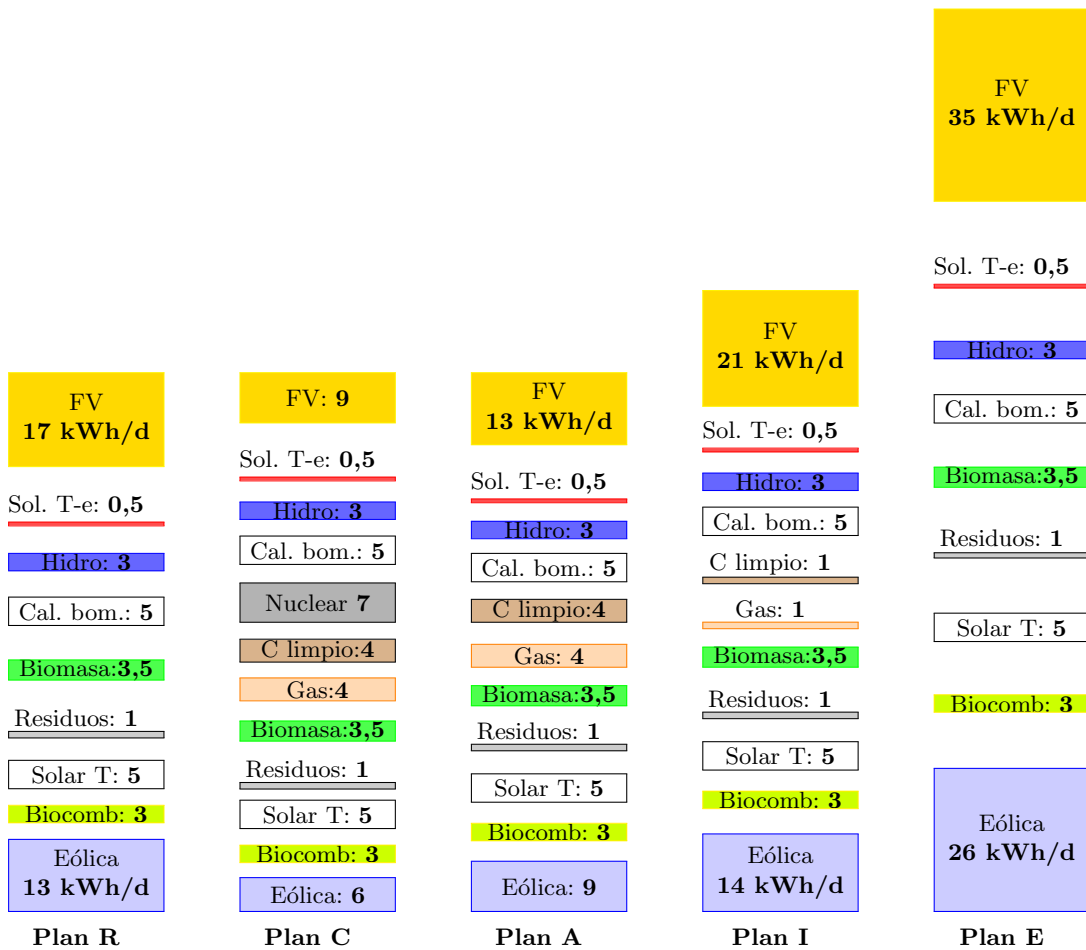


Figura 27.8: Los cinco planes.

¡Estos planes son absurdos!

Si no te gusta ninguno de estos planes, ¡no nos extraña! En todos ellos hay alguna cosa que chirría. Pero lánzate a hacer tu plan y, simplemente, ¡asegúrate de que cubra todo el consumo! Nosotros, a partir de aquí, seguiremos con el *Plan I*.

Por otro lado, dejando de un lado la generación, quizás tu conclusión sea que un plan viable debería implicar un consumo de energía todavía menor. Podemos estar de acuerdo en esto, pero sin duda esta es una política difícil de vender. Alternativamente, puedes pensar que quizás seamos demasiadas personas en este planeta. Nuevamente, algo difícil de tratar.

¡Ánimo con tu plan!

Notas y textos de consulta

Página

- 262 *El transporte (para humanos y mercancías) utiliza 23 kWh por persona y día, para lo cual se necesitan unos 29 kWh/p/d de petróleo principalmente.* Fuentes: Universidad de Comillas y el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Para obtener los 29 kWh/p/d se han tenido en cuenta las pérdidas en las transformaciones del petróleo y los autoconsumos.
- 262 *La electricidad consumida en España es de 16 kWh/p/d, proveniente aproximadamente en un 40% de renovables, 40% de combustibles fósiles y 20% de nuclear.* Fuente: REE (Red Eléctrica de España) [62].
- 263 *El área requerida para conseguir los biocombustibles (cuyo consumo se multiplicaría por más de 4) sería el 8,7% de todo España (960 m² por persona), asumiendo que el biocombustible viniera de la colza con los rendimientos actuales.* Fuentes: [207, 208, 209].
- 264 *Esto es aproximadamente 1 kg/p/d de residuos, con el que se podría generar 0,5 kWh(e)/p/d.* Fuente: página web de la planta de valorización de residuos Torsa [185].
- 266 *En cuanto a la fotovoltaica, necesitaríamos unos 195 GW, lo cual parece irrealizable si se compara con la poca potencia actual en España (tan solo 5,4 GWp), pero es, por ejemplo, 5 veces más de lo actualmente instalado en Alemania.* Fuentes: Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid [210]. Red Eléctrica de España no proporciona la potencia pico instalada de paneles, sino la potencia conectada a la red, es decir, la del inversor que la conecta a la red.

Capítulo 28

Pongamos los costes en perspectiva

Un plan de ruta

Analicemos, mediante un mapa de España, la magnitud del Plan I descrito en el capítulo anterior, que consiste en una propuesta intermedia que evita las situaciones más extremas propuestas en el resto de planes (Figura 28.1). En la Figura 28.2 se recoge una posible distribución geográfica del enorme número de centrales que sería necesario instalar para cumplir con nuestro plan.

Los costes aproximados de estas instalaciones se muestran en la Tabla 28.1. Para simplificar, los costes están estimados utilizando precios actuales de instalaciones similares a las que se proponen en el Plan I. La tecnología y los procesos de fabricación van mejorando, por lo que se espera que estos costes sigan disminuyendo durante los próximos años. Los costes que se mencionan en la tabla son costes de instalación, por lo que no incluyen los de operación y mantenimiento ni los de desmantelamiento. El coste «por persona» se ha calculado dividiendo el total entre 46 millones. Recuerda que este no es un libro de economía –¡nos llevaría otras 400 páginas!–, sino que se dan estimaciones de costes que son solo un valor *aproximado* que podríamos esperar encontrarnos en un plan que sume.

También es importante el hecho de que no estamos defendiendo este plan particular. Puedes añadir cualquiera de las tecnologías de las que hemos hablado en capítulos anteriores para diseñar tus propios planes con otras proporciones. El que proponemos aquí te dará una idea para saber los aspectos más importantes que debes analizar.

Por ejemplo, si dices «la eólica tiene demasiado impacto ambiental, me gustaría un plan con energía nuclear en lugar de eólica». Vale, pues sustituye, por ejemplo, 6 GW de eólica por 2 GW de nuclear. Si no te gusta la ubicación de las plantas fotovoltaicas, muévelas libremente (pero ¿a dónde?). Si te gustaría ocupar menos espacio con plantas fotovoltaicas, perfecto –simplemente elige por cuál de las otras tecnologías las vas a sustituir–.

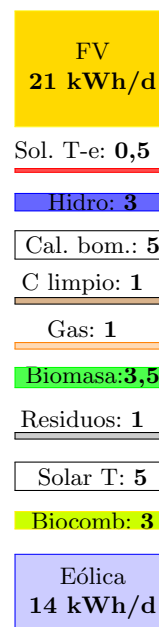


Figura 28.1: Generación con el Plan I.

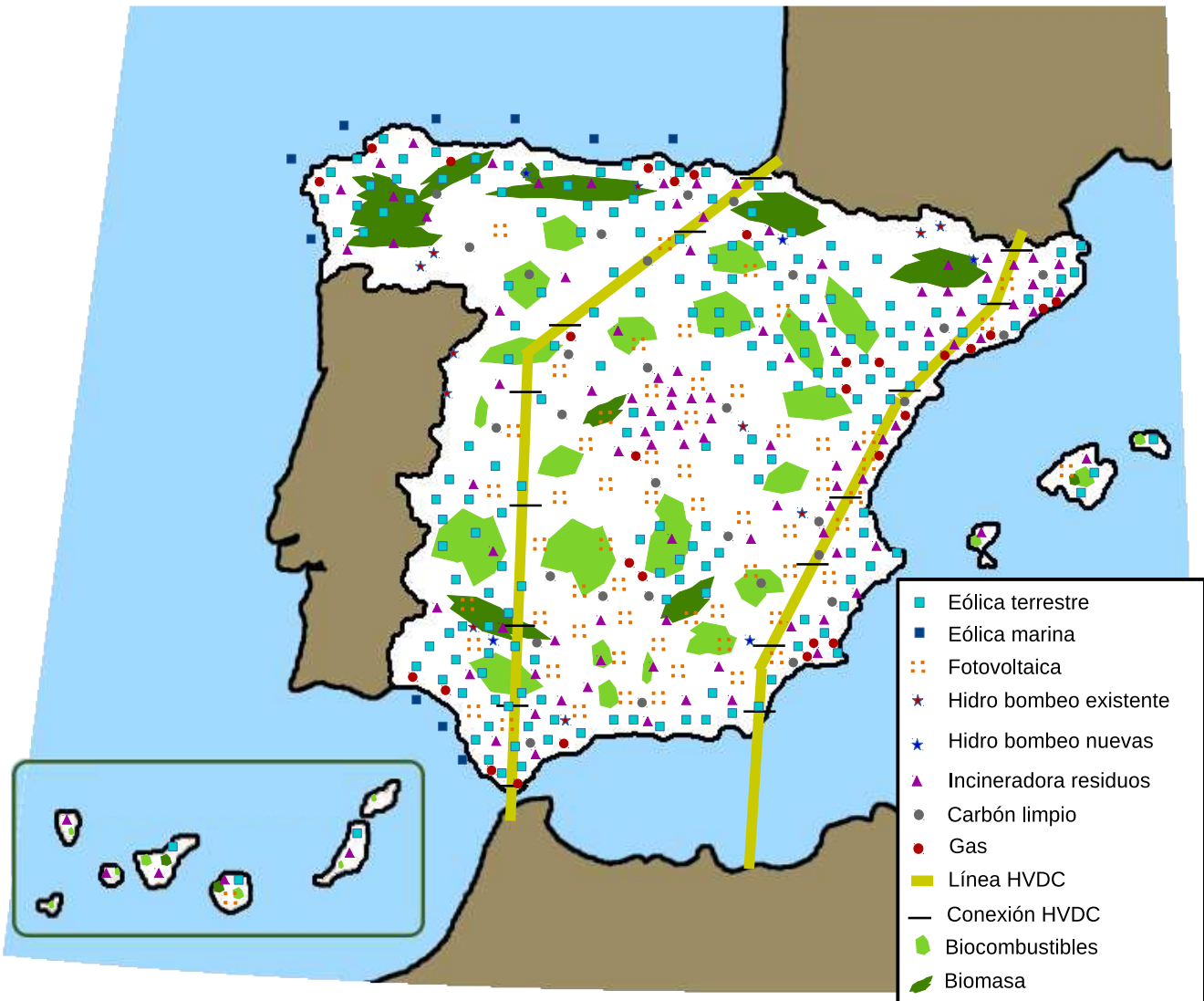


Figura 28.2: ¡Un plan que marca la diferencia! Cada cuadrado azul representa un área de 100 km² destinados a la generación eólica. Cada cuadrado naranja tiene una superficie de 9 km², se han agrupado de cuatro en cuatro para que sean fácilmente identificables, y representan las plantas fotovoltaicas requeridas por nuestro plan. Las estrellas rojas representan las centrales hidráulicas de bombeo construidas en la actualidad cuya potencia es superior a 200 MW. Las azules representan las centrales con una potencia similar a la de La Muela que sería necesario añadir. Los triángulos son las incineradoras de residuos de 30 MW que habría que instalar. Los puntos negros representan las centrales de carbón limpio necesarias (ya instaladas), cada una de ellas tiene una potencia de 670 MW. Los círculos rojos representan las centrales de gas (ya instaladas). Los dos tirantes amarillos que recorren España, son las líneas de HVDC necesarias para exportar el excedente de la generación solar de los desiertos y del propio territorio español, así como para abastecer a los países europeos deficitarios en energías renovables. Por último, las regiones verdes marcan las zonas destinadas a biocombustibles (verde claro), y a biomasa (verde oscuro).

Tabla 28.1: Superficie de tierra y mar necesarias para poner en práctica el Plan I, y coste aproximado. 1GW (term.) denota un GW de potencia térmica. El coste total de los biocombustibles y la biomasa se ha calculado multiplicando el coste anual por los 20 años de vida que se estiman normalmente para los sistemas de energías renovables.

	Capacidad necesaria (GW)	Capacidad instalada (GW)	Coste de ampliación Total (miles de mill. €)	Por pers. (€)	Potencia media (kWh/p/d)
Eólica terrestre 190 parques: 19 000 km ²	104 GW	23 GW	81	1760 €	13 kWh/d/p
Eólica marina 10 parques: 1000 km ²	6 GW	0	10	220 €	1 kWh/d/p
Fotovoltaica 300 plantas: 2700 km ²	240 GW	5,4 GW	174	3370 €	21 kWh/d/p
Solar térmica de tejado 2 m ² de tejado por persona 92 km ² en total	9,6 GW(term.) de media	2,6 GW	50	1085 €	5 kWh/d/p
Solar termoeléctrica 20 plantas: 190 km ²	4,6 GW	2,3 GW	7	150 €	0,5 kWh/d/p
Hidroelectricidad	24 GW	17 GW	10	215 €	3 kWh/d/p
Incineradoras de residuos 100 incineradoras de 30 MW	3 GW	0,7 GW	5	110 €	1 kWh/d/p
Bombas de calor	65 GW	22 GW	10	220 €	5 kWh/d/p
Carbón limpio 30 centrales	20 GW	9 GW	40	870 €	1 kWh/d/p
Gas 30 centrales	20 GW	25 GW	0	0	1 kWh/d/p
2000 km de líneas de HVDC	200 GW	33 km, 1,4 GW	77	1670 €	
15 conexiones HVDC	200 GW	1,4 GW	21	460 €	
Biocombustibles: 44 000 km ²			70	1533 €	3 kWh/d/p
Madera, miscanthus: 13 000 km ²			47	1022 €	3,5 kWh/d/p
TOTAL			602	13 095 €	

- basado en datos de IRENA

- basado en datos de IRENA

- basado en datos de IRENA

- basado en precios de fabricantes

- basado en datos de IRENA

- basado en datos de IRENA

- basado en los costes de la central de Zabalgardi

- basado en precios en tienda

* no es limpio

- estimaciones del Centro Aeroespacial alemán

- basado en datos del NREL

- basado en datos del IDAE

Quizá pienses que este plan (al igual que los demás presentados en el capítulo anterior) dedica demasiada extensión a los biocombustibles. Vale, entonces, pensarás que la demanda de combustibles fósiles para el transporte debería ser menor que 2 kWh por persona y día, que es lo que este plan propone; o que los combustibles líquidos se deberían crear de alguna otra forma.

«Coste» de sustituir los combustibles fósiles por renovables

Cada parque eólico cuesta unos pocos millones de euros y genera unos pocos megavatios. Como estimación muy aproximada de coste, con datos de 2018, instalar 1 W de potencia eólica costó 1 €; un kilovatio, 1000 €; un megavatio, 1 millón de euros. Un megavatio de nuclear no baja de dos millones de euros. 1 MW de fotovoltaica vale 0,8 millones, y el resto de renovables son algo más caras. Nosotros (España) tenemos un consumo medio de aproximadamente 94 GW, tras haber realizado las mejoras de eficiencia propuestas. Por lo tanto, podemos anticipar que, para sustituir los combustibles fósiles por energía renovable, necesitaremos generar una media de 94 GW de renovables, lo que requerirá la instalación de, aproximadamente, el quintuple de potencia (470 GW), que tendrá un coste aproximado de 470 mil millones de euros. De hecho, la estimación de precio más detallada obtenida de la Tabla 28.1 es de 602 mil millones de euros. Debido a las mejoras tecnológicas, esperamos que estos costes se reduzcan en los próximos años.

A pesar de que hasta este momento hemos hablado de las inversiones requeridas por el Plan I en términos de coste, se trata realmente de una inversión. Los sistemas basados en combustibles fósiles tienen costes de operación anuales muy altos, debido al combustible que queman para su funcionamiento. Por contra, las cifras relativas a las renovables no son en sí mismas un coste, sino una inversión, que permitiría reducir o incluso eliminar el coste de los combustibles fósiles. Además, a día de hoy, tal y como revelan las últimas subastas para la instalación de generación renovable en España, tanto la eólica como la fotovoltaica ya son una inversión muy interesante para las empresas sin necesidad de subvenciones públicas. De esta forma, no hay que ver el cambio de modelo energético como un «esfuerzo de país», con alto coste presupuestario, sino como una posibilidad de inversión para empresas e inversores privados, sin necesidad de dinero público. Estas inversiones generarían empleo y crecimiento económico en el país, evitando la fuga de capitales a terceros países que implica la compra de combustibles fósiles.

Entendiendo el cambio de modelo energético como una inversión, tiene sentido dividir el «coste» total calculado entre el número de años de vida útil, para así compararlo con otros gastos anuales a nivel del país. Si se considera que la vida útil de los sistemas de generación renovable es de 20 años (los primeros parques eólicos de España ya han cumplido más de 25 años y siguen funcionando casi como el primer día), la inversión anual requerida es de 30 mil millones de euros (652 € por español).

Otros gastos de miles de millones

Los miles de millones son cifras grandísimas, difíciles de abarcar y de tener una idea intuitiva sobre su magnitud. Para ayudar a poner en perspectiva el coste de librarnos de los combustibles fósiles, vamos a mencionar otros gastos que también se miden en miles de millones de euros o miles de millones al año. También expresaremos estas magnitudes en unidades «por persona» y dividiremos el total entre la población que corresponda en cada caso.

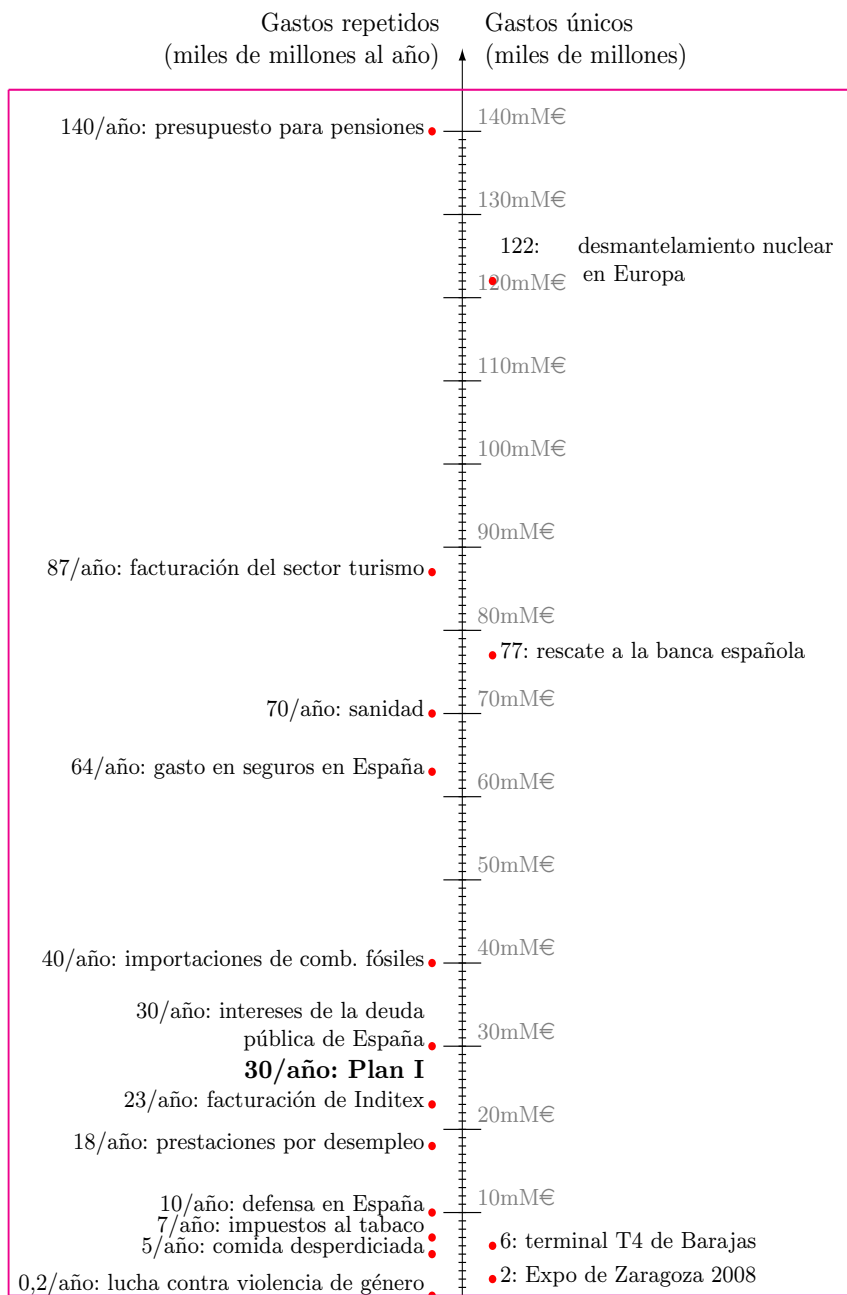
Quizá la magnitud más relevante en esta comparación es el dinero que *ya* estamos gastando en energía cada año. El dinero que se gasta España en importar combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) es de 40 mil millones de euros al año (o 870 €/p/año). ¡Superior a la inversión requerida para deshacernos de los mismos! Otra comparación interesante se puede hacer con nuestro gasto anual en seguros: algunas de las inversiones que habría que hacer para llevar a cabo este plan acarrearán cierta incertidumbre, exactamente como los seguros. Las personas y empresas españolas gastamos 64 mil millones de euros en seguros durante el año 2016.

Estos costes de 40 y 64 mil millones de euros son superiores a los 30 mil millones de euros que hemos calculado mediante la Tabla 28.1. En la Figura 28.3 y Figura 28.4 se representan algunos costes que se miden en miles de millones. Los gastos representados a la izquierda del eje son gastos que se repiten cada año, mientras que los de la derecha del eje son gastos únicos. Si quieres realizar una comparación más equitativa entre unos y otros, tendrás que decidir entre cuántos años te parece razonable dividir cada uno de los gastos únicos.

Subvenciones

- 5 mil millones de euros al año: primas a las energías renovables durante los años 2014-2016 (108 € por español).

Figura 28.3: Gastos e ingresos que se miden en miles de millones de euros. La escala central tiene marcas más largas cada 10 mil millones de euros, y marcas más cortas, cada mil millones. Los gastos e ingresos que se hicieron en dólares se han convertido a la moneda europea a una tasa de $1 \text{ €} = 1,22 \text{ \$}$.



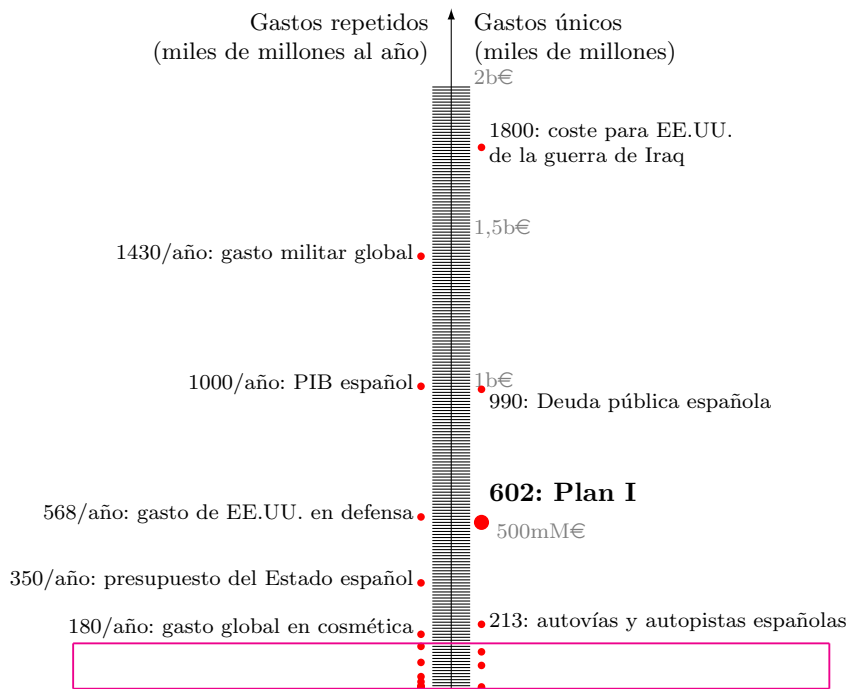


Figura 28.4: Otras cosas que cuestan miles de millones, o incluso billones de euros. El eje vertical está comprimido 25 veces respecto a la Figura 28.3, que se muestra a escala en el rectángulo magenta.

- 122 mil millones de euros: coste estimado del desmantelamiento de todas las centrales nucleares europeas (165 € por europeo) [211].

Transporte

- 6 mil millones de euros: el coste de la Terminal 4 del aeropuerto de Barajas (130 € por español).
- 213 mil millones de euros: el coste de construcción de la red española de autopistas y autovías (4630 € por español).

Ocasiones especiales

- 2 mil millones de euros: el coste de la Expo de Zaragoza de 2008 (43 € por español).
- Mil millones de euros: construcción de la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia (28 € por español).

El día a día

- 3 mil millones de euros al año: beneficios de Inditex en 2016 (65 € por español).
- 5 mil millones de euros al año: gasto de los españoles en comida que tiran a la basura (110 € por español).
- 23 mil millones de euros al año: facturación de Inditex en 2016 (500 € por español).
- 40 mil millones de euros al año: gasto de España en importar combustibles fósiles en 2017 (870 € por español).
- 87 mil millones de euros al año: facturación del sector del turismo en España en 2017 (1890 € por español).
- 180 mil millones de euros al año: gasto mundial en cosméticos (33 € por habitante del mundo).

El día a día del Gobierno

- 7 mil millones de euros al año: recaudación en España mediante el impuesto al tabaco en 2016 (152 € por español).
- 18 mil millones de euros al año: partida de desempleo de los Presupuestos Generales del Estado de 2017 (390 € por español).
- 22 mil millones de euros al año: gasto público en educación (478 € por español).
- 70 mil millones de euros al año: gasto público en sanidad (1500 € por español).
- 140 mil millones de euros al año: partida de pensiones de los Presupuestos Generales del Estado de 2017, que incluye pensiones de jubilación, incapacidad y viudedad (3043 € por español).
- 350 mil millones de euros al año: Presupuestos Generales del Estado de 2017 (7600 € por español).
- 990 mil millones de euros: Deuda pública de España de 2016 (21 700 € por español).
- 1 billón de euros al año: Producto Interior Bruto de España de 2016 (21 700 € por español).

Bancos

- 77 mil millones de euros: rescate a la banca española de 2012 (1700 € por español).

Armamento

- 4 mil millones de euros al año: exportaciones de armamento español (87 € por español).
- 10 mil millones de euros al año: gasto español en defensa (217 € por español).
- 568 mil millones de euros al año: gasto de Estados Unidos en defensa (1759 € por estadounidense).
- 1,43 billones de euros al año: gasto militar global (238 € por habitante del mundo).
- 1,8 billones de euros: coste que supuso la guerra de Iraq para Estados Unidos según un estudio publicado en 2014 por la Universidad de Brown (5500 € por estadounidense).

Según el informe Stern, el coste global de evitar las consecuencias más dañinas del cambio climático (si hubiéramos comenzado a actuar cuando se publicó) habría sido de 360 mil millones de euros al año (360 € por persona si el gasto se reparte entre los mil millones de personas más ricas). En 2016, el gobierno estadounidense gastó 568 mil millones de euros en guerras y preparativos para guerras.

Notas y textos de consulta

Página

273 *Tabla 28.1.* Las superficies necesarias para instalar cada tecnología se han calculado utilizando los datos de densidad energética descritos en los capítulos anteriores de este libro.

Para los costes de instalación de cada tecnología detallada en la Tabla 28.1, se han usado las siguientes fuentes: para la eólica terrestre, el informe sobre costes durante el año 2016 publicado por IRENA [212] que recoge precios de 1100 \$ por kW; para la eólica marina, de 2000 \$ por kW; y para la fotovoltaica, de 950 \$ por kW.

El precio de una instalación solar térmica se ha calculado a partir del catálogo del fabricante español Termicol (www.termicol.es).

La información sobre la potencia que hay actualmente instalada en España se ha extraído de un estudio sobre el parque de bombas de calor en España publicado por el IDAE en 2016 [213].

La obra de ingeniería necesaria para construir la central de La Muela y la inauguración de la central a manos del rey de España dio lugar a numerosas noticias en las que quedó constatado su coste de 1200 millones de euros [214].

El precio de las incineradoras de residuos se han calculado en base al coste de la planta de Zabalgardi, que, situada a las afueras de Bilbao, entró en funcionamiento en el año 2015. Sus datos técnicos están especificados en la página web

dedicada a esta planta de valorización energética de residuos [215], mientras que sus costes de construcción los analizó la asociación surgida en Pamplona Compañía de las tres R [216].

Los costes de las líneas HVDC se han tomado de un estudio del Centro Aeroespacial Alemán [217] en el que se detalla el coste estimado de este tipo de infraestructuras por GW y por km construido. Cuando se pone en la tabla que las líneas serán de 200 GW no queremos decir que un solo par de cables vaya a llevar esta potencia. Se pueden hacer varios circuitos en paralelo en las zonas con mayor necesidad de potencia.

Para estimar el coste de los biocombustibles, se ha considerado el coste de fabricación del bioetanol de maíz. Según el NREL (Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos), el coste de producción del bioetanol osciló entre 0,33 €/l y 0,7 €/l de 2007 a 2016 [218]. Tomando un precio de 0,4 €/l, el poder calorífico inferior del bioetanol (7,5 kWh/kg) y su densidad (0,8 kg/l), se obtiene un coste de 0,07 €/kWh. De este modo, un consumo de 3,5 kWh/p/d durante 20 años supone un coste de 1533 € por persona.

De acuerdo con el IDAE, el precio del pellet a granel fue de 0,18 €/kg en 2018 [219]. Teniendo en cuenta que, de acuerdo con los datos de este mismo instituto, el poder calorífico de los pellets es de 5 kWh/kg, se obtiene un coste de 0,04 €/kWh. Un consumo de 3,5 kWh/p/d a lo largo de 20 años supone un coste de 1022 € por persona, o, lo que es lo mismo, 47 mil millones de euros para todo el país. Este será el coste empleado para la biomasa.

- 274 *Instalar 1 W de potencia eólica cuesta 1 €.* De hecho, según el informe REN21 publicado en 2017 el coste medio en 2016 fue de 1457 \$ por kW instalado [163]. 1 € por W es una cifra próxima que permite unos resultados fiables y es mucho más fácil de recordar.
- 274 *Un megavatio de nuclear no baja de dos millones de euros.* El coste de instalar una central nuclear depende, en gran medida, de las medidas de seguridad exigidas en cada país. Actualmente se está construyendo en China la central nuclear de Sanmen, conectada a la red en noviembre de 2018, con un coste de 2440 \$ por kW, según la Asociación Nuclear Mundial [220].
- 274 *1 MW de fotovoltaica vale 0,8 millones de euros.* Según la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA) [212], el precio de las instalaciones fotovoltaicas más económicas del año 2017 fue de 950 \$ por kW, lo que equivale a 0,78 millones de euros por MW utilizando la conversión mencionada en este capítulo de 1 € = 1,22 \$.
- 274 *Nosotros (España) tenemos un consumo medio de aproximadamente 94 GW, tras haber realizado las mejoras de eficiencia propuestas.* Este es el consumo total correspondiente a los 49 kWh/p/d desglosados en la Figura 27.1.
- 274 *...lo que requerirá la instalación de, aproximadamente, el quíntuple de potencia.* Cuando se instala una planta de generación renovable, se tiene en cuenta que no va a estar generando siempre al 100% de la potencia instalada, ya que pocas veces se dispone del recurso renovable óptimo (viento constante y rápido o sol en lo más alto del cielo, por ejemplo). Se define como *factor de capacidad* al cociente entre la energía generada por una central (E) y la energía máxima que podría generar a lo largo del año si se tuvieran siempre las condiciones ideales:

$$FC = \frac{E}{8760 \times P_N}, \quad (28.1)$$

donde P_N es la potencia nominal de la instalación.

Este factor de capacidad depende de la ubicación de la planta renovable y del tipo de energía que aproveche (eólica, solar, etc.). Un valor razonable promedio para el mix de centrales renovables es $FC = \frac{1}{5}$.

- 277 *...coste de construcción de la red española de autopistas y autovías.* Este coste es una estimación hecha con base en el coste medio de construcción de carreteras en España publicado en un informe de la Unión Europea [221] (500 000 € por cada 1000 m² de carretera) y la longitud total de autovías y autopistas disponibles en nuestro país (17 109 km a fecha de 31 de diciembre de 2016 según datos del Ministerio de Fomento [222]). Se ha considerado que estas carreteras tienen tres carriles por sentido (3,5 m de ancho cada uno) y dos arce- nes de 1 m. Por lo tanto:

$$17\,109 \text{ km} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \times (3,5 \times 6 + 1 \times 4) \text{ m} \times \frac{500\,000 \text{ €}}{1000 \text{ m}^2} = 213 \text{ mil millones de €}. \quad (28.2)$$

- 278 *...gasto de los españoles en comida que tiran a la basura (110 € por español).* El valor de los alimentos que los españoles tiramos a la basura se ha calculado con base en dos datos. Por una parte, el dinero total que mueve el sector de la alimentación en España (96 400 millones de euros en 2016 según la Federación de Industrias de Alimentación y Bebidas, FIABI, [223]), y, por otra, el porcentaje de alimentos que desperdicia un español medio que, según un estudio de la asociación de fabricantes y distribuidores AECOC publicado en 2016, es del 5% de los alimentos adquiridos [224].

$$96\,400 \times \frac{5}{100} \simeq 5000 \text{ millones de € en la basura}. \quad (28.3)$$

- 278 *...gasto mundial en cosméticos.* Fuente: [225].
- 279 *...gastos en defensa.* Se ha tomado la contribución de España y Estados Unidos a la OTAN. Aunque todos los países se comprometieron a contribuir con el 2% de su PIB al gasto militar de la OTAN, la contribución española no supera en 1% de nuestro PIB [226].
- 279 *...coste que supuso la guerra de Iraq para Estados Unidos.* Costs of War (watson.brown.edu/costsofwar) es un proyecto que lleva a cabo la Universidad de Brown en el que se analiza con rigor el coste real que tienen las guerras para la economía estadounidense. En su estudio publicado en 2014 estiman el coste de la guerra de Iraq para Estados Unidos en 2,2 billones de dólares [227]. Otra estimación de una personalidad de prestigio es la del Premio Nobel de Economía Joseph Stiglitz, que en su libro titulado *The three trillion dollar war* [228] estima en tres billones de dolares el coste de esta guerra, tal como indica en el propio título del libro.

Capítulo 29

Qué hacer ahora

Lo que más nos conviene hacer ahora depende en gran medida de nuestras motivaciones. Recuerda que en el capítulo de motivaciones discutimos tres razones para dejar de lado los combustibles fósiles: el fin de los combustibles fósiles baratos, la seguridad de suministro y el cambio climático. Asumamos, en primer lugar, que nuestra principal motivación es el cambio climático y que queremos reducir las emisiones radicalmente. (Cualquiera que no crea en el cambio climático puede saltarse directamente la siguiente sección y reengancharse en la pág. 285).

Qué hacer con la contaminación del carbono

No estamos en el camino de la descarbonización de la economía. El dinero que sería necesario invertir a largo plazo simplemente no se está invirtiendo. Las empresas de captura de dióxido de carbono no prosperan a pesar de que los expertos en clima creen que la captura de CO₂ es necesaria para evitar cambios climáticos severos. Ni siquiera estamos capturando dióxido de carbono en las centrales térmicas de carbón, algo que nos ayudaría a conseguir el objetivo de recortar las emisiones. ¿Por qué no?

El problema es que la contaminación del dióxido de carbono no está tasada correctamente. Y no hay seguridad de que se vaya a corregir en un futuro cercano. Cuando decimos «correctamente» nos referimos a que el precio de emitir dióxido de carbono debe de ser lo suficientemente grande para que todas las centrales térmicas de carbón prefieran instalar sistemas de recuperación del dióxido de carbono.

Resolver el problema del cambio climático es un tema complicado, pero, a grandes rasgos, esta es la solución: el precio del dióxido de carbono debe de ser lo suficientemente alto para que la gente deje de quemar carbón sin un mecanismo de captura. La mayor parte de la solución se encuentra resumida dentro de la frase anterior, ya que, a largo plazo, el carbón será el principal combustible fósil. La reducción de las emisiones del petróleo y del gas es importante, pero no tanto, ya que se espera

que las reservas de estos dos combustibles se reduzcan enormemente en los próximos 50 años.

¿Qué tienen que hacer los políticos? Tienen que asegurar que todas las plantas de carbón cuentan con sistemas de recuperación del carbono. En primer lugar, para conseguir este objetivo, los gobiernos tienen que financiar proyectos a gran escala que permitan establecer y perfeccionar la tecnología de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. (El primero de estos proyectos en la Unión Europea comenzó en el año 2008, en una instalación de prueba en Alemania). En segundo lugar, los políticos tienen que cambiar las regulaciones de las centrales térmicas de tal forma que todas ellas quieran adoptar esta tecnología perfeccionada. Una sugerencia simple para lograr este segundo objetivo es imponer una norma que obligue, a partir de una fecha, a incorporar dispositivos de captura de carbono. Algo similar a la desnitrificación de las centrales de carbón impuesta por la normativa europea para 2019. Sin embargo, la mayoría de políticos democráticos cree que la mejor manera de cerrar esta puerta es crear un mercado de derechos, que lo que realmente consigue es dejar la puerta abierta. Así que si nos ajustamos a este dogma de que el cambio climático debe de ser solucionado a través de mercados, ¿cuál es la propuesta de mercado para asegurarnos nuestro objetivo simple de que todas las centrales de carbón tengan dispositivos de recuperación de carbono? Bueno, podemos jugar con el mercado del carbono creando una compraventa de derechos para emitir carbono y de certificados de captura de carbono. De esta forma, una tonelada de carbono capturada se convierte en un derecho de emisión de una tonelada de carbono. El problema es que los propietarios de las plantas de carbón solo invertirán en estos sistemas de captura y almacenamiento si están convencidos de que el precio de los derechos va a ser lo suficientemente alto, durante un tiempo suficientemente largo, como para que se amorticen las instalaciones de captura de CO₂. Los expertos dicen que un precio a largo plazo que garantizaría estas inversiones estaría en torno a los 100 \$ por tonelada de dióxido de carbono (la emisión media en Europa es de 11 t/p/año, es decir, que tocaría a unos 1100 \$ por persona y año). A pesar de ello, el precio medio de los derechos durante el año 2017 en Europa no llegó a los 7 \$ por tonelada.

Los políticos tienen que ponerse de acuerdo para reducir las emisiones de CO₂ de manera tan decidida que los inversores tengan claro que el precio del carbono va a continuar aumentando hasta al menos 100 \$ por tonelada de CO₂. Alternativamente, podrían emitir permisos de emisión en una subasta con un precio mínimo de salida.

Nos seguimos preguntando si no sería más inteligente cerrar la puerta directamente en lugar de crear un mercado internacional de derechos que incentive este cierre de puertas.

Qué hacer con el suministro de energía

Expandamos nuestras motivaciones y supongamos que queremos deshacernos de los combustibles fósiles para garantizar el suministro eléctrico.

¿Qué debemos hacer para que se produzca el desarrollo definitivo de las energías no basadas en combustibles fósiles y las medidas de eficiencia energética? Una actitud es: «Dejemos simplemente que el mercado se encargue. Conforme los combustibles fósiles se hagan más caros, las energías renovables y la energía nuclear se harán comparativamente más baratas, y el consumidor racional preferirá las tecnologías eficientes». Hay que recordar que a día de hoy la fotovoltaica y la eólica ya son competitivas, sin embargo, otras tecnologías renovables todavía no han alcanzado este objetivo. Encontramos raro que la gente tenga esta fe en los mercados, ya que cada poco tiempo los mercados nos traen *booms* y quiebras, contracciones de crédito y colapsos de bancos.

Los mercados pueden ser una buena herramienta para tomar decisiones a corto plazo sobre inversiones cuyo periodo de retorno se encuentre en el entorno de los 10 años aproximadamente, pero ¿podemos esperar que los mercados jueguen un buen papel en la toma de decisiones que nos afectarán de aquí a varias decenas de años o incluso cientos de años?

Si permitimos, por ejemplo, que el mercado construya casas libremente, terminamos con casas con un aislamiento muy pobre y una eficiencia energética realmente mala. Si las casas modernas son energéticamente más eficientes, es gracias a que existen normativas que así lo exigen.

El mercado libre no es responsable de que se construyan carreteras, trenes, carriles reservados al autobús, aparcamientos para coches o carriles bici. Sin embargo, todos estamos de acuerdo en que estas infraestructuras impactan notablemente en la elección de nuestro medio de transporte en el día a día. De igual modo, las políticas de urbanismo que determinan dónde se crearán las viviendas y los lugares de trabajo y con qué densidad se van a construir las casas tienen una influencia clave en el comportamiento futuro de las personas en lo que a transporte se refiere. Si las zonas residenciales y los lugares de trabajo se encuentran muy separados, muchas personas estarán forzadas a conducir hasta el trabajo.

Un pozo sin fondo de consumo energético es la fabricación de cosas. En un mercado libre muchos fabricantes buscan su modelo de producción en la obsolescencia programada. Hay que tirar los productos y reemplazarlos por otros nuevos para que los fabricantes consigan más beneficios.

Así que, aunque los mercados jueguen un rol muy importante, no parece la mejor solución decir «dejemos que el mercado se ocupe de todo». Seguramente habrá que hablar de legislación, regulación e impuestos.

Ecologizar el sistema tributario

Necesitamos revisar profundamente todos nuestros impuestos. El propósito es el de gravar más la contaminación y menos el trabajo.

Nicolas Sarkozy
(como presidente de Francia)

Hoy en día es mucho más barato comprar un nuevo microondas, ordenador o aspirador que arreglar uno que se haya estropeado. Es de locos.

Esta locura está causada, en parte, por el sistema de impuestos, que grava el trabajo del reparador y le exige un trabajo de papeleo que consume un tiempo importante. Está haciendo algo *bueno* y, sin embargo, el sistema de impuestos dificulta que pueda obtener un beneficio.

La idea de ecologizar el sistema tributario es mover la carga fiscal de las *bienes* como el trabajo a los *males* como el daño al medio ambiente. Los defensores de una reforma medioambiental de los impuestos sugieren trasladar la reducción de impuestos a los *bienes*, incrementando los impuestos en los *males*, de tal forma que la reforma no tenga un impacto negativo en la recaudación.

Impuestos al carbono

El impuesto más importante a incrementar, si queremos promocionar las tecnologías libres de combustibles fósiles, es el impuesto al carbono. El precio debe de ser lo suficientemente alto para promocionar alternativas de inversión a los combustibles fósiles, así como la inversión en medidas de eficiencia. Hay que darse cuenta de que esta es exactamente la misma solución que se dio en la sección anterior. Así que, independientemente de que nuestra motivación sea evitar el cambio climático o asegurar el suministro eléctrico, las políticas a llevar a cabo son las mismas: necesitamos un precio del carbono estable y alto. La Figura 29.1 indica de forma orientativa los precios del carbono que harían falta para provocar cambios en el comportamiento y en las inversiones;

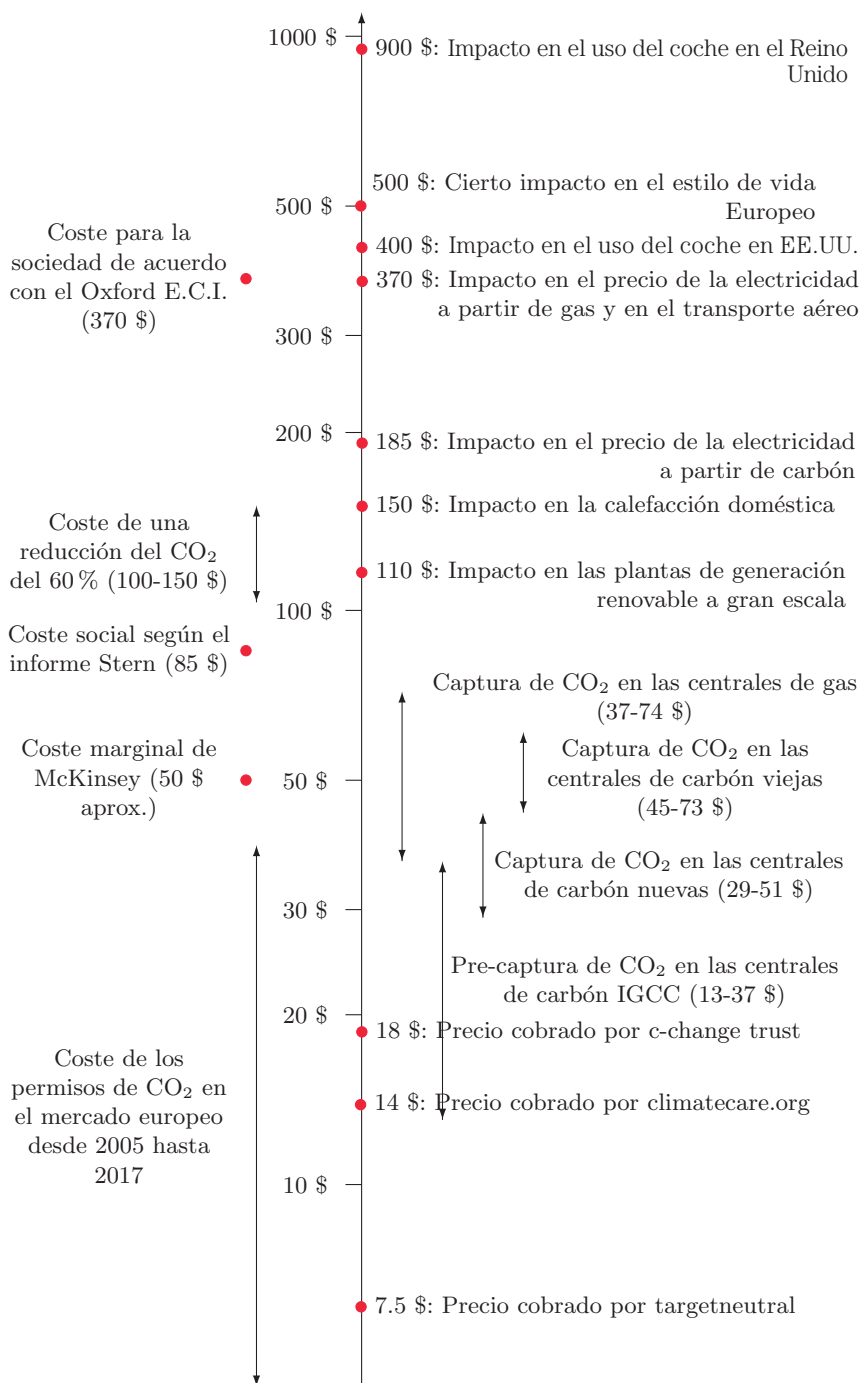


Figura 29.1: Como tendría que ser el precio del CO₂ para producir cambios en la sociedad y conseguir reducir las emisiones.

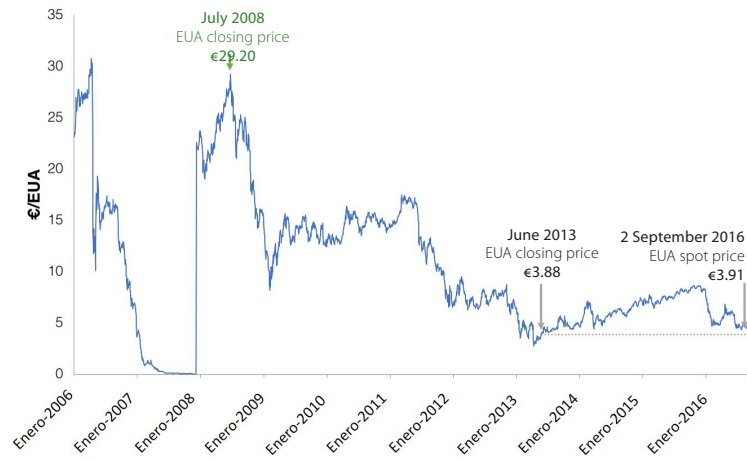
El diagrama muestra el coste del dióxido de carbono por tonelada al que una determinada inversión sería económicamente viable, o cómo comportamientos particulares se verían significativamente afectados, asumiendo que una actividad como conducir o volar se ve afectada si el coste del CO₂ duplica al de la propia actividad.

Conforme el coste aumenta hasta los 20-70 \$ por tonelada, sería rentable añadir la captura del carbono a las centrales nuevas y viejas.

Un precio de 110 \$ por tonelada haría viable los proyectos renovables a gran escala cuyo coste sea 3 céntimos por kWh más caro que el gas. Con 150 \$ por tonelada, los usuarios de gas en sus viviendas notarían el coste del carbono en sus facturas. Con un precio de 370 \$, la contaminación del carbono costaría lo suficiente como para hacer que la gente se incline por no volar.

A 500 \$ por tonelada, aquellos europeos que no hayan cambiado sus hábitos de vida gastarán un 12 % de sus ingresos en los costes del dióxido de carbono asociados a la conducción, los vuelos y calentar sus casas.

Figura 29.2: Precio, en euros, de una tonelada de CO₂ en el marco del mercado de emisiones de la Unión Europea. Fuente: www.sandbag.org.uk.



y los precios, mucho más bajos, que cobran algunas organizaciones asegurando que este precio permite modificar las emisiones de gases de efecto invernadero. ¿Cuál es la mejor manera de fijar un precio elevado en el carbono? ¿Es el mercado europeo de emisiones la forma de conseguirlo (Figura 29.2)? Esta cuestión cae en el terreno de los economistas y los expertos en política internacional. Desde el punto de vista de los economistas de Cambridge Michael Grubb y David Newbery, el mercado europeo de emisiones no está funcionando: «los instrumentos actuales no conseguirán la adecuada respuesta en la inversión».

Instituciones de renombre se han posicionado en algunos países a favor de un impuesto al carbono, mostrando que hay un apoyo claro a una tasa importante sobre el carbono acompañada de una reducción en los impuestos al empleo. Pero los impuestos y los mercados no van a traer la solución por sí solos. La propuesta de impuestos y mercados falla si los consumidores eligen irracionalmente: si los consumidores valoran el dinero a corto plazo más que el ahorro a largo plazo o si las personas que eligen qué comprar no están pagando por todos los costes asociados al producto elegido.

De hecho, hay marcas que son *tranquilizadoramente caras*. Los consumidores eligen en algunas ocasiones la imagen y la percepción que tienen de un producto y deciden comprar caro en lugar de atender únicamente a cuestiones como el precio.

Una vez que se ha comprado una cosa ineficiente ya es demasiado tarde. Es esencial que las cosas ineficientes no lleguen ni siquiera a fabricarse; o que el consumidor, cuando compre, se vea influenciado a no comprar cosas ineficientes.

A continuación, hay algunos ejemplos de fallos del mercado libre.

Las barreras de entrada

Imagina que las tasas al carbón son lo suficientemente altas como para que un nuevo chisme con unas emisiones de carbono extremadamente bajas (el Eco-chisme) pudiese costar un 5% menos que su viejo competidor con altas emisiones (el Dino-chisme) si ambos se fabricasen en las mismas condiciones de producción en masa, en las mismas cantidades. Gracias a una tecnología inteligente, las emisiones del Eco-chisme son un 90% inferiores a las del Dino-chisme. Está claro que sería positivo para la sociedad si todos los usuarios del chisme comprasen el Eco-chisme. Sin embargo, actualmente, como el Eco-chisme es nuevo, tiene unas ventas muy reducidas, por lo que el coste por cada unidad es más alto que el del Dino-chisme. Únicamente algunos consumidores suficientemente concienciados comprarán el Eco-chisme, por lo que la empresa Eco-Chismes S. A. tendrá que abandonar el negocio.

Quizás las intervenciones del Gobierno son necesarias para favorecer las transiciones y dar a la innovación un impulso. ¿Apoyo a la innovación y desarrollo? ¿Incentivos fiscales favoreciendo nuevos productos (como los incentivos que favorecieron la transición de la gasolina con plomo a la sin plomo)?

El problema de las pequeñas diferencias en el coste

Supongamos que Eco-Chismes S. A. tiene éxito y crece, y que las tasas al carbono son lo suficientemente altas como para conseguir que el Eco-chisme cueste un 5% menos que su viejo rival con altas emisiones de Dino-Aplicaciones S. A. Seguramente las tasas de carbono cumplirán con su misión y todos los consumidores comprarán ahora el Eco-chisme. Bueno, en primer lugar, a muchos consumidores no les importa una diferencia en el precio del 5%. La imagen lo es todo. En segundo lugar, si se sienten amenazados por Eco-Chismes S. A., Dino-Aplicaciones S. A. relanzará su Dino-Chisme, enfatizando que es más patriótico, anunciando que ahora está disponible en verde y enseñando a gente guay con el viejo Dino-chisme. «Los hombres de verdad compran Dino-chismes». Si esto no funciona, Dino emitirá notas de prensa diciendo que los científicos no han rechazado todavía que el uso prolongado del Eco-chisme pueda producir cáncer a largo plazo, subrayando que una señora mayor tropezó con un Eco-chisme o sugiriendo que los Eco-chismes dañan al murciélago de la fruta. Miedo, incertidumbre, duda. A modo de plan B, Dino-Aplicaciones S. A. siempre puede comprar a Eco-Chismes S. A. El producto ganador no tendrá nada que ver con el ahorro energético si la diferencia para el consumidor es tan solo el 5%.

¿Cómo arreglar este problema? Quizás el Gobierno deba, simplemente, prohibir las ventas de Dino-chismes (como se prohibió, en su día, la venta de gasolina con plomo o las bombillas incandescentes).

El problema de Antonio y Carmen

Imagina que Antonio, un propietario, alquila un apartamento a Carmen, la inquilina. Antonio es responsable de mantener el piso y proporcionar los electrodomésticos necesarios, mientras que Carmen paga la calefacción y la factura eléctrica. Aquí está el problema: Antonio no tiene ningún incentivo para invertir en modificaciones en el apartamento que repercutan en una reducción de la factura de Carmen. Podría instalar bombillas más eficientes o una nevera con menor consumo energético. Estos electrodomésticos fácilmente recuperarían, a lo largo de su vida, la inversión inicial; pero será Carmen la que se beneficiará, no Antonio. De igual forma, Antonio no tiene ningún incentivo para mejorar el aislamiento de las paredes del apartamento, o instalar cristales dobles. En principio, en un mercado perfecto, Antonio y Carmen tomarían la decisión correcta: Antonio instalaría todas las medidas de ahorro energético y cobraría a Carmen un pequeño incremento en el alquiler, Carmen reconocería las ventajas de las mejoras instaladas y estaría contenta pagando un poco más en su alquiler, ya que empezaría a ahorrar en su factura energética. Sin embargo, es difícil que ambos participen en este mercado perfecto. Carmen no tiene mucho dinero y difícilmente llega a pagar el alquiler. Por otro lado, Antonio tiene el firme deseo de alquilar la propiedad, por lo que probablemente tenderá a exagerar las bondades del apartamento, entre ellas el bajo consumo.

De esta forma, hace falta cierta intervención para que ambos hagan lo correcto. Por ejemplo, el Gobierno podría imponer impuestos muy elevados a los electrodomésticos ineficientes, prohibir los frigoríficos que no cumplan con un estándar de ahorro, exigir un determinado nivel de aislamiento o una calificación alta en el certificado de eficiencia de la vivienda para poder ponerla en alquiler. De este modo, Carmen sabrá que el piso tendrá una garantía mínima de ahorro energético antes de entrar.

La historia de Zara y Lucy

Dos amigas británicas, Zara, de Birmingham, y Lucy, de Newcastle, tenían unos días libres y ganas de verse. En lugar de coger un tren para recorrer los 320 kilómetros que separan sus ciudades, tomaron un avión

y se encontraron a unos 2000 kilómetros de distancia, en Málaga. «Era más barato ir al extranjero porque Ryanair tenía una oferta y los trenes son muy caros». Los billetes de avión de ida y vuelta, con las tasas incluidas, les costaron 20 libras (casi 23 euros) desde Newcastle y 55 libras (unos 62 euros) desde Birmingham.

Este uso del avión es posible porque las aerolíneas no asumen parte del coste de la actividad que ejercen, el daño al medio ambiente. Si el Gobierno aumentase los impuestos por contaminación, haciendo que las aerolíneas tuviesen que repercutir el coste medioambiental en el precio final del billete, una actividad con un consumo energético tan importante como volar se haría de forma más responsable.

Dividendos de carbono

En febrero de 2017 algunos miembros del partido republicano de los Estados Unidos propusieron una vuelta de tuerca a la política de impuestos a las emisiones de CO₂ (sí, sorprendentemente el partido al que pertenece el actual presidente de ese país, Donald Trump, y que recientemente retiraba a EE.UU. del acuerdo climático de París, negando que el calentamiento global fuese una realidad). En el documento «The conservative case for carbon dividends» se establece un plan de acción basado en cuatro pilares, que permitiría una reducción notable de las emisiones a la atmósfera:

1. Un impuesto creciente a las emisiones de dióxido de carbono. De fienden que la tasa debería empezar en el entorno de los 40 \$ por tonelada de CO₂ y que se debería ir incrementando a lo largo del tiempo de forma gradual. De esta forma se envía un mensaje claro a los inversores para que sean conscientes de que las inversiones realizadas para reducir las emisiones de CO₂ serán rentables en un plazo de tiempo razonable.

Hasta aquí nada nuevo, pero a partir del siguiente punto es cuando cambia la propuesta con respecto a las anteriores.

2. El dinero recaudado de los impuestos al carbono ha de retornar a los ciudadanos en forma de dividendos. Para el caso americano, estiman que con el impuesto de 40 \$, una familia de cuatro miembros cobraría 2000 \$ durante el primer año. Al reembolsar el dinero del impuesto a los ciudadanos, un impuesto que es impopular, especialmente en Estados Unidos, se convierte en popular.
3. Obviamente, las empresas del país, al estar sometidas a un nuevo impuesto que penalizaría las emisiones, podrían perder compe-

titividad con respecto a empresas extranjeras. Por este motivo, proponen que haya *ajustes de carbono en las fronteras*. Esto quiere decir que, si un determinado país no aplica este impuesto, las importaciones de dicho país serían gravadas con el impuesto correspondiente a las emisiones de cada producto. De igual modo, las exportaciones a estos países estarían subvencionadas, mediante el impuesto recaudado, para que las empresas puedan seguir exportando.

4. Por último, como defensores del mercado libre en su máxima expresión, proponen eliminar toda la regulación que no se necesite una vez que entre en vigor este sistema de dividendos del carbono.

Los autores de esta propuesta defienden la existencia de un efecto dominó. En el momento en el que un país adopte este sistema de dividendos, el resto de países dejará de tener incentivos para no seguir sus pasos. Por este motivo animan a que EE.UU. sea el primero, pero también destacan que cualquier otro país podría serlo, y que cuanto antes adopten este sistema, mejor.

Un ejemplo de aplicación de los dividendos del carbono es el de la provincia British Columbia en Canadá. En dicha provincia la política de dividendos de carbono entró en vigor en 2008 con una tasa de 10 dólares canadienses por tonelada métrica emitida de dióxido de carbono, que, incrementándose en 5 dólares al año hasta 2012, alcanzó un precio de 30 \$ por tonelada. El impuesto es neutral para las arcas de esta provincia, ya que todo lo recaudado se devuelve en forma de dividendos a las pequeñas y medianas empresas, en descuentos a los impuestos sobre las rentas del trabajo y en créditos para las economías familiares más desfavorecidas. En 2012 el precio del CO₂ se congeló hasta el año 2017. ¿Significa esto que el precio no va a continuar aumentando en el futuro? Ni mucho menos, el mensaje es claro, el precio continuará aumentando, este parón se planificó desde un primer momento. De hecho, el partido que estableció este impuesto fue reelegido, mostrando que el impuesto goza de popularidad entre los ciudadanos, y mandando un mensaje claro a las empresas: las inversiones que se hagan para reducir las emisiones se rentabilizan, ya que el precio del carbono va a continuar aumentando. Este impuesto se ha mostrado efectivo, ya que en esta provincia se redujeron las emisiones de forma mucho más importante que en el resto del país: una reducción del 13% per cápita en la provincia de British Columbia, entre 2008 y 2012, frente al 3,7% en el resto de Canadá. Además, el PIB de esta provincia creció por encima de la media de Canadá, demostrando que las políticas económicas ecológicas no están reñidas con el desarrollo económico.

Pero hay más buenas noticias al respecto, los impuestos al carbono ya se han extendido a 6 provincias y el gobierno ha establecido que todas las provincias de Canadá tienen que tener un impuesto al carbono en 2019, ¿se creará el efecto dominó esperado en el resto de países? ¡Ojalá!

Inversión en investigación y desarrollo

Se nos fue la olla con las renovables.

Miguel Sebastián
(ministro de Industria, Turismo y Comercio de 2008 a 2011
con el Gobierno de José Luis Rodríguez Zapatero)

España no cuenta con una estrategia global para eliminar las subvenciones nocivas para el medio ambiente, aunque su abandono puede ofrecer ventajas económicas, sociales y medioambientales, permitir una mayor competitividad y contribuir a la consolidación presupuestaria.

La Comisión Europea sobre las subvenciones en España a los combustibles fósiles y el carbón nacional.

Hacen falta décadas para desarrollar tecnologías renovables como la solar térmica de concentración, la mareomotriz o la undimotriz. La fusión nuclear también requiere décadas. Todas estas tecnologías necesitan un apoyo claro para poder tener éxito.

Acción individual

La gente a veces nos pregunta ¿qué debo hacer? La Tabla 29.1 indica ocho acciones personales simples que recomendamos y un cálculo *grosso modo* indicando el ahorro asociado a cada acción. Hay que tener en cuenta los *términos y condiciones*. Tu ahorro dependerá de cuál sea tu punto de inicio. Los números de la Tabla 29.1 asumen un punto de inicio para un consumidor por encima de la media.

Mientras que las acciones de arriba son bastante sencillas, las de la Tabla 29.2 requieren más planificación, determinación y dinero.

Finalmente, la Tabla 29.3 muestra un par de acciones simples que suponen pequeños ahorros que también puedes llevar a cabo.

Tabla 29.1: Ocho acciones individuales simples para ahorrar energía.

Acción simple	Posible ahorro
–Ponerse un jersey de lana y bajar el termostato de casa (a 17 o 18 °C). Poner termostatos individuales en cada radiador. Asegurarse de que la calefacción está apagada cuando no hay nadie en casa. Hacer lo mismo en el trabajo.	15 kWh/d
–Leer todos los contadores (luz, electricidad, agua) todas las semanas e identificar los cambios sencillos para reducir el consumo (apagar cosas). Comparar de forma competitiva con un amigo. Leer los contadores del lugar de trabajo, crear una auditoría energética perpetua en tu vida.	4 kWh/d
–Dejar de volar.	35 kWh/d
–Conducir menos, hacerlo más despacio, utilizar un coche eléctrico, compartir coche, andar, ir en bici, usar el tren o el autobús.	15 kWh/d
–Seguir usando cosas viejas, no sustituirlas antes de tiempo (salvo que el ahorro global de energía sea rentable).	4 kWh/d
–Cambiar las bombillas por LED.	2 kWh/d
–Comer vegetariano seis días a la semana.	10 kWh/d
–Evitar comprar trastos. Evitar los empaquetados.	20 kWh/d

Tabla 29.2: Cinco acciones más complicadas para ahorrar energía.

Acciones planificadas	Posible ahorro
–Eliminar corrientes de aire.	5 kWh/d
–Doble vidrio en las ventanas.	10 kWh/d
–Mejorar el aislamiento de techos, muros y suelos.	10 kWh/d
–Derribar edificios viejos y construir nuevos más eficientes.	35 kWh/d
–Reemplazar la calefacción de combustibles fósiles por bombas de calor con sumidero en el suelo y en el ambiente.	10 kWh/d

Tabla 29.3: Algunas acciones simples que suponen pequeños ahorros energéticos.

Acción	Posible ahorro
–Lavar la ropa en agua fría.	0,5 kWh/d
–Dejar de usar la secadora y utilizar una cuerda para tender la ropa.	0,5 kWh/d

Capítulo 30

Planes energéticos para el mundo

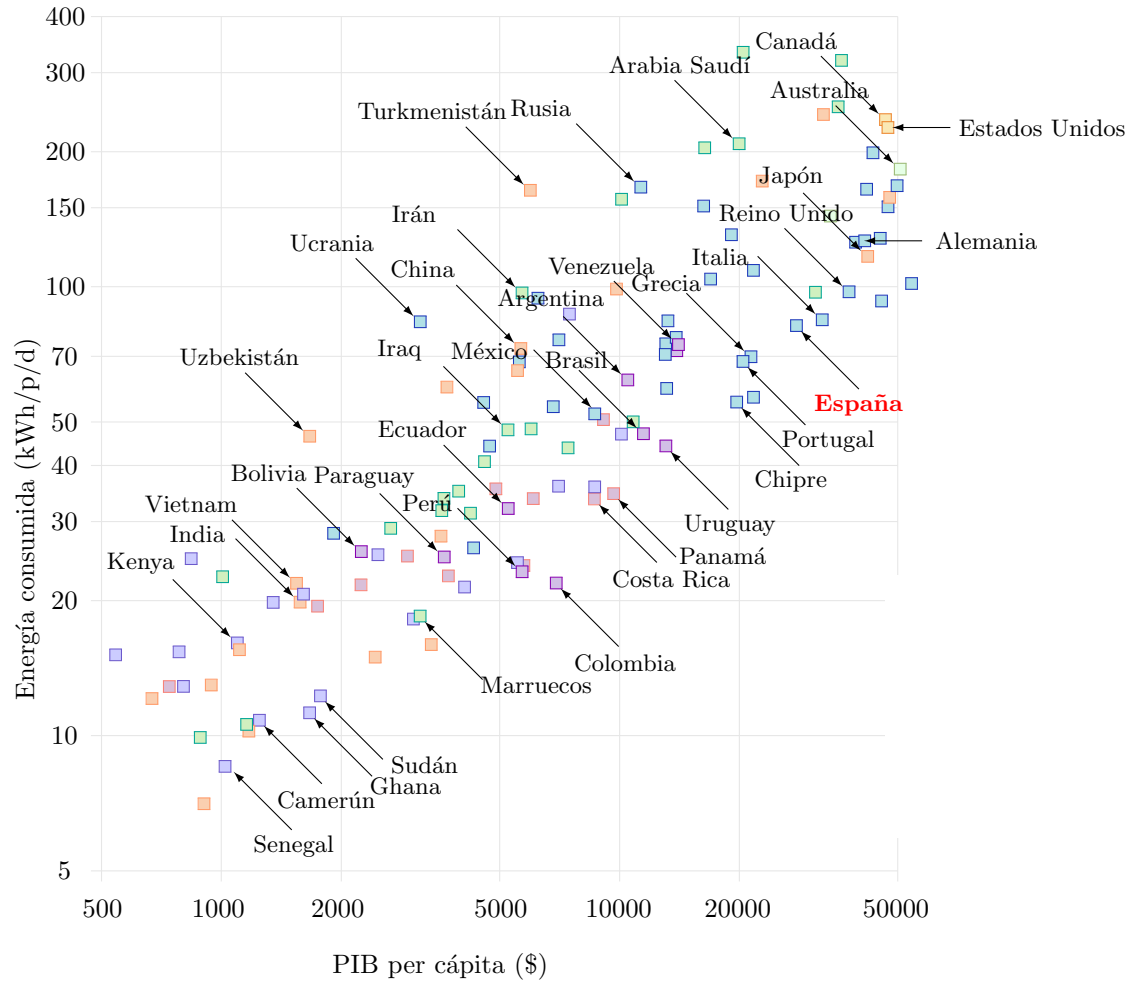
La Figura 30.1 muestra el consumo energético medio por persona en distintos países frente a su producto interior bruto (PIB). Es totalmente común asumir que el desarrollo humano y el crecimiento son cosas buenas, por lo que, cuando hagamos nuestros planes energéticos sostenibles para el mundo, asumiremos que los países con un PIB bajo per cápita van a progresar hacia la derecha en la Figura 30.1. Conforme aumenta su producto interior bruto, será inevitable que aumente también su consumo energético. No está claro qué consumo debemos esperar de estos países, pero el nivel medio europeo de 112 kWh por persona y día parece una suposición razonable. Alternativamente, podemos asumir que las medidas de eficiencia, como las que se han presentado para España en los capítulos anteriores, permiten a todos los países alcanzar un nivel de vida europeo con un consumo energético menor. En el plan de consumo realizado para España en el Capítulo 27, el consumo se reducía a **49 kWh por persona y día**. Teniendo en cuenta que en este plan energético nuestra España esquemática no tenía mucha actividad industrial, quizás sería más sensato asumir un consumo objetivo algo mayor, pongamos **80 kWh/p/d**.

Rehaciendo los cálculos para Europa

¿Puede Europa vivir de las renovables?

La densidad de población en Europa es algo menor que la de España, por lo que hay mayor superficie por persona para instalar las infraestructuras necesarias para producir las enormes cantidades de energía renovable que necesitaremos, unos **14 182 m² por persona**, frente a los 10 800 m² en nuestro país. Sin embargo, no todos los países tendrán el excelente recurso solar que tenemos en la península, aunque algunos de ellos tendrán mayor recurso eólico, geotérmico, mareomotriz o undimotriz. Deduzcamos de forma muy aproximada los números.

Figura 30.1: Energía diaria consumida por persona y día frente al producto interior bruto per cápita, en \$. Información obtenida del informe «Climate Data Explorer» de 2017, del World Resources Institute (Instituto Mundial de Recursos).



Viento

El norte de Europa tiene mejor recurso eólico que el que hemos calculado para España. Supongamos que de media en Europa se tiene una densidad de potencia de $1,5 \text{ W/m}^2$, y que damos a Europa el mismo tratamiento que a España en el Capítulo 4, es decir, que cubrimos con aerogeneradores el 10% del continente (teniendo en cuenta que en ese 10% pueden coexistir cultivos y que, por lo tanto, la superficie inutiliza-

da por los aerogeneradores es en realidad en torno a un 1%). Teniendo en cuenta la superficie disponible por persona, el viento nos da:

$$14\,182\text{ m}^2 \times 10\% \times 1,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 2127\text{ W} \quad (30.1)$$

o, lo que es lo mismo, **51 kWh por persona y día**.

Hidroelectricidad

La producción hidroeléctrica en Europa es de 590 TWh/año, o 67 GW de media; compartida entre 713 millones de personas, nos da 2,2 kWh/p/d. Esta producción está dominada por Noruega, Francia, Suecia, Italia, Austria y Suiza. Si cada país doblara sus instalaciones hidroeléctricas, lo cual sería complicado, entonces la hidroelectricidad nos daría **4,4 kWh por persona y día**.

Olas

Tomando toda la costa atlántica (unos 4000 km) y multiplicando por una producción media de 10 kW/m, tenemos **1,4 kWh por persona y día**. Las costas del Báltico y del Mediterráneo no tienen un recurso que merezca la pena ser considerado.

Mareas

Considerando que las costas bálticas y mediterráneas no tienen un recurso mareomotriz a considerar, solo nos quedaría el mar del Norte. Doblando el recurso total estimado para las islas británicas, de 11 kWh por persona y día, para tener en cuenta el recurso de las costas francesas, irlandesas y noruegas, y repartiéndolo entre una población de 713 millones, tenemos **1,8 kWh por persona y día**.

Solar fotovoltaica y solar térmica en los tejados

La mayoría de países europeos no son tan soleados como España, supongamos que la potencia solar en los países de la Unión Europea es de 200 W/m² y que cada europeo tiene 10 m² de tejado. Con paneles fotovoltaicos con un 15% de eficiencia, tenemos **7,2 kWh/p/d**. De forma similar, con 2 m² por persona y paneles térmicos para calentar agua con



Figura 30.2: Un panel solar térmico para calentar agua para una familia en Michigan (EE.UU.). La bomba del sistema está alimentada por un panel fotovoltaico pequeño que se puede ver a la izquierda del panel solar térmico.

una eficiencia del 50 %, podríamos obtener 4,8 kWh/p/d de energía de baja calidad, energía térmica. No tiene sentido suponer que instalaremos paneles térmicos para calentar agua en una superficie mayor de 2 m² por persona, ya que con esa superficie tendríamos cubierta la demanda típica de agua caliente.

¿Qué más?

Hasta ahora tenemos $51 + 4,4 + 1,4 + 1,8 + 7,2 + 4,8 = 70,6$ kWh/p/d. ¡Casi los 80 que queríamos! Los únicos recursos que todavía no se han mencionado hasta ahora son la geotermia y las plantas solares a gran escala (solar térmica de concentración, fotovoltaica o biomasa).

La geotermia puede ayudar, pero todavía se encuentra en una etapa de investigación por las grandes profundidades a las que hay que adentrarse. Sugerimos tratarla como la fusión nuclear: una buena inversión, pero con la que todavía no podemos contar.

¿Qué pasa con las plantas solares? Tal y como se explica en el Capítulo 6, las plantas fotovoltaicas actuales tienen una potencia de hasta 16 W/m². Podemos imaginar que cubrimos un 1 % de la superficie disponible (142 m² por persona), y generaríamos ¡55 kWh/p/d!

Las plantas fotovoltaicas podrían, por lo tanto, realizar una aportación considerable. Y aún tenemos más buenas noticias: esta tecnología ha reducido mucho sus costes y, a día de hoy, ya es una tecnología competitiva. Eso sí, obtener la energía necesaria en invierno sería otra cuestión aparte.

¿Semillas energéticas? Las plantas capturan aproximadamente 0,5 W/m². Dado que Europa también necesita producir alimento, la contribución no alimentaria de las plantas en Europa no puede ser enorme. Sí, habrá algo de biocombustibles y madera, pero la contribución no alimentaria de las plantas no se prevé que pueda superar los 12 kWh/p/d en Europa.

Sumando todo esto, tendríamos 137,6 kWh/p/d, suficiente para abastecer la demanda energética total que habíamos supuesto. Otra cuestión sería el nivel de industrialización del entorno que sería necesario y cómo conseguir almacenar la energía para aprovecharla cuando se necesite.

Conclusión

Europa, si reduce su consumo, puede abastecer sus necesidades mediante energías renovables. En cualquier caso, para poder hacerlo, sería necesario resolver el problema del almacenamiento de la energía.

Rehaciendo los cálculos para América del Norte

Consideraremos en esta sección a México, EE.UU. y Canadá. Supongamos que en los tres países se alcanza un consumo igual al estadounidense, es decir, **220 kWh/p/d**. ¿Se puede alcanzar este objetivo con renovables? ¿Qué pasa si imaginamos que se aplican en esta región medidas drásticas de eficiencia energética (como coches eléctricos más eficientes y trenes eléctricos de alta velocidad) de tal forma que se obligase a los estadounidenses a vivir en la «miseria» de **112 kWh/p/d** como un ciudadano europeo o japonés cualquiera?

Viento

En un estudio publicado en 1991 [229] se analizó el potencial eólico en Estados Unidos. Los lugares más ventosos son Dakota del Norte, Wyoming y Montana. Se calculó que, en todo el país, se podrían explotar 435 000 km² de zonas ventosas sin generar demasiadas molestias, y que la electricidad generada sería de 4600 TWh al año, lo que supone **39 kWh/p/d** si se comparte entre los 325 millones de personas de EE.UU. Los cálculos del informe asumían una densidad de potencia de 1,2 W/m², prácticamente igual a la que habíamos supuesto para España en el Capítulo 4. El área de estos parques eólicos, 435 000 km², es similar al área de California. La potencia a instalar (asumiendo un factor de carga del 20%) sería de 2600 GW, lo que supone multiplicar por más de 30 la potencia eólica instalada en la actualidad en el país americano.

Viento marino

Si asumimos que la eólica offshore de baja profundidad, con un área igual a Delaware y Connecticut (20 000 km², una porción importante de todas las aguas poco profundas de la costa de los Estados Unidos), se llenase con parques eólicos que tuviesen una densidad de potencia de 3 W/m², obtendríamos una potencia media de 60 GW. Esto es **4,5 kWh/p/d** si se comparte entre 320 millones de personas.

Geotermia

En el estudio del MIT, ya mencionado anteriormente en el capítulo de geotermia, los autores eran muy optimistas sobre el potencial de esta energía en América del Norte, especialmente en el Oeste de EE.UU.,



Figura 30.3: En algún lugar al norte de Los Ángeles (EE.UU.) alguien se ha tomado en serio eso de recolectar energía renovable. En esta foto, que abarca 8 × 20 km, se puede ver arriba un parque eólico mientras que los cuadros oscuros de la mitad inferior son plantas fotovoltaicas. Fuente: Google.

donde hay más yacimientos de rocas calientes secas. «Con una inversión razonable en I+D, los sistemas mejorados de geotermia podrían generar 100 GW eléctricos, o más, de energía competitiva durante los próximos 50 años. Es más, la geotermia es una fuente segura de potencia a largo plazo». Asumamos que no se equivocan, 100 GW de electricidad son 7,5 kWh/p/d para 325 millones de estadounidenses.

Hidroelectricidad

Las instalaciones hidroeléctricas de México, Canadá y Estados Unidos generan 660 TWh al año. Si se comparten entre sus 500 millones de habitantes, nos da 3,6 kWh/p/d. ¿Podría doblarse esta producción? En ese caso se podrían generar 7,2 kWh/p/d.

¿Qué más?

Hasta el momento tenemos $39 + 4,5 + 7,5 + 7,2 = 58,2$ kWh/p/d, lo cual no es suficiente ni para el consumo europeo. Podríamos discutir varias opciones más, como la quema sostenible de los bosques canadienses en centrales térmicas. Sin embargo, en lugar de prolongar la agonía, vamos directamente a una tecnología que realmente marca la diferencia: la solar fotovoltaica.

La Figura 30.4 muestra en amarillo el área de América del Norte requerida para suministrar 250 kWh/p/d a 500 millones de personas.

Conclusiones

Los recursos no solares en América del Norte no son suficientes para abastecer su propia demanda. Cuando se incluye una expansión masiva de la energía solar ¡hay más que suficiente!

Rehaciendo los cálculos para Sudamérica

En Sudamérica hay una población de unos 425 millones de personas que consumen unos 40 kWh/p/d. ¿Podría aumentar su consumo a 80 kWh/p/d de forma sostenible? Para ello dispone de recursos energéticos en unos 18 millones de kilómetros cuadrados, aunque con una particularidad, la selva del Amazonas (que nos gustaría conservar) ocupa

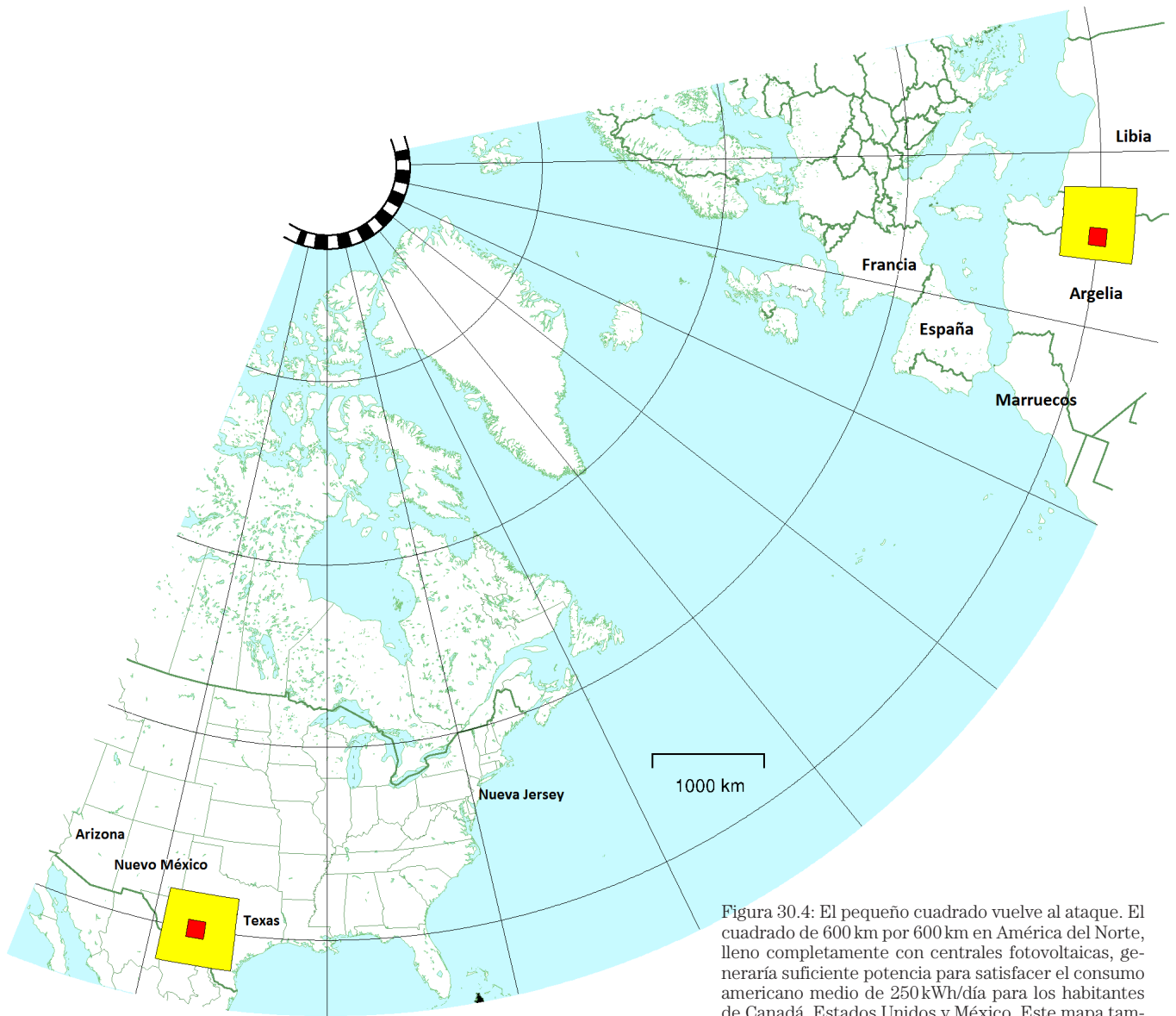


Figura 30.4: El pequeño cuadrado vuelve al ataque. El cuadrado de 600 km por 600 km en América del Norte, lleno completamente con centrales fotovoltaicas, generaría suficiente potencia para satisfacer el consumo americano medio de 250 kWh/día para los habitantes de Canadá, Estados Unidos y México. Este mapa también muestra el cuadrado de 600 km por 600 km en África del que hablamos en el Capítulo 25. Se ha asumido una potencia de 15 W/m², al igual que antes.

El área de un cuadrado amarillo es similar a la superficie de Arizona y 16 veces la de Nueva Jersey (EE. UU.). Dentro de cada recuadro amarillo hay un recuadro rojo de 145 km por 145 km, que muestra el área requerida en el desierto para proveer a 30 millones de personas con 250 kWh por persona y día.



Figura 30.5: Represa de Itaipú en el río Paraná. Prácticamente empatada en generación de energía con la presa de las Tres Gargantas en China, genera unos 100 000 GWh al año. Fuente: International Hydropower Association.

casi 6 millones de kilómetros cuadrados. Por ello, consideraremos para estos cálculos una superficie útil de 12 millones de kilómetros cuadrados, es decir, unos 28 000 m² por persona.

Hidroelectricidad

Uno de los aspectos más característicos de Sudamérica en cuanto a generación renovable es su gran potencial hidroeléctrico. Entre Paraguay y Brasil se encuentra la represa de Itaipú que, junto a las Tres Gargantas de China, es la central que más energía genera del mundo, unos 100 000 GWh al año. Es la culpable de que Paraguay pueda decir que se abastece al 100% de energías renovables (de hecho, exporta gran parte de lo que produce). Algo similar le ocurre a Uruguay, cuya energía eléctrica es casi 100% renovable, en gran parte gracias a la hidroeléctrica, pero también gracias al esfuerzo por instalar energía eólica, con la que generan un 25% de su consumo eléctrico.

Volviendo a la hidroeléctrica. Las tres grandes centrales hidroeléctricas de Sudamérica (que junto a la china, son las 4 más grandes del mundo) generan unos 200 000 GWh. ¿Es esto mucho? Bueno, repartida entre toda su población suponen 1,3 kWh/d/p. ¡Vaya! Eso está muy lejos del consumo al que aspiramos; incluso del actual consumo. ¿Se podría duplicar esta generación? Aunque fuera posible, no sería mucho. Si bien no es despreciable (y además ayudará a regular el sistema eléctrico), necesitará la ayuda de otras tecnologías.

Biomasa

Gran parte de Sudamérica tiene un clima tropical especialmente privilegiado para el cultivo. Brasil, que ocupa casi la mitad de extensión de Sudamérica, es conocido por ser el gran impulsor del bioetanol para transporte (el 20% del transporte en Brasil se alimenta con bioetanol) y además aprovecha todos los restos del procesado de la caña de azúcar para generar calor y electricidad. En total, en Brasil, la biomasa supone aproximadamente 1000 GWh, lo que equivale al 33% de la energía consumida, que proviene principalmente de residuos de caña de azúcar (18%), leña y carbón vegetal (10%) y bioetanol (5%). Como decíamos, Brasil supone aproximadamente la mitad de la superficie sudamericana, así que es bastante representativo. Suponiendo que se pudiera extender esta producción al resto de países vecinos, se podrían generar 2000 GWh al año a repartir entre 425 millones de personas, es decir, 4,7 kWh/d/p. ¡Vaya, es menos de lo esperado! Pero cuidado, solo un 0,3% de la superficie

de Brasil está dedicada a la caña de azúcar, lo cual no representa ni el 1 % de su área cultivable. Así que un plan ambicioso podría aumentar la generación con biomasa hasta 47 kWh/p/d si se utilizara el 10 % del área cultivable, lo cual no está nada mal. Aun y todo, no sería suficiente para abastecer a una futura Sudamérica tan sedienta de energía como Europa.

Viento

En 2015 apenas había instalados 20000 MW eólicos en Sudamérica, pero el ritmo de crecimiento hará que esta cifra se quede pequeña en poco tiempo. Visto lo visto en Europa y en América del Norte, arriesguémonos a asumir un potencial similar ($1,2 \text{ W/m}^2$) y, ya que hay una densidad de población más baja, cubramos «solo» un 5 % de las zonas no amazónicas con aerogeneradores. En ese caso, la producción sería de 42 kWh/p/d. ¡No está nada mal! Sumado esto a la hidráulica y a la biomasa ya podríamos abastecer a Sudamérica sin más ayuda de otras tecnologías, aunque nos hemos quedado un poco justos y los planes son muy ambiciosos.

Solar

La energía solar, hasta ahora, ha demostrado ser la energía que marca la diferencia. En Sudamérica podemos encontrar uno de los mejores enclaves para la fotovoltaica, el desierto de Atacama, donde la combinación de poca nubosidad y gran altitud hacen que sea una de las zonas del mundo con valores más altos de radiación solar, en torno a un valor medio anual de 300 W/m^2 . Pero a gran escala, podemos considerar un valor promedio de 230 W/m^2 en buenos enclaves de Sudamérica. Así, y utilizando un 1 % del área no amazónica, ¡podríamos conseguir 123 kWh/p/d!

A esto se podría añadir paneles solares en los tejados para agua caliente y electricidad, pero podemos parar aquí y quedarnos tranquilos. Al igual que América del Norte, Sudamérica tiene un gran recurso energético y una baja densidad de población en comparación a Europa, así que todo América podría abastecerse holgadamente de sus propias fuentes de energía de forma sostenible.

Rehaciendo los cálculos para el mundo

Como hemos podido comprobar de forma indirecta, la respuesta a si una región grande del planeta puede alcanzar un determinado consumo a partir de sus propias fuentes de energía de forma sostenible está en

la densidad de población de dicha región. Al considerar un área del planeta grande, que por lo tanto tenga tanto zonas de alta radiación solar como zonas con recurso eólico, costas, grandes ríos, etc., la densidad de energías renovables por unidad de área es extrapolable a cualquier otro lugar de la Tierra. Si además consideramos un objetivo de consumo por habitante igual, el factor determinante es la densidad de población. De esta forma, sin necesidad de hacer más cálculos, podríamos concluir que África, con una densidad de población un 41 % inferior a la europea, podrá abastecerse de energías renovables locales, mientras que Asia, con una densidad un 45 % mayor, podría tenerlo más complicado pero no imposible. Así que pasemos directamente a una visión global. ¿Cómo pueden 7000 millones de personas obtener la energía suficiente para alcanzar el estándar de vida europeo de 80 kWh por persona y día (el estándar teniendo en cuenta que se introducen medidas de eficiencia energética)?

Viento

Los lugares excepcionalmente buenos en el mundo con un viento fuerte y estable se encuentran en el centro de Estados Unidos (Kansas y Oklahoma); Canadá (Saskatchewan); el sur de Argentina y Chile; el noreste de Australia; el noreste y noroeste de China; el noroeste de Sudán; el sudoeste de Sudáfrica; en Somalia; en Irán y en Afganistán. También en las localizaciones en el mar, excepto en una franja tropical de 60 grados centrada en el ecuador.

Para nuestra estimación global, tomaremos los números de Greenpeace y de la European Wind Energy Association: «el recurso total eólico disponible en el mundo se estima en 53 000 TWh al año». Esto es, 20 kWh/p/d.

Hidroelectricidad

En el mundo, a día de hoy, la hidroelectricidad contribuye aproximadamente con 1,4 kWh/p/d.

De la página web www.ieahydro.org:

La International Hydropower Association y la International Energy Agency estiman que el recurso hidráulico total técnicamente factible es de 14 000 TWh/año (5,3 kWh/p/d), de los cuales 8 000 TWh/año (3,6 kWh/p/d) se consideran económicamente factibles para su desarrollo. La mayor parte del potencial de desarrollo se encuentra en África, Asia y Latinoamérica.

Mareas

Hay varios lugares en el mundo con un buen recurso mareomotriz. Entre ellos se encuentran el estuario del Severn, en Reino Unido; San José y el golfo Nuevo en Argentina; en Australia el Walcott Inlet; Estados Unidos y Canadá comparten la bahía de Fundy; en Canadá también tienen Cobequid; India tiene el golfo de Khambat; Estados Unidos, Turnagain Arm y Knik Arm; y Rusia, Tugur. Y luego está el enorme Penzhinsk, en Rusia, con un recurso de 22 GW.

En un estudio publicado en 2004 [230] se estima que en el mundo se podrían generar entre 40 y 80 GW de potencia mareomotriz. Compartida entre los 7000 millones de habitantes del planeta, tendríamos entre 0,1 y 0,3 kWh/p/d.

Olas

Podemos estimar la potencia total extraíble de las olas multiplicando la longitud total de costa (unos 300 000 km) por la potencia típica por unidad de longitud de costa (10 kW por metro): el resultado son unos 3000 GW.

Asumiendo que un 10% de esta potencia es interceptada por sistemas con una eficiencia del 50% en la conversión a electricidad, las olas podrían proporcionar 0,4 kWh/p/d.

Geotermia

De acuerdo con D. H. Freeston del Intituto Geotérmico de Auckland, la generación geotérmica alcanzó una media de 4 GW a nivel mundial en 1995, lo que equivale a 0,01 kWh por persona día.

Si asumimos que los autores del MIT, mencionados en el apartado de América del Norte, están en lo cierto y si asumimos que todo el mundo es como los Estados Unidos (lo cual parece bastante optimista), la generación geotérmica ofrecería 6,6 kWh/p/d.

Solar para biomasa

A veces nos emocionamos cuando se habla de cultivos como la *Jatropha*, de la cual se dice que no tendría que competir con los cultivos para

alimentación, al poderse cultivar en tierras baldías. Pero deberíamos acostumbrarnos a mirar un poco los números antes de emocionarnos tanto. Los números de la *Jatropha* están en el Apéndice D. Incluso si el 100 % de la superficie de África se cubriese con *Jatropha*, la potencia producida, compartida entre la población mundial, sería **6,6 kWh/p/d** (solo un tercio del consumo actual de petróleo). ¡No se puede eliminar la adicción al petróleo simplemente con la *Jatropha*!

Estimemos un límite para la potencia que podríamos obtener en el mundo, usando el mismo método que aplicamos para España en el Capítulo 6. Imaginemos que tomamos toda la tierra arable del mundo y la dedicamos a cultivar biomasa. El 18 % de la superficie mundial es actualmente arable, un área de 27 millones de km². Esto es **3800 m² por persona** si se comparte entre los 7000 millones de habitantes del planeta. Asumiendo una densidad de potencia de 0,5 W/m² y unas pérdidas del 33 % en el cultivo y en el posterior procesamiento, tenemos que la biomasa, cubriendo toda la superficie cultivable del mundo, produciría **30 kWh/p/d**. Puede que esta sea una estimación conservadora, ya que vimos en el Capítulo 6 que había plantas con densidades de hasta 2 W/m², cuatro veces mayor que la que hemos asumido aquí. Puede que este tipo de cultivos tengan futuro, pero dejémoslo así para pasar a analizar una tecnología que realmente puede marcar la diferencia.

Colectores solares, solar fotovoltaica y solar térmica de concentración

Supongamos que cada persona del mundo dispone de 2 m² de tejado y que esta superficie se cubre con paneles térmicos que se emplean para calentar agua con una eficiencia del 50 %. Si suponemos que la radiación es de 235 W/m², tenemos **5,6 kWh/p/d**, suficiente para satisfacer la demanda de agua caliente por persona.

¿Qué pasa con la solar fotovoltaica? Si cubrimos un 1 % de la superficie con plantas fotovoltaicas (178 m² por persona) y asumiendo que en las zonas donde se instalen hay una potencia media por unidad de superficie similar a la que se puede conseguir en España, es decir, de 16 W/m², tal y como ya se explicó en el Capítulo 6, podríamos generar **68 kWh/p/d**. ¡Una contribución importante para alcanzar nuestro objetivo!

En muchas regiones la tecnología solar térmica de concentración es una opción muy buena, ya que permite almacenar la energía de forma sencilla. En las páginas 233 y 300 calculamos la superficie que sería necesaria ocupar en el desierto para abastecer las necesidades de 1000 millones de personas en el norte de África y en Europa, así como la

superficie requerida para los 500 millones de personas de América del Norte. Dejamos como ejercicio para el lector identificar los desiertos que ayudarían a abastecer al resto de la población mundial.

Conclusiones

Los recursos no solares que dibujan nuestras estimaciones son los siguientes: 20 (viento) + 3,6 (hidroelectricidad) + 0,3 (mareas) + 0,4 (olas) + 6,6 (geotermia), lo que nos da 31 kWh por persona y día. Nuestro objetivo era alcanzar una generación de 80 kWh/p/d correspondiente a un consumo posteuropeo. La conclusión es clara: los recursos renovables no solares no son suficientes y necesitamos de la energía solar con la que se puede sobrepasar nuestro objetivo.

Notas y textos de consulta

Página

- 297 *Doblando el recurso total estimado para las islas británicas, de 11 kWh por persona y día, para tener en cuenta el recurso de las costas francesas, irlandesas y noruegas...* Para encontrar el cálculo correspondiente al recurso existente en las islas británicas, acudir al Capítulo 14 del libro original: *Sustainable energy – Without the hot air*.
- 305 *La potencia extraíble de las olas [...] es de unos 3000 GW.* Fuente: [231].

Capítulo 31

La última cosa de la que deberíamos hablar

Capturar el dióxido de carbono del aire es la última cosa de la que deberíamos hablar.

Cuando decimos esto lo estamos expresando, deliberadamente, con un doble sentido. Primero, la cantidad de energía necesaria para capturar carbono del aire es enorme, parece casi absurdo que nos lo planteemos (y es preocupante que este elevado coste pueda llevar a un bloqueo en estas tecnologías que intentan arreglar el cambio climático hoy en día). Pero, en segundo lugar, creemos que deberíamos tratar este tema, ver cómo podríamos hacerlo de la mejor manera y financiar investigaciones que ayuden a mejorarlo, ya que capturar el carbono del aire podría convertirse en nuestra última línea de defensa, si es que el cambio climático es tan malo como los científicos afirman y si los humanos no descubrimos otras opciones más sencillas y baratas que las que tenemos hoy en día al alcance de la mano.

Antes de analizar las formas de capturar ese carbono del aire necesitamos entender el panorama global de esta sustancia.

Entendiendo el CO₂

A lo largo de este libro no se ha hablado mucho del cambio climático. De hecho, la energía sostenible es un tema suficientemente interesante incluso sin tener en cuenta el cambio climático. La razón principal es que no importa cuándo se van a terminar los combustibles fósiles, ni las consecuencias que estos tienen sobre el clima; *la quema de combustibles fósiles no es sostenible de ninguna de las maneras*; imaginémonos vivir de forma sostenible y veamos cuánta energía tenemos disponible.

Sin embargo, el cambio climático ha llegado a la conciencia pública y ha despertado preguntas de todo tipo. Por eso, se ha decidido hablar



Figura 31.1: *Maid in London*, obra de Banksy.

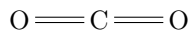


Figura 31.2: El peso del átomo de carbono y de una molécula de CO_2 siguen una proporción de 12 a 44, ya que el átomo de carbono tiene una masa de 12 unidades y cada átomo de oxígeno 16: $16 + 12 + 16 = 44$.

brevemente sobre ello, tanto en el prefacio como en este capítulo: no un debate en profundidad, sino unas cuantas cifras interesantes.

Unidades

Las tasas por emisión de CO_2 se miden habitualmente en dólares o euros por tonelada de CO_2 , por eso emplearemos la *tonelada de CO_2* como la principal unidad cuando hablemos de la contaminación per cápita y la *tonelada de CO_2 al año* para medir la tasa de contaminación. (Las emisiones medias de gases efecto invernadero de un ciudadano europeo son equivalentes a 8 toneladas de CO_2 al año; o 22 kg de CO_2 al día). Pero cuando hablamos del carbono presente en los combustibles fósiles, la vegetación, el suelo y el agua, emplearemos las toneladas de carbono. Una tonelada de CO_2 contiene 12/44 toneladas de carbono, un poco más que un cuarto de tonelada. A escala mundial, hablaremos de gigatoneladas de carbono (GtC). Una gigatonelada de carbono son 1000 millones de toneladas. Las gigatoneladas son difíciles de visualizar, pero si quieres bajar esta unidad a escala humana, imagina quemar una tonelada de carbón (que es lo que podrías utilizar para calentar tu casa durante un año entero). Ahora, imagina que todo el mundo en el planeta está quemando una tonelada de carbón en un año, todo eso suma 7 GtC, ya que la población de la Tierra es de 7000 millones de personas.

¿Dónde está el carbono?

¿Dónde está todo el carbono en la Tierra? Si queremos entender las consecuencias de las emisiones de CO_2 , necesitamos saber cuánto carbono hay en los océanos, en la tierra y en la vegetación, comparado con el carbono presente en la atmósfera.

La Figura 31.3 muestra la distribución de este carbono. La mayor parte (40 000 GtC) se encuentra en el océano (en forma de CO_2 disuelto, carbonatos, plantas, animales marinos y materia en descomposición). El suelo terrestre y la vegetación suman alrededor de 3700 GtC. Los combustibles fósiles accesibles (sobre todo en forma de carbón) contienen aproximadamente 1600 GtC. Finalmente, la atmósfera alberga una cantidad cercana a 600 GtC de carbono, o, mejor dicho, albergaba antes de la revolución industrial. En la actualidad ya hay 800 GtC.

Hasta hace poco tiempo todas estos pozos de carbono estaban en equilibrio, todos los flujos de carbono que salían de cada uno de ellos, digamos del suelo, la vegetación o la atmósfera, se equilibraban con los

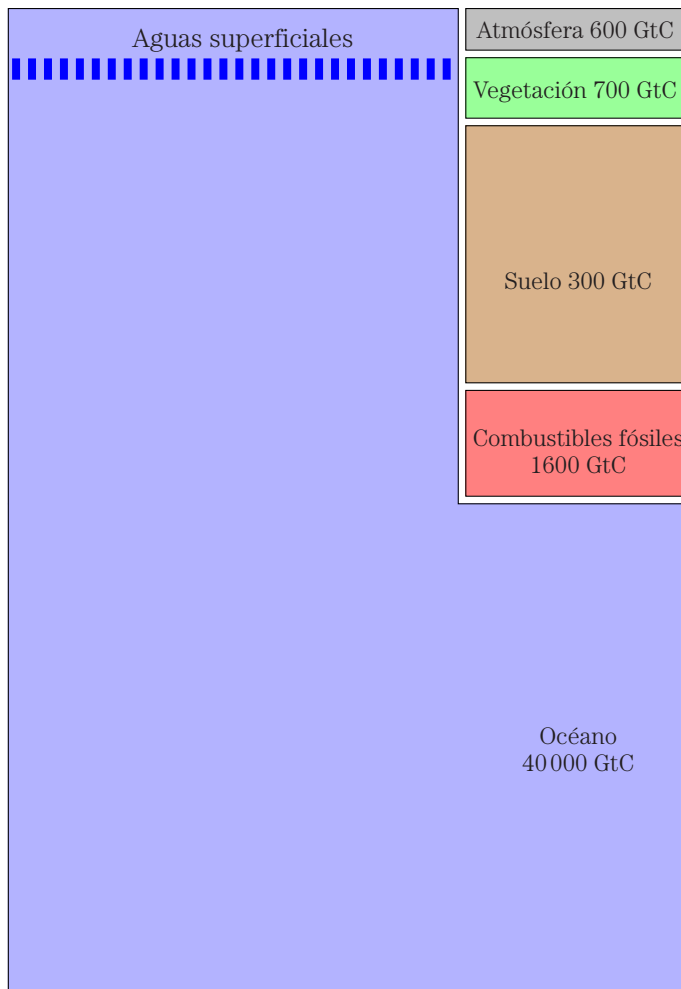


Figura 31.3: Cantidades estimadas de carbono, en gigatoneladas, en lugares accesibles de la Tierra en tiempos preindustriales. En la actualidad ya hay en la atmósfera 800 GtC. Hay también más cantidad de carbono en rocas, pero este carbono se mueve en una escala temporal de millones de años, con un balance a largo plazo entre el carbono sedimentado que se tragan los bordes de las placas tectónicas y el carbono que sale a la superficie a través de los volcanes de vez en cuando. Se ha ignorado este carbono geológico para simplificar el análisis.

flujos que entraban a dicho pozo. Los flujos salientes y entrantes de la zona de combustibles fósiles eran despreciables. Pero entonces el ser humano empezó a quemar estos combustibles fósiles y esto creó dos flujos extra totalmente *desequilibrados*, como se muestra en la Figura 31.4.

El ritmo al que se quemaban los combustibles fósiles era de aproximadamente 1 GtC/año en 1920, 2 GtC/año en 1955 y 10 GtC/año en 2016. (Estas cifras incluyen una pequeña contribución derivada de la producción de cemento, que libera CO₂ al procesar la roca caliza).

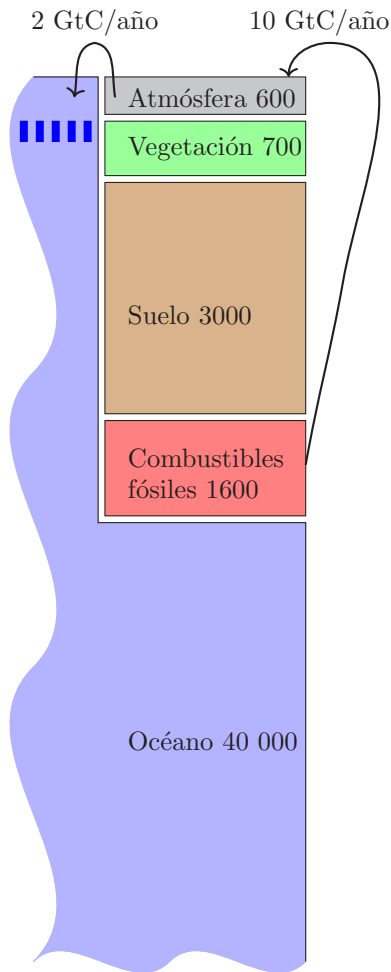


Figura 31.4: Las flechas muestran dos flujos de carbono extra producidos por la quema de combustibles fósiles. Hay un desequilibrio entre las 10 GtC/año que se emiten al quemar estos combustibles y las 2 GtC/año que los océanos capturan en forma de CO_2 . Esta figura omite los flujos, difíciles de estimar entre la atmósfera, el terreno, la vegetación, etc.

¿Cómo ha modificado todo este flujo extra de carbono el panorama que se mostraba en la Figura 31.3? Bueno, no se sabe con exactitud, pero la Figura 31.4 marca los aspectos claves que *sí* se conocen. Gran parte de los 10 GtC al año que se liberan a la atmósfera se queda en la atmósfera, aumentando, de esta manera, la concentración de dióxido de carbono. La atmósfera se equilibra bastante rápido con el agua superficial de los océanos (este equilibrio necesita de entre 5 y 10 años), y hay un flujo neto de CO_2 desde la atmósfera a este agua de la superficie de los océanos que alcanza las 2 GtC al año. Hay estudios recientes que revelan que este ritmo de captura del carbono por parte del agua puede estar reduciéndose. Este flujo desequilibrado hace que el agua superficial se acidifique, malas noticias para el coral. Algo de carbono extra se está moviendo también entre la vegetación y el suelo, quizás unos 1,5 GtC al año, pero estos flujos no están tan bien cuantificados. Debido a que, aproximadamente, la mitad de las emisiones de carbono a la atmósfera se quedan en ella, la emisión continuada a un ritmo de 10 GtC al año seguirá incrementando los niveles de CO_2 en la atmósfera y en la superficie marina.

¿Qué pasará con este extra de CO_2 a largo plazo? Como la cantidad de carbono en los combustibles fósiles es muchísimo menor que la presente en los océanos, a «largo plazo», todo este carbono extra regresará al océano, y los niveles de carbono en la atmósfera, en la vegetación y en el terreno volverán a ser normales. Sin embargo, el «largo plazo» implica miles de años. El equilibrio entre la atmósfera y el agua *superficial* es veloz, como ya se ha comentado, pero las Figuras 31.3 y 31.4 muestran una línea discontinua que separa el agua superficial del resto del agua en los océanos. En una escala de tiempo de 50 años, esta frontera es prácticamente un muro sólido. El carbono radioactivo que se dispersó a lo largo del planeta debido a los ensayos con bombas atómicas en la década de los 60 y 70 ha penetrado en el agua marina únicamente hasta las profundidades que no superan los 400 metros, y, sin embargo, la profundidad media de los océanos es de 4000 m.

Los océanos se mueven muy despacio, un trozo de agua oceánica profunda tarda 1000 años en llegar hasta la superficie y descender de nuevo. La circulación de este agua profunda se debe a una combinación de gradientes de temperatura y de salinidad, por eso se le llama circulación termohalina (a diferencia de la circulación del agua superficial, provocada por el viento).

Esta renovación tan lenta de los océanos tiene una consecuencia esencial: tenemos suficientes combustibles fósiles como para influir seriamente sobre el clima durante los próximos 1000 años.

¿A dónde va a parar el carbono?

La Figura 31.4 es una gran simplificación. Por ejemplo, los humanos estamos causando un flujo adicional de carbono que no se muestra en este diagrama: la quema de rastrojos y bosques en Borneo en 1997 emitió a la atmósfera alrededor de 0,7 GtC. Los incendios no intencionados suelen emitir aproximadamente 0,25 GtC al año.

Sin embargo, esta figura sí que nos permite hacernos una idea general de lo que pasaría a corto y medio plazo bajo diferentes políticas. En primer lugar, si la emisión de carbono sigue una trayectoria similar a la que tenemos hoy en día, esto es, si se liberan otras 500 GtC en los próximos 50 años, podemos esperar que el carbono siga «goteando» al agua superficial de los océanos a un ritmo de 2 GtC al año. Para 2067, al menos 100 de las 500 GtC se habrían transmitido a este agua superficial y las concentraciones de CO₂ en la atmósfera doblarían los niveles de concentración que se tenían en la época pre-industrial.

Si la quema de combustibles fósiles se redujera a cero para la década de 2050, el flujo de 2 GtC de la atmósfera a los océanos se reduciría también significativamente. (Podríamos imaginar que este flujo entre océanos y atmósfera se mantendría durante décadas, pero esto solo pasaría si el agua de estos océanos y la atmósfera estuvieran en desequilibrio, sin embargo, como se mencionó anteriormente, estas dos masas alcanzan el equilibrio en unos pocos años.) Gran parte de las 500 GtC liberadas a la atmósfera se irían derivando a los océanos durante los próximos miles de años, conforme el agua superficial se fuera renovando con agua de las profundidades.

De esta forma, nuestra perturbación en las concentraciones de carbono se corregiría, pero tras miles de años. Y esto considerando que esta gran perturbación de la atmósfera no altera de forma drástica el ecosistema. Sin embargo, es posible que la acidificación del agua superficial de los océanos pudiera causar la extinción de la flora marina, llevándonos a un nuevo círculo vicioso: la acidificación supone la extinción de las plantas; esto implica que las plantas son capaces de absorber menos CO₂ de los océanos, lo que deriva en un agua de los océanos todavía más ácida. Estos círculos viciosos (que los científicos llaman «realimentación positiva») ya han ocurrido en la Tierra antes: se cree, por ejemplo, que las edades de hielo acabaron rápidamente a causa de ciclos de realimentación positiva en los que el aumento de las temperaturas provocó el deshielo de las superficie nevadas y heladas, disminuyendo la capacidad del terreno para reflejar los rayos del Sol. Esto suponía que la Tierra absorbía más calor, con lo que se incrementaban las temperaturas, ya que la nieve derretida (agua) es mucho más oscura que la nieve congelada.

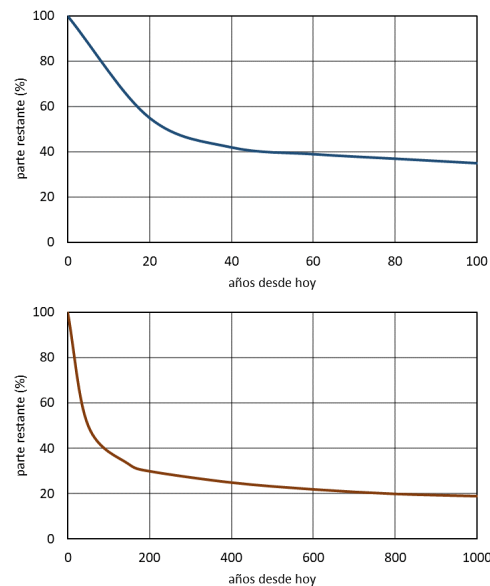


Figura 31.5: Declive de una pequeña cantidad de CO₂ añadido a la atmósfera hoy, según el modelo de Bern del ciclo del carbono. Fuente [232].

Otro ciclo de realimentación positiva del que preocuparse tiene que ver con los hidratos de metano. Estos compuestos, formados a lo largo de millones de años y almacenados en cantidades enormes en lugares como Siberia y en cantidades todavía más enormes en la corteza continental, mantienen moléculas de metano atrapadas dentro de cajas formadas por moléculas de agua. Un calentamiento global por encima de 1 °C podría derretir estos hidratos de metano, liberándolo a la atmósfera; y el metano incrementa el calentamiento global de manera más brusca de lo que hace el CO₂. Algunas estimaciones apuntan a una cantidad de metano almacenado equivalente a entre 100 y 500 veces las emisiones anuales de efecto invernadero derivadas de la quema de combustibles fósiles a nivel mundial.

En cualquier caso, el propósito de este capítulo es hablar sobre posibles soluciones para evitar el cambio climático tratando de capturar el dióxido de carbono del aire, teniendo en cuenta que esta debería de ser nuestra última alternativa. A continuación, se discute sobre el coste energético de esta captura.

El coste de capturar CO₂

Hoy en día, extraer carbono de la tierra cuesta mucho dinero. Es previsible que, en un futuro, introducir este carbono en la tierra cueste nuevamente enormes cantidades de dinero. Dado que actualmente no se están tomando medidas adecuadas para parar esta contaminación global de carbono, es posible que, con voluntad por parte de todos, se termine pagando dentro de unas décadas para crear una aspiradora gigante que sea capaz de limpiar este desastre.

Antes de describir los detalles de cómo capturar carbono del aire, veamos cuál es el inevitable coste energético de esta captura. Sea cual sea la tecnología que empleamos, esta tiene que respetar las leyes de la física y, desafortunadamente, coger CO₂ del aire y concentrarlo requiere de cierta cantidad de energía. Las leyes de la física dicen que la energía necesaria debe ser de, al menos, 0,2 kWh por kilogramo de CO₂ (ver Tabla 31.1). Suponiendo que los procesos reales suelen tener un 35% de eficiencia en el mejor de los casos, no parece que el coste energético de capturar carbono vaya a ser menor que 0,55 kWh por kg.

Ahora supongamos que queremos anular las emisiones típicas de CO₂ de un europeo, esto es, 11 toneladas al año (que se corresponden con 30 kg por persona y día). La energía necesaria, suponiendo un coste de 0,55 kWh por kg de CO₂, sería de **16,5 kWh por persona y día**. Esta cantidad es prácticamente **la demanda de energía eléctrica en España**

(que en 2016 fue de 16 kWh por persona y día). Por tanto, alimentar la aspiradora gigante supondría doblar la producción de electricidad actual en España.

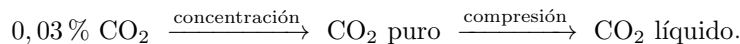
Si el coste de poner en funcionamiento estas aspiradoras se puede reducir, adelante, hagámoslo. Pero ninguna investigación o desarrollo tecnológico puede saltarse las leyes de la física, que dicen que para capturar CO₂ del aire y concentrarlo en CO₂ líquido se necesitan, al menos, 0,2 kWh por kg de CO₂.

Bueno, entonces, ¿cuál es la mejor forma de extraer CO₂ del aire? Comentaremos, a continuación, cuatro tecnologías que permitirían construir esa aspiradora gigante:

- A. bombas químicas;
- B. árboles;
- C. desgaste acelerado de rocas;
- D. nutrición del océano.

A. Técnicas químicas para capturar carbono

Las técnicas químicas tratan, normalmente, el dióxido de carbono en dos pasos:



Primero se *concentra* el CO₂ en la atmósfera para *comprimirlo* después en un pequeño volumen que se meterá en algún lugar (ya sea enterrado en un agujero en el terreno o en las profundidades del océano). Cada uno de estos dos pasos tiene un coste energético según las leyes de la física. Estos costes se han recogido en la Tabla 31.1.

En 2005, los mejores métodos publicados para capturar CO₂ del aire eran bastante ineficientes: el coste energético ascendía hasta 3,3 kWh por kg, con un coste económico de 140 \$ por cada tonelada de CO₂. Con este coste energético, capturar los 30 kg diarios de un europeo costaría **100 kWh al día**, casi la misma energía que consume ese mismo europeo al día, 112 kWh. ¿Se pueden diseñar mejores aspiradoras?

Wallace Broecker, un científico climático y, «quizás, el principal intérprete del funcionamiento de la Tierra como un sistema biológico, químico y físico», ha estado promocionando una tecnología, desarrollada por el físico Klaus Lackner, para capturar el CO₂ del aire. Broecker imagina

Tabla 31.1: El mínimo coste energético de concentrar y comprimir CO₂ del aire.

	Coste (kWh/kg)
Concentración	0,13
Compresión	0,07
Total	0,20

que el mundo seguirá quemando combustibles fósiles al mismo ritmo que lo hace ahora y que 60 millones de limpiadores de CO_2 (cada uno de ellos del tamaño de un contenedor de transporte) serán los encargados de aspirar el CO_2 . ¿Cuánta energía requiere este proceso desarrollado por Lackner? En 2007 llegaron a conseguir valores de 1,3 kWh por kg, pero, desde entonces, han desarrollado una nueva técnica basada en una resina capaz de absorber el CO_2 cuando se seca; y que lo libera al humedecerse. En un clima seco el coste energético del proceso de concentración se podría reducir hasta un rango de 0,18-0,37 kWh de energía de baja calidad por cada kg de CO_2 . El coste del proceso de compresión es de 0,11 kWh por kg. De esta forma, el coste total del proceso de Lackner es de 0,48 kWh o menos por kg. Para capturar las emisiones de un ciudadano europeo, 30 kg diarios de CO_2 , estaríamos hablando de un coste energético de **14 kWh al día**, de los cuales **3,3 kWh al día** serían de energía eléctrica y el resto en forma de calor.

¡Un hurra por el progreso tecnológico! Pero, por favor, no pienses que este es un coste pequeño. Necesitaríamos aproximadamente un incremento de un 20% de la producción energética mundial para hacer funcionar estas aspiradoras.

B. ¿Qué pasa con los árboles?



Figura 31.6: CO_2 capturado.

Los árboles son sistemas de captación de carbono; son capaces de absorber el CO_2 del aire sin vulnerar ninguna ley de la física. En realidad son dos máquinas en un mismo sistema: son captadores de carbono alimentados por una estación de generación solar incorporada, es decir, son capaces de absorber el carbono utilizando la energía que obtienen de la luz solar. Los combustibles fósiles que quemamos fueron creados originalmente gracias a este proceso. La propuesta es la siguiente, ¿y si intentamos hacer lo contrario a la quema de combustibles fósiles? ¿Si creamos madera y la enterramos en un agujero, mientras, por otro lado, la humanidad sigue desenterrando madera fosilizada y le prende fuego? Es estúpido imaginarse esta situación en la que se crea madera y se entierra al mismo tiempo que se desentierra. Aun así, calculemos el área necesaria para resolver el problema climático con árboles.

Las mejores plantaciones en Europa captan carbono a un ritmo de aproximadamente 10 toneladas de madera seca por hectárea al año, equivalente a 15 toneladas de CO_2 por hectárea al año. Así que, para compensar las emisiones europeas de 11 toneladas de CO_2 al año, necesitamos 7500 m^2 de bosque por persona. Esta área necesaria de 7500 m^2 por persona es *tres cuartas partes del área que tenemos en España* por persona. Y, además, habría que contar con un lugar para que cada

1 hectárea = 10 000 m^2

persona pudiera acumular 7,5 toneladas de madera cada año. Con una densidad de 500 kg/m^3 , la madera de cada persona ocuparía 15 m^3 . La madera de toda la vida, que, recuerda, debería ser almacenada sin quemarla, ocuparía 1000 m^3 . Este volumen es cinco veces el volumen que ocupa una casa típica. Si alguien propone utilizar los árboles como medida contra el cambio climático, debería ser consciente del tamaño necesario de las instalaciones.

C. *Desgaste de las rocas*

¿Hay alguna forma escurridiza de evitar el elevado coste energético de las técnicas descritas para captar el carbono? Os presentamos una interesante idea: pulverizar rocas que sean capaces de absorber CO_2 y dejarlas al aire libre. Esta idea se puede considerar como una aceleración del proceso geológico natural. Mira qué curioso:

Dos flujos de carbono que se han omitido en la Figura 31.4 son el flujo de carbono desde el suelo a los océanos, asociado al desgaste natural de las rocas; y la precipitación natural de carbono en los sedimentos marinos, que finalmente acaban en las rocas. Estos flujos son relativamente pequeños, suponiendo aproximadamente $0,2 \text{ Gt de C al año}$ ($0,7 \text{ Gt de CO}_2$ al año). Por eso, son despreciables al lado de las emisiones humanas, que son unas 40 veces mayores. Pero la sugerencia de los defensores del *desgaste de rocas mejorado* es que podríamos resolver el problema del cambio climático si aceleráramos la velocidad a la que las rocas se rompen de forma natural y absorben el CO_2 . Las rocas apropiadas para esta rotura son las del grupo de los minerales olivinos o los silicatos de magnesio, que están por todas partes. La idea sería encontrar minas en lugares rodeados por muchos kilómetros cuadrados de terreno sobre los que se pudieran esparcir las rocas machacadas, o, quizás, esparcir estas rocas troceadas directamente en los océanos. De cualquiera de las maneras, estas rocas absorberían el CO_2 que se convertiría en carbonato y estos carbonatos resultantes acabarían en el océano. La pulverización de las rocas en granos suficientemente pequeños como para que puedan reaccionar con el CO_2 requiere de tan solo **$0,04 \text{ kWh por kg de CO}_2$ captado**. Un momento, ¿no es esa cifra menor que los $0,20 \text{ kWh por kg}$ que se requerían según las leyes de la física? Sí, pero no es un error: las propias rocas son la fuente de esta energía perdida. Los silicatos tienen más energía que los carbonatos, por eso las rocas pagan el coste energético de captar el CO_2 del aire.

Nos gusta el pequeño coste energético de esta técnica, pero la pregunta ahora es: ¿quién querría voluntariamente cubrir su país con roca pulverizada?

D. Nutrición del océano

Un problema con las técnicas químicas, el método de los árboles y el de pulverizar las rocas para absorber el CO₂ del aire es que todos requieren una gran inversión de trabajo, y ninguno tiene incentivos (a no ser que un acuerdo internacional decida pagar por la captura de carbono). De momento, los precios del carbono son demasiado bajos.

Una idea final para capturar el carbono podría esquivar esta dificultad. La idea es convencer al océano de que capture el carbono un poco más rápido de lo que hace normalmente como consecuencia de la cría de peces.

Algunas regiones del mundo tienen escasez de alimentos. Hay escasez de peces en muchas regiones debido a la sobrepesca realizada durante los últimos 50 años. Esta idea de *nutrir al océano* supondría abonar los océanos, manteniendo la base de la cadena alimentaria, permitiendo que estos océanos puedan albergar más flora y fauna marina y de esta manera puedan fijar más carbono. Dirigidos por el científico australiano Ian Jones, los ingenieros que desarrollan esta nutrición del océano bombardearían fertilizantes ricos en nitrógeno, como la urea, en aquellas regiones con escasez de peces. Ellos afirman que alimentando 900 km² de océano se podrían absorber 5 Mt de CO₂ al año. Jones y sus colegas estiman que este proceso de nutrición de los océanos es apropiado para muchas zonas de los océanos pobres en nitrógeno. Esto incluye la mayor parte del Atlántico Norte. Pongamos esta idea sobre un mapa. Las emisiones españolas de CO₂ ascienden a 302 Mt al año. Por tanto, para neutralizar completamente estas emisiones se necesitarían 60 regiones de 900 km².

El mapa de la Figura 31.7 muestra estas zonas a lo largo de la costa española. Como de costumbre, un plan de estas características requiere de instalaciones de un enorme tamaño. Por no hablar de cómo podríamos conseguir la urea necesaria para desarrollar esta técnica.

A pesar de ser una idea todavía no probada y actualmente no legal, puede que sea interesante en el futuro, ya que, al contrario que el almacenamiento de carbono geológico, es una tecnología que podría utilizarse incluso sin el respaldo de la comunidad internacional. Los pescadores podrían nutrir los océanos con el propósito de, simplemente, conseguir más pescado.

Una técnica similar consiste en esparcir por el océano sulfato de hierro, con similares efectos a los vistos anteriormente. Un equipo alemán lo puso en práctica en 2009, con no poca controversia, como parte del proyecto LOHAFEX. Otros proyectos similares, como el EIFEX, también lo han probado.

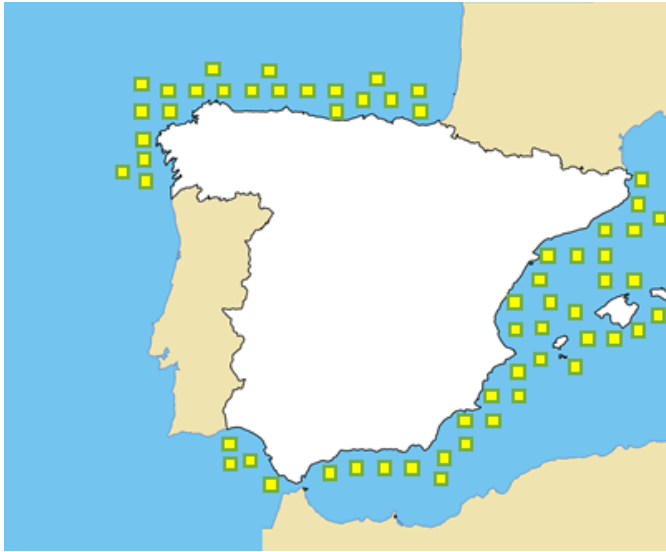


Figura 31.7: 60 zonas, de 900km² cada una, en los mares y océanos que rodean la costa española. Esto constituye el área necesaria para resolver las emisiones de carbono de España empleando la técnica de la nutrición del océano.

¿Y si todo lo demás falla?

¿No era la captura de CO₂ la última cosa de la que deberíamos hablar? Bien, pues hay propuestas que van más allá. El calentamiento global tiene muy diversas causas, pero sin duda, ese calor proviene del Sol. Entonces, la solución es obvia, ¡tapémoslo! Esta idea ha sido sugerida en varios estudios que proponen pulverizar ácido sulfúrico a 20 km de altitud para, junto con el agua, formar aerosoles que reflejen la luz del sol; otros, simplemente, sugieren pulverizar fina roca, con el mismo objetivo. Estamos hablando de conseguir un sombreado de hasta un 2%, imperceptible para el ojo humano, pero con inmensas consecuencias. ¿Es buena idea conocer la raíz del problema pero atacar por otro lado? ¿Es sensato llevar a cabo semejantes obras de geoingeniería sin conocer bien todas sus consecuencias? Parece un plan viable, pero esta sí es *la última cosa de la que deberíamos hablar*.

Ahora que finalmente nos hemos dado cuenta del terrible daño que hemos ocasionado al medio ambiente, estamos extremando nuestro ingenio para hallar soluciones tecnológicas. Pero la tecnología por sí sola no basta. También tenemos que poner el corazón.

Jane Goodall
(primatóloga y antropóloga inglesa)

Notas y textos de consulta

Página

- 310 *¿Dónde está el carbono?* Fuentes: [233, 234].
- 311 *El ritmo al que se quemaban los combustibles fósiles...* Información obtenida de la base de datos <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>.
- 312 *...hay estudios recientes que revelan que este ritmo de captura del carbono por parte del agua puede estar reduciéndose.* Fuente: [235].
- 312 *...aproximadamente la mitad de las emisiones de carbono a la atmósfera se quedan en ella.* Se requieren 2100 millones de toneladas de carbono en la atmósfera (7,5 Gt de CO₂) para elevar la concentración atmosférica de CO₂ en una parte por millón (1 ppm). Si todo el CO₂ que emitimos a la atmósfera se quedase ahí, la concentración iría aumentando en 3 ppm al año, pero realmente se está incrementando en solo 1,5 ppm al año.
- 312 *El carbono radioactivo [...] ha penetrado en el agua marina únicamente hasta profundidades que no superan los 400 metros.* El valor medio de la profundidad a la que había penetrado el átomo ¹⁴C en todos los lugares donde se midió en los últimos años de la década de los 70 era de 390 ± 29 m ([236]). Fuente: [237].
- 314 *Un calentamiento global por encima de 1 °C podría derretir estos hidratos de metano.* Fuente: [232].
- 315 *Tabla 31.1 El mínimo coste energético de concentrar y comprimir CO₂ del aire.* El inevitable requerimiento energético de pasar de una concentración de CO₂ del 0,03% a una del 100% a presión atmosférica es $kT \ln(100/0,03)$ por molécula, lo que se traduce en 0,13 kWh por kg. El coste energético ideal de comprimir el CO₂ hasta 110 bar (presión mencionada para el almacenamiento geológico) es de 0,067 kWh/kg. Por tanto, el coste energético total (captura y compresión) asciende a 0,2 kWh/kg. Según el informe especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) sobre la captación y almacenamiento de carbono, el coste práctico de la segunda fase, la compresión del CO₂ a 110 bar, es de 0,11 kWh por kg. (0,4 GJ por t de CO₂; 18 kJ por mol de CO₂).
- 315 *Primero se concentra el CO₂ en la atmósfera para comprimirlo después en un pequeño volumen que se meterá en algún lugar (ya sea enterrado en un agujero en el terreno o en las profundidades del océano).* Ver [160] para conocer más sobre el tema: «para que una gran parte del CO₂ inyectado se quede en los océanos, este debe ser depositado a grandes profundidades. Por consenso se están considerando profundidades de 1000-1500 m, que se pueden alcanzar con la tecnología existente». Consultar también el Informe Especial del IPCC: [238].
- 315 *En 2005, los mejores métodos publicados para capturar CO₂ del aire eran bastante ineficientes: el coste energético ascendía hasta 3,3 kWh por kg, con un coste económico de 140 \$ por cada tonelada de CO₂.* Fuentes: [239, 240, 241, 242, 243].
- 316 *Las mejores plantaciones en Europa captan carbono a un ritmo de, aproximadamente 10 toneladas de madera seca por hectárea al año.* Fuente: Select Committee on Science and Technology del parlamento británico.
- 317 *Desgaste de las rocas.* Ver: [244].
- 318 *Nutrición del océano.* Ver: [245]. Ver también [246]. Los riesgos de nutrir los océanos se comentan en [247].

Capítulo 32

Diciendo que sí

*No hay pasajeros en la nave espacial Tierra.
Todos somos tripulantes.*

Marshall McLuhan

Como España obtiene el 75 % de su energía de combustibles fósiles, no es de extrañar que, si queremos dejar de emplear esta fuente de energía, se necesiten cambios muy, muy grandes: un cambio absoluto en el parque de vehículos, un cambio completo en los sistemas de climatización y calefacción de los hogares y multiplicar por 10 el uso de energías verdes.

Dada la tendencia general de la gente a decir «no» a los parques eólicos, «no» a las centrales nucleares, «no» a las centrales maremotrices, en definitiva, «no» a cualquier alternativa a los combustibles fósiles, da algo de miedo que no dejemos de usar este tipo combustibles no sostenibles a tiempo. Y si, por el contrario, optamos por centrales eléctricas que emplean combustibles fósiles, vehículos y sistemas de calefacción tradicionales que sean ligeramente más eficientes y una pequeña pizca de energía eólica y solar, nos estaremos quedando a medio camino entre la situación energética actual y el panorama al que deberíamos aspirar.

Necesitamos seguir un plan que sume. De hecho, *sí*, es posible crear un plan que mire hacia adelante y proponga alternativas reales, aunque no vaya a resultar fácil.

Tenemos que dejar de decir *no* y empezar a decir *sí*. Tenemos que abandonar los teatros que no llevan a nada y empezar a construir de verdad.

Si quieres que haya una política energética honesta y realista que contribuya al bien de todos, por favor, pídeselo a tus representantes políticos y a los posibles candidatos.

Parte III

Apéndices técnicos

Apéndice A

Coches II

En el Capítulo 3 hemos estimado que un coche consume aproximadamente 70 kWh para recorrer 100 km.

¿Para qué se utiliza esta energía? ¿Cuál es la influencia de las características de cada coche en este consumo? ¿Podríamos diseñar coches que fueran 100 veces más eficientes? Realicemos un esquema para entender en qué se gasta esa energía. En el caso de un coche típico con motor de combustión, este consumo se reparte en cuatro grandes bloques:

1. Acelerar y posteriormente reducir la velocidad utilizando los frenos.
2. Resistencia aerodinámica.
3. Rozamiento con la carretera.
4. Calor: el 75% de la energía se convierte en calor, debido a la baja eficiencia del ciclo de conversión.

Inicialmente ignoraremos el rozamiento con la carretera. Sin embargo, lo tendremos en cuenta más adelante en este capítulo.

Supongamos que un conductor acelera rápidamente hasta una velocidad v , y mantiene dicha velocidad durante una distancia d , que será la distancia hasta que se encuentre con un semáforo en rojo, una señal de *stop*, o algún atasco. Una vez recorrida esa distancia, el conductor pisa el pedal del freno y toda la energía cinética se convierte en calor mediante los frenos (por desgracia este coche no tiene un sistema de frenada regenerativa). Posteriormente, el conductor vuelve a acelerar hasta la velocidad v . Cada vez que acelera acumula energía cinética y, cada vez que frena, la libera en forma de calor.

Pero la energía no se pierde únicamente a través de los frenos: cuando el coche se mueve, existe una fricción con el aire que lo rodea. El coche deja tras de sí una estela de aire arremolinado, que se mueve a una velocidad similar a v . La primera pregunta que nos hacemos es: ¿cuál de estos dos consumos de energía es mayor? ¿La energía cinética perdida

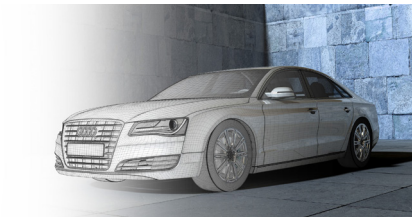


Figura A.1: Un Audi A8 tiene un coeficiente aerodinámico de 0,27.

La fórmula clave para la mayoría de los cálculos es:

$$\text{energía cinética} = \frac{1}{2}mv^2.$$

Por ejemplo, un coche de 1000 kg que circula a 100 km/h tiene una energía cinética igual a:

$$\frac{1}{2}mv^2 \simeq 390\,000 \text{ J} \simeq 0,1 \text{ kWh}.$$

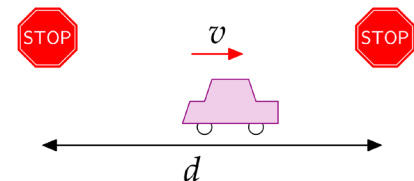
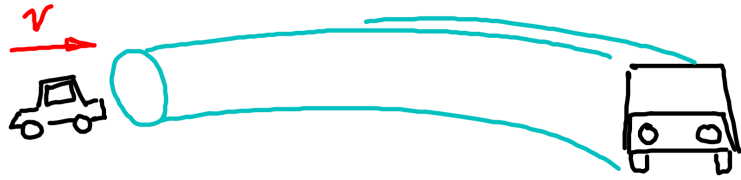


Figura A.2: Nuestro esquema: un coche se mueve a la velocidad v entre dos paradas separadas por una distancia d .

Figura A.3: Un coche que se mueve a velocidad v deja tras de sí una estela de aire turbulento; la sección transversal de esta esfera es similar al área frontal del coche, y la velocidad a la que se mueven los remolinos de aire es aproximadamente v .



por el rozamiento aerodinámico o la que se libera en forma de calor en los frenos? Vamos a calcularlo:

- El coche acelera y frena una vez en cada tramo d . El ritmo al que la energía se disipa en los frenos es:

$$\frac{\text{Energía cinética}}{\text{Tiempo entre dos frenadas}} = \frac{\frac{1}{2}m_c v^2}{d/v} = \frac{\frac{1}{2}m_c v^3}{d}, \quad (\text{A.1})$$

donde m_c es la masa del coche.

- La estela de aire creada en un instante t tiene un volumen Avt , donde A es la sección transversal de la estela, que será similar al área frontal del coche (para un coche con buena aerodinámica, A es ligeramente menor que el área frontal A_{coche} , y el ratio entre la sección transversal de la estela y el área frontal del coche es conocido como coeficiente de resistencia aerodinámica C_x . En adelante, el parámetro A hará referencia al área efectiva del coche, es decir, $C_x \cdot A_{\text{coche}}$). La estela tiene una masa de aire $m_{\text{aire}} = \rho Avt$ (donde ρ es la densidad del aire), por lo que su energía cinética es:

$$\frac{1}{2}m_{\text{aire}}v^2 = \frac{1}{2}\rho Avt v^2,$$

y el ritmo al que se transfiere energía cinética al aire en movimiento es:

$$\frac{\frac{1}{2}\rho Avt v^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3.$$

Por tanto, la potencia total liberada por el coche es: potencia disipada en los frenos + potencia transferida a la estela de aire:

$$= \frac{1}{2}m_c v^3 / d + \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (\text{A.2})$$

Estamos utilizando esta fórmula:

masa = densidad \times volumen

El símbolo ρ (letra griega *rho*) hace referencia a la densidad.

Ambas potencias son proporcionales al cubo de la velocidad, lo que muestra que reducir a la mitad la velocidad hace que la potencia sea 8 veces menor. Si el conductor termina recorriendo la misma distancia, habrá tardado el doble de tiempo, pero la energía consumida será la cuarta parte.

¿Cuál de las dos formas de disipación de energía –frenos o rozamiento aerodinámico– es mayor? Dependerá del ratio

$$\frac{(m_c/d)}{(\rho A)}$$

Si este ratio es mayor que 1, entonces se liberará más energía en los frenos. Si es menor, será el rozamiento aerodinámico el que disipe más energía. Reorganizando este ratio, podemos comprobar que será mayor que 1 si

$$m_c > \rho A d.$$

El producto Ad es el volumen de la estela de aire desde una frenada hasta la siguiente, por lo que ρAd es la masa de esa estela. Así que podemos extraer la siguiente conclusión: la disipación de energía estará dominada por la frenada si la masa del coche es *mayor* que la de la estela de aire entre una frenada y la siguiente, y viceversa (Figura A.4).

Vamos a calcular la distancia d^* entre frenadas, por debajo de la cual la disipación está dominada por la frenada y por encima de la cual predominará la disipación por resistencia aerodinámica. Si el área frontal del coche es:

$$A_{\text{coche}} = 2 \text{ m de ancho} \times 1,5 \text{ m de alto} = 3 \text{ m}^2,$$

el coeficiente aerodinámico $C_x = 1/3$ y la masa es $m_c = 1000 \text{ kg}$, esta distancia será:

$$d^* = \frac{m_c}{\rho C_x A_{\text{coche}}} = \frac{1000 \text{ kg}}{1,3 \text{ kg/m}^3 \times \frac{1}{3} \times 3 \text{ m}^2} = 750 \text{ m}.$$

Por tanto, en la conducción por ciudad predomina la energía disipada en los frenos si la distancia entre frenadas es inferior a 750 m. Bajo estos supuestos, si queremos ahorrar energía, serían buenas ideas:

1. Reducir el peso del coche.
2. Comprar un coche con frenada regenerativa (reduce aproximadamente a la mitad la energía perdida en cada frenada –ver Capítulo 20–).
3. Conducir más despacio.

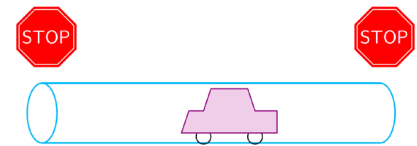


Figura A.4: Para saber si el consumo de energía está dominado por las frenadas o por la resistencia aerodinámica, comparamos la masa del coche con la masa de la estela de aire entre dos paradas.

Tabla A.1: Cosas a recordar: consumo de un coche.

ENERGÍA POR DISTANCIA	
Coche a 110 km/h	73 kWh/100 km
Bicicleta a 22 km/h	2,2 kWh/100 km
AVIONES A 900 km/h	
A380	27 kWh/100 km-asiento

Si la distancia entre paradas es superior a 750 m, la disipación de energía está dominada por la resistencia aerodinámica. Bajo estas condiciones no importa mucho el peso del coche, y la disipación de energía será la misma transportando una persona que seis. Para reducir esta disipación, podríamos:

1. Reducir el coeficiente de resistencia aerodinámica del coche.
2. Reducir la sección transversal.
3. Conducir más despacio.

El consumo de energía total del coche será igual a la disipación calculada en la Ecuación A.2, multiplicada por un factor relacionado con la baja eficiencia del motor y la transmisión. Los motores de gasolina típicos tienen aproximadamente un 25% de eficiencia, por lo que tres cuartas partes de la energía química que engulle el coche se malgastan en hacer que el motor y el radiador del coche se calienten, mientras que solo una cuarta parte se transforma en energía útil:

$$\text{consumo del coche} \simeq 4 \left[\frac{1}{2} m_c v^3 / d + \frac{1}{2} \rho A v^3 \right].$$

Tabla A.2: Coeficientes de resistencia aerodinámica. Los datos para los coches corresponden a los modelos en venta en 2017.

COEFICIENTE AERODINÁMICO	
COCHES	
Mercedes CLA	0,22
Audi A4	0,23
Tesla Model S	0,24
Toyota Prius	0,24
BMW Serie 3	0,27
Honda Civic	0,27
VW Passat CC	0,28
Lexus CT 200h	0,29
Audi Q5	0,30
VW Tiguan	0,31
Ciclista	1
Autobús	0,425
AVIONES	
Cessna	0,027
Learjet	0,022
Boeing 747	0,031

Vamos a comprobar esta teoría aplicándola a algunos casos realistas. Supongamos $v = 110 \text{ km/h} = 31 \text{ m/s}$ y $A = 1 \text{ m}^2$. El consumo aproximado del motor será:

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3 = 2 \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ m}^2 \times (31 \text{ m/s})^3 = 80 \text{ kW}.$$

Si condujeras tu coche a esta velocidad durante una hora cada día, harías 110 km/día y se utilizarían **80 kWh**, o, lo que es lo mismo, **73 kWh** a los 100 km. Si lo hicieras a la mitad de velocidad y durante el doble de tiempo, habrías recorrido la misma distancia consumiendo **20 kWh** de energía. Las simplificaciones realizadas parecen coherentes con lo analizado en el Capítulo 3. Además, estos cálculos nos dan una visión de cómo podríamos reducir la energía consumida por el coche.

¿Podríamos diseñar un nuevo coche que consumiera 100 veces menos y pudiera circular a 110 km/h? **No**. No si el coche tiene la misma forma que los actuales. En una autopista la mayor parte de la energía se va a disipar por culpa de la resistencia aerodinámica. Modificar los materiales del coche no mejoraría esta disipación. Quizás una mejora en los motores de combustión pueda elevar su eficiencia hasta el 50%, rebajando la energía consumida a apenas 40 kWh/100 km.

Los coches eléctricos tienen algunas ventajas: a pesar de que el peso del depósito de energía, por cada kWh útil almacenado, es 25 veces

superior al de un coche de combustión, el peso del motor eléctrico es unas 8 veces menor. Además, la transformación de energía es mucho más eficiente, llegando a rendimientos del 90 %.

Volveremos al tema de los coches eléctricos con mayor detalle al final del capítulo.

Las bicicletas y el truco de las escalas

Una pregunta interesante: ¿cuál es la energía consumida por una bicicleta en kWh por cada 100 km? Desplazarse en bicicleta requiere energía por el mismo motivo que hacerlo en coche, está dejando tras de sí una estela de aire en movimiento. Podríamos rehacer todos los cálculos sustituyendo los parámetros relativos a los coches por otros relativos a las bicicletas, pero hay un truco muy simple que podemos utilizar para obtener la respuesta partiendo de los datos obtenidos antes. La energía consumida por el coche al recorrer una distancia dada es igual a la asociada a la resistencia aerodinámica,

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3,$$

dividida por la velocidad, v , es decir:

$$\text{energía por unidad de distancia} = 4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2.$$

Recordemos que ese «4» proviene de la baja eficiencia del motor, ρ es la densidad del aire, $A = C_x A_{\text{coche}}$ es el área frontal efectiva del coche y v su velocidad.

Ahora, para comparar la bicicleta con el coche, dividimos el consumo de la primera entre el consumo del segundo. Las densidades y los coeficientes se anulan si la eficiencia del *motor de combustión* de la bicicleta es similar a la del motor del coche (que lo es). El ratio resultante es:

$$\frac{\text{energía por unidad de distancia en bicicleta}}{\text{energía por unidad de distancia en coche}} = \frac{C_x^{\text{bici}} A_{\text{bici}} v_{\text{bici}}^2}{C_x^{\text{coche}} A_{\text{coche}} v_{\text{coche}}^2}.$$

El truco que hemos utilizado se conoce como «escalado». Si sabemos cómo escalar el consumo de energía con la velocidad y el área, entonces

podremos predecir el consumo energético de objetos con velocidades y secciones totalmente diferentes. Concretamente, asumamos que:

$$\frac{A_{\text{bici}}}{A_{\text{coche}}} = \frac{1}{4}.$$

(Cuatro ciclistas podrían ponerse hombro con hombro ocupando la anchura de un coche.) En cuanto a la aerodinámica, la bicicleta estará mucho peor diseñada que el coche, así que:

$$\frac{C_x^{\text{bici}}}{C_x^{\text{coche}}} = \frac{1}{1/3}.$$

Y por último, consideremos que la bicicleta circula a 22 km/h, así que:

$$\frac{v_{\text{bici}}}{v_{\text{coche}}} = \frac{1}{5}.$$

Teniendo esto en cuenta:

$$\begin{aligned} \frac{\text{energía por unidad de distancia en bicicleta}}{\text{energía por unidad de distancia en coche}} &= \left(\frac{C_x^{\text{bici}}}{C_x^{\text{coche}}} \frac{A_{\text{bici}}}{A_{\text{coche}}} \right) \left(\frac{v_{\text{bici}}}{v_{\text{coche}}} \right)^2 \\ &= \left(\frac{3}{4} \right) \times \left(\frac{1}{5} \right)^2 \\ &= \frac{3}{100}. \end{aligned}$$

Así que un ciclista a 22 km/h consume aproximadamente un 3% de la energía por km que consume un coche circulando por carretera –aproximadamente 2,2 kWh cada 100 km–.

Si lo que buscas es un vehículo cuya eficiencia sea 30 veces mejor que la de un coche, es fácil: muévete en bici.

¿Qué hay de la resistencia a la rodadura?

Una de las cosas que hemos ignorado por completo hasta ahora es la energía consumida en las ruedas y los rodamientos del coche, la energía que se convierte en el calor que desprenden los neumáticos debido a su constante deformación, la energía que produce el ruido de los neumáticos que ruedan sobre el asfalto, la energía que se convierte en desprendimiento de goma de las ruedas y la energía perdida en vibraciones sobre el suelo. Todas estas formas de energía las englobamos dentro de lo que llamamos *resistencia a la rodadura*. El modelo típico de esta resistencia asume que su valor es proporcional al peso del vehículo e

independiente de la velocidad. A la constante de proporcionalidad se le llama coeficiente de resistencia a la rodadura, C_{rr} . La Tabla A.3 muestra algunos valores típicos.

El coeficiente de resistencia a la rodadura de un coche está próximo a 0,01. El efecto de esta resistencia es el que supondría subir permanentemente por una colina con una pendiente del 1%. Así que el rozamiento es de aproximadamente 100 N por tonelada, independientemente de la velocidad. Esto se puede confirmar de forma muy sencilla empujando el típico coche de una tonelada a lo largo de una carretera llana. Una vez has conseguido que se empiece a mover verás que puedes mantenerlo en movimiento con una mano (100 N equivale al peso de 50 manzanas). Así que a una velocidad de 31 m/s, la potencia necesaria para vencer esa resistencia a la rodadura, para un coche de una tonelada, es

$$\text{fuerza} \times \text{velocidad} = (100 \text{ N}) \times (31 \text{ m/s}),$$

que, en el caso de tener un motor con una eficiencia del 25%, requiere 12 kW de potencia (mientras que la potencia requerida para vencer el rozamiento aerodinámico calculado en la página 328 es de 80 kW). Por tanto, a altas velocidades, aproximadamente el 15% de la potencia se utiliza para vencer la resistencia a la rodadura.

Tabla A.3: La resistencia a la rodadura es igual al peso del vehículo multiplicado por el coeficiente de resistencia a la rodadura, C_{rr} . Esta resistencia incluye la fuerza debida a la deformación de la rueda, las pérdidas por fricción en los rodamientos de la rueda, vibraciones en el asfalto y en el vehículo (incluida la energía absorbida en los amortiguadores) y el deslizamiento de las ruedas sobre la carretera. El coeficiente varía con la calidad de la carretera, el material de la rueda y con la temperatura.

Rueda	C_{rr}
Tren (acero sobre acero)	0,002
Rueda de bicicleta	0,005
Rueda de camión	0,007
Rueda de coche	0,010

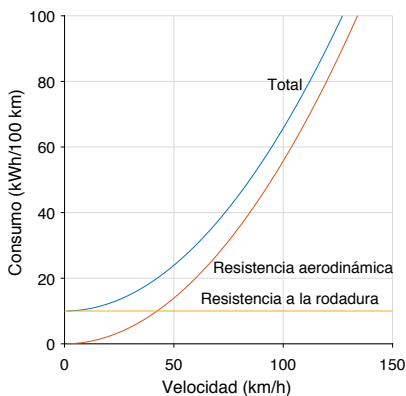


Figura A.5: Consumo teórico de un coche (energía por distancia recorrida). Suposiciones: el motor tiene una eficiencia del 25% a cualquier velocidad, el área frontal efectiva es de 1 m², tiene una masa de 1000 kg y un coeficiente de resistencia a la rodadura de 0,01.

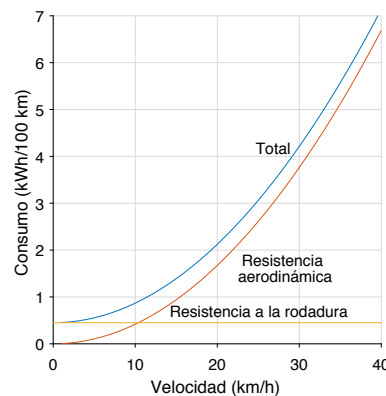


Figura A.6: Consumo teórico de una bicicleta (energía por distancia recorrida). Suposiciones: el motor (es decir, ¡tú!) tiene una eficiencia del 25% a cualquier velocidad, el área frontal efectiva es de 0,75m², $m = 90 \text{ kg}$ y $C_{rr} = 0,005$.

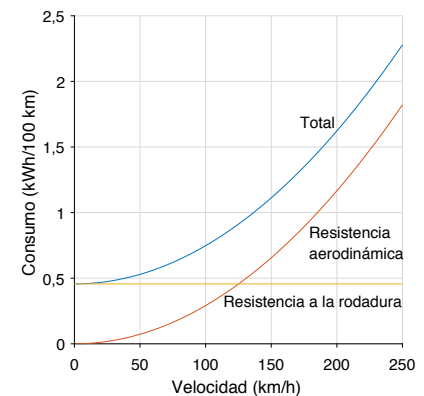


Figura A.7: Consumo teórico de un tren, por pasajero, para un tren de 8 vagones y 584 pasajeros. Suposiciones: el motor tiene una eficiencia del 90%, el área frontal efectiva es de 11 m², $m = 400\,000 \text{ kg}$ y $C_{rr} = 0,002$.

La Figura A.5 muestra el consumo teórico de gasolina (energía por unidad de distancia) en función de la velocidad, cuando sumamos la resistencia a la rodadura y la resistencia aerodinámica.

La velocidad a la que ambas resistencias son iguales se puede calcular a partir de:

$$C_{rr}m_c g = \frac{1}{2}\rho C_x A v^2,$$

que nos da como resultado

$$v = \sqrt{2 \frac{C_{rr}m_c g}{\rho C_x A}} = 13 \text{ m/s} = 47 \text{ km/h.}$$

Bicicletas

Para una bicicleta ($m = 90 \text{ kg}$, $A = 0,75 \text{ m}^2$), la transición entre un movimiento dominado por la resistencia a la rodadura y uno dominado por la resistencia aerodinámica se da a una velocidad de aproximadamente 12 km/h. Circulando a 20 km/h, la bicicleta consume aproximadamente **2,2 kWh cada 100 km**. Si se circula adoptando una postura más aerodinámica, se puede reducir el área frontal y bajar el consumo hasta los 1,6 kWh cada 100 km.

Trenes

Para un tren de 8 vagones con $m = 400\,000 \text{ kg}$ y $A = 11 \text{ m}^2$, la velocidad a partir de la cual la resistencia aerodinámica supera a la de rodadura es

$$v = 33 \text{ m/s} = 119 \text{ km/h.}$$

Para un tren de un solo vagón ($m = 50\,000 \text{ kg}$, $A = 11 \text{ m}^2$), la velocidad a partir de la cual la resistencia aerodinámica supera a la de rodadura es

$$v = 12 \text{ m/s} = 43 \text{ km/h.}$$

Relación entre potencia y velocidad

Cuando hemos dicho que reducir la velocidad a la mitad podría reducir el consumo energético a un cuarto, es probable que haya gente que no se lo termine de creer. Hay un motivo: la mayor parte de los motores

de los coches tienen un punto óptimo de funcionamiento, que se da a unas determinadas revoluciones por minuto, y variando las marchas de los coches podemos elegir en qué rangos de velocidad se obtiene ese rendimiento óptimo. Si hiciéramos una prueba haciendo funcionar el coche fuera de estos rangos, el consumo no bajaría tanto como a la cuarta parte del original. En nuestra suposición, el motor tenía la misma eficiencia a cualquier velocidad y, por lo tanto, reducirla siempre era una buena idea. Sin embargo, si la eficiencia del motor se reduce a bajas revoluciones por minuto, lo ideal sería funcionar a una velocidad intermedia que mantenga un buen compromiso entre la eficiencia del motor y el rozamiento. Para un BMW 318ti, por ejemplo, la velocidad óptima ronda los 60 km/h, como puedes ver en la Figura A.8. Aun así, si la sociedad decidiera que la velocidad de los coches fuera menor, no hay nada que impida rediseñar los motores y las marchas para conseguir altas eficiencias a las velocidades adecuadas. Como prueba de que la potencia que necesita un coche para moverse se incrementa con el cubo de la velocidad, la Figura A.9 muestra la potencia del motor frente a la velocidad máxima de una serie de coches. Esta gráfica muestra que la potencia es proporcional a v^3 .

Coches eléctricos. ¿Es la autonomía un problema?

Mucha gente dice que la autonomía de los coches eléctricos no es suficiente. Los fabricantes ante esto siempre responden «no hay problema, se pueden poner más baterías» –y es verdad, pero, además del sobrecoste, hay que analizar el efecto que tienen esas baterías extra en el consumo del coche–. La respuesta depende de la densidad energética de las baterías. Para una densidad de 40 Wh/kg (típica en baterías de plomo), es difícil aumentar la autonomía más allá de los 200 o 300 km; sin embargo, con la llegada de las baterías de litio, con densidades cercanas a los 180 Wh/kg es factible alcanzar hoy en día autonomías superiores a los 500 km. Pero veamos de qué estamos hablando.

Para los siguientes cálculos, supongamos que el peso del coche y sus ocupantes es de unos 740 kg, *sin* baterías. A este coche añadiremos 100, 200, 300, 500 y hasta 700 kg de baterías (con una densidad de 150 Wh/kg) y veremos qué ocurre en los dos casos típicos de conducción. El primero, una conducción por ciudad a 50 km/h con paradas cada 500 m (en las que la frenada regenerativa recupera un 50% de la energía cinética del coche); y el segundo, conducción en autopista, de forma ininterrumpida a 120 km/h. En ambos casos supondremos un área frontal efectiva de 0,8 m², una resistencia a la rodadura de 0,01 y una eficiencia del motor del 85%. La Figura A.10 resume estos cálculos

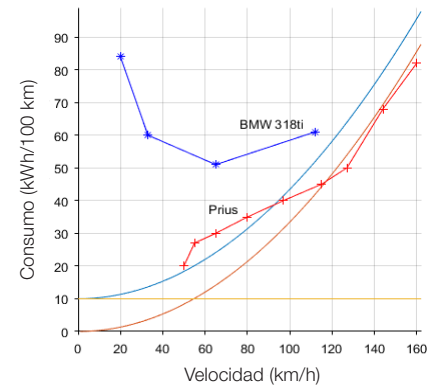


Figura A.8: El consumo real de los coches no varía con el cuadrado de la velocidad. Los datos sobre el Prius se han obtenido de B. Z. Wilson. Los datos del BMW de Phil C. Stuart. Las curvas superpuestas muestran el consumo teórico asumiendo un área frontal efectiva de 0,6 m².

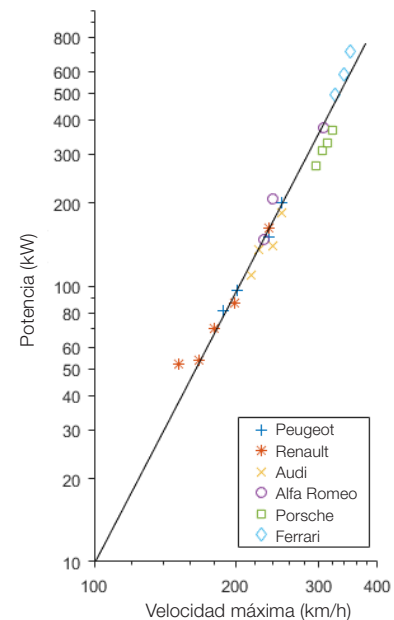


Figura A.9: Potencia de diferentes coches (kW) frente a su velocidad máxima (km/h). Ambas escalas son logarítmicas. La potencia varía con el cubo de la velocidad. En otras palabras, para conseguir el doble de velocidad se necesita multiplicar por 8 la potencia. Datos de www.km77.com.

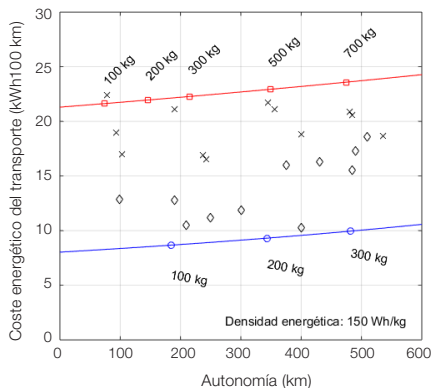


Figura A.10: Las líneas azul y roja representan el cálculo teórico de la autonomía (eje horizontal) y del coste energético del transporte (eje vertical) en función del peso de la batería, para dos formas de conducción: ciudad y autopista. Un coche con 200 kg de baterías de litio tiene una autonomía de 350 km en ciudad, pero apenas podría recorrer unos 150 km en carretera, debido al consumo extra de ir a gran velocidad. Las equis indican valores de consumo y autonomía de coches reales según el estándar EPA, y los rombos, según el NEDC.

de forma ordenada, mostrando el coste energético de moverse en este coche frente a su autonomía, que aumentamos añadiendo más baterías. La curva inferior muestra la conducción en ciudad. El consumo es muy inferior al de autopista (curva superior), por lo que se consiguen autonomías mucho mayores para un mismo tamaño de baterías. En ciudad parece que la autonomía no es un problema. Teóricamente, con 100 kg de baterías (unos 15 kWh) se podrían recorrer unos 180 km, lo cual es de sobra para la mayoría de los trayectos urbanos, durante varios días sin recargar. Por otro lado, la curva superior muestra la conducción en autopista. El consumo por cada 100 km es casi el doble que en ciudad debido a la alta velocidad. Para conseguir una autonomía de 400 km en carretera harían falta unos 550 kg de batería, es decir, unos 82 kWh de batería. Estos datos son aproximaciones, quizás algo optimistas en el consumo en ciudad, ya que hemos obviado consumos auxiliares o ineficiencias en los acelerones, sin embargo, no se alejan mucho de la realidad. Por ejemplo, el Tesla S, con una batería de 85 kWh y 540 kg de peso, tiene una autonomía a 50 km/h de 680 km consumiendo unos 12,5 kWh/100 km, mientras que a 120 km/h su consumo asciende a unos 23,5 kWh/100 km, reduciéndose su autonomía a 360 km.

Como vemos, en la actualidad ya existen coches eléctricos con estas características, y la tecnología sigue evolucionando para ofrecer mejores baterías a precios más bajos, por lo que no parece que haya una barrera tecnológica para conseguir coches eléctricos con una buena autonomía. No obstante, los coches eléctricos con gran autonomía son hoy en día muy costosos y nos vemos en la obligación de ajustar la autonomía de nuestro coche a nuestros bolsillos. Para ello, debemos ser capaces de poder evaluar bien el consumo y la autonomía de un coche eléctrico.

El consumo y la autonomía son muy distintos según el tipo de conducción (incluso puede cambiar significativamente si llevamos la calefacción o el aire acondicionado puestos). Por ello es difícil saber el consumo real a partir de un dato único de consumo y autonomía, pero los distintos estándares hacen precisamente esto, dando un valor de consumo y de autonomía que es el resultado de una conducción mixta. Esto implica, además, que el consumo y la autonomía «oficiales» pueden ser distintos para un mismo coche. En Estados Unidos, el estándar utilizado se conoce como EPA, que ofrece un único valor de autonomía, aunque distingue entre consumo en ciudad y en carretera. En Europa se utilizaba hasta hace poco el NEDC, pero es bastante más optimista que el EPA; de hecho, muy poco realista. No obstante, hoy en día se aplica ya un nuevo estándar mundial, el WLTC, más realista que el NEDC y similar al EPA. En definitiva, si vas a comprar un coche eléctrico, piensa para qué lo vas a usar, consulta el consumo para distintos tipos de conducción y mira bajo qué estándares se han hecho las pruebas de consumo y autonomía.

Mientras avance la tecnología que permita mejorar la densidad energética y bajar el coste de las baterías, habrá que ser muy cuidadoso a la hora de elegir coche. Mientras tanto, también se podrían tomar soluciones ingeniosas, como que las baterías pudieran dividirse en módulos de 25 kg desmontables. Así, el dueño de un coche eléctrico podría dejar únicamente 4 módulos conectados para los trayectos del día a día (100 kg nos dan una autonomía de unos 100 km) y añadir más módulos cuando necesite realizar trayectos de larga distancia (quizás alquilarlos sólo para esos viajes). Otra solución similar que han adquirido algunas compañías consiste en que conductores típicamente urbanos compren coches eléctricos con autonomías bajas pero tengan la posibilidad de alquilar, con facilidad y a buen precio, coches con mayor autonomía para los pocos desplazamientos largos que hagan al año.

Notas y textos de consulta

Página

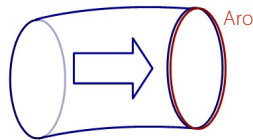
- 328 *Los motores de gasolina típicos tienen aproximadamente un 25% de eficiencia...* Según Wikipedia [es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Otto], los motores de ciclo Otto tienen un rendimiento de entre un 25% y un 30%, mientras que un motor diésel puede llegar a rendimientos de hasta el 45% debido a su mayor relación de compresión. El motor de gasolina de un Toyota Prius utiliza un ciclo Atkinson en vez de un ciclo Otto, logrando eficiencias de hasta el 38%. En 2017, Mazda anunció el motor SkyActive-X con tecnología HCCI, que aumenta la relación de compresión (hasta lograr una relación de 18:1) y permite eliminar las bujías. Según el fabricante, este motor permite reducir el consumo un 30% respecto a los motores tradicionales de gasolina.
- 329 *El peso del motor eléctrico es unas 8 veces menor.* Un motor de gasolina de 4 cilindros tiene un ratio potencia-peso de aproximadamente 0,75 kW/kg. Los mejores motores eléctricos tienen una eficiencia del 90% y una relación potencia-peso de 6 kW/kg. Sin embargo, la relación potencia-peso de las baterías es de aproximadamente 1 kW/kg. Por lo tanto, lo que ganamos por el motor, lo perdemos por las baterías.
- 333 *Figura A.8.* Datos del Toyota Prius [hiwaay.net/bzwilson/prius] y datos del BMW 318ti [www.randomuseless.info/318ti/economy.html].

Apéndice B

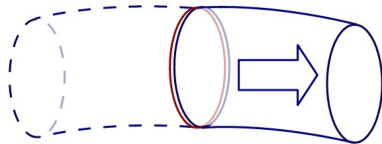
Viento II

La física de la energía eólica

Para estimar la potencia del viento, imaginemos que sostenemos un aro con un área A enfrentado al viento, cuya velocidad es v . Considera la masa de aire que pasa a través de dicho aro en un segundo. Aquí tienes una imagen que muestra esta masa de aire justo antes de que pase a través del aro:



Pasado un segundo, esa misma masa de aire estaría en la siguiente posición:



La masa de esa porción de aire es el producto de su densidad, ρ , su área, A , y su longitud, la cual es v veces t , siendo t un segundo.

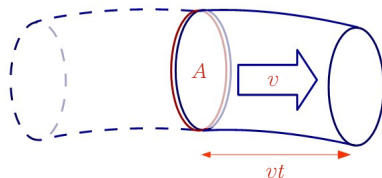


Figura B.1: Pequeño aerogenerador típicamente utilizado para bombear agua.

La energía cinética de esta porción de aire es

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Avtv^2 = \frac{1}{2}\rho Atv^3. \quad (\text{B.1})$$

Por lo tanto, la potencia eólica para un área A , es la energía que pasa a través de la misma por unidad de tiempo:

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (\text{B.2})$$

La fórmula que utilizamos es:
masa = densidad \times volumen

Esta fórmula puede resultar familiar, ya que se obtuvo una expresión idéntica en la página 326 al discutir sobre la potencia requerida por un vehículo en movimiento.

¿Cuál es la velocidad típica del viento? En un día ventoso, un ciclista siente la fuerza del viento. Si está detrás de ti, puedes ir mucho más rápido que sin viento. La velocidad de este viento es, pues, parecida a la velocidad típica del ciclista, pongamos 18 kilómetros por hora, o 5 metros por segundo. Obviamente, la velocidad del viento varía notablemente de un lugar a otro del país, sin embargo, vamos a tomar 18 km/h como un dato representativo para España (teniendo en cuenta que las estimaciones que realicemos pueden necesitar ser recalculadas posteriormente).

La densidad del aire es, aproximadamente, de 1,3 kg por m³. De este modo, la potencia típica del viento por metro cuadrado de aro es:

$$\frac{1}{2}\rho v^3 = \frac{1}{2}1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = 80 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \quad (\text{B.3})$$

No toda esta potencia puede ser extraída por un molino de viento (aerogenerador a partir de ahora). El aerogenerador reduce bastante la velocidad del viento que lo atraviesa, pero tiene que dejarlo con cierta energía cinética, ya que, si no, el viento ralentizado entorpecería el camino del flujo. La Figura B.2 representa el flujo real a través de un aerogenerador. La máxima porción de la energía recibida que puede ser extraída por un aerogenerador con forma de disco fue deducida por un físico alemán llamado Albert Betz en 1919. Si la velocidad de salida del viento es un tercio de la velocidad de entrada, la potencia extraída es 16/27 (0,59) de la potencia total del viento. En la práctica, vamos a considerar que la energía que es capaz de extraer un aerogenerador es inferior a este máximo teórico. Tomamos una eficiencia del 50%. En realidad, los aerogeneradores reales se diseñan para un determinado rango de velocidades de viento en los que la eficiencia es óptima. Fuera de ese

rango, la eficiencia disminuye. Si la velocidad de viento es mucho mayor que la de diseño, hay que parar el aerogenerador (la eficiencia es cero).

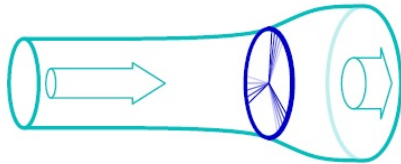


Figura B.2: Flujo de aire a través de un aerogenerador. El aerogenerador ralentiza y dispersa el aire.

Uno de los primeros parques eólicos de España es el que aparece en la Figura B.3, situado en la sierra de El Perdón, cerca de Pamplona. Este parque está formado por 40 aerogeneradores de 39 m de diámetro cada uno. A modo de ejemplo, la potencia que cada aerogenerador de este parque podría extraer para la velocidad típica considerada es:

$$\begin{aligned} &\text{factor de eficiencia} \times \text{potencia por unidad de área} \times \text{área} = \\ &50\% \times \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2 = 50\% \times 80 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times \frac{\pi}{4} (39\text{m})^2 = 48 \text{ kW}. \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

Para estimar la potencia que se puede obtener del viento, tenemos que decidir cómo de grandes van a ser nuestros aerogeneradores y cómo de cerca van a estar los unos de los otros.

¿Cómo de juntos se van a situar los aerogeneradores? Si se colocan demasiado cerca los unos de los otros, los primeros en recibir el viento quitarán potencia a los que lo reciban más tarde. Los expertos dicen que los aerogeneradores no deben estar separados una distancia inferior a 5 veces su diámetro para no perder una potencia significativa, tal y como se ha representado en la Figura B.4. Con esta separación, la potencia que los aerogeneradores pueden generar, por unidad de área terrestre ocupada, es:

$$\begin{aligned} \frac{\text{potencia de un aerogenerador (B.4)}}{\text{área por aerogenerador}} &= \frac{\frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} = \\ &= \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho v^3 = \\ &= 0,016 \times 80 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \\ &= 1,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$



Figura B.3: Parque de El Perdón, en las proximidades de Pamplona (Navarra), formado por 40 máquinas de 500 kW, con un diámetro de 39 m cada una. Fuente: Acciona.

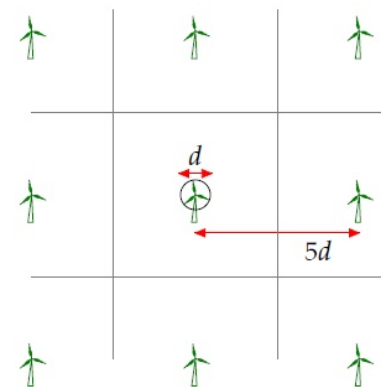


Figura B.4: Distribución del parque eólico.

Tabla B.1: Información importante a recordar: potencia media por unidad de área en parques eólicos.

Potencia por unidad de área	
Parque eólico (Velocidad 5 m/s)	1,3 W/m ²

Merece la pena recordar este número: un parque eólico con una velocidad de viento de 5 m/s produce una potencia de 1,3 W por m² de terreno. Hay que destacar que la solución no depende del diámetro del aerogenerador. Los diámetros se cancelan, porque aerogeneradores más grandes necesitan mayores distancias de separación. Los aerogeneradores más grandes son una buena idea para conseguir aprovechar las mayores velocidades de viento que se dan a altitudes mayores (cuanto más grande es el aerogenerador, mayor es la velocidad de viento que encuentra), o debido a economías de escala; pero estas son las únicas razones para preferir grandes aerogeneradores.

Este cálculo depende mucho de la estimación que se ha realizado de la velocidad de viento. ¿Es 5 m/s una velocidad realista como estimación de la velocidad típica en lugares ventosos de España? En la Figura B.5 aparece un mapa de España coloreado en función de la velocidad media de viento anual. Si se suma toda la superficie del mapa con una velocidad media superior a los 5 m/s, se obtiene que en el 60% de la superficie se dispone de un recurso igual o superior a dicha velocidad [67]. Suponer que la velocidad media del viento en la superficie es de 5 m/s es muy optimista, sin embargo, a una altura de 80 m, altura que superan de largo los aerogeneradores actuales, es un valor bastante realista, o incluso conservador, ya que solo se instalarán estos en zonas con un buen recurso eólico.

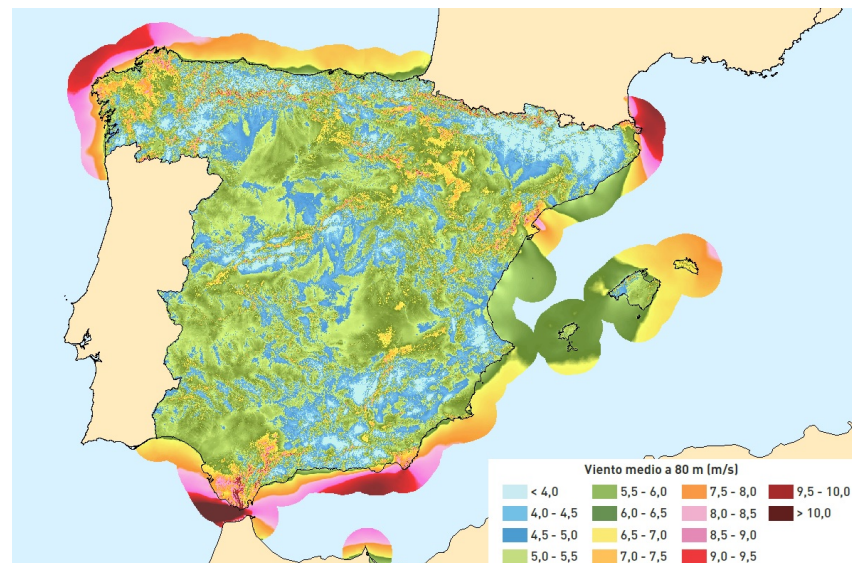


Figura B.5: Velocidad media de viento en España a una altura de 80 m sobre la superficie. Fuente: IDAE.

Por otro lado, para estimar la potencia típica, no debemos tomar la velocidad media del viento y elevarla al cubo, sino calcular la media cúbica de la velocidad del viento. La media del cubo es mayor que el cubo de la media, pero si empezamos a meternos en estos detalles, las cosas se complican, ya que los aerogeneradores tampoco dan una potencia proporcional a la velocidad al cubo. En su lugar, en un rango de velocidades dan la potencia ideal, y fuera de ese rango, a velocidades mayores y menores, las turbinas eólicas obtienen una potencia inferior a la ideal.

Variación del viento con la altura

Aerogeneradores más altos ven velocidades de viento mayores. La forma en la que la velocidad de viento aumenta con la altura es complicada y depende de la rugosidad del terreno y del momento del día. Como una cifra aproximada, doblar la altura típicamente supone incrementar la velocidad del viento en un 10 % y, por lo tanto, la potencia del viento en un 30 %.

Algunas fórmulas estándar para la variación de la velocidad del viento con la altura son:

1. De acuerdo con la fórmula del NREL para la variación vertical de la velocidad de viento con la altura:

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha, \tag{B.6}$$

siendo v_{10} la velocidad del viento a 10 m de altura, y un valor típico para el exponente α 0,143 o 1/7. La ley de un séptimo ($v(z)$ es proporcional a $z^{1/7}$) es la elegida por algunos ingenieros [248].

2. La fórmula para variación del perfil de viento que aconseja la Asociación Danesa de Industria Eólica es:

$$v(z) = v_{ref} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{ref}/z_0)}, \tag{B.7}$$

donde z_0 es un parámetro llamado longitud de rugosidad, y v_{ref} es la velocidad a la altura de referencia z_{ref} , como por ejemplo 10 m. La longitud de rugosidad para un campo (tierra de cultivo con algunas casas y setos de protección a intervalos de unos 500 m) es $z_0=0,1$ m.

En la práctica, estas dos fórmulas dan valores numéricos similares. Sin embargo, esto no quiere decir que sean siempre precisas.

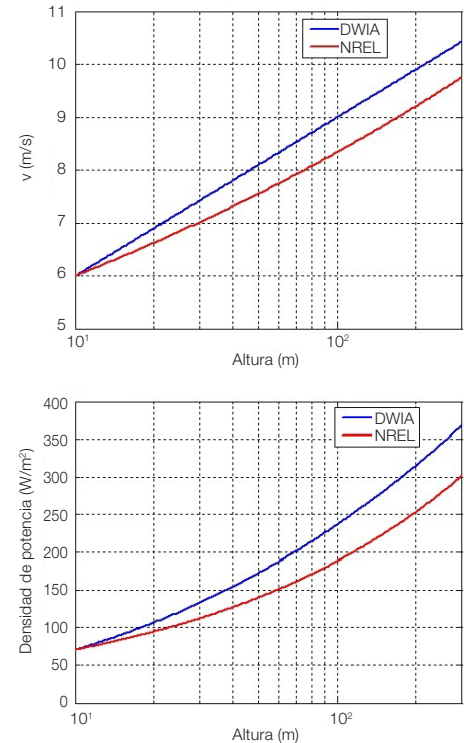


Figura B.6: Dos modelos de velocidad de viento (arriba) y de densidad de potencia (abajo) en función de la altura. DWIA (Danish Wind Industry Association); NREL (National Renewable Energy Laboratory). La velocidad a 10 m se ha fijado a 6 m/s en ambos modelos. En el modelo de DWIA, la longitud de rugosidad se ha fijado en $z_0=0,1$ m.

Propiedades estándar de los aerogeneradores

Hoy en día, un aerogenerador típico tiene un diámetro de rotor en torno a los 115 m, que se sitúa a una altura sobre el terreno que ronda los 100 m. Una máquina de estas características tiene una «capacidad» de 2,5 MW. La «capacidad» o «potencia pico» es la *máxima* potencia que el aerogenerador puede entregar en condiciones óptimas. Normalmente, los aerogeneradores están diseñados para empezar a funcionar a velocidades de viento de entre 3 y 5 m/s y parar si la velocidad de viento alcanza los 25 m/s. La potencia media real entregada es la «capacidad» multiplicada por un factor que describe la fracción de tiempo en la que las condiciones de viento están cerca del óptimo. Este factor, a veces llamado «factor de carga» o «factor de capacidad», depende del emplazamiento. El factor de carga típico en España es del 24 %.

Figura B.7: Aerogenerador qr5, de quietrevolution.co.uk. No es un aerogenerador convencional.



Otras estimaciones sobre la potencia eólica por unidad de área

En un estudio realizado por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) se estima una potencia eólica instalada de 4 W/m^2 («capacidad», no producción media). Si el factor de capacidad típico en España es 24 %, entonces la producción media será de 1 W/m^2 .

El parque eólico de La Plana-La Muela, ubicado cerca de la ciudad de Zaragoza, tiene una potencia instalada de 235 MW gracias a 313 aerogeneradores de 750 kW que ocupan una superficie de 3870 hectáreas. Esto supone una capacidad de generación de 6 W/m^2 . Multiplicando por el factor de capacidad medio, se obtiene una producción media de $1,4 \text{ W/m}^2$.

Por otro lado, en el Atlas Eólico de España [67], a finales de 2009, la treintena de proyectos eólicos existentes presentaban una potencia pico por unidad de superficie de 6 W/m^2 . Con el factor medio de capacidad obtenemos de nuevo $1,4 \text{ W/m}^2$.

Preguntas

¿Qué pasa con la microgeneración? Si instalas una de estas miniturbinas en tu tejado, ¿cuánta energía puedes esperar que genere?

Asumiendo una velocidad de viento de 5 m/s (que es superior a la media para la mayor parte de España a una altura mucho más cercana al suelo que los 80 m que alcanzan los aerogeneradores más grandes) y suponiendo un diámetro de 1 m, la potencia suministrada será de 30 W. Esto equivale a 0,72 kWh al día; no mucho. Además, un gran problema para la energía eólica en entornos urbanos es la presencia de edificios que, además de reducir la velocidad del viento, hacen que este sea muy racheado y difícil de aprovechar mediante aerogeneradores. Algunas medidas de producción real tomadas en un entorno urbano en Inglaterra (un país con mejor recurso eólico que España) muestran que un aerogenerador de este tipo genera realmente unos 0,22 kWh al día [249].

Es probable que los peores aerogeneradores del mundo sean los de la ciudad de Tsukuba en Japón, los cuales consumen más potencia de la que generan. ¡Los instaladores estaban tan avergonzados de que sus turbinas no giraran porque no había suficiente viento, que incluso consumían potencia para hacerlos girar y así pareciese que estaban funcionando!

Notas y textos de consulta

Página

- 338 *La máxima porción de la energía recibida que puede ser extraída por un aerogenerador con forma de disco...* Hay una buena explicación de esto en la página web de la Danish Wind Industry Association. <http://drønmstørre.dk/wpcontent/wind/miller/windpower%20web/en/stat/betzpro.htm>.
- 342 *Normalmente, los aerogeneradores están diseñados para empezar a funcionar a velocidades de viento de entre 3 y 5 m/s.* Basta con mirar el catálogo de los fabricantes de aerogeneradores para comprobarlo. <http://www.siemensgamesa.com/es/productos-servicios/aerogeneradores> o <http://www.acciona-windpower.com/products-and-services/>
- 342 *El factor de carga típico en España es del 24%.* En 2016 se generaron en España 49 GWh de energía eólica, con una potencia instalada de 23 MW. Esto equivale a que todos los aerogeneradores de España hubiesen trabajado durante 2100 horas a su máxima capacidad, lo que supone un 24% de las horas del año.



Figura B.8: Aerogenerador de 6 kW situado en el campus de la Universidad Pública de Navarra (UPNA). La energía media generada por esta turbina, situada en un entorno urbano, es de 5 kWh al día. Foto de Javier Samanes.



Figura B.9: Mini aerogenerador y paneles fotovoltaicos para iluminación en Westerplatte, Polonia. Foto de Javier Samanes.

Apéndice C

Aviones II

*Esperar lo mejor no es un principio,
es una ilusión.*

Emily Armistead
(Greenpeace)

¿Cuáles son los límites fundamentales de los viajes en avión? ¿Existe un límite físico que establezca la mínima cantidad de energía por tonelada y kilómetro recorrido necesaria para volar? ¿Cuál es la máxima distancia que puede volar un Boeing 747 de 300 toneladas? ¿Tiene alguna relación con una aguja colipinta de 1 kg o con un pequeño charrán ártico de 100 g?

Al igual que el Capítulo 3, donde hemos estimado el consumo de los coches, va acompañado por el Apéndice A, donde se ofrece un modelo de a dónde va a parar la energía consumida por los coches, este capítulo completa el Capítulo 5, explicando a dónde va la energía que se consume en los aviones. Las únicas leyes físicas que se requieren para esta explicación son las leyes del movimiento de Newton, que describiremos más adelante cuando sean necesarias.

Este razonamiento nos permitirá responder preguntas como «¿consumiría el transporte aéreo mucha menos energía si viajáramos en aviones de hélices más lentos que los turbopropulsados?» A continuación vienen un montón de ecuaciones, ¡esperamos que las disfrutes!

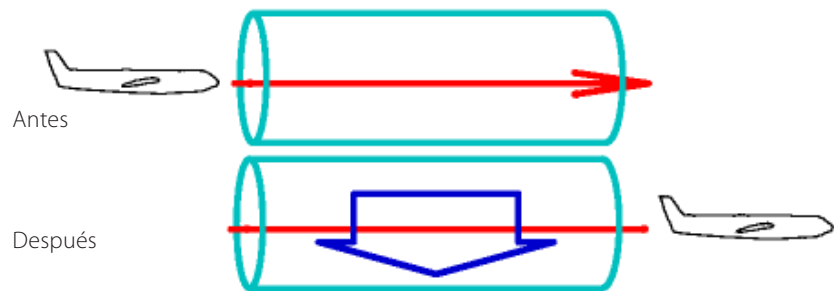
Cómo volar

Los aviones (y los pájaros) se mueven a través del aire, por lo que, al igual que los coches y los trenes, se ven afectados por la resistencia aerodinámica, que, en el caso de los aviones, se conoce como *fuerza de arrastre* . Además, a diferencia de los coches y trenes, los aviones tienen que gastar energía para mantenerse en el aire.



Figura C.1: Aves: dos charranes árticos, una aguja colipinta y un boeing 747. Fotos de Wikipedia.

Figura C.2: Un avión se encuentra con un tubo estacionario de aire. Una vez que lo ha atravesado, el avión ha empujado el aire hacia abajo. La fuerza que ha hecho el avión sobre el aire para acelerarlo hacia abajo es igual, pero de sentido opuesto, a la que ha hecho el aire sobre el avión para mantenerlo en el aire.



Los aviones se mantienen en las alturas impulsando aire hacia abajo. Cuando el avión impulsa aire hacia abajo, el aire impulsa al avión hacia arriba (porque se lo dice la tercera ley de Newton). Siempre que el impulso hacia arriba, que se llama sustentación, sea suficientemente grande como para equilibrar el peso hacia abajo del avión, se evita que este se precipite hacia el suelo.

Cuando el avión empuja aire hacia abajo, le aporta energía cinética. Es decir, crear la sustentación requiere energía. La potencia total que necesita el avión es la suma de la usada para crear la sustentación y la que necesita para vencer la fuerza de arrastre. (Por cierto, a la potencia necesaria para crear la sustentación se le suele llamar «resistencia inducida», pero aquí le llamaremos potencia de sustentación P_{sust}). Las dos ecuaciones que necesitaremos para deducir la teoría del vuelo son la segunda ley de Newton:

fuerza = velocidad de cambio de momento,

y la tercera ley de Newton, que acabamos de mencionar:

fuerza hecha por A sobre B = -fuerza hecha por B sobre A.

Por si no te gustan las ecuaciones, te podemos adelantar la conclusión que vamos a obtener: vamos a demostrar que la potencia necesaria para crear la sustentación coincide con la que se necesita para vencer la fuerza de arrastre. Es decir, el requisito de «flotar» dobla la potencia necesaria para desplazarse una distancia dada.

Dibujemos un esquema de la fuerza de sustentación en un avión que se mueve a una velocidad v . En un tiempo t , el avión avanza una distancia vt , dejando tras de sí una salchicha de aire descendente (Figura C.2). Llamemos al área transversal de esta salchicha A_s . El diámetro de la salchicha es, aproximadamente, el ancho de las alas del avión w . (Dentro de esta salchicha hay otra salchicha más pequeña con remoli-

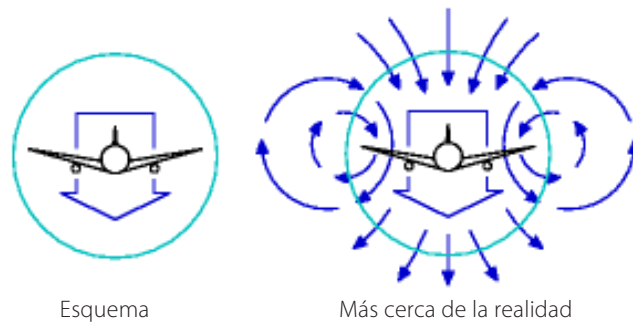


Figura C.3: Con nuestro esquema asumimos que el avión deja una salchicha de aire moviéndose hacia abajo en su estela. Una imagen más realista implicaría remolinos de aire más complejos. Si quieres ver la realidad, mira la Figura C.4.

nos de aire turbulento que tiene una sección similar al área frontal del cuerpo del avión). En realidad, los detalles de flujos de aire son mucho más interesantes que este dibujo de salchichas: la punta de cada ala deja tras de sí un vórtice, con el aire entre las puntas de las alas moviéndose rápidamente hacia abajo y el aire de la parte externa moviéndose hacia arriba (Figura C.3 y Figura C.4). Este aire ascendente es usado por los pájaros que vuelan en formación: justo detrás de la punta del ala del pájaro precedente hay un suave y cómodo empuje hacia arriba. Bueno, volvamos a nuestra salchicha.

La masa de la salchicha es:

$$m_{salchicha} = \text{densidad} \times \text{volumen} = \rho v t A_s$$

Si la salchicha entera se mueve hacia abajo con una velocidad u , veamos cuánto tiene que valer u para que el avión sufra un empuje hacia arriba igual a su peso $m \times g$. El momento de la salchicha creado en el tiempo t hacia abajo es:

$$\text{masa} \times \text{velocidad} = m_{salchicha} u = \rho v t A_s u$$

Y por las leyes de Newton tiene que ser igual al momento desarrollado por el peso del avión en el tiempo t , es decir,

$$mgt.$$

Mediante esta ecuación,

$$\rho v t A_s u = mgt, \tag{C.1}$$

podemos calcular el valor de la velocidad a la que el aire es impulsado hacia abajo,

$$u = \frac{mg}{\rho v A_s}.$$



Figura C.4: Flujo de aire tras un avión. Foto de NASA Langley Research Center.

¡Interesante! La velocidad de la salchicha es *inversamente* proporcional a la velocidad del avión v . Un avión que avanza despacio tiene que impulsar aire hacia abajo más fuerte que uno que avanza rápido, ya que se encuentra con menos cantidad de aire por minuto y tiene que conseguir la misma fuerza de sustentación. Por esta razón, cuando los aviones están despegando o aterrizando, momento en el que vuelan despacio, tienen que desplegar los *flaps* de las alas para crear un ala más grande e inclinada que desvíe más aire.

¿Cuál es el coste energético de impulsar la salchicha hacia abajo a la velocidad necesaria u ? La potencia es:

$$\begin{aligned} P_{sust} &= \frac{\text{energía cinética de la salchicha}}{\text{tiempo}} \\ &= \frac{1}{t} \frac{1}{2} m_{salchicha} u^2 \\ &= \frac{1}{2t} \rho v t A_s \left(\frac{mg}{\rho v A_s} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_s}. \end{aligned}$$

La potencia total necesaria para volar es la suma de la de arrastre y la de sustentación:

$$\begin{aligned} P_{total} &= P_{arr} + P_{sust} \\ &= \frac{1}{2} c_d \rho A_p v^3 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_s}, \end{aligned}$$

donde A_p es el área frontal del avión y c_d el coeficiente de arrastre (igual que en el Apéndice A).

La eficiencia del combustible del avión expresada en energía por unidad de distancia sería:

$$\left. \frac{\text{energía}}{\text{distancia}} \right|_{ideal} = \frac{P_{total}}{v} = \frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s} \quad (\text{C.2})$$

si el avión convirtiera todo el combustible en potencia de sustentación y en potencia para vencer el arrastre de forma perfectamente eficiente. Un detalle, otro nombre para «energía por distancia recorrida» es «fuerza», y en la ecuación anterior se pueden reconocer los dos términos: el de la fuerza de arrastre $\frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2$ y el de la fuerza de sustentación $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s}$. La suma es la fuerza, o «empuje» que indica exactamente lo fuerte que tienen que empujar los motores.

Los motores de un avión a reacción real tienen una eficiencia de aproximadamente $\varepsilon = 1/3$, por lo que la energía consumida por unidad de distancia en un avión que viaja a una velocidad v es:

$$\frac{\text{energía}}{\text{distancia}} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s} \right). \quad (\text{C.3})$$

Esta expresión es un poco complicada, pero se simplifica enormemente si asumimos que el avión se ha diseñado para volar a la velocidad que minimiza la energía consumida por unidad de distancia. Ya ves en la Figura C.5 que la energía por distancia tiene un punto óptimo en función de v . La suma de las dos cantidades $\frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2$ y $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s}$ es mínima cuando las dos cantidades son iguales. Este fenómeno es maravillosamente común en la física: dos magnitudes que, a primera vista, no *tienen que ser iguales son* en realidad iguales, o una el doble que la otra.

Por lo tanto, esta igualdad nos dice que la velocidad óptima del avión es tal que:

$$c_d \rho A_p v^2 = \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s},$$

es decir,

$$\rho v_{opt}^2 = \frac{mg}{\sqrt{c_d A_p A_s}}. \quad (\text{C.4})$$

Esto define la velocidad óptima, siempre que nuestro esquema del avión sea preciso. El esquema se rompe si la eficiencia de los motores depende bastante de la velocidad, o si la velocidad del avión supera la del sonido (330 m/s). Por encima de la velocidad del sonido necesitaríamos un modelo diferente para el cálculo de las fuerzas de arrastre y sustentación.

Veamos cuál es la velocidad óptima que se obtiene con nuestro modelo para un Boeing 747 y para un albatros. Para ello, debemos asegurarnos de que consideramos una densidad de aire correcta: si queremos estimar la velocidad óptima de un 747 a 30 000 pies de altura, debemos recordar que la densidad del aire baja a medida que aumenta la altitud z según $\exp(-mgz/kT)$, donde m es la masa de las moléculas de nitrógeno u oxígeno y kT es la energía térmica (la constante de Boltzmann multiplicada por la temperatura absoluta). La densidad es unas 3 veces más pequeña a dicha altitud que a nivel del mar.

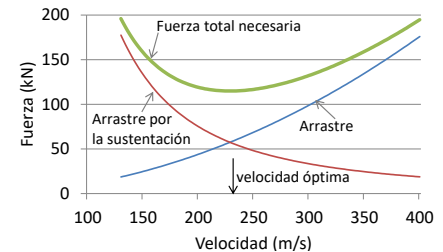


Figura C.5: La fuerza necesaria para mantener un avión en movimiento, en función de su velocidad v , es la suma de la fuerza de arrastre $\frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2$ –que aumenta con la velocidad– y la fuerza de sustentación (también conocida como arrastre inducido) $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s}$ –que decrece con la velocidad–. Hay una velocidad óptima, v_{optima} , para la cual se requiere la mínima fuerza. Fuerza es energía por unidad de distancia, por lo que minimizar la fuerza también minimiza el consumo de combustible por unidad de distancia. Para optimizar la eficiencia del combustible, se debe volar a la velocidad v_{optima} . Este gráfico muestra el empuje estimado con nuestros cálculos para el Boeing 747, de 319 t de masa, envergadura de 64,6 m, coeficiente de arrastre de 0,03 y área frontal de 180 m², volando en un aire con densidad $\rho = 0,41$ kg/m³ (la densidad a una altura de 10 km), en función de su velocidad v en m/s. Nuestro modelo calcula una velocidad óptima $v_{optima} = 220$ m/s (800 km/h). Para un cálculo basado en un esquema de salchichas, ¡es una buena aproximación al dato real!

Tabla C.1: Estimación de la velocidad óptima para un *Jumbo* (nombre cariñoso con el que se conoce al Boeing 747) y para un albatros. * Área frontal del 747 estimada como el doble del producto de la anchura de la cabina (6,1 m) por su altura estimada (10 m) para incluir el área frontal de los motores, alas y cola; para un albatro, el área frontal se ha estimado a partir de una fotografía.

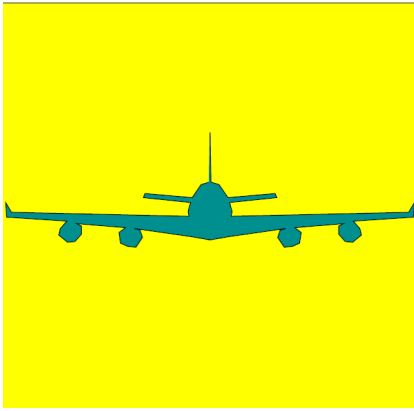


Figura C.6: Vista frontal del Boeing 747, usada para estimar el área frontal del avión A_p . El cuadrado amarillo tiene un área de A_s (el cuadrado de la envergadura del avión).

Pájaro		747	Albatros
Compañía		Boeing	Selección natural
Masa (a plena carga)	m	363 000 kg	8 kg
Envergadura	w	64,4 m	3,3 m
Área*	A_p	180 m ²	0,09 m ²
Densidad	ρ	0,4 kg/m ³	1,2 kg/m ³
Coefficiente de arrastre	c_d	0,03	0,1
Velocidad óptima	v_{opt}	242 m/s =870 km/h	14 m/s =50 km/h

Las velocidades óptimas predichas en la Tabla C.1 son más precisas de lo que cabría esperar. La velocidad óptima predicha para el 747 es de 870 km/h, y la del albatros de 50 –ambas muy cercanas a la velocidad de crucero de estos dos pájaros (900 km/h y 50-90 km/h respectivamente)–.

Veamos unas pocas predicciones más de nuestro esquema. Podemos comprobar si la fuerza (Ecuación C.2) es compatible con el funcionamiento real del 747. Recordando que a la velocidad óptima las dos fuerzas son iguales, podemos tomar únicamente una de las dos y multiplicarla por dos:

$$\begin{aligned}
 \text{fuerza} &= \frac{\text{energía}}{\text{distancia}} \Big|_{\text{ideal}} = \frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s} \\
 &= c_d \rho A_p v_{opt}^2 \\
 &= c_d \rho A_p \frac{mg}{\rho (c_d A_p A_s)^{1/2}} \\
 &= \left(\frac{c_d A_p}{A_s} \right)^{1/2} mg.
 \end{aligned} \tag{C.5}$$

Llamemos factor de relleno f_A al cociente:

$$f_A = \frac{A_p}{A_s}.$$

(Piensa en f_A como la fracción del cuadrado ocupado por el avión en la Figura C.6). Entonces,

$$\text{fuerza} = (c_d f_A)^{1/2} (mg). \tag{C.6}$$

¡Interesante! Independientemente de la densidad del fluido a través del cual vuela el avión, el empuje necesario (si el avión viaja a su velocidad óptima) es simplemente una constante adimensional $(c_d f_A)^{1/2}$ multiplicada por el peso del avión. Por cierto, esta constante es la relación sustentación-arrastre del avión. (La relación sustentación-arrastre tiene otros nombres como coeficiente de planeo, relación de planeo o eficiencia aerodinámica; sus valores típicos se muestran en la Tabla C.2).

Tomando los números reales del *Jumbo*, $c_d \simeq 0,03$ y $f_A \simeq 0,04$, obtenemos que el empuje requerido es:

$$(c_d f_A)^{1/2} mg = 0,036 mg = 130 \text{ kN.}$$

¿Encaja este número con las especificaciones del 747? En realidad, cada uno de sus 4 motores tiene un empuje máximo de 250 kN, pero este empuje solo se utiliza durante el despegue. El empuje realizado durante crucero es mucho menor: el empuje de un 747 en crucero es de 200 kN, solo un 50% más de lo que sugería nuestro esquema. Nuestro resultado se ha quedado un poco corto porque la estimación que hemos hecho de la relación sustentación-arrastre era un poco grande.

Este valor de empuje puede utilizarse para deducir la eficiencia de cualquier avión. Podemos calcular dos tipos de eficiencia de transporte: el coste energético de mover *masa*, medido en kWh por tonelada y km; y el coste energético de mover pasajeros, medido en kWh por 100 pasajeros y km.

Eficiencia en términos de peso

El empuje es una fuerza, y fuerza es energía por unidad de distancia. La energía total usada por unidad de distancia aumenta en un factor de $1/\varepsilon$, donde ε es la eficiencia de los motores, que asumiremos que es $1/3$.

Este es el coste bruto del transporte, definido como la energía por unidad de peso (de toda la aeronave) por unidad de distancia:

$$\begin{aligned} \text{coste de transporte} &= \frac{1 \text{ fuerza}}{\varepsilon \text{ masa}} \\ &= \frac{1 (c_d f_A)^{1/2} mg}{\varepsilon m} \\ &= \frac{(c_d f_A)^{1/2}}{\varepsilon} g. \end{aligned} \tag{C.7}$$

Tabla C.2: Relaciones sustentación-arrastre.

	sust/arr
Airbus A320	17
Boeing 767-200	19
Boeing 747-100	18
Charrán común	12
Albatros	20



Figura C.7: Cessna 310N: 60 kWh por 100 pasajeros y km. Un Cessna 310 Turbo lleva a 6 pasajeros (incluyendo al piloto) a una velocidad de 370 km/h. Fotografía de Adrian Pingstone.

Es decir, el coste del transporte es una cantidad adimensional (relacionada con la forma del avión y la eficiencia de los motores), multiplicada por g , la aceleración de la gravedad. Fíjate que este coste bruto es válido para cualquier avión, pero depende solo de tres propiedades: el coeficiente de arrastre, la forma del avión y la eficiencia de sus motores. No depende del tamaño del avión, ni de su peso, ni de la densidad del aire. Si asumimos un valor de $\varepsilon = 1/3$ y un ratio sustentación-arrastre de 20, obtenemos que el coste de transporte bruto de *cualquier* avión, de acuerdo con nuestros cálculos, es

$$0,15 g$$

o

$$0,4 \text{ kWh/t-km.}$$

Este coste bruto del transporte es el coste energético de mover peso, *incluyendo el peso del propio avión*. Para estimar la energía necesaria para mover mercancías en avión, por unidad de masa de la carga, hay que dividir esta energía por la fracción del peso total que es realmente carga. Por ejemplo, el peso de la carga de un carguero 747 lleno es aproximadamente $1/3$ del peso total, por lo que el coste de transporte es

$$0,45 g,$$

o, aproximadamente, de $1,2 \text{ kWh/t-km}$. Este resultado es solo un poco mayor que el coste de transporte en camión, que es de 1 kWh/t-km .

¿Se pueden mejorar los aviones?

Si la eficiencia de los motores solo puede aumentar un poco por el progreso tecnológico, y si la forma de los aviones ya ha sido perfeccionada, hay poco que se pueda hacer para mejorar la cantidad adimensional. La eficiencia del transporte está cerca de su límite físico. La comunidad aerodinámica dice que la forma de los aviones podría mejorarse un poco cambiando al concepto de fuselaje integrado, y que el coeficiente de arrastre podría reducirse también un poco utilizando un control de flujo laminar, una tecnología que reduce la formación de turbulencias sobre el ala absorbiendo un poco de aire a través de pequeñas perforaciones en el ala [250]. Este control de flujo laminar añadido en los aviones actuales produciría una reducción del 15% en el coeficiente de arrastre, y el cambio a aviones de fuselaje integrado lo reduciría en un 18% según las estimaciones que se han realizado [251]. La Ecuación C.7 dice que el



Figura C.8: Un Bombardier Learjet 60XR que transporta a 8 pasajeros a 780 km/h tiene un coste energético de **150 kWh por 100 pasajeros-km**. Fotografía de Adrian Pingstone.

coste del transporte es proporcional a la raíz cuadrada del coeficiente de arrastre, por lo que una mejora en c_d del 15% o 18% produciría una mejora en el coste del transporte de 7,5% y 9% respectivamente.

Eficiencia en el transporte en términos de cuerpos

De una forma similar, podemos estimar el consumo en el transporte de pasajeros en un 747.

$$\begin{aligned} & \text{Consumo (litros por pasajero y 100 km)} \\ &= \frac{\text{empuje}}{\varepsilon} \times \frac{1}{\text{energía combustible por litro}} \times \frac{1}{\text{pasajeros}} \\ &= 3 \times 200\,000 \text{ N} \times \frac{1}{38 \text{ MJ/litro}} \times \frac{1}{400 \text{ p}} \\ &= 4 \text{ l/p-100 km} = 40 \text{ kWh/p-100 km.} \end{aligned}$$

Resulta que un 747 lleno consume por persona aproximadamente 4 litros a los 100 km, es decir, es un poco más eficiente que un coche típico ocupado por una persona (7 l/100 km). Por lo tanto, viajar en avión es más eficiente energéticamente que viajar en coche si solo va una persona; y los coches son más eficientes si viajan dos o más pasajeros en cada uno.

Puntos clave

¡Hemos hablado de muchas cosas! Recapitulemos las ideas principales. La mitad del trabajo hecho por los aviones se utiliza para *mantenerse a flote*; la otra mitad se dedica a *seguir avanzando*. La eficiencia del combustible a la velocidad óptima, expresada en energía por distancia recorrida, se calculó mediante la Ecuación C.6, y simplemente es proporcional al peso del avión; la constante de proporcionalidad es la relación sustentación-arrastre, que está determinada por la forma del avión. Por lo tanto, mientras que reducir los límites de velocidad de los coches reduciría la energía consumida por distancia recorrida, no tiene sentido considerar un límite de velocidad para los aviones. Cada avión tiene su propia velocidad óptima, diferente a la de los demás aviones, y que depende de su peso. Si haces volar a un avión más despacio, su consumo energético *aumentará*. La única forma de hacer que un avión use el combustible de forma más eficiente es dejarlo en tierra. Ha habido mejoras increíbles en la eficiencia de los aviones, pero no hay perspectivas



Figura C.9: Boeing 737-700: 30 kWh por 100 pasajeros-km. Foto de Chris Finney.

de mejoras significativas en el futuro. (Véanse las páginas 64 y 185-186 para conocer detalles sobre la idea de que el nuevo A380 es «mucho más eficiente» que otros aviones de pasajeros; y la página 63 para un análisis sobre si los aviones de turbohélice son «mucho más eficientes» que los de turbo reacción).

Alcance

Otra predicción que podemos hacer es: ¿cuál es el alcance de un avión o de un pájaro? El alcance es la mayor distancia que puede recorrer sin repostar. Podrías pensar que los aviones grandes tienen un alcance mayor, pero la predicción de nuestro modelo es sorprendentemente simple. El alcance de un avión, la máxima distancia que puede recorrer sin repostar, es proporcional a su velocidad y a la energía total del combustible, e inversamente proporcional al ritmo al que traga combustible:

$$\text{alcance} = v_{opt} \frac{\text{energía}}{\text{potencia}} = \frac{\text{energía} \times \varepsilon}{\text{fuerza}}. \quad (\text{C.8})$$

Ahora, la energía total del combustible es su poder calorífico C (en julios por kilogramo), multiplicado por su masa; y la masa del combustible es una fracción f_{comb} de la masa total del avión. Entonces,

$$\text{alcance} = \frac{\text{energía} \varepsilon}{\text{fuerza}} = \frac{C m \varepsilon f_{comb}}{(c_d f_A)^{1/2} (m g)} = \frac{\varepsilon f_{comb}}{(c_d f_A)^{1/2}} \frac{C}{g}. \quad (\text{C.9})$$

Habría sido difícil imaginarse una predicción más simple: el alcance de un pájaro o avión es el producto de un factor adimensional $\left(\frac{\varepsilon f_{comb}}{(c_d f_A)^{1/2}}\right)$ que tiene en cuenta la eficiencia de los motores, el coeficiente de arrastre y la geometría; por una distancia fundamental,

$$\frac{C}{g},$$

que es una propiedad del combustible y la gravedad. Y nada más. Nada de tamaño del pájaro, nada de masa, ni de longitud, ni de anchura, ni de ninguna dependencia de la densidad del fluido.

Así que, ¿qué es esta medida mágica? Es la misma distancia, ya sea el combustible grasa de ganso o queroseno: ambos combustibles son esencialmente hidrocarburos $(\text{CH}_2)_n$. El queroseno tiene un poder calorífico

$C=40$ MJ por kg. La distancia aproximada asociada a un avión a propulsión es:

$$d_{quero} = \frac{C}{g} = 4000 \text{ km.}$$

El alcance de un pájaro es el alcance intrínseco del combustible, 4000 km, multiplicado por el factor $\left(\frac{\varepsilon f_{comb}}{(c_d f_A)^{1/2}}\right)$. Si nuestro pájaro tiene una eficiencia $\varepsilon = 1/3$ y un coeficiente arrastre-sustentación $(c_d f_A)^{1/2} \approx 1/20$, y si casi la mitad de la masa del pájaro es combustible (el 46% de la masa de un 747 cargado es combustible), descubrimos que pájaros y aviones, de cualquier tamaño, tienen un alcance similar: unas tres veces el alcance del combustible –unos 13 000 km–.

Este número es, de nuevo, bastante cercano a la realidad: el vuelo más largo sin escalas de un 747 (23-24 de marzo de 1989) tuvo una distancia de 16 560 km.

Además, el hecho de que el alcance es independiente del tamaño del ave está reforzado por la observación de que pájaros de todos los tamaños, desde los grandes gansos hasta las pequeñas golondrinas o el charrán ártico, migran distancias intercontinentales. La distancia de vuelo más larga registrada de un pájaro es de 11 000 km, lo hizo una aguja colipinta.

¿Qué distancia recorrió Steve Fossett en su Virgin Atlantic GlobalFlyer especialmente diseñado por Scaled Composites? 41 467 km [252]. Se trata de un avión peculiar: el 83% de su masa en el despegue era combustible e hizo un uso muy cuidadoso de sus turbomotores para alargar la distancia recorrida. Era un avión frágil que sufrió diversos daños durante el viaje.

Un detalle interesante al hilo de este razonamiento: si preguntamos «¿cuál es la densidad óptima del aire para volar?», encontramos que el empuje necesario (Ecuación C.5) a la velocidad óptima es independiente de la densidad del aire. Por lo tanto, nuestro avión volaría feliz a cualquier altitud; no hay una densidad óptima para volar; el avión puede alcanzar los mismos litros por kilómetro a cualquier densidad; pero la velocidad óptima sí depende de la densidad ($v^2 \propto 1/\rho$, Ecuación C.4). Así que, si todo lo demás se mantiene constante, nuestro avión tendrá el menor tiempo de vuelo si vuela en el aire menos denso. Realmente, la eficiencia de los motores de aviones no es independiente de la velocidad y la densidad. A medida que el avión pierde peso quemando combustible, nuestro cálculo pronostica que la velocidad óptima a una densidad específica se reduciría ($v^2 \propto \frac{mg}{\rho(c_d A p A_s)^{1/2}}$). Por lo tanto, un avión que vuela en aire con una

Puedes pensar que d_{quero} es la distancia a la que el combustible podría lanzarse a sí mismo si, de repente, convirtiera toda su energía química en energía cinética y se lanzara en una trayectoria parabólica sin rozamiento. Para ser precisos, la distancia alcanzada por la parábola óptima sería dos veces C/g . Esta distancia es también la altura *vertical* a la que el combustible podría impulsarse a sí mismo si el aire no opusiera resistencia. Otra cosa maravillosa en la que merece la pena fijarse es que el poder calorífico de un combustible C , que se mide en julios por kilogramo, es también una velocidad al cuadrado (exactamente como la relación energía-masa de Einstein $E = mc^2$): 40×10^6 J por kg es equivalente a $(6000 \text{ m/s})^2$. Así que una forma de pensar en la grasa es: «la grasa es 6000 metros por segundo». Si quieres perder peso haciendo *footing*, 6000 m/s (21 600 km/h) es la velocidad que debes alcanzar para perder toda tu grasa en un único salto gigante.

densidad constante debería reducir poco a poco su velocidad a medida que va perdiendo masa. Sin embargo, también puede continuar volando a la misma velocidad óptima si incrementa su altitud para volar en aire menos denso. La próxima vez que hagas un vuelo de larga distancia, puedes comprobar que el piloto aumenta la altura de crucero desde, digamos, 31 000 pies hasta unos 39 000 pies al final del vuelo.

¿Cómo funcionaría un avión de hidrógeno?

Ya hemos visto que la eficiencia de un avión, en términos de toneladas de combustible por kilómetro, es solo un simple número adimensional multiplicado por g . Cambiar el combustible no va a cambiar este resultado. Merece la pena hablar de los aviones de hidrógeno si queremos reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Podrían tener un alcance más largo, pero no esperes que sean radicalmente más eficientes.

Posibles áreas de mejora de la eficiencia

El vuelo en formación, como el de los gansos, podría mejorar la eficiencia en un 10% (porque la relación sustentación-arrastre de la formación es mejor que la de un solo avión), pero este truco, por supuesto, está condicionado a que haya gansos esperando a volar en la misma dirección y al mismo tiempo.

Optimizar la distancia de los saltos: los aviones de larga distancia (diseñados para alcances de unos 15 000 km) son más ineficientes que los de corta distancia, ya que tienen que llevar combustible extra, lo que hace que haya menos espacio para pasajeros y carga. Sería más eficiente desde el punto de vista energético volar distancias más cortas en aviones diseñados para estos vuelos. El punto óptimo está en saltos de en torno a 5000 km, por lo que los típicos vuelos de larga distancia tendrían uno o dos repostajes [253]. Los vuelos de larga distancia en varios saltos tendrían un aumento de eficiencia de hasta un 15%; pero, por supuesto, introduciría otros costes.

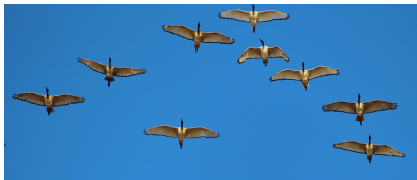


Figura C.10: Los gansos ya han aprendido que si vuelan en formación consumen menos energía. Foto de *GPS Ignacianos*.

Aeronaves ecológicas

De vez en cuando oirás hablar de gente que hace aeronaves ecológicas. Sin embargo, en las partes anteriores de este capítulo, nuestro

cálculo ha dado el resultado de que el coste de transporte de *cualquier* avión es de unos

0,4 kWh/t-km.

De acuerdo con este cálculo, las únicas modificaciones que permitirían mejorar significativamente este número son reducir la resistencia del aire (quizás con algún nuevo truco de novedosas aspiradoras en las alas) o cambiar la geometría del avión (haciendo que parezca más un planeador, con alas inmensamente anchas en comparación con el fuselaje, o deshacerse del fuselaje en sí).

Pero veamos algunas de las últimas noticias sobre «aviación ecológica» y a ver si alguno de estos aviones mejora la referencia de 0,4 kWh por t-km. Si algún avión usa menos de 0,4 kWh por t-km, podremos considerar que nuestros cálculos son defectuosos.

El Electra, un avión de madera y tela con un solo asiento, voló 50 km durante 48 minutos el 23 de diciembre de 2007 en la parte sur de los Alpes [254]. El Electra tiene una envergadura de 9 m y un motor eléctrico de 18 kW alimentado por una batería de litio de 47 kg. El peso de despegue del avión era de 265 kg (134 kg de aeronave, 47 kg de baterías y 84 kg de carga humana). Si asumimos que la densidad energética de las baterías era de 130 Wh/kg, y que se usó el 90% de una carga completa (5,5 kWh) durante el vuelo, el transporte costó aproximadamente

0,4 kWh/t-km,

que coincide exactamente con nuestros cálculos. Este avión eléctrico no tiene un consumo mucho más reducido que un avión *chupacombustible* normal.

Por supuesto, esto no significa que los aviones eléctricos no sean interesantes. Si los aviones tradicionales se pueden reemplazar por alternativas con un consumo energético similar, pero sin emisiones contaminantes, sería una tecnología realmente útil. Y, como transporte de personas, el Electra tiene un respetable consumo de **11 kWh por 100 p-km**, similar al coche eléctrico en nuestro diagrama de transportes de la página 177. Pero en este libro la pregunta de fondo es siempre: ¿de dónde viene la energía?

Algunos barcos son también pájaros

Después de hacer estos cálculos para aviones, nos dimos cuenta de que se puede aplicar a algo más que los pájaros del aire: se puede aplicar



Figura C.11: Electra F-WMDJ: **11 kWh por 100 pasajeros-km**. Foto de JeanBernard Gache: www.apame.eu.

a hidroalas y a otras embarcaciones rápidas, todas aquellas que se elevan en el agua cuando se mueven.

La Figura C.13 muestra el principio de funcionamiento de la hidroala. Un ala submarina inclinada, que puede ser bastante pequeña en comparación con el barco, soporta el peso de la embarcación. El ala genera una fuerza de sustentación impulsando agua hacia abajo, exactamente como el avión de la Figura C.2. Si asumimos que el arrastre está dominado por el del ala, y que las dimensiones del ala y la velocidad de la nave se han optimizado para minimizar la energía usada por unidad de distancia, el mejor coste de transporte posible, en términos de energía por t-km, es exactamente el mismo que en la Ecuación C.7:

$$\frac{(c_d f_A)^{1/2}}{\varepsilon} g,$$

donde c_d es el coeficiente de arrastre del ala submarina, f_A es el ratio adimensional de área definido anteriormente, ε es la eficiencia energética, y g , la aceleración de la gravedad.

Quizás c_d y f_A no sean exactamente los mismos que los de un avión, pero lo importante de esta teoría es que no depende de la densidad del fluido por el que se viaja. Por lo tanto, nuestra predicción es que el coste de transporte (energía por distancia y por masa, incluida la masa del vehículo) de un hidroala es *¡el mismo* que el coste de transporte en avión! Es decir, aproximadamente 0,4 kWh por t-km.

En un cálculo detallado para embarcaciones que se desplazan rozando la superficie del agua, como los catamaranes o los esquís acuáticos, se debería incluir la energía empleada en crear olas, pero podemos considerar que la anterior teoría hidrodinámica sirve también como aproximación.

No tenemos datos del gasto energético de un hidroala, pero algunos datos para catamaranes de pasajeros que viajan a unos 41 km/h encajan bastante bien: consume alrededor de 1 kWh por t-km.

Ha sido bastante sorprendente descubrir que un vuelo entre una isla y otra en avión no solo es mucho más rápido que ir en este tipo de barcos, sino que probablemente también consuma menos energía.



Figura C.12: Hidroala. Fotografía de Georgios Pazios.

Otras formas de flotar

Dirigibles

En este capítulo hemos hablado de que no se pueden conseguir aviones más eficientes reduciendo su velocidad, ya que cualquier beneficio

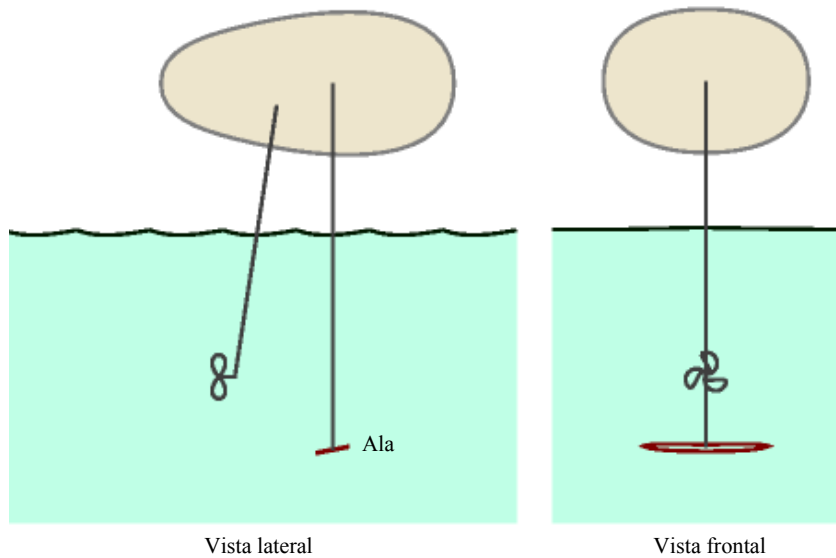


Figura C.13: Principio de operación de la hidroala.

que se pueda conseguir al reducir la resistencia del aire, se cancela por tener que impulsar más aire hacia abajo. ¿Se puede solucionar este problema cambiando de estrategia: en vez de tirar aire hacia abajo, ser tan ligero como el aire? Un dirigible, o zepelín, usa un enorme globo lleno de helio, que es más ligero que el aire, para contrarrestar el peso de su pequeña cabina. La desventaja es que el enorme globo aumenta mucho la resistencia al aire.

La forma de mantener un coste energético reducido en un dirigible (por masa y distancia) es moverse despacio, tener forma de pez y ser muy grande y largo. Hagamos unos cálculos rápidos de la energía utilizada por un dirigible.

Asumiremos que el globo tiene forma elíptica, con una sección de área A y longitud L . El volumen es $V = \frac{2}{3}AL$. Si el dirigible flota de forma estable en aire, que tiene una densidad ρ , la masa total del dirigible, que incluye la carga y el helio, tiene que ser $m_{total} = \rho V$. Si se mueve a una velocidad v , la fuerza de resistencia al aire es:

$$F = \frac{1}{2}C_d A \rho v^2, \quad (C.10)$$

donde c_d es el coeficiente de arrastre, que, basándonos en datos de aviones, podemos asumir que tiene un valor de 0,03. El consumo energético, por unidad de distancia, es igual a F dividido por la eficiencia de los

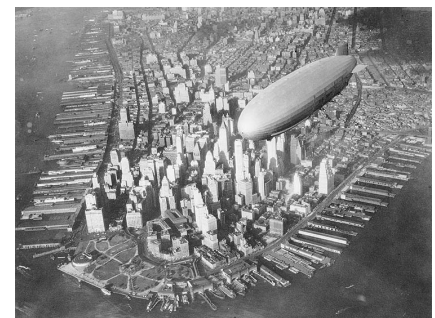


Figura C.14: El USS Akron (ZRS-4), de 239 m de largo, sobrevolando Manhattan. Pesaba 100 t y podía transportar 83 t de carga. Sus motores tenían un potencia total de 3,4 MW, y podía transportar 89 personas y armamento a 93 km/h. También se usó como portaaviones.

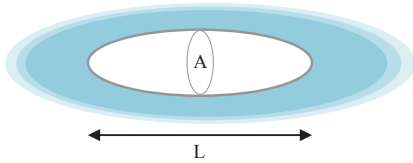


Figura C.15: Nave elíptica.

motores. Por lo tanto, el coste bruto del transporte (energía usada por unidad de distancia y de masa) es:

$$\frac{F}{\varepsilon m_{total}} = \frac{\frac{1}{2}c_d A \rho v^2}{\varepsilon \rho \frac{2}{3} A L}$$

$$= \frac{3}{4\varepsilon} c_d \frac{v^2}{L}.$$

¡Bonito resultado! El coste bruto del transporte de este dirigible ideal depende solo de su velocidad v y longitud L , no de la densidad del aire ρ ni del área frontal del dirigible A .

Este cálculo también es aplicable sin ninguna modificación a los submarinos. El coste bruto del transporte (en kWh por t-km) de un dirigible es exactamente el mismo que el de un submarino de la misma longitud y que se desplace a la misma velocidad. La masa del submarino será 1000 veces mayor, ya que el agua es 1000 veces más densa que el aire, y costará 1000 veces más moverlo. La única diferencia entre ambos serán los ingresos por publicidad.

Pongamos algunos números. Supongamos que queremos viajar a una velocidad de 80 km/h (así cruzar el Atlántico nos costaría tres días). En unidades del SI son 22 m/s. Asumamos una eficiencia $\varepsilon = 1/4$. Para conseguir el mejor coste posible, ¿cuál es la máxima longitud que podríamos tener? El Hindenburg medía 245 m de largo. Si ponemos $L=400$ m, obtenemos el siguiente coste de transporte:

$$\frac{F}{\varepsilon m_{total}} = 3 \times 0,03 \frac{(22 \text{ m/s})^2}{400 \text{ m}} = 0,1 \text{ m/s}^2 = 0,03 \text{ kWh/t-km}.$$

Si se consigue que la carga útil sea la mitad de la masa del dirigible, el coste neto del transporte de este monstruo volador sería de **0,06 kWh/t-km**, parecido al del tren.

Ekranoplanos

El ekranoplano es un avión de efecto suelo: un avión que vuela muy cerca de la superficie del agua, consiguiendo su sustentación, no tirando aire hacia abajo como un avión, o agua como un hidroala; sino apoyándose en un cojín de aire comprimido que forma entre las alas del avión y la superficie. (Puedes demostrar el efecto suelo deslizando una tarjeta so-



Figura C.16: Ekranoplano Lun. Un poco más largo y pesado que un Boeing 747. Fotografías de A. Belyaev.

bre una mesa plana). Mantener este colchón de aire requiere muy poca energía, por lo que los aviones de efecto suelo son parecidos, en términos energéticos, a vehículos de superficie sin resistencia a la rodadura. Recuerda que la mitad de la energía que usa un avión desplazándose a su velocidad óptima se emplea en vencer la resistencia del aire y la otra mitad en mantenerse a flote.

La Unión Soviética desarrolló el ekranoplano como un vehículo de transporte militar y lanzamisiles en la era Khrushchev. El ekranoplano Lun tenía una velocidad máxima de 500 km/h, y la fuerza total de sus ocho motores era de 1000 kN. Esta fuerza máxima no era necesaria una vez el vehículo salía del agua. Asumiendo que la fuerza necesaria a velocidad de crucero era un cuarto de la máxima, que los motores tenían una eficiencia del 30% y que 100 de sus 400 toneladas de masa eran carga útil, este vehículo tenía un coste neto de transporte de **2 kWh por t-km**. Seguramente, si se hubiera perfeccionado para transporte no militar, el coste neto de transporte del ekranoplano podría ser la mitad del de un avión normal.

Mitos

«*El avión iba a volar de todas formas, así que mi vuelo es energéticamente neutro*».

Esto es falso por dos razones: Primero, tu peso extra en el avión requiere un gasto adicional de energía para mantenerte en el aire. Segundo, las aerolíneas responden a la demanda planificando más o menos vuelos.

Notas y textos de consulta

Página

- 349 *Los motores de un avión a reacción real tienen una eficiencia de aproximadamente...* La eficiencia de un motor está en un rango entre 23% y 36%. Para aviones típicos, su eficiencia global varía entre 20% y 40%. Los mejores motores *bypass* consiguen una eficiencia del 30-37% en crucero [255]. No se puede tomar directamente el motor más eficiente, ya que podría ser también más pesado (es decir, podría tener una masa mayor por unidad de potencia), reduciendo la eficiencia global del avión.
- 350 *Boeing 747*. Coeficiente de arrastre del 747 obtenido de www.aerospaceweb.org. Otros datos del 747 de [256]. Datos sobre el albatros de [257].
- 355 *La distancia de vuelo de un pájaro más larga registrada...* *New Scientist*: «Bartailed godwit is king of the skies» (Número 2492, 26-3-2005); «Una limosa vuela 11 500 km sin parar desde Alaska hasta Nueva Zelanda» (11-9-2007) [258].

- 356 *El punto óptimo está en saltos de en torno a 5000 km.* Fuente: Green (2006) [253].
- 358 *...algunos datos para catamaranes de pasajeros...* De [259]: Capacidad (a plena carga) 26,3 toneladas. En un viaje de 1050 millas náuticas consumió solo 4780 litros de combustible. De aquí sacamos que el coste de transporte es de 0,93 kWh por t-km. Por cierto, estamos considerando el peso total de la embarcación. La eficiencia en el transporte de pasajeros de este mismo buque es aproximadamente 35 kWh por 100 p-km.
- 360 *El ekranoplano Lun.* Fuentes: [260], [261].

Textos de consulta: [262], [263]

Apéndice D

Sol II

En el Capítulo 6 vimos que había cuatro opciones para la biomasa solar:

1. Sustitución del carbón.
2. Sustitución del petróleo.
3. Comida para humanos y otros animales.
4. Incineración de residuos agrícolas.

Estimaremos ahora la máxima contribución posible de cada uno de estos procesos a la pila de generación. En la práctica, muchos de estos métodos necesitan una cantidad tal de energía que apenas aportan energía neta, tal como hemos visto en el Capítulo 6. Sin embargo, en las próximas secciones ignoraremos los costes energéticos involucrados en estos procesos.

Cultivos como sustituto del carbón

Si cultivamos plantas específicas para la biomasa en España, como el *Miscanthus*, con una productividad media de 1 W/m^2 , y lo utilizamos a continuación en una planta de generación eléctrica con un 40% de eficiencia, la producción final sería de $0,4 \text{ W/m}^2$.

Si dedicásemos un octavo de la superficie de España a esta actividad (unos $1400 \text{ m}^2/\text{persona}$) tendríamos **13,4 kWh por día y persona**, algo inferior a todo el consumo eléctrico en España, que en la actualidad es de 16 kWh(e) por persona y día.

Sustitución del petróleo

Existen diversas formas de convertir las plantas en combustibles líquidos. Expresaremos su potencial en términos de potencia por unidad



Figura D.1: Robles del bosque de Orgi (Navarra). Fotografía de Alberto Berrueta.

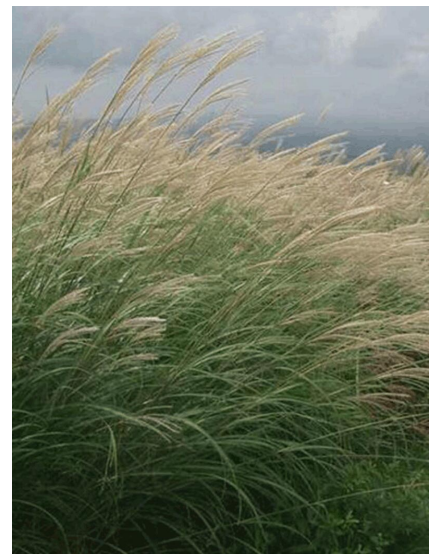


Figura D.2: *Miscanthus*. Foto de Miya.m.

de área (como en la Figura 6.8, pág. 71) y, en algunos casos, se realizará una estimación de la energía que se puede obtener.

El principal cultivo para biodiésel en España, la colza



Figura D.3: Algunos de los autores de este libro en un campo de colza. Foto de Amaya Merino.

La colza es una planta que se siembra alrededor de septiembre y se recolecta entre julio y agosto del año siguiente. En el año 2014, se cultivaron en España 43 244 ha de colza (el 0,1 % de la superficie total de España), produciendo 104 361 t de semilla (solo 1187 t se utilizan para biodiésel). El rendimiento medio fue de unas 2,5 t/ha (3 t/ha en regadío). Considerando que la semilla es algo más de un 40 % aceite (con una densidad de 0,9 kg/l), y que la conversión de aceite a biodiésel es prácticamente de 1:1, podemos estimar una producción de unos 1200 l de biodiésel por hectárea cultivada. Dado que el biodiésel tiene una densidad energética (poder calorífico) de 9,8 kWh por cada litro, se obtiene un rendimiento de **0,13 W/m²**.

Si usáramos el 25 % de la superficie de España para cultivar colza, obtendríamos unos **8,2 kWh por día y persona**.

Bioetanol de remolacha azucarera

La remolacha en España tiene un rendimiento de 48 t/ha en secano y hasta 98 t/ha en regadío. En 2014 se produjeron 3,7 millones de toneladas de remolacha azucarera en España. Con ellas se obtuvo más de medio millón de toneladas de azúcar y unas 3700 toneladas de biocombustible (nótese que aproximadamente el 75 % de la remolacha es agua).

Dado que se obtienen unos 108 litros de etanol por tonelada de remolacha azucarera, y que el etanol tiene una densidad energética de 6 kWh/l, la producción será de entre **0,35 y 0,72 W/m²** según sea en secano o regadío. Esta es la producción sin descontar la energía consumida en el proceso.

Bioetanol de caña de azúcar

En lugares donde se puede producir la caña de azúcar, como Brasil, se pueden obtener hasta 80 t/ha y año, lo cual da unos 7200 l/ha de etanol, y un rendimiento de **0,5 W/m²**. Con el residuo de materia seca, se pueden obtener unos 0,8 W/m² térmicos más, que en una planta eléctrica podrían dar **0,4 W/m²**. Sin embargo, esta no parece una solución adecuada para ningún clima de España.

Tabla D.1: Poder calorífico de distintos combustibles.

	Densidad energética (kWh/kg)
Madera, papel y cartón	4-6
Bioetanol	7,5
Carbón	8
Aceites y biodiésel	11,5

Bioetanol de maíz: el caso de EE.UU.

La potencia por unidad de área del bioetanol de maíz es sorprendentemente baja. Para divertirnos, y siguiendo la nomenclatura de los artículos especializados en el tema, usaremos unas unidades tan arcaicas como extrañas para los no anglosajones. Allá vamos: 1 acre produce 122 *bushels* de maíz al año, de cada uno de los cuales se obtienen 2,6 galones de etanol. A 84 000 BTU por galón, la densidad de potencia es de 218 400 BTU/acre, es decir, $0,22 \text{ W/m}^2$. Además, hay que utilizar una gran fracción de la energía que se genera para el procesado del etanol, lo cual en los años 90 lo convertía en una actividad que apenas aportaba la energía suficiente para su propio procesado. Sin embargo, las mejoras tecnológicas que fueron introducidas hasta 2015 hacen que el resultado neto oscile entre $0,07$ y $0,16 \text{ W/m}^2$. En cualquier caso, el límite máximo lo establece la eficiencia de la propia planta en su crecimiento que, actualmente, es de unos $0,22 \text{ W/m}^2$, lo cual podrá mejorar en todo caso con nuevas técnicas de cultivo (por ejemplo, la cosecha de maíz por unidad de área en Estados Unidos ha ido mejorando progresivamente, gracias a mejoras en las técnicas de cultivo, llegando a ser en el año 2000 el doble que en 1970).

Bioetanol celulósico

A veces visto como el etanol del futuro, el etanol proveniente de cultivos energéticos de tipo herbáceo produce $0,2 \text{ W/m}^2$ netos (descontando la energía necesaria para producirlo). Su producción hoy en día es cara y por ello se utilizan otros medios para la obtención de bioetanol.

La Jatropha: baja potencia por unidad de área

La *Jatropha* es un cultivo que produce aceite en entornos tropicales secos (300-1000 mm de lluvia al año) y al que le gustan las temperaturas de 20 a 28 °C. En climas cálidos y con buena tierra puede producir hasta 1600 litros de biodiésel por hectárea y año, es decir, unos $0,18 \text{ W/m}^2$. En tierras áridas el rendimiento es de 583 litros por hectárea y año, es decir, $0,065 \text{ W/m}^2$. Si se ocupara el 10 % de África con este cultivo de $0,065 \text{ W/m}^2$, y lo compartiéramos entre 6000 millones de personas, tendríamos $0,8 \text{ kWh/d/p}$. En comparación, el consumo de petróleo es de 97 millones de barriles al día, lo que equivale a 23 kWh/d/p . Así que incluso si cubriésemos todo África con esta planta, solo obtendríamos la tercera parte del consumo mundial de combustible.



Figura D.4: Plantación de maíz.



Figura D.5: Olivar en Granada.

España, mayor productor de aceite de oliva del mundo

Estudiemos tanto el caso del aceite de oliva, por ser el aceite más producido en España, como el de girasol, que también se produce en gran cantidad y que sería más barato para hacer biodiésel. En España hay 783 425 ha de girasol y 2,5 millones de hectáreas de olivar, que cubren el 6,5% de su superficie. En esta superficie se producen anualmente 370 000 toneladas de aceite de girasol y 880 000 toneladas de aceite de oliva. Con un poder calorífico similar al del biodiésel, esto supone 0,81 kWh/d/p. ¡Vaya!, no es mucho para ser el mayor productor de aceite de oliva del mundo. En términos de densidad de potencia, en España, donde casi toda la producción es de secano, el valor medio es de $0,044 \text{ W/m}^2$ para el aceite de oliva y de $0,05 \text{ W/m}^2$ en el caso del girasol. En regadío los rendimientos pueden duplicarse, pero, en cualquier caso, la densidad energética de estos cultivos es muy baja incluso antes de considerar el coste energético de su procesado.

¿Y las algas?

Las algas son plantas, así que todo lo que se ha dicho hasta ahora puede aplicarse a las algas. Las viscosas plantas submarinas no son más eficientes haciendo la fotosíntesis que sus primas terrestres. Pero hay un truco que no hemos discutido, habitual en las tecnologías de alga a biodiésel, consistente en hacer crecer las algas en aguas enriquecidas con CO_2 , el cual podría recogerse de centrales eléctricas u otras industrias. A las plantas les cuesta menos esfuerzo realizar la fotosíntesis si el dióxido de carbono ya ha sido concentrado para ellas. En una zona soleada de América, en estanques con concentraciones de CO_2 del 10%, Ron Putt, de la Universidad de Auburn, hizo crecer algas a 30 g por metro cuadrado al día, produciendo 0,01 litros de biodiésel por metro cuadrado y día. Esto corresponde a 4 W/m^2 , similar a algunas plantas fotovoltaicas (si bien no se ha descontado la energía que necesita el sistema de producción de algas). Si quisieras conducir 50 km diarios con un coche normal, el cual consume 6 l cada 100 km, necesitarías 300 m^2 de estanques para algas para alimentar a tu coche. En comparación, según el diagrama mostrado en la Figura 6.6, a cada español le tocan 75 m^2 de lagos y estanques. Y no hay que olvidar que hay que inyectar CO_2 para mantener la concentración al 10%. Así que sería un problema de superficie de agua y de acceso a CO_2 concentrado (cuya captura tiene un coste asociado como se ha visto en los Capítulos 23 y 31). Veamos el límite establecido para el acceso a CO_2 concentrado. Para hacer crecer 30 g de algas, se necesitan al menos 60 g de CO_2 por metro cuadrado y día (porque una molécula de CO_2 tiene más masa por cada átomo de carbono que las algas). Si todo el CO_2 de las

plantas de generación eléctrica que utilizan combustibles fósiles en España fuera capturado (1,4 toneladas por persona y año), se podrían crear 64 m² de estanques para algas por persona (0,58% del suelo de España). Esta superficie daría biodiésel a razón de 6,1 kWh por día y persona, asumiendo que se puedan aplicar los resultados de una zona soleada en América a España y sin descontar la energía necesaria para su procesado. ¿Es esta una opción posible? ¿Quizás una porción de lo calculado podría ser realmente aprovechado? Que el lector decida.

¿Y las algas en el mar?

Los números que hemos hecho anteriormente requieren bombear CO₂ constantemente a las algas; hacer esto en el mar no parece una idea factible. Sin esta ayuda, la producción de biodiésel mediante algas se reduce unas 100 veces, así que necesitaríamos cosechar algas en una superficie comparable a la de España para conseguir un rendimiento similar al de los estanques analizados.

¿Y las algas que producen hidrógeno?

Conseguir hidrógeno directamente a partir de algas expuestas al sol es una buena idea, ya que se salta varios pasos que normalmente realizan las plantas al producir carbohidratos. Cada paso reduce un poco la eficiencia. El hidrógeno se puede producir mediante fotosíntesis directamente en el primer paso. Un estudio del NREL (National Renewable Energy Laboratory, laboratorio de energías renovables dependiente del gobierno de EE.UU.) estimó que un reactor lleno de algas genéticamente modificadas, con una superficie de 11 hectáreas en el desierto de Arizona, podría producir 300 kg de hidrógeno al día. El hidrógeno contiene 39 kWh/kg, así que este sistema podría producir 4,4 W/m². Teniendo en cuenta el consumo propio de este sistema, el resultado neto sería de 3,6 W/m². Este es un valor bastante prometedor, comparable al de una planta fotovoltaica como la de Amareleja en Portugal (4,25 W/m²).

Comida para personas y otros animales

Los cultivos de cereales en España pueden producir, de media, unas 3,5 t de grano por hectárea. Con una densidad energética de 4,6 kWh/kg, esto son unos 0,18 W/m². Si dedicásemos toda la superficie de España actualmente dedicada a la agricultura a este tipo de cultivos, tendríamos



Figura D.6: Algas.



Figura D.7: Biomasa: comida y paja. Foto de Javier Samanes.

unos 18 kWh por persona y día. Recordemos que una persona necesita ingerir unos 3 kWh de comida al día, lo que resulta en un consumo de hasta 13 kWh/p/d considerando la energía extra de alimentar a los animales que nos comemos y el uso de fertilizantes y maquinaria agrícola.

Incineración de residuos agrícolas

Unas líneas más arriba, hemos visto que la generación eléctrica a partir de biomasa utilizando cultivos específicamente diseñados para ello tendría una densidad de $0,4 \text{ W/m}^2$. Si, por el contrario, se cultivan plantas para alimento humano y quemamos los residuos que no comemos (o si alimentamos a pollos con ellos y quemamos sus excrementos), ¿cuánta potencia se podría producir por unidad de área cultivada? Hagamos un cálculo aproximado y miremos después datos reales. Para el cálculo aproximado, imaginemos que los residuos provienen del área cultivable de España (4144 m^2 por habitante), que se transportan esos residuos hasta la planta de incineración más cercana y que dichos residuos producen un 5% de la potencia que producirían los cultivos dedicados a biomasa: $0,02 \text{ W/m}^2$. Si multiplicamos esta cifra por 4144 m^2 , tenemos unos 2 kWh por persona y día.

¿Hemos sido justos en este cálculo? Hagamos una nueva estimación de esta cifra utilizando los datos que ofrece la planta de biomasa de Acciona en Sangüesa, planta pionera en el sur de Europa en la quema de paja para generación eléctrica. Según su web, esta planta de 30,2 MW genera 200 GWh al año quemando 160 000 t de paja, recogida en un radio medio de 100 km. Considerando una producción de paja de 1500 kg/ha (esa paja se habrá recogido en un área cultivada de unos 1000 km^2), la densidad de potencia sería, entonces, de $0,023 \text{ W/m}^2$, muy cercanos a los $0,02 \text{ W/m}^2$ calculados anteriormente. Desde otro punto de vista, considerando toda la paja producida en España (unos 8 millones de toneladas al año) y suponiendo una eficiencia de la central eléctrica del 35%, se podrían obtener unos 0,6 kWh al día por persona. Utilizando toda la superficie actual de cultivo (suponiendo que fuera viable hacerlo con la misma productividad) esta cifra ascendería a 2,1 kWh al día por persona. Este resultado se obtiene sin considerar otros consumos energéticos como el transporte y olvidando que la paja no es un residuo, sino que tiene otros usos, especialmente en ganadería.

Gas de vertedero

Actualmente la mayor parte del metano que se genera en los vertederos proviene de productos biológicos, principalmente restos de comi-

da. Mientras sigamos tirando cosas como restos de comida y periódicos a la basura, el gas de vertedero será una fuente sostenible de energía. Además, quemar este gas es beneficioso desde el punto de vista del cambio climático, ya que el metano es un gas de efecto invernadero mucho más nocivo que el CO_2 . Un vertedero que reciba 7,5 millones de toneladas de basura doméstica al año puede producir 50 000 m^3 por hora de metano.

En 1994, se estimaba que la producción de gas en los vertederos era de unos 0,5 m^3 por persona y día, lo cual equivale a 0,5 kWh de energía química por persona y día, que podría convertirse en unos 0,2 kWh eléctricos por persona y día si se quema en una planta con una eficiencia del 40 %. No obstante, debido a nuevas legislaciones, las emisiones en vertederos tienden a disminuir, siendo hoy en día aproximadamente la mitad. En España, con 500 kg de residuos urbanos (aproximadamente los residuos generados por una persona en un año) se podrían obtener unos 100 m^3 de biogás. No obstante solo la mitad de ese gas es metano y, además, se estima que solo el 70 % del gas se podrá recuperar. Esto nos deja unos 35 m^3 de metano por persona y año, que equivale a 1 kWh por persona al día. Esto suponiendo que se extraigan 140 m^3 de biogás por tonelada de residuo, si bien, los proyectos existentes de vertedero obtienen entre 1 y 80 m^3 de biogás por cada tonelada que entra al vertedero, por lo que una cifra realista apenas alcanzaría 0,5 kWh por persona y día.

Incineración de basura

La Planta de Valorización Energética (PVE) de TERSA, en Sant Adrià de Besòs, es una instalación que realiza el proceso de minimizar el volumen de los residuos mediante la combustión y que aprovecha la energía que genera este proceso para producir vapor y electricidad. Su planta eléctrica tiene una potencia de 31,5 MW. Para la producción de energía, se incineran unas 350 000 toneladas de basura al año tal y como las echamos a los contenedores. Después de la quema se separan los metales para chatarra y el resto de cenizas y desechos son tratados posteriormente. La electricidad producida neta (descontando autoconsumos) ronda los 170 GWh anuales, es decir, se obtienen unos 0,5 kWh(e) por cada kilogramo de basura, que es aproximadamente la cantidad de basura que genera una persona diariamente. La cifra es similar a la obtenida en la captación de gas en vertederos (pero ojo, no podemos obtener ambas al mismo tiempo). Además, por cada kilogramo de basura se producen 0,22 kWh de vapor, que se aprovechan en una red de calefacción, y se recuperan unos 200 g de metal para chatarra.

Notas y textos de consulta

Página

- 363 *Si cultivamos plantas específicas para la biomasa en España, como el Miscanthus, con una productividad media de 1 W/m²...* Fuente: [264]. Tabla 1. Los valores de producción del *Miscanthus* en el sur de Europa van desde 10 hasta 44 t/ha/año (este último valor en condiciones altamente favorables). Con un poder calorífico de unos 18 MJ/kg (entre 17 y 20 MJ/kg según esta misma fuente), esto equivale a entre 0,6 y 2,5 W/m². Sin embargo, observando los valores más típicos de la tabla, teniendo en cuenta que cultivado en masa no se conseguirán los resultados experimentales, se puede tomar como valor típico 20 t/ha/año, que equivale a aproximadamente 1 W/m².
- 364 *Colza*. Fuentes: Anuario de estadística del MAPAMA [265], informe técnico de Agri for Energy [266] y dos artículos de investigación [267, 268].
- 364 *Bioetanol de remolacha azucarera*. Fuentes: [265, 269].
- 364 *Bioetanol de caña de azúcar*. Fuente: [249].
- 365 *Bioetanol de maíz*. Fuentes: [270, 271].
- 365 *Bioetanol celulósico*. Fuente: [272].
- 365 *Jatropha*. Fuentes: [273, 274].
- 366 *Aceites de oliva y girasol*. Fuente: [265].
- 366 *Algas*. Fuente: [275]. Nótese que estos datos no tienen en cuenta la energía necesaria para abastecer este proceso, que sería mayor a la producida.
- 367 *¿Y las algas que producen hidrógeno?* Fuente: [276].
- 368 *Planta de biomasa de Acciona en Sangüesa*. Fuente: [277].
- 369 *Gas de vertedero*. Fuente: [278].
- 369 *Incineradora Torsa*. Fuente: [185].

Apéndice E

Calefacción y refrigeración II

Un edificio perfectamente sellado y aislado sería capaz de mantener la temperatura en su interior eternamente sin necesidad de un sistema de calefacción. Los sistemas de calefacción son necesarios debido a que el sellado y aislamiento de los edificios no son perfectos y el calor se escapa. Las dos razones principales por las que un edificio pierde calor son:

1. **Conducción:** el calor que atraviesa las ventanas, las paredes y las puertas.
2. **Ventilación:** el aire caliente que se escapa a través de fisuras, grietas y, también, a través de los conductos de ventilación.

En un modelo estándar de pérdidas de calor, estos dos tipos de pérdidas son proporcionales a la diferencia de temperatura entre el aire de dentro y de fuera del edificio. En una vivienda española típica, la conducción es la mayor de estas pérdidas, como veremos más adelante.

Pérdidas de calor

Pérdidas por conducción

La velocidad de conducción del calor a través de una pared, el techo, el suelo o las ventanas se calcula multiplicando tres cosas: el área de la pared que atraviesa, una medida de la conductividad de la pared, que se conoce en el mundillo de la edificación como transmitancia térmica (o «valor U »), y la diferencia de temperatura.

$$\text{Pérdidas} = \text{área} \times U \times \text{diferencia temperaturas.} \quad (\text{E.1})$$

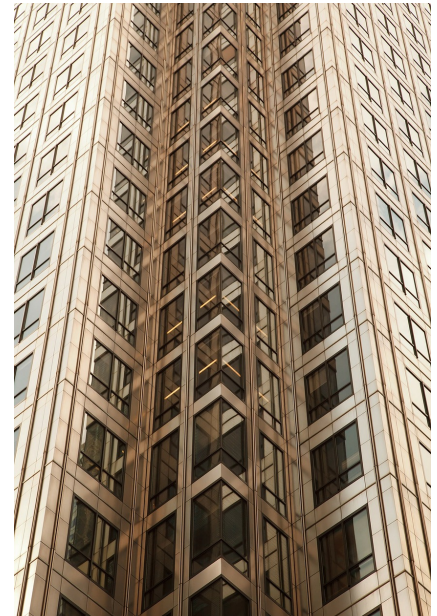


Figura E.1: Las pérdidas de calor de un edificio se producen principalmente por conducción y por ventilación.

Tabla E.1: Valores típicos de transmitancia térmica para diferentes cerramientos que se dan en una vivienda.

TIPO DE CERRAMIENTO	$U(\text{W}/\text{m}^2/^\circ\text{C})$
Paredes	
– Ladrillo macizo, 24 cm espesor	2,0
– Ladrillo hueco, 24 cm espesor	1,8
– Ladrillo hueco + cámara de aire (5 cm)	1,2
– Ladrillo hueco + aislante (5 cm)	0,5
Suelo	
– En contacto con el terreno	0,64
– Sobre cámara de aire (2,5m)	0,47
Cubierta	
– Tejas, forjado y aislamiento (5 cm)	0,32
Ventanas (carpintería metálica)	
– Acristalamiento sencillo	5,8
– Acristalamiento doble	4,0
– Acrist. doble y cámara aire (30 mm)	3,0

El valor U se mide habitualmente en $\text{W}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$. Valores altos de U se corresponden con grandes pérdidas de calor. Cuanto mayor espesor tenga la pared, menor será el valor del parámetro U . Por ejemplo, las ventanas con doble cristal tienen valores de transmitancia térmica similares a una pared sólida de ladrillo (ver Tabla E.1).

Los valores de U de aquellos objetos que estén «en serie», como podría ser un muro con su correspondiente aislante en el interior, se pueden combinar de la siguiente forma:

$$U_{\text{combinación en serie}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2}\right)}. \quad (\text{E.2})$$

Tabla E.2: Capacidad de renovación de aire por hora: valores de N recomendados por el documento básico de salubridad (DB-HS-3-Calidad del aire interior) del Código Técnico de Edificación español. No se trata de un flujo de renovación continua, sino de la capacidad máxima que ha de tener cada espacio de la casa.

	N
Dormitorios	0,7
Sala de estar	1
Cocina	4
Baños	3

Hay un ejemplo usando esta regla en la página 380.

Pérdidas por ventilación

Para calcular el calor necesario para elevar la temperatura del aire frío que entra a nuestras casas necesitamos conocer el calor específico del aire, que es $1,2 \text{ kJ}/\text{m}^3/\text{K}$. En el mundo de la construcción, las pérdidas de calor por ventilación se expresan habitualmente como el producto del número de veces que se renueva el aire a la hora, N ; por el volumen

del espacio en metros cúbicos, V ; por su calor específico, C ; y por la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio, ΔT , como se muestra en la Ecuación E.3. La tasa media de renovación de aire recomendada para un hogar es de $N = 0,6$ renovaciones de aire por hora.

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia (W)} &= C \times \frac{N}{1 \text{ h}} \times V \text{ (m}^3\text{)} \times \Delta T \text{ (}^\circ\text{C)} \\
 &= 1,2 \text{ (kJ/m}^3\text{/K)} \times \frac{N}{3600 \text{ s}} \times V \text{ (m}^3\text{)} \times \Delta T \text{ (}^\circ\text{C)} \\
 &= \frac{1}{3} \times N \times V \times \Delta T. \tag{E.3}
 \end{aligned}$$

Transmitancia térmica límite

$U \text{ (W/m}^2\text{/K)}$

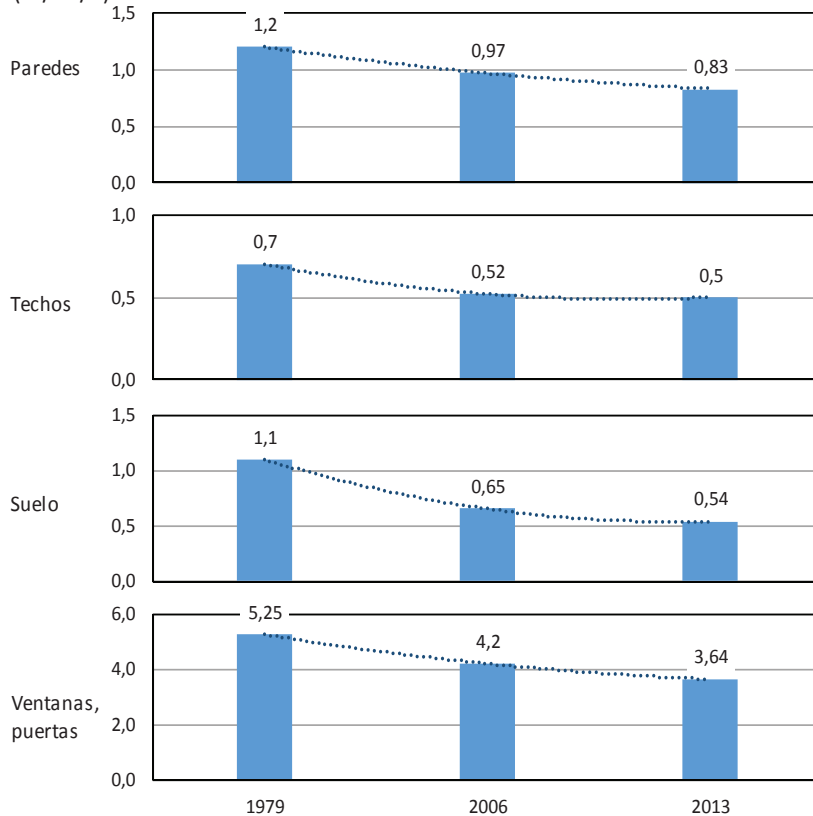


Figura E.2: Evolución de la transmitancia térmica máxima permitida por la regulación española recogida en los diferentes códigos técnicos de edificación de 1976 (llamado Norma Básica de Edificación), de 2006 y 2013 (en los correspondientes Documentos Básicos HE de Ahorro de Energía).

Pérdidas de energía y demanda de temperatura

Dado que la energía es el producto de potencia \times tiempo, podemos escribir las pérdidas de energía por conducción a través de una determinada área en un breve periodo de tiempo como:

$$\text{pérdidas por conducción} = \text{área} \times U \times (\Delta T \times \text{tiempo}), \quad (\text{E.4})$$

y las pérdidas de energía debidas a la ventilación como:

$$\text{pérdidas por ventilación} = \frac{1}{3} \times N \times V \times (\Delta T \times \text{tiempo}). \quad (\text{E.5})$$

Ambos tipos de pérdidas de energía tienen la forma de:

$$\text{pérdidas de energía} = \text{algo} \times (\Delta T \times \text{tiempo}), \quad (\text{E.6})$$

en la que ese «algo» está medido en vatios por $^{\circ}\text{C}$. Como después del día viene la noche y las estaciones pasan, las diferencias de temperatura, ΔT , que mencionábamos antes cambian. Podemos imaginarnos un periodo largo de tiempo que dividimos en un montón de periodos mucho más cortos, en los cuales podemos considerar que la diferencia de temperatura permanece prácticamente constante. Entre periodos la diferencia de temperatura sí que cambia, pero el «algo» no. Cuando se estima la pérdida total de calor de un determinado espacio, tanto por conducción como por ventilación, a lo largo de un periodo largo de tiempo, se han de multiplicar dos términos:

1. la suma de todos los «algo» (sumando el $\text{área} \times U$ de todas las paredes, techos, suelos, puertas y ventanas; y $\frac{1}{3} NV$ para el volumen de dicho espacio); y
2. la suma de todas las diferencias de temperatura \times duración (para todos los periodos considerados).

El primer factor es una propiedad de cada edificio que se mide en vatios por $^{\circ}\text{C}$. Llamemos a esto *permeabilidad* del edificio (a veces se le llama también coeficiente de pérdidas de calor del edificio). El segundo factor es una propiedad del clima y generalmente se expresa en «grados-día», ya que la diferencia de temperatura se mide en grados centígrados y los días son una unidad cómoda si pensamos en periodos de tiempo a lo largo de un año. Por ejemplo, si el interior de tu casa está a 18°C y fuera, en la calle, la temperatura es de 8°C durante una semana, diremos, entonces, que esa semana contribuyó $10 \times 7 = 70$ grados-día al término ($\Delta T \times \text{periodo}$) de la suma. A partir de ahora llamaremos *demanda de temperatura* a la suma de todos los ($\Delta T \times \text{periodo}$):

$$\text{energía perdida} = \text{permeabilidad} \times \text{demanda de temperatura}. \quad (\text{E.7})$$

Podríamos reducir las pérdidas de calor reduciendo la *permeabilidad* de nuestro edificio, o reduciendo la *demanda de temperatura*, o reduciendo ambas. Las siguientes dos secciones describen más en detalle estos dos factores utilizando una casa en Pamplona como ejemplo.

Hay un tercer factor que también se debe mencionar. Todas estas pérdidas de energía se suplen con el sistema de calefacción del edificio y también por otras fuentes como son los propios ocupantes, sus cocinas, los aparatos y el sol.

Si nos centramos en el sistema de calefacción, la energía *entregada* por dicho equipo no es la misma que la energía *consumida* por la calefacción. Estos dos términos están relacionados con el llamado coeficiente de operación (COP por sus siglas en inglés, *coefficient of performance*):

$$\text{coeficiente de operación} = \frac{\text{energía entregada}}{\text{energía consumida}}. \quad (\text{E.8})$$

El coeficiente de operación de una caldera de gas natural de condensación es del 90 %, ya que el 10 % de la energía se pierde en la chimenea. Resumiendo, se puede reducir el consumo de energía de un edificio de tres formas:

1. reduciendo la *demanda de temperatura*;
2. reduciendo la *permeabilidad* del edificio; o
3. aumentando el coeficiente de operación.

Cuantifiquemos ahora el potencial que tienen estas tres opciones. (Existe una cuarta opción que sería la de incrementar las ganancias de calor del edificio, especialmente las que se producen por el sol, pero no se considerarán aquí).

Demanda de temperatura

Podemos visualizar la demanda de temperatura en un gráfico que represente la temperatura exterior frente al tiempo (Figura E.4). Para un edificio que se mantiene a una temperatura (en el interior) de 20 °C, la demanda total de temperatura es el *área* entre la línea horizontal a 20 °C y la temperatura exterior. En la Figura E.4 (a) vemos que para un año en Pamplona, mantener el interior de nuestra casa a 20 °C durante todo el año implica una demanda de temperatura de 2857 grados-día de calefacción y 148 grados-día de aire acondicionado. Estos gráficos nos permiten evaluar fácilmente el efecto de bajar la temperatura del termostato y vivir sin aire acondicionado. Si bajamos esa temperatura hasta

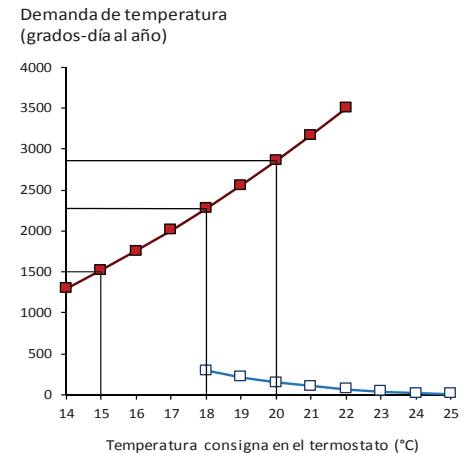
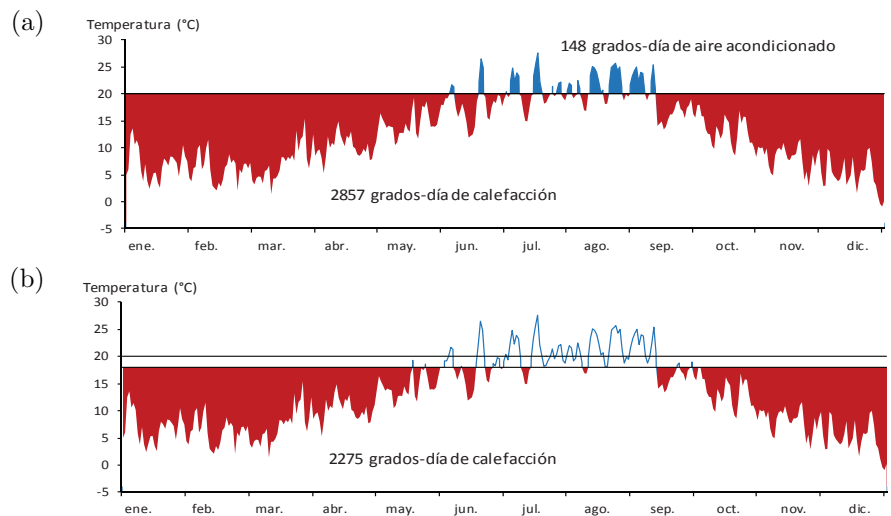


Figura E.3: Demanda de temperatura para el caso de Pamplona, en grados-días al año, como función de la temperatura de consigna del termostato (en °C). Una bajada en esta temperatura desde 20 °C hasta 18 °C supone una reducción de las necesidades de calefacción de un 20 %, al pasar de 2857 a 2275 grados-día. Si decidiéramos elevar la temperatura del termostato en verano de 20 °C a 23 °C, la demanda de aire acondicionado se reduciría un 74 %, de 148 a 39 grados-día.

Figura E.4: La demanda de temperatura para el caso de Pamplona, en 2016, mostrada como el área comprendida entre el valor de temperatura media diario y la consigna fijada en el termostato. (a) Termostato fijado en 20°C, incluyendo el aire acondicionado en verano; (b) Termostato fijado únicamente en invierno a 18°C.



los 18°C, la demanda de temperatura de calefacción desciende desde 2857 grados-día hasta 2275 grados-día (Figura E.4 (b)), que representa una reducción del 20% en la demanda de calefacción. Si vamos más allá y bajamos el termostato hasta 15°C, se consigue pasar de 2857 a 1517 grados-día, una reducción de un 47%.

Estos cálculos nos dan una indicación aproximada del beneficio de bajar el termostato en nuestras casas, pero solo será una predicción exacta si tenemos en cuenta dos detalles: el primero es que los edificios absorben de manera natural energía del sol consiguiendo así elevar la temperatura interior por encima de la exterior, incluso sin sistema de calefacción; y segundo, los ocupantes y todos sus dispositivos también emiten calor, por lo que la reducción de las necesidades de calefacción sería todavía mayor. La demanda de temperatura de un lugar, convenientemente expresada en grados-día, es un valor un tanto difícil de manejar.

Para la mayoría de la gente es complicado recordar datos como «2857 grados-día». Además, la unidad grados-día puede resultar inquietante para un académico, ya que ellos tienen otro significado para grados-día. Le podemos dar un significado mayor a esta cantidad y quizás sea más fácil de manejar si la dividimos por 365, el número de días en un año, obteniendo así la demanda de temperatura en «grados-día al día», o, si lo prefieres, sencillamente, «grados». La Figura E.5 muestra la demanda de temperatura reajustada con esta nueva unidad. Expresada de esta forma, la demanda de temperatura es simplemente la *media* de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio. Las

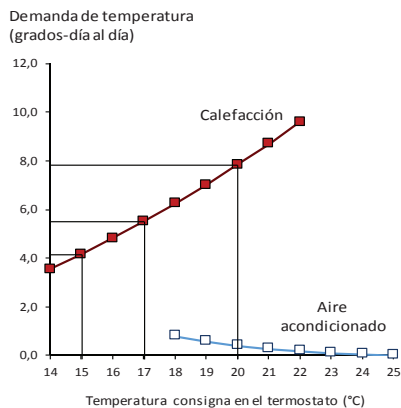


Figura E.5: La demanda de temperatura para el caso de Pamplona, en 2016, redibujada en grados-día al día, también conocidos como grados. Empleando esta unidad, la demanda de temperatura es simplemente la media de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior.

temperaturas destacadas en el gráfico son: 7,8°C para una temperatura del termostato de 20°C; 5,5°C para una consigna de 17°C, y 4,2°C con un termostato a 15°C.

Fugas de calor

Vamos a desarrollar este apartado mediante el análisis de un ejemplo concreto: un piso de 4 habitaciones de un edificio construido en 1970. En 2010, se hizo una pequeña reforma en la que se sustituyeron algunos electrodomésticos de la cocina, se aislaron las paredes exteriores y se cambiaron las ventanas por unas de marco de aluminio con rotura de puente térmico, doble cristal y cámara de aire.

PÉRDIDAS POR CONDUCCIÓN	Área (m ²)	Valor U (W/m ² /°C)	Pérdidas (W/°C)
Superficies horizontales			
– techo	91,0	0,6	54,6*
– suelo	91,0	0,6	54,6*
Superficies verticales			
– paredes sin aislar (al exterior)	70,0	1,2	84
– paredes contacto otra vivienda	17,5	2,0	35*
– ventanas simples	12,5	4,5	56,3
Total pérdidas por conducción			140,3
PÉRDIDAS POR VENTILACIÓN	Volumen (m ³)	N (renov./hora)	Pérdidas (W/°C)
– ventilación media	228	0,6	45,6
TOTAL			185,9

Tabla E.3: Desglose de las pérdidas de calor por conducción y ventilación de la casa, antes de la reforma de 2010. Las pérdidas marcadas con un asterisco no se han considerado en el cómputo global debido a que esos cerramientos están en contacto con otras viviendas, por lo que se supone que no hay pérdidas de calor a través de ellos. Se han destacado en rojo los parámetros que se alteraron con la reforma de 2010 y que se describirán en breve.

La estimación de las fugas de calor que presenta esta casa se ha calculado tal y como se indica en la Tabla E.3. Las pérdidas totales eran de 186 W/°C (o 4,5 kWh/d/°C), siendo las pérdidas por conducción el 75 %, y las debidas a la ventilación, el 25 % del total. Las pérdidas por conducción se han dividido igualmente en dos partes: las superficies horizontales (techo y suelo) y las verticales (paredes y ventanas). Dado que se trata de un piso, las pérdidas a través de superficies en contacto con otras viviendas no se han tenido en cuenta para el cálculo del total.

Para comparar las pérdidas que se dan en dos edificios que tienen diferente superficie, podemos dividir sus pérdidas entre los metros cuadrados de cada uno, lo que nos proporciona el parámetro *pérdida de calor* del edificio, que está medido en $W/^{\circ}C/m^2$. Las *pérdidas de calor* de este edificio (con una superficie total de 91 m^2) son:

$$2\text{ W}/^{\circ}\text{C}/\text{m}^2. \quad (\text{E.9})$$

Usemos los valores anteriores para estimar el consumo diario de energía de una casa en un día frío de invierno. En un día frío de invierno, considerando una temperatura exterior de -1°C y una temperatura interior de 19°C , la diferencia de temperatura es de $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$. Si esta diferencia se mantiene durante 6 horas al día, la pérdida de energía al día será:

$$186\text{ W}/^{\circ}\text{C} \times 120\text{ grados} - \text{hora} \approx 22\text{ kWh}. \quad (\text{E.10})$$

Si la temperatura se mantiene en 19°C durante las 24 horas del día, la pérdida de energía será de:

$$89\text{ kWh/d}. \quad (\text{E.11})$$

Para calcular una cifra de *pérdida de energía* anual podemos tomar la demanda de temperatura de Pamplona de la Figura E.4. Con el termostato fijado en 19°C , la demanda de temperatura en 2016 fue de 2557 grados-día. Por tanto, el valor medio de *pérdida de energía* anual, si mantenemos la casa siempre a 19°C , es de:

$$4,5\text{ kWh/d}/^{\circ}\text{C} \times \frac{2557\text{ grados-día}}{365\text{ días/año}} = 31,5\text{ kWh/d}. \quad (\text{E.12})$$

Bajando el termostato hasta 17°C , la *pérdida de calor* desciende hasta los $24,3\text{ kWh/d}$. Si subimos la temperatura hasta los 21°C , la *pérdida de calor* media anual asciende hasta los 39 kWh/d .

Ten en cuenta que este cálculo se ha realizado suponiendo que se mantiene el termostato a la misma temperatura durante todo el invierno y sin tener en cuenta el calor que entra en la vivienda mediante la radiación solar. La realidad es que, en un hogar medio, la temperatura del termostato se reduce durante la noche y en los periodos de tiempo en los que no hay gente en la vivienda. Además, la radiación solar colabora en el calentamiento del hogar. Por eso, la demanda real de calefacción de una vivienda es sensiblemente menor que los valores anteriormente calculados. Como ejemplos de consumo real en Pamplona podemos aportar el consumo en calefacción de dos de los autores de este libro. Uno de

ellos consume una media de 22 kWh diarios en calefacción, mientras que el otro, cuya vivienda está mejor aislada, consume 15 kWh diarios. Ambas viviendas se encuentran en edificios construidos en torno a 1950, con una superficie de unos 110 m² cada una y han sido reformadas para aumentar su eficiencia energética.

Efecto de aumentar el aislamiento

Durante 2010 se hicieron las siguientes modificaciones en la casa del ejemplo inicial:

1. Se incorporó aislante en las paredes exteriores.
2. Se cambiaron las ventanas antiguas por unas nuevas con doble cristal.

¿Cómo afectan estos cambios a la estimación de las *pérdidas de calor*? La pérdida total antes del cambio era de 186 W/°C. El hecho de añadir el aislante a las paredes en contacto con el exterior (con un nuevo valor de transmitancia asociado $U = 0,7 \text{ W/m}^2/\text{°C}$) reduce las pérdidas de la casa en 34 W/°C. La sustitución de las antiguas ventanas por unas nuevas con doble cristal y cámara de aire (modificando el valor de la transmitancia a $U = 3 \text{ W/m}^2/\text{°C}$) reduce las pérdidas por conducción a través de estos cerramientos en casi 19 W/°C. Con todas estas mejoras se consigue una reducción total de las pérdidas de un 30%, pasando de 186 a 133 W/°C, es decir, pasamos de 4,5 a 3,2 kWh/d/°C. En la Tabla E.4 se muestran los ahorros esperados con estas dos modificaciones durante un día de invierno con una diferencia de temperatura entre el interior de la vivienda y el exterior de 15°C.

- Incorporación de aislante en las paredes (cerramientos verticales)	12 kWh/d
- Sustitución de ventanas por unas con doble cristal y cámara de aire	6,7 kWh/d

Tabla E.4: Desglose de las reducciones en las pérdidas de calor conseguidas con las reformas de la casa que se ha puesto de ejemplo, un día de invierno con una temperatura media exterior 15°C inferior a la interior.

El parámetro *pérdida de calor* de la casa del ejemplo inicial (con una superficie de 91 m²) se reduce así un 30%, pasando de 2 a 1,4 W/°C/m².

Hemos visto que es realmente difícil mermar las fugas de un edificio ya construido. Una medida mucho más sencilla es bajar la temperatura del termostato. Por ejemplo, pasando de 20 a 18°C se consiguen reducciones del 20%. Si combinamos las dos acciones comentadas, la modificación física de los elementos que componen los cerramientos y la bajada de la consigna del termostato, el modelo predice que las pérdidas se pueden

llegar a reducir en más de un 50%. Además, como parte del calor lo generamos los propios inquilinos de las casas, los aparatos que utilizamos y los rayos de sol que se cuelean por las ventanas, las reducciones en el consumo de gas serían mayores.

Reducción de fugas de calor por revestimientos interiores

¿Se pueden reducir las fugas de calor a través de las paredes si las cubrimos, por la parte del interior de la vivienda, con algún tipo de aislante? La respuesta es sí, pero se pueden dar dos problemas. Primero, el espesor del recubrimiento interior sería mayor de lo que cabría esperar. Para transformar un muro de ladrillo de 24 cm ya existente (con un valor de transmitancia $U = 2,2 \text{ W/m}^2/\text{°C}$) en una pared con un valor decente de este parámetro ($U = 0,3 \text{ W/m}^2/\text{°C}$, por ejemplo), se necesitan unas planchas de aislante de 6 cm. Segundo, se podrían formar condensaciones en la cara oculta entre las diferentes capas de aislante, lo que podría desencadenar problemas de humedades.

Si no se busca una reducción tan grande, podemos apañarnos con un recubrimiento más fino. Por ejemplo, unas planchas prefabricadas de 2 cm que tienen un valor de $U = 1,7 \text{ W/m}^2/\text{°C}$. Con estas planchas sobre la pared, el valor de U se reduciría de $2,2 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ a:

$$\frac{1}{\left(\frac{1}{2,2} + \frac{1}{1,7}\right)} \simeq 1 \text{ W/m}^2/\text{°C}. \quad (\text{E.13})$$

Definitivamente, una reducción que merecería la pena.

Intercambio de aire

Una vez que un edificio está bien aislado, la causa principal de pérdida de calor es la ventilación (las renovaciones de aire) en lugar de la conducción. Las pérdidas de calor por la ventilación se pueden reducir si se transfiere parte del calor del aire saliente al aire que entra desde el exterior. Sorprendentemente, una gran parte de este calor puede ser transferido sin necesidad de emplear energía extra. El truco está en emplear una especie de nariz artificial imitando su funcionamiento natural. La nariz calienta el aire entrante porque enfría el que sale. Hay un gradiente de temperatura a lo largo de la nariz y sus paredes están más frías en las zonas más cercanas a los orificios nasales. Cuanto más grande sea la nariz, mejor funciona el sistema, como un intercambiador a contra corriente.

En las narices *naturales*, la dirección del flujo de aire se alterna sucesivamente. Otra forma de configurar una nariz es colocando dos conductos para el aire, uno para el entrante y otro para el saliente, separados desde el punto de vista del aire, pero acoplados lo suficientemente cerca desde el punto de vista de la transmisión de calor como para que el calor pueda pasar fácilmente de un flujo de aire al otro. Así es como estas narices, llamadas intercambiadores de calor, funcionan en los edificios.

Eficiencia energética en edificios

En España, desde el Real Decreto RD47/2007 que regulaba la certificación energética de aquellos edificios de nueva construcción y con el nuevo RD135/2013 que incluye en esta certificación a edificios ya existentes, se obliga a clasificar a todos los inmuebles con una letra dentro de una escala que mide cómo de eficiente es energéticamente. Y esta clasificación se hace con base en dos indicadores principales: la energía primaria anual consumida por el edificio (expresada en kWh/m² de superficie útil) y las emisiones anuales de CO₂ (medidas como kg/m² de superficie útil). También se deben calcular otros indicadores que hacen un desglose de los consumos energéticos y de las emisiones referentes a cada uno de los usos que se le da a la energía.

Como cada edificio va a tener unas necesidades energéticas diferentes dependiendo de múltiples factores (el clima, el uso que se le vaya a dar, su forma o dimensiones, sistemas de climatización y agua caliente sanitaria que emplee, etc.), es necesario tener en cuenta edificios de características similares y compararlos para asignar una letra u otra. Por eso, los indicadores que van a determinar la letra que se asigna a cada edificio (Figura E.6) se calculan relacionando el edificio en estudio con uno de referencia de la misma zona climática.

Passivhaus. La casa pasiva

En esta misma línea de la eficiencia energética, se debe mencionar también una corriente de edificación que se lleva desarrollando desde hace muchos años, pero que últimamente está cogiendo más fuerza. En la Directiva Europea 2010/31/UE se marcó como objetivo para el año 2020 que todos los edificios de nueva construcción fueran de consumo energético casi nulo. Esta es, precisamente, la filosofía que persiguen las Passivhaus, las viviendas pasivas que, especialmente en las fases de diseño y de cálculo de proyecto, tratan de reducir al máximo la demanda energética.

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO TERMINADO ETIQUETA

DATOS DEL EDIFICIO

Nombre y apellidos	Tipo de edificio
Denominación / Rehabilitación	Dirección
	Municipio
Referencias catastrales	C.P.
	C. Autónoma

ESCALA DE LA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

Letra	Consumo de energía kWh / m ² año	Emisiones kg CO ₂ / m ² año
A (más eficiente)		
B		
C		
D		
E		
F		
G (menos eficiente)		

REGISTRO

Válido hasta diciembre 2018

ESPAÑA
Directiva 2010 / 31 / UE

Figura E.6: Etiqueta de calificación energética de los edificios en la que se tiene que incluir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ anuales. La escala va desde la letra A (edificio más eficiente) hasta la letra G (edificio menos eficiente), lo que permite ver de forma clara la eficiencia energética de nuestro edificio. (Extraído del RD 135/2013).



Figura E.7: Primer edificio que se construyó bajo el estándar Passivhaus, situado en la localidad de Darmstadt, Alemania. Foto de W. Feist.

Este tipo de construcciones se empezaron a estudiar en Alemania. Bo Adamson y Wolfgang Feist crearon oficialmente el estándar Passivhaus en 1988, y en 1990 se construyó el primer ejemplo bajo este estándar en Darmstadt, Alemania (Figura E.7).

Los principios en los que se fundamentan las casas pasivas son:

- Mucho aislamiento. Con espesores que doblan o triplican los empleados en las construcciones tradicionales se reducen las pérdidas por conducción a través de suelos y paredes.
- Eliminación de puentes térmicos. Los puentes térmicos son las zonas de la envolvente del edificio por donde se *escapa* el calor y que, a pesar de tener un buen aislamiento, pueden hacer que las pérdidas energéticas sean considerables.
- Control de las infiltraciones de aire, para evitar que el aire frío de la calle se *cuele* dentro de casa.
- Ventilación con recuperación de calor. Si controlamos las infiltraciones y hacemos pasar el aire que se tiene que renovar dentro del edificio por un recuperador de calor, podremos precalentar dicho aire, como comentamos en la página 380.
- Ventanas con buenas prestaciones. Como vimos en la Tabla E.1, las ventanas (y con las puertas ocurre lo mismo) son las zonas más débiles de los cerramientos de un edificio. Con sistemas de doble cristal, cámara de aire y vidrios de baja emisividad se puede mejorar notablemente este apartado para minimizar las pérdidas.
- Aprovechar el sol. Utilizar la radiación proveniente del sol que se cuela en los edificios para así reducir la demanda de calefacción. De igual manera, hay que controlar el exceso de radiación en verano para minimizar el uso de sistemas de aire acondicionado.

Para que un edificio obtenga el certificado Passivhaus debe cumplir con los siguientes requisitos: una demanda máxima para calefacción de $15 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$; una demanda máxima para refrigeración de $15 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$ (para aquellos edificios con sistemas de calefacción y refrigeración por aire, la carga de frío y calor debe ser menor que 10 W/m^2); un valor en el ensayo de estanqueidad (que determina las filtraciones de aire) menor de $0,6 \text{ ren./h}$; un consumo total de energía primaria inferior a $120 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$, y una temperatura superficial interior en invierno superior a 17°C . Para adaptar estos consumos a la unidad utilizada en este libro (kWh/p/d), podemos suponer viviendas de 90 m^2 ocupadas por 2 personas. En este caso, el estándar Passivhaus equivale a consumos inferiores a $1,8 \text{ kWh/p/d}$ en calefacción, otros $1,8 \text{ kWh/p/d}$ en refrigeración y un consumo total de energía primaria inferior a 15 kWh/p/d . En la Tabla E.5 se muestran dos ejemplos de casas pasivas construidas en España.



Localidad	Roncal (Navarra)	Moraleda (Granada)
Año	2011	2009
Superficie útil	185 m ²	98 m ²
Demanda calef.	12 kWh/m ² /año (3 kWh/p/d)	3 kWh/m ² /año (0,4 kWh/p/d)
Demanda refrig.	-	1 kWh/m ² /año (0,13 kWh/p/d)
Consumo total de energía primaria	113 kWh/m ² /año (29 kWh/p/d)	68 kWh/m ² /año (9 kWh/p/d)

Tabla E.5: Dos ejemplos de casas pasivas que se han construido en España. Una, en la localidad navarra de Roncal, y la otra, en la localidad granadina de Moraleda de Zafayona, que fue precisamente el primer edificio con esta certificación en España. Los consumos energéticos por persona y día se han calculado suponiendo dos habitantes por vivienda. Fotos de *BAU Passivhaus* y www.construible.es.

Mejorando el coeficiente de operación (COP)

Podrías pensar que el coeficiente de operación, COP, de una caldera de condensación, que es de un 90 %, es difícil de batir. Pero, realmente, se puede superar gracias a las bombas de calor. Mientras que las calderas

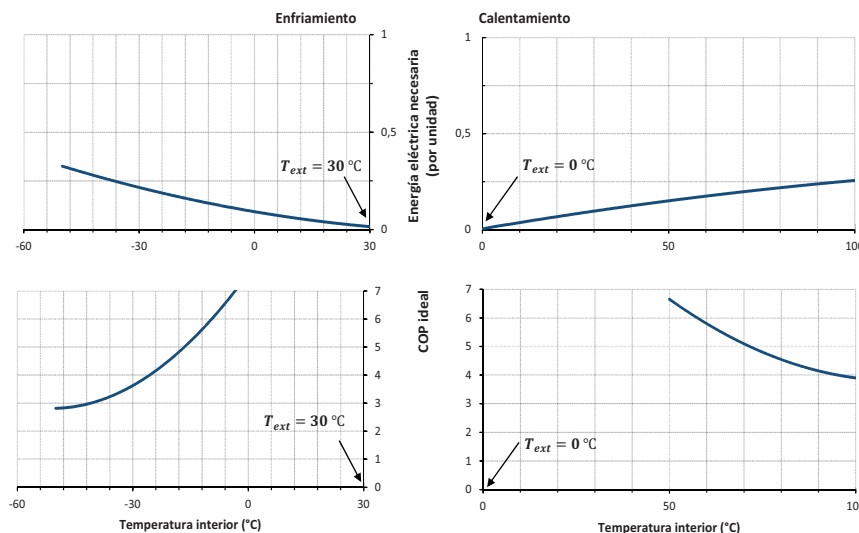


Figura E.8: Eficiencias ideales de las bombas de calor. Fila superior: (Izquierda) Electricidad necesaria, según los límites de la termodinámica, para sacar calor de un lugar a una temperatura T_{in} a otro lugar que está a una temperatura de $T_{ext} = 30^\circ\text{C}$; (derecha) Energía eléctrica necesaria para introducir calor a un lugar a temperatura T_{in} desde un lugar a temperatura $T_{ext} = 0^\circ\text{C}$. Fila inferior: la eficiencia de estos sistemas se expresa normalmente con el coeficiente de operación, que representa el calor movido por unidad de energía eléctrica.

de condensación utilizan energía química y transforman un 90 % de esta energía en calor útil, una bomba de calor emplea algo de electricidad para *mover* calor de un sitio a otro (por ejemplo, de fuera de un edificio al interior). Normalmente la cantidad de calor útil entregado es mucho mayor que la energía eléctrica empleada para ello, por eso se pueden alcanzar coeficientes de operación de 3 o 4.

Teoría de las bombas de calor

A continuación puedes encontrar las fórmulas para el cálculo teórico de las eficiencias de las bombas de calor, es decir, de la energía eléctrica necesaria por unidad de calor entregado. Si estamos impulsando calor desde el exterior de un lugar a una temperatura T_1 a otro que está a una temperatura mayor T_2 –ambas temperaturas expresadas en relación al cero absoluto (es decir, en Kelvin)–, la eficiencia ideal es:

$$\text{eficiencia} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}. \quad (\text{E.14})$$

Si, en cambio, estamos impulsando calor desde un lugar a una temperatura T_2 al exterior que está más caliente, a una temperatura T_1 , la eficiencia ideal será:

$$\text{eficiencia} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (\text{E.15})$$

Estos límites teóricos (Figura E.8) solo podrían alcanzarse impulsando calor infinitamente despacio. Date cuenta que la eficiencia ideal es mayor conforme la temperatura interior T_2 se acerca a la temperatura exterior T_1 . En teoría, los sistemas de bomba de calor que impulsan la energía desde el suelo (bombas de calor geotérmicas) podrían tener mejores coeficientes de operación que los que emplean aire, ya que la temperatura del suelo está más próxima a la temperatura interior que lo que suele estarlo la temperatura del aire exterior. Sin embargo, en la práctica, una bomba de calor que impulsa el calor desde el aire exterior suele ser la opción más simple y más empleada siempre que el clima no sea demasiado frío.

La calefacción y el suelo

En esta sección presentamos algún cálculo interesante. Imagina que tienes colectores solares en tu tejado, y siempre que el agua de los co-

lectores alcanza los 50 °C la bombas a través de una gran roca que hay debajo de tu casa. Si llega un triste y gris mes, podrías utilizar el calor almacenado en esa roca para calentar tu casa. Pero ¿cómo de grande debería ser esa roca para poder guardar energía para tu casa durante un mes entero a 50 °C? Supongamos que tenemos una demanda térmica de 24 kWh al día, durante 30 días, y que la casa está a 16 °C. La capacidad calorífica del granito es de $0,195 \times 4200 \text{ J/kg/}^\circ\text{C} = 820 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$. Por tanto, la masa necesaria de roca será:

$$\begin{aligned} \text{masa} &= \frac{\text{energía}}{\text{capacidad calorífica} \times \text{diferencia de temperatura}} \\ &= \frac{24 \times 30 \times 3,6 \text{ MJ}}{(820 \text{ J/kg/}^\circ\text{C})(50^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C})} \\ &\simeq 100\,000 \text{ kg.} \end{aligned} \tag{E.16}$$

100 toneladas, que se corresponden, considerando una densidad del granito de $\rho = 2750 \text{ kg/m}^3$, con una roca de $6 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 1 \text{ m}$.

Almacenamiento en el suelo sin paredes

Vale, hemos calculado el tamaño del almacenamiento en el suelo que deberíamos emplear, pero ¿es fácil mantener todo el calor dentro?, ¿deberíamos rodear la roca con algún tipo de aislamiento?

En realidad, el suelo es un material aislante bastante bueno. Hagamos unos cálculos para demostrarlo. Si introducimos una barra caliente en el suelo, el calor se difundiría por la tierra de acuerdo a esta expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(\kappa/(C\rho))t}\right), \tag{E.17}$$

siendo κ la conductividad térmica del suelo, C el calor específico del terreno y ρ su densidad. Esta ecuación describe una curva con forma de campana de anchura:

$$\sqrt{2\frac{\kappa}{C\rho}t}. \tag{E.18}$$

Por ejemplo, después de 6 meses ($t = 1,6 \times 10^7 \text{ s}$), usando los valores del granito para estos parámetros ($C = 0,82 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $\kappa = 2,1 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$), la anchura es de 6 m. Si usamos los valores de otro material, como el agua ($C = 4,2 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\kappa = 0,6 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$),

Tabla E.6: Propiedades del granito. (Tomamos el granito como ejemplo de una roca típica).

Calor específico:	$C = 820 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$
Conductividad térmica:	$\kappa = 2,1 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$
Densidad:	$\rho = 2750 \text{ kg/m}^3$
Calor específico volumétrico:	$C_v = 2,3 \text{ MJ/m}^3/^\circ\text{C}$

Tabla E.7: Conductividades térmicas. Para más propiedades ver Tabla E.8.

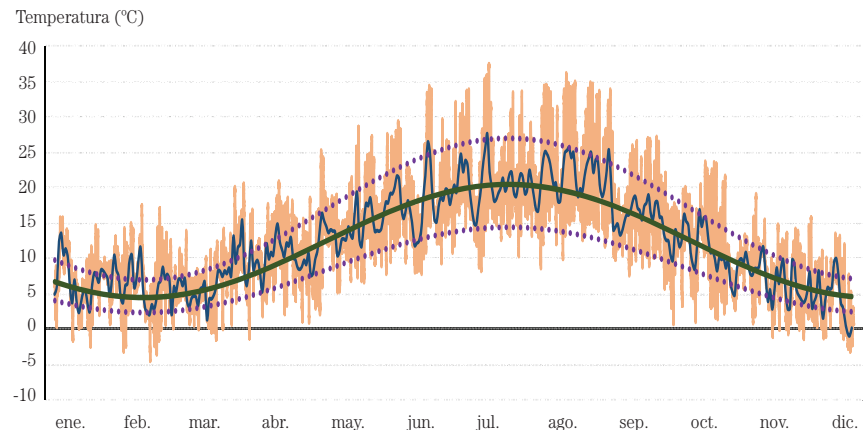
	(W/m/°C)
Agua	0,6
Cuarzo	8
Granito	2,1
Corteza terrestre	1,7
Barro seco	0,14

la anchura es de 2 m. Por eso, si la región de almacenamiento es mayor que $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$, la mayor parte del calor almacenado seguirá ahí pasados 6 meses (porque 20 m es significativamente mayor que 6 m y que 2 m).

Los límites de las bombas de calor geotérmicas

La baja conductividad térmica del suelo es un arma de doble filo. Gracias a esta baja conductividad, el suelo es capaz de mantener el calor durante un largo periodo de tiempo. Pero, por otro lado, esta baja conductividad también implica que sea más complicado meter y extraer el calor del terreno rápidamente. Veamos cómo el valor de este parámetro, la conductividad térmica del suelo, limita el uso que se les puede dar a las bombas de calor geotérmicas. Consideremos un barrio con una alta densidad de población. ¿Podría todo el mundo utilizar este tipo de bombas de calor sin emplear el reabastecimiento activo de verano, como se propone en la página 207? El problema en esta situación sería que, si todos extraemos calor del suelo al mismo tiempo, podríamos congelar el terreno. Abordemos esta cuestión a través de dos estimaciones. Primero, calcularemos el flujo natural de energía que entra y sale del suelo en verano y en invierno. Si el flujo de calor que queremos extraer en invierno es mucho mayor que estos flujos naturales, estas extracciones alterarán significativamente las temperaturas del suelo y, por lo tanto, no sería factible. Para esta estimación asumiremos que el terreno justo debajo de la superficie se mantiene, gracias a la influencia combinada del suelo, el aire, las nubes y el cielo nocturno, a una temperatura que presenta pequeñas variaciones durante el año (Figura E.9).

Figura E.9: La temperatura en Pamplona, en 2016, y una gráfica que muestra que esta temperatura es la suma de una variación anual, con forma sinusoidal entre $4,5\text{ °C}$ y $20,5\text{ °C}$, y otra variación, también sinusoidal, con régimen de oscilación diario, de 9 °C . La temperatura media es de $12,5\text{ °C}$.



	Conductiv. térmica κ (W/m/°C)	Calor específico C_v (MJ/m ³ /°C)	Longitud caract. z_0 (m)	Flujo $A\sqrt{C_v\kappa\omega}$ (W/m ²)
Aire	0,02	0,0012		
Agua	0,57	4,18	1,2	5,7
Granito	2,1	2,3	3	8,1
Hormigón	1,28	1,94	2,6	5,8
Suelo arenoso:				
– seco	0,30	1,28	1,5	2,3
– 50 % saturado	1,80	2,12	2,9	7,2
– 100 % saturado	2,20	2,96	2,7	9,5
Suelo arcilloso:				
– seco	0,25	1,42	1,3	2,2
– 50 % saturado	1,18	2,25	2,3	6,0
– 100 % saturado	1,58	3,10	2,3	8,2
Suelo de turba:				
– seco	0,06	0,58	1,0	0,7
– 50 % saturado	0,29	2,31	1,1	3,0
– 100 % saturado	0,50	4,02	1,1	5,3

Tabla E.8: Conductividad térmica y calor específico de varios materiales y tipos de suelo; longitud característica deducida de la Ecuación E.24 y el flujo pico asociado, calculado con la Ecuación E.26, suponiendo una variación anual de temperatura con una amplitud de 8,3°C.

Respuesta a las variaciones de la temperatura exterior

El cálculo de la respuesta de la temperatura interior del suelo para ver si el flujo de calor entra o sale del suelo requiere de unas matemáticas algo avanzadas que se han agrupado en la Tabla E.9 (pág. 391), al final de este apéndice. La recompensa de este cálculo es un diagrama bastante bonito (Figura E.10) que muestra cómo la temperatura va variando con el tiempo a distintas profundidades. Este diagrama muestra la respuesta para cualquier material en términos de la longitud característica z_0 (Ecuación E.24), que depende de la conductividad κ y el calor específico C del material y de la frecuencia de variación de la temperatura exterior ω . (Podemos elegir para los cálculos tanto variaciones diarias como variaciones anuales usando la misma teoría). A una profundidad de $2z_0$, las variaciones en la temperatura son un séptimo de todas las variaciones que se producen en la superficie y, además, están retrasadas temporalmente un tercio de cada ciclo (Figura E.10). A una profundidad de $3z_0$ las variaciones de temperatura son un veinteaño de las variaciones en la superficie y están retrasadas medio ciclo.

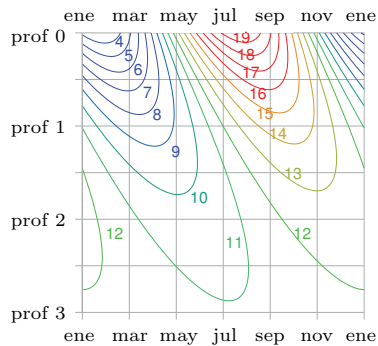


Figura E.10: Temperatura (en °C) en función de la profundidad y del tiempo. Las distintas profundidades están dadas en las mismas unidades que la longitud característica, z_0 , que, para el granito y considerando variaciones anuales, es de 3m. En «prof 2», a 6m de profundidad, la temperatura está siempre entre 11 y 12°C. En «prof 1», a 3m, se mueve entre 8 y 15°C.

Si analizamos el caso de variaciones diarias y consideramos el terreno como granito sólido, la longitud característica es $z_0 = 0,16$ m. Entonces, 32 cm de roca es el espesor necesario para soportar las oscilaciones diarias de temperatura. Para variaciones anuales, considerando también granito sólido, la longitud característica es $z_0 = 3$ m.

Quedémonos con las variaciones anuales y analicemos otros materiales. Las longitudes características para varios materiales las puedes encontrar en la tercera columna de la Tabla E.8. Para suelos arenosos mojados y suelos de hormigón, la longitud característica es similar a la del granito, aproximadamente 2,6 m. En suelos secos o turbosos, la longitud característica es más corta, alrededor de 1,1 m. Esto puede parecer bueno a primera vista, porque significa que no necesitas cavar muy profundo para encontrar un terreno con una temperatura estable; sin embargo, en suelos secos los flujos naturales de calor son menores.

El flujo natural cambia a lo largo del año y tiene un valor pico (Ecuación E.26), que es más pequeño cuanto menor sea el valor de conductividad térmica de ese terreno.

Para el caso de granito sólido, el flujo pico es de 8 W/m^2 . En suelos secos, el flujo pico varía entre $0,7 \text{ W/m}^2$ y $2,3 \text{ W/m}^2$. En suelos húmedos, el flujo pico se encuentra en el intervalo que va desde 3 W/m^2 hasta 8 W/m^2 .

¿Y todo esto qué significa? Podemos tomar un valor medio de entre todos estos números para el flujo, por ejemplo 5 W/m^2 , como punto de referencia útil, y calcular cuánta potencia esperamos poder extraer por unidad de área, con una bomba de calor geotérmica. Si extraemos un flujo de calor mucho menor que esos 5 W/m^2 , la perturbación que estaremos introduciendo al flujo natural será pequeña. Si, por el contrario, tratamos de extraer un flujo mucho mayor que los 5 W/m^2 , deberíamos tener en cuenta que la temperatura del suelo se moverá lejos de su valor natural, por lo que esos flujos tan altos serán imposibles de alcanzar.

La densidad de población de una ciudad como Pamplona, expresada como la superficie urbana por persona, es de $125 \text{ m}^2/\text{p}$. Con este valor de densidad podemos deducir que el límite aproximado de energía diaria entregada por un sistema de bomba de calor geotérmica sería:

$$5 \text{ W/m}^2 \times 125 \text{ m}^2 = 15 \text{ kWh/día y persona.} \quad (\text{E.19})$$

Si comparamos este valor con el pico de demanda en invierno que podría tener un piso como el del ejemplo que hemos usado en este apéndice (unos $60 \text{ kWh/persona y día}$), vemos que no todo el mundo podría utilizar esta tecnología, a no ser que durante el verano se preocupen de meter grandes cantidades de calor en la tierra.

Hagamos un segundo cálculo para estimar el flujo de calor que podríamos extraer de forma continua mediante un ciclo que pasa por dentro del terreno a una profundidad de $h = 2$ m. Supongamos que nos permitimos reducir la temperatura del suelo en las proximidades de nuestro ciclo (a 2 m de profundidad) hasta $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ por debajo de la temperatura media del terreno en la superficie; y supongamos también que esta temperatura superficial permanece constante. Entonces, podemos deducir el flujo de calor que estamos demandando desde la superficie hasta la profundidad h . Considerando una conductividad térmica de $1,2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (valor típico para suelos húmedos arcillosos),

$$\text{flujo} = \kappa \times \frac{\Delta T}{h} = 3 \text{ W/m}^2. \quad (\text{E.20})$$

Si, como antes, asumimos una densidad de ocupación de $125 \text{ m}^2/\text{p}$, la máxima potencia por persona que un sistema de bomba de calor podría suministrar, si todo el mundo en el barrio dispone de este sistema, es de 675 W , que son 9 kWh/día y persona.

Así que, otra vez, llegamos a la conclusión de que, en un barrio típico con edificios mal aislados, como es bastante común, no todo el mundo podría emplear este sistema de bomba de calor, a no ser que introdujeran durante el verano grandes cantidades de energía en el suelo. En ciudades con densidades de población mayores es improbable que estos sistemas sean viables.

Por eso se suele recomendar el uso de bombas de calor aire-aire como mejor opción en la mayoría de los casos.

Masa térmica

¿El hecho de aumentar la masa térmica de un edificio ayuda a reducir las facturas de calefacción y aire acondicionado? Depende. La temperatura exterior puede variar a lo largo del día en unos 10°C . Un edificio con una gran masa térmica, con gruesas paredes de piedra, por ejemplo, podrá amortiguar de forma natural estas variaciones de temperatura y, sin necesidad de calefacción ni aire acondicionado, podrá mantener una temperatura próxima a la media exterior. De esta forma, nos ahorraríamos los sistemas de climatización varios meses al año. Por el contrario, los edificios con poca masa que además estén mal aislados se calentarían demasiado durante el día y se enfriarían mucho durante la noche, haciéndonos gastar mucho en calefacción y en aire acondicionado.

Sin embargo, no siempre son beneficiosos los edificios con una gran masa. Si un cuarto se ocupa únicamente durante un par de horas al día en invierno, el coste energético de calentar dicho cuarto hasta una temperatura agradable será mayor si la masa de la habitación es grande. Este calor extra invertido permanecerá durante más tiempo en la habitación, pero, si nadie la ocupa, será una energía perdida. Por eso, en el caso de habitaciones poco utilizadas, parece que tiene sentido inclinarse por estructuras con una masa menor y calentar esa pequeña masa rápidamente solo cuando sea necesario.

Notas y textos de consulta

Página

- 372 *Capacidad de renovación de aire por hora.* Valores estimados de acuerdo a las indicaciones recogidas en el Documento Básico HS-3 del CTE [279], que especifica los caudales de ventilación mínimos exigidos para las distintos espacios. Esta tasa no es la renovación media que tiene lugar en un edificio típico, sino la capacidad que deben tener los sistemas de ventilación. Una tasa razonable de renovaciones de aire en un hogar es de 0,6 renovaciones por hora.
- 372 *Valores típicos de transmitancia térmica.* Estos valores se han deducido del Documento de Apoyo al Documento Básico HE-1: Cálculo de parámetros característicos de la envolvente [280]. Para otros tipos de cerramientos, en función del material, espesor, modo de ensamblaje, etc., se puede consultar el documento de referencia.
- 381 *Eficiencia energética en edificios.* La información relacionada con la forma en la que se realiza la calificación energética se ha extraído de un manual titulado *Escala de calificación energética. Edificios de nueva construcción* [281]. En él se puede aprender la forma de estimar cada uno de los indicadores y conocer así la letra que correspondería a nuestro edificio. Para más información sobre la calificación energética de edificios, se puede consultar la sección de publicaciones del IDAE [282].
- 381 *Passivhaus. La casa pasiva.* Para escribir esta sección se ha empleado la guía del estándar Passivhaus elaborada por la Comunidad de Madrid [283]. También se ha consultado la página web del Passive House Institute [284] y de la asociación española Plataforma de Edificación Passivhaus [285] de donde se han obtenidos las fotos y valores de los ejemplos mostrados.

Si asumimos que el terreno es un material sólido, homogéneo, con conductividad térmica k y capacidad calorífica C , la temperatura a una profundidad z por debajo de la superficie en el instante de tiempo t responde a la temperatura impuesta en la superficie en concordancia con la ecuación de difusión:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C} \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}. \quad (\text{E.21})$$

Para una temperatura impuesta, que sigue una función sinusoidal con frecuencia ω y amplitud A en la superficie (es decir, a profundidad $z = 0$),

$$T(0, t) = T_{\text{superficie}}(t) = T_{\text{media}} + A \cos(\omega t), \quad (\text{E.22})$$

la temperatura resultante a una profundidad z y en el instante de tiempo t es una función oscilante y amortiguada,

$$T(z, t) = T_{\text{media}} + A e^{-z/z_0} \cos(\omega t - z/z_0), \quad (\text{E.23})$$

siendo z_0 la longitud característica tanto de la amortiguación como de la oscilación,

$$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C\omega}}. \quad (\text{E.24})$$

El flujo de calor (la potencia por unidad de área) a una profundidad z es:

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} e^{-z/z_0} \sin(\omega t - z/z_0 - \pi/4). \quad (\text{E.25})$$

Por ejemplo, en la superficie, el flujo pico de calor es:

$$\kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} = A \sqrt{C\kappa\omega}. \quad (\text{E.26})$$

Tabla E.9: Cálculo del flujo natural de calor causado por la variación sinusoidal de la temperatura.

Apéndice F

Olas II

La física de las olas en aguas profundas

Las olas contienen dos tipos de energía: potencial y cinética. La energía potencial es la energía necesaria para mover todo el agua de los valles a las crestas, mientras que la energía cinética es la asociada al movimiento del agua.

La gente, a veces, cree que cuando la cresta de la ola se mueve por el océano a 50 km por hora, el agua que se encuentra en dicha cresta también se debe estar moviendo a 50 km por hora en la misma dirección. Sin embargo, esto no es cierto. Para entenderlo, podemos pensar en las olas humanas que hacemos en los estadios. En este caso, las personas no nos estamos moviendo alrededor del estadio, sino que simplemente nos levantamos y sentamos cuando llega nuestro turno. El movimiento de una partícula de agua en el océano es similar: si nos fijamos en un alga que flota en el agua, nos daremos cuenta que ésta prácticamente no avanza, sino que su movimiento es ascendente y descendente, y un poco hacia delante y hacia atrás en la dirección de avance de la ola – este efecto se podría recrear si las personas presentes en las olas de los estadios se movieran como limpiadores de ventanas, sacando brillo a un gran cristal mediante un movimiento circular–. Así, la ola tiene energía potencial debido a la elevación de la cresta sobre la superficie del agua y energía cinética debido al pequeño movimiento de balanceo circular del agua.

Un cálculo aproximado de la potencia de las olas marinas necesita 3 ingredientes: una estimación del periodo de las olas T (el tiempo entre crestas); una estimación de la altura de las olas h , y una fórmula física que nos muestre cómo obtener la velocidad de la ola v a partir de su periodo.

La longitud de onda λ y el periodo de las olas (la distancia y el tiempo respectivamente entre dos crestas consecutivas) dependen de la velocidad del viento que genera la ola, tal y como se muestra en la Figura F.1.

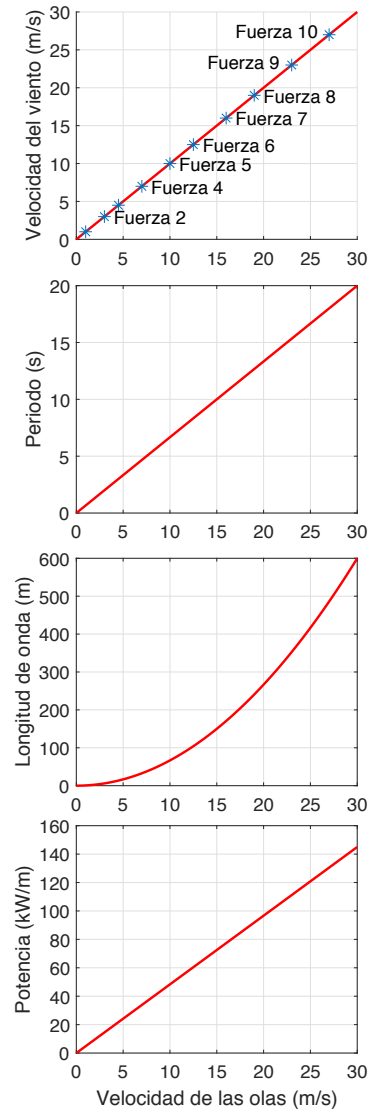
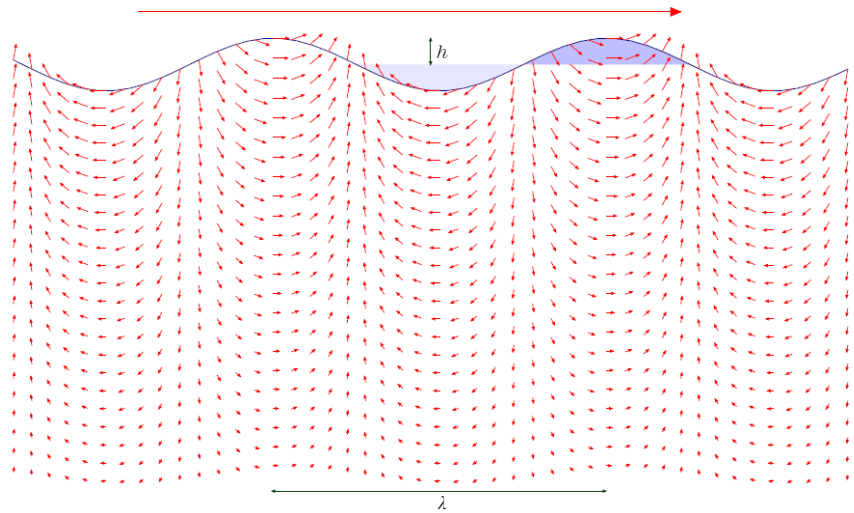


Figura F.1: Mediciones de olas en aguas profundas. El eje horizontal representa en las cuatro figuras la velocidad de las olas en m/s. De arriba a abajo las gráficas muestran: velocidad del viento (en m/s) requerida para hacer que la ola tenga la velocidad correspondiente; periodo (en segundos) de una ola; longitud de onda (en m) de una ola; y densidad de potencia (en kW/m) de una ola con amplitud 1 m.

Figura F.2: Una ola tiene dos tipos de energía: energía potencial asociada a la elevación del agua desde los valles sombreados en claro a las crestas sombreadas en oscuro, y energía cinética del agua superficial. La velocidad del agua se indica mediante las flechas pequeñas. La velocidad de la ola, viajando de izquierda a derecha, se indica con la flecha superior de mayor tamaño.



En cambio, la altura de las olas no depende de la velocidad del viento, sino que más bien depende del tiempo que ha estado el viento incidiendo sobre la superficie del agua.

Podemos estimar el periodo de las olas del mar recordando las olas que llegan a la playa. ¿Es 10 segundos un valor razonable? Para la altura de las olas asumiremos una amplitud de 1 m, lo que supone 2 m desde el valle hasta la cresta. En olas de esta altura, un hombre en una lancha no podría ver más allá de la cresta más cercana cuando está en un valle. Podemos considerar que esta altura es mayor que la media, pero siempre podemos revisarla si consideramos que es importante. La velocidad de las olas en aguas profundas está relacionada con el tiempo T entre crestas mediante la fórmula física [74]:

$$v = \frac{gT}{2\pi}, \quad (\text{F.1})$$

donde g es la aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$). Por ejemplo, si $T = 10$ segundos, entonces, $v = 16 \text{ m/s}$. La longitud de onda de una ola como esa (la distancia entre crestas) es $\lambda = gT^2/2\pi = 160 \text{ m}$.

Para una ola con longitud de onda λ y periodo T , si la altura de cada cresta y profundidad de cada valle es $\bar{h} = 1 \text{ m}$, la energía potencial por unidad de tiempo y por unidad de longitud es:

$$P_{\text{potencial}} \simeq m^* g \bar{h} / T, \quad (\text{F.2})$$

donde m^* es la masa por unidad de longitud, que es aproximadamente $\frac{1}{2}\rho h(\lambda/2)$ (aproximando el área sombreada de la cresta de la Figura F.2 con el área de un triángulo), y \bar{h} es el cambio de altura del centro de masas de un trozo de agua elevada, que es aproximadamente h . Por tanto,

$$P_{potencial} \simeq \frac{1}{2}\rho h \frac{\lambda}{2} gh/T. \quad (F.3)$$

Teniendo en cuenta que λ/T es simplemente la velocidad a la cual viaja la ola, v , obtenemos:

$$P_{potencial} \simeq \frac{1}{4}\rho gh^2 v. \quad (F.4)$$

Las olas tienen tanto energía cinética como energía potencial y, sorprendentemente, los dos valores son exactamente iguales. Preferimos no detallar aquí esta demostración para no entorpecer los cálculos principales, así que tendrás que creértelo. Por lo tanto, la potencia total de las olas es el doble del valor calculado en la Ecuación F.4:

$$P_{total} \simeq \frac{1}{2}\rho gh^2 v. \quad (F.5)$$

Solo hay una cosa incorrecta en esta respuesta: esta potencia es demasiado grande porque hemos despreciado la extraña propiedad de las olas dispersivas: la energía de la ola no viaja a la misma velocidad que las crestas, sino que viaja a una velocidad que se llama velocidad de grupo, que en el caso de olas en aguas profundas es la *mitad* de la velocidad v . El hecho de que la energía viaja más despacio que las crestas se puede apreciar arrojando una piedrita a un estanque y observando la expansión de las ondas atentamente. Lo que esto significa es que debemos corregir la Ecuación F.5 y dividirla entre 2. La potencia correcta por unidad de longitud de un frente de ola es:

$$P_{total} = \frac{1}{4}\rho gh^2 v. \quad (F.6)$$

Considerando una velocidad $v = 16$ m/s y una altura $h = 1$ m, tenemos que:

$$P_{total} = \frac{1}{4}\rho gh^2 v = 40 \text{ kW/m}. \quad (F.7)$$

Este cálculo aproximado concuerda con mediciones reales en el océano atlántico [75].

Las pérdidas debidas a la viscosidad del agua son mínimas: una ola con un periodo de 9 segundos tendría que dar 3 vueltas a la Tierra para perder el 10 % de su amplitud por este fenómeno.

Sistemas de generación undimotriz

Dispositivos para aguas profundas

¿Cómo de efectivos son los sistemas de extracción de potencia de las olas? Si consideramos el dispositivo ideado por Stephen Salter y conocido como «Pato de Salter» (que consiste en una fila de «patos» de 16 m de diámetro, alimentado por olas del océano Atlántico con una potencia media de 45 kW/m), se podrían generar 19 kW/m, incluyendo las pérdidas asociadas a la transmisión de la potencia generada a la central eléctrica de transformación [75].

El dispositivo Pelamis, creado por Ocean Power Delivery, ha relevado al «Pato de Salter» como sistema líder de generación undimotriz para aguas profundas. Cada dispositivo tiene forma de serpiente con 130 m de largo y está formado por una cadena de 4 segmentos, cada uno con 3,5 m de diámetro. Tiene una potencia máxima de salida de 750 kW. Los Pelamis están diseñados para ser anclados a una profundidad de unos 50 m. En una central undimotriz, 39 dispositivos colocados en 3 filas encarando la dirección principal de las olas ocuparían un área de océano de unos 400 m de largo y 2,5 km de ancho (1 km²). El área transversal efectiva de un único Pelamis es de 7 m (para buenas olas extrae una potencia correspondiente a 7 m de frente de ola). La compañía dice que una central undimotriz como esta puede generar unos 10 kW/m.

Dispositivos para aguas poco profundas

El 70 % de la energía de las olas se pierde por fricción con el fondo del océano cuando la profundidad desciende desde los 100 m a 15 m. Por lo tanto, la potencia media de las olas por unidad de longitud de costa en aguas poco profundas se reduce a unos 12 kW/m. El Oyster, desarrollado por Queen's University Belfast y Aquamarine Power Ltd [www.aquamarinepower.com], consiste en una aleta de unos 12 m de alto fijada en el fondo del mar. Está diseñada para funcionar en aguas de unos 12 m de profundidad, en áreas donde la potencia de las olas incidentes sea mayor de 15 kW/m. Su pico de potencia es 600 kW. Un único dispositivo produciría unos 270 kW siempre que las olas tengan alturas superiores

a los 3,5m. Se estima que un Oyster puede tener mayor potencia por unidad de masa de equipo que un Pelamis.

Los Oyster se podrían usar también para operar directamente instalaciones de desalinización basadas en ósmosis inversa. El pico de agua fresca generada por un desalinizador Oyster está entre 2000 y 6000m³/día. Dicha producción tiene un valor, considerando la instalación Jersey (que usa 8kWh/m³), equivalente a 600-2000kW de electricidad.

Apéndice G

Mareas II

Densidad de potencia de las presas de marea

Para estimar la potencia de una poza artificial de marea, o presa de marea, imagina que se llena rápidamente con marea alta y que se vacía rápidamente con marea baja. La potencia se genera en ambas direcciones, en el refluo y en el llenado. Esto es lo que se conoce como generación en dos direcciones o generación de doble efecto. El cambio en la energía potencial del agua, cada seis horas, es mgh , donde h es el cambio de altura del centro de masas del agua, que es la mitad del rango. (El rango es la diferencia en altura entre las mareas baja y alta; Figura G.1). La masa por unidad de área cubierta por la presa de marea es $\rho \times (2h)$, donde ρ es la densidad del agua (1000 kg/m^3). Por tanto, la potencia por unidad de área generada por una presa de marea es:

$$\frac{2\rho gh}{6 \text{ horas}}, \quad (\text{G.1})$$

asumiendo generadores perfectos. En el caso en el que $h = 2 \text{ m}$ (lo que supone un rango de 4 m), tenemos una potencia por unidad de área de la presa de marea de $3,6 \text{ W/m}^2$. Considerando una eficiencia del 90% para la conversión de esta potencia en electricidad, obtenemos:

potencia por unidad de área en una presa de marea $\approx 3 \text{ W/m}^2$.

Así, para generar 1 GW de potencia (de media), necesitamos una presa de marea con un área de unos 300 km^2 . Una poza circular con un diámetro de 20 km serviría para esto. Por comparación, esto es el área que tienen las rías de Arousa y Pontevedra juntas.

Si la presa de marea genera electricidad en una sola dirección, la potencia por unidad de área se divide entre dos. Por dar un ejemplo, la densidad de potencia media de la presa de marea en La Rance (Francia),

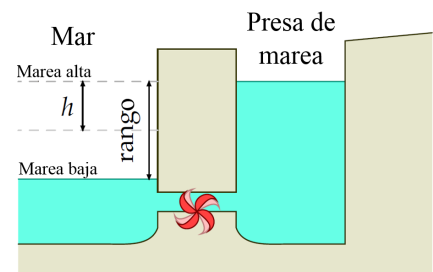
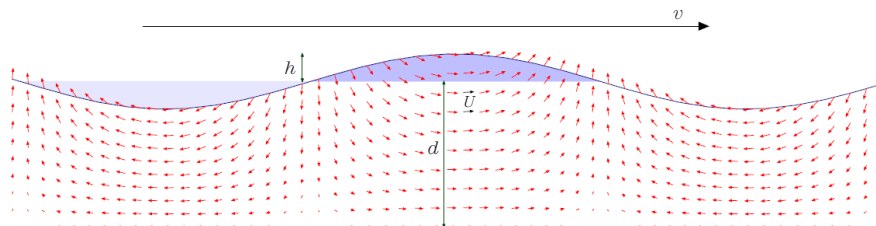


Figura G.1: Sección transversal de una presa de marea. Esta presa se llenó cuando había marea alta y ahora hay marea baja. Si dejamos salir el agua a través del generador eléctrico, la energía potencial del agua se transformará en electricidad.

Figura G.2: Una ola de marea en agua poco profunda. Al igual que las olas, la marea tiene energía de dos tipos: energía potencial asociada a la elevación del agua desde los valles, sombreados en claro; a las crestas, sombreadas en oscuro; y energía cinética por todo el agua moviéndose, según indican las pequeñas flechas. La velocidad de la ola, viajando de izquierda a derecha, se indica por la flecha mucho más grande situada arriba. Para las olas de marea, una profundidad típica podría ser 100 m; la velocidad de cresta, 30 m/s; amplitud vertical sobre la superficie de 1 o 2 m, y amplitud de la velocidad del agua de 0,3 o 0,6 m/s.



donde el rango medio de mareas es 10,9 m, ha sido de 2,7 W/m² durante décadas (ver pág. 123).

El recurso natural de las mareas

Las mareas en las costas cantábrica y atlántica de España son verdaderas olas de marea. Los tsunamis, que también se conocen como olas de marea, no tienen nada que ver con las mareas: son causados por deslizamientos de tierra debajo del agua y por terremotos. La posición de la marea alta (la cresta de la ola de marea) se mueve a mucha mayor velocidad que el flujo de marea –digamos 160 kilómetros por hora, mientras que el propio agua se mueve a únicamente 1,6 kilómetros por hora–.

La energía que podemos extraer de las mareas, usando presas de marea o parques mareomotrices, nunca puede ser mayor que la energía de las olas de marea del Atlántico. Podemos estimar la potencia total de estas grandes olas de marea atlánticas de la misma manera que se estiman las olas comunes generadas por el viento. La siguiente sección describe el modelo estándar para calcular la potencia de las olas con una profundidad d que es pequeña en comparación con la longitud de onda de la ola (Figura G.2). La potencia por unidad de longitud de la cresta de la ola, para olas de marea en aguas poco profundas, es:

$$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2. \quad (\text{G.2})$$

Tabla G.1: Flujos de potencia (potencia por unidad de longitud de la cresta de la ola) para una profundidad $d = 100$ m.

h (m)	$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2$ (kW/m)
0,9	125
1,0	155
1,2	220
1,5	345
1,75	470
2,0	600
2,25	780

La Tabla G.1 muestra la potencia por unidad de longitud de la cresta de la ola para posibles alturas. Si $d = 100$ m y $h = 1$ o 2 m, la potencia por unidad de longitud de la cresta de la ola es 150 kW/m o 600 kW/m respectivamente. Estos valores son impresionantes en comparación con la potencia neta por unidad de longitud de las olas convencionales en aguas profundas, 40 kW/m (ver Apéndice F). Las olas y mareas del Atlántico tienen amplitudes verticales similares (sobre 1 m), pero la potencia neta

en las mareas es aproximadamente 10 veces mayor que la de las olas convencionales, generadas por el viento.

Taylor [286] desarrolló un modelo más detallado para estimar la potencia de las mareas que incluye importantes efectos como el efecto Coriolis (el efecto producido por la rotación diaria de la Tierra), la existencia de olas de marea que viajan en dirección opuesta y el efecto directo de la Luna en algunos mares. Desde entonces, mediciones experimentales y modelos computacionales han comprobado y ampliado el análisis de Taylor. Si nos centramos en España, se estima que, por ejemplo, aprovechando la energía potencial del agua entre la pleamar y la bajamar en la costa atlántica andaluza, se dispone de una potencia aprovechable de 50 MW. Si se extrae además la energía cinética de las olas de marea (mediante parques mareomotrices en el estrecho de Gibraltar), se tiene un potencial de 7 GW por explotar.

La potencia de las olas de marea

Esta sección, que se puede saltar perfectamente, proporciona más detalles respecto a la fórmula de la potencia de las mareas usada en la sección anterior. Vamos a profundizar en este modelo porque las estimaciones del recurso de marea en la mayor parte de países se basan en un modelo que consideramos incorrecto.

La Figura G.2 muestra un modelo para las olas de marea que viajan a través de aguas relativamente poco profundas. Este modelo se pretende usar como base, por ejemplo, en las crestas de marea que llegan a las costas atlántica y cantábrica españolas. Es importante distinguir la velocidad U a la que se mueve la propia agua (que puede ser de alrededor de 1,6 kilómetros por hora) de la velocidad v a la que se mueve la marea alta, que es típicamente de 160 o 320 kilómetros por hora.

El agua tiene una profundidad d . Las crestas y los valles del agua se inyectan desde el lado izquierdo por las mareas de 12 horas. Estas crestas y valles se mueven con una velocidad:

$$v = \sqrt{gd}. \quad (\text{G.3})$$

Suponemos que la longitud de onda es mucho mayor que la profundidad, y despreciamos detalles como las fuerzas de Coriolis y las variaciones de densidad en el agua. Llamémosle a la amplitud vertical de la marea h . Para la suposición estándar de que hay un flujo prácticamente libre de vórtices, la velocidad horizontal del agua es prác-

ticamente constante con la profundidad. La velocidad horizontal U es proporcional al desplazamiento de la superficie y se puede obtener por conservación de masa:

$$U = vh/d. \quad (\text{G.4})$$

Si la profundidad decrece, la velocidad de la ola v se reduce (Ecuación G.3). Sin embargo, para la presente discusión asumiremos una profundidad constante. La energía fluye de izquierda a derecha a una velocidad determinada. ¿Cómo se puede estimar todo este potencial de las mareas? ¿Cuál es la máxima potencia que podemos extraer?

Una opción es elegir una sección transversal y estimar el flujo medio de potencia cinética a través del plano, asumiendo que esta cantidad representa la potencia que se podría extraer. Este método del flujo de energía cinética ya fue empleado por los consultores Black y Veatch para estimar potenciales mareomotrices. En cambio, en nuestro modelo, calcularemos el potencial de las mareas con otros medios y veremos que la respuesta del modelo anterior de flujo de energía cinética es considerablemente más pequeña.

El pico de flujo de energía cinética en cualquier sección es:

$$K_{BV} = \frac{1}{2}\rho AU^3, \quad (\text{G.5})$$

donde A es el área trasversal. Esta fórmula para el flujo de energía cinética es la misma que encontramos en el Apéndice B.

Pero la verdadera potencia incidente no es igual que este flujo de energía cinética. Lo cierto es que la potencia real total incidente en aguas poco profundas se obtiene con un sencillo cálculo; la forma de obtenerlo es calcular la energía total presente en una longitud de onda y dividirla entre el periodo. La energía total por longitud de onda es la suma de las energías potencial y cinética, cuyos valores son idénticos. Esto es una característica estándar de casi todas las cosas que se tambalean, ya sean masas en muelles o niños en columpios. Por tanto, para calcular la potencia total, simplemente tenemos que calcular una de las dos –la energía potencial por unidad de longitud de onda, o la energía cinética por longitud de onda– y después multiplicarla por dos. La energía potencial de una ola (por longitud de onda y por unidad de anchura del frente de onda) se ha obtenido en el Apéndice F, y es:

$$\frac{1}{4}\rho gh^2\lambda. \quad (\text{G.6})$$

Por lo que, multiplicando por dos y dividiendo por el periodo, la verdadera potencia de este modelo para olas de marea en aguas poco profundas es:

$$potencia = \frac{1}{2} (\rho g h^2 \lambda) \times w/T = \frac{1}{2} \rho g h^2 v \times w, \quad (G.7)$$

donde w es la anchura del frente de onda. Sustituyendo $v = \sqrt{gd}$,

$$potencia = \rho g h^2 \sqrt{gd} \times w/2 = \rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 \times w/2. \quad (G.8)$$

Comparemos esta potencia con el flujo de energía cinética K_{BV} . Sorprendentemente, estas dos expresiones tienen distinta dependencia con la amplitud h . Empleando la Ecuación G.3 y Ecuación G.4, y $A = wd$, podemos expresar el flujo de energía cinética como:

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3 = \frac{1}{2} \rho w d (vh/d)^3 = \rho (g^{3/2}/\sqrt{d}) h^3 \times w/2. \quad (G.9)$$

Por lo que el método del flujo de energía cinética sugiere que la potencia total de una ola poco profunda depende del *cuubo* de su amplitud (Ecuación G.9); pero la fórmula correcta muestra que realmente depende de la amplitud *al cuadrado* (Ecuación G.8).

La relación es:

$$\frac{K_{BV}}{potencia} = \frac{\rho w (g^{3/2}/\sqrt{d}) h^3}{\rho g^{3/2} h^2 \sqrt{d} w} = \frac{h}{d}. \quad (G.10)$$

Dado que h suele ser mucho más pequeño que d (h suele ser 1 m o 2 m, mientras que d es 100 m o 10 m), las estimaciones de la potencia mareomotriz basadas en el método del flujo de energía cinética pueden ser demasiado pequeñas, al menos en los casos en los que se puede aplicar el modelo de aguas poco profundas.

Además, las estimaciones basadas en el método del flujo de energía cinética afirman, de manera incorrecta, que la potencia total disponible en las mareas vivas (las más grandes) es 8 veces superior al de las muertas (las más pequeñas), asumiendo un ratio de amplitud de dos a uno de las vivas respecto a las muertas. Sin embargo, la estimación correcta es que la potencia total disponible en una ola viajante depende de su amplitud al cuadrado, por lo que el ratio de las mareas vivas con respecto a las muertas en la potencia total entrante es cuatro a uno.

Efecto de la plataforma continental y la fuerza de Coriolis

Si la profundidad d decrece gradualmente y la anchura permanece constante de modo que hay una mínima reflexión o absorción de la potencia entrante, entonces la potencia de una ola permanecerá constante. Esto significa que $\sqrt{dh^2}$ es una constante, por lo que deducimos que la altura de la marea depende de la profundidad según $h \sim 1/d^{1/4}$.

Esto es un modelo en crudo. Un detalle que se desprecia es el efecto Coriolis. La fuerza de Coriolis causa que las crestas y los valles de las mareas tiendan a ser más pronunciadas en su parte derecha. Por ejemplo, en el canal de la Mancha, las mareas altas son más altas y las mareas bajas son más bajas en el lado francés del canal. Despreciando este efecto, hemos podido introducir algo de error en las estimaciones.

Densidad de potencia en los parques mareomotrices

Imagina colocar molinos de viento debajo del agua, al nivel del lecho marino. El flujo de agua haría girar estos molinos. Debido a que la densidad del agua es aproximadamente 1000 veces la del aire, la potencia del flujo de agua es 1000 veces superior a la potencia del viento a la misma velocidad.

¿Cuál es la potencia que se podría obtener de un parque mareomotriz? Depende, básicamente, de si podemos o no podemos sumar las contribuciones de trozos adyacentes de suelo marino. Para el viento, esta suposición de aditividad se cree que funciona correctamente: siempre y cuando los aerogeneradores estén espaciados una distancia estándar entre ellos, la potencia total suministrada por 10 aerogeneradores adyacentes será la suma de la potencias que generaría cada uno si estuviese solo.

¿Ocurre lo mismo con los parques mareomotrices? ¿O los «aerogeneradores» sumergidos interfieren uno con el otro en generación de modo diferente? Esta pregunta no tiene una respuesta simple, válida para todos los casos. Podemos hacer dos hipótesis e identificar situaciones en las que cada suposición parece válida. La suposición de que «la marea es como el viento» dice que se pueden poner turbinas mareomotrices por todo el lecho marino, espaciadas aproximadamente 5 diámetros, y no se interferirán entre ellas, sin importar qué parte del lecho marino se cubre con dichos parques mareomotrices.

La suposición de que «solo se puede colocar una fila», en cambio, afirma que la potencia máxima extraíble en una región es la que genera-

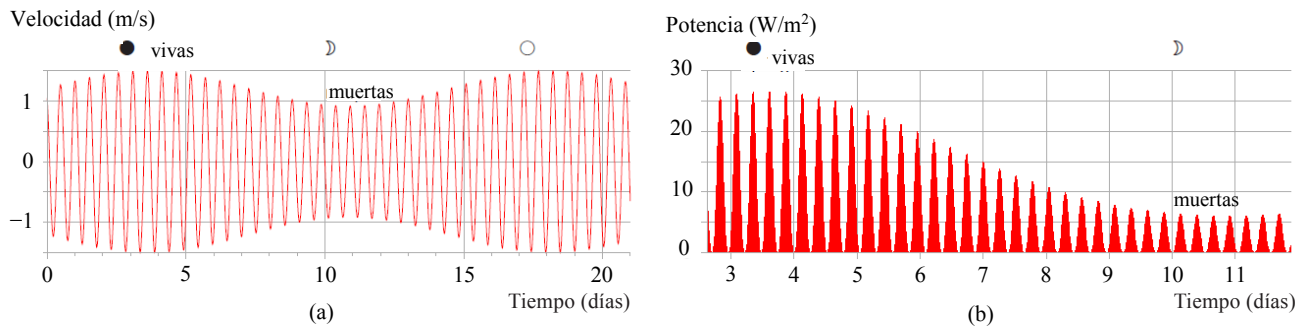


Figura G.3: (a) Corriente de marea durante un periodo de 21 días en una localización donde la máxima corriente en marea viva es 2,9 nudos (1,5 m/s). (b) La potencia por unidad de área de suelo marino durante un periodo de nueve días que contiene mareas tanto vivas como muertas. Los picos de potencia se producen cuatro veces al día, y se tiene un máximo de unos 27 W/m². La potencia media del parque mareomotriz es de 6,4 W/m².

ría una *única* fila de turbinas encarando el flujo. Una situación en la que esta suposición es correcta es el caso especial de las presas hidroeléctricas: si el agua de la presa pasa a través de una única turbina bien diseñada, no tiene sentido poner más turbinas detrás de esa. No se puede obtener 100 veces más potencia poniendo 99 turbinas más detrás de la primera. El brío del agua se extrae en la primera, y no queda más para las siguientes. Así, la suposición «solo se puede colocar una fila» es la correcta para estimar el potencial extraíble en un lugar en donde el agua fluye a través de un estrecho canal desde una zona de agua estacionaria a una determinada altura a otra zona de menor altura. (Este es el caso analizado por Garrett y Cummins [287, 288]).

Ahora nos vamos a mojar. Creemos que, en la mayor parte de los lugares de las costas cantábrica y atlántica, la suposición de que «la marea es como el viento» es una buena aproximación. Quizá algunos puntos tienen el carácter de canal estrecho. Por tanto, en dichos puntos, nuestras estimaciones pueden ser demasiado optimistas.

Asumamos que las reglas para colocar un parque mareomotriz son las mismas que para uno eólico y que la eficiencia de los generadores es la misma, aproximadamente 1/2. Podemos, entonces, tomar prestada la fórmula para la potencia en un parque eólico (por unidad de área superficial) de la página 339. Así, la potencia por unidad de área de lecho marino es:

$$\frac{\text{Potencia por generador mareomotriz}}{\text{Área por generador mareomotriz}} = \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3. \quad (\text{G.11})$$

Tabla G.2: Densidad de potencia (en vatios por metro cuadrado de suelo marino) de un parque mareomotriz como función de la velocidad de flujo U (1 nudo = 1 milla náutica por hora = 0,514 m/s). La densidad de potencia se ha calculado usando $\frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3$ (Ecuación G.11).

U (m/s)	U (nudos)	Potencia parque mareomotriz (W/m ²)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Usando esta fórmula, la Tabla G.2 muestra la potencia de un parque mareomotriz para algunas corrientes de mareas.

Ahora, ¿cuáles son las corrientes de marea típicas? Las tablas de mareas normalmente proporcionan información sobre las corrientes de las mareas con mayor rango (las llamadas mareas vivas) y con menor rango (llamadas mareas muertas). Las mareas vivas ocurren poco después de cada luna llena o cada luna nueva. Las mareas muertas ocurren después del primer y tercer cuarto de luna. La potencia de un parque mareomotriz variará a lo largo del día de una forma completamente predecible. La Figura G.3 ilustra la variación de la densidad de potencia de un parque mareomotriz con una corriente máxima de 1,5 m/s. La densidad de potencia media de este parque mareomotriz sería de 6,4 W/m².

En España no son demasiados los sitios en los que podemos obtener una densidad de potencia de 6 W/m² o más. Un ejemplo sería el estrecho de Gibraltar. Esta densidad de potencia es similar a nuestras estimaciones para parques eólicos (1,3-2 W/m²) y plantas solares fotovoltaicas (4-18 W/m²).

A partir de ahora usaremos la teoría de que «los parques mareomotrices son como los parques eólicos» para estimar la potencia extraíble de las corrientes de marea en regiones prometedoras en España. A modo de comprobación, también calcularemos la potencia del recurso natural de las mareas que cruzan cada una de estas regiones usando la teoría de la «potencia de las olas de marea» para comprobar que la potencia estimada en nuestro parque mareomotriz no excede la potencia total disponible. La mejor localización alrededor de España donde las corrientes de marea son grandes es el estrecho de Gibraltar. Por tanto, nos centraremos en esta zona para estimar la energía que podemos obtener por persona y día.

En el estrecho de Gibraltar las velocidades de la corriente de marea oscilan entre 0,5 m/s y 1,5 m/s, por lo que asumiremos la anterior densidad de potencia media de 6,4 W/m². Debemos tener en cuenta que no podemos colocar turbinas mareomotrices en toda la superficie del estrecho, sino que tendremos que seleccionar solo aquellas zonas que presenten condiciones adecuadas para su instalación: que no sean zonas de pesca ni de uso militar, que no sean zonas delimitadas para la conexión eléctrica con África o para el gaseoducto, y que además no sean zonas calificadas como parque natural. Si tenemos en cuenta todos estos filtros, al final obtenemos una superficie de 10,46 km². Por tanto, asumiendo que generamos durante las 24 horas del día, la energía máxima que podemos obtener por persona y día es de 0,035 kWh, una cantidad ínfima.

Esta estimación de capacidad de generación en Gibraltar es optimista, ya que las características de esta zona no son las ideales para aseme-

jar la generación mareomotriz a la eólica, debido a su carácter de «canal estrecho» comentado en la página 405. En las zonas estrechas, cada generador entorpece el flujo de agua, reduciendo la potencia generada por los aerogeneradores situados aguas abajo. Dado que en nuestra localización más favorable apenas conseguimos generar una cantidad significativa de energía, no extenderemos los cálculos al litoral gallego ni a Canarias.

Estimación del recurso mareomotriz vía fricción con el fondo

Otra forma de estimar la potencia disponible en las mareas es calcular la potencia que se está disipando por fricción con el lecho marino. Una capa de turbinas colocadas justo encima del lecho marino podría actuar como sustituto del fondo, ejerciendo aproximadamente la misma fricción con el agua que pasa, y extrayendo aproximadamente la misma potencia, sin alterar significativamente las corrientes de marea.

Así, ¿cuál es la potencia que se disipa por «fricción con el fondo»? Desafortunadamente, no hay un modelo directo para la fricción con el fondo. Depende de la aspereza del lecho marino y de su material –y aun cuando se tiene esta información, la fórmula no proporciona resultados precisos–. Un modelo ampliamente usado dice que la magnitud del esfuerzo (fuerza por unidad de área) es $R_1 \rho U^2$, donde U es la velocidad media del flujo y R_1 es una cantidad adimensional que representa el coeficiente de fricción. Podemos estimar la potencia disipada por unidad de área multiplicando este esfuerzo por la velocidad. La Tabla G.3 muestra la potencia disipada por fricción, $R_1 \rho U^3$, asumiendo $R_1 = 0,01$ o $R_1 = 0,003$. Para valores del coeficiente de fricción en este rango, la potencia de fricción es muy similar a la que se ha estimado para un parque

v (m/s)	v (nudos)	Densidad de potencia de fricción (W/m ²)		Densidad de potencia parque mareomotriz (W/m ²)
		$R_1 = 0,01$	$R_1 = 0,003$	
0,5	1	1,25	0,4	1
1	2	10	3	8
2	4	80	24	60
3	6	270	80	200
4	8	640	190	500
5	10	1250	375	1000

Tabla G.3: Densidad de potencia de fricción $R_1 \rho U^3$ (en vatios por metro cuadrado de suelo marino) como función de la velocidad de flujo, asumiendo $R_1 = 0,01$ o $0,003$. Flather (1976) usa $R_1 = 0,0025 - 0,003$; Taylor (1920) usa $0,002$. La última columna muestra la potencia del parque mareomotriz estimada en la Tabla G.2. Para más información ver [289] y [290].

mareomotriz. Esto son buenas noticias, porque sugiere que plantar un bosque de aerogeneradores sumergidos en el fondo de mar, espaciados cinco diámetros entre sí, no alteraría radicalmente el flujo. La fricción natural ya tiene un efecto que es del mismo orden.

Pozas de marea con bombeo

El truco del bombeo incrementa artificialmente la amplitud de las mareas en una poza de marea y permite obtener una mayor potencia. El coste energético de bombear *dentro* un agua extra en marea alta se compensa con intereses cuando la misma agua se deja salir en marea baja. De igual manera, se puede bombear una cantidad extra de agua hacia *fuera* en marea baja, para después volver a dejarla entrar en marea alta. El truco del bombeo se usa a veces en La Rance, incrementando su energía generada aproximadamente un 10% [291]. Averigüemos el límite teórico de esta tecnología. Asumiremos que la generación tiene una eficiencia de $\varepsilon_g = 0,9$ y que el bombeo tiene una eficiencia $\varepsilon_b = 0,85$. Pongamos un rango de marea de $2h$. Asumiremos también, por simplicidad, que los precios de comprar y vender electricidad son los mismos en todo momento. Por lo tanto, hay un valor para el incremento de altura b que es el que mejor resultado proporciona, teniendo en cuenta el rango de la marea y el rendimiento de la central:

$$b/\varepsilon_b = \varepsilon_g(b + 2h). \quad (\text{G.12})$$

Definiendo la eficiencia de ciclo $\varepsilon = \varepsilon_g \varepsilon_b$, tenemos:

$$b = 2h \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (\text{G.13})$$

Tabla G.4: Densidad de potencia teórica a partir de energía mareomotriz usando el truco del bombeo y asumiendo que no hay limitación en la altura de las paredes del depósito.

Amplitud de marea (medio rango) (m)	Incremento óptimo de altura b (m)	Potencia con bombeo (W/m ²)	Potencia sin bombeo (W/m ²)
1,0	6,5	3,5	0,8
2,0	13	14	3,3
3,0	20	31	7,4
4,0	26	56	13

Por ejemplo, para un rango de marea de $2h = 4\text{ m}$, y una eficiencia de ciclo de $\varepsilon = 76\%$, el incremento de altura óptimo es $b = 13\text{ m}$. Esta es la máxima altura a la cual el bombeo está justificado si el precio de la electricidad es constante.

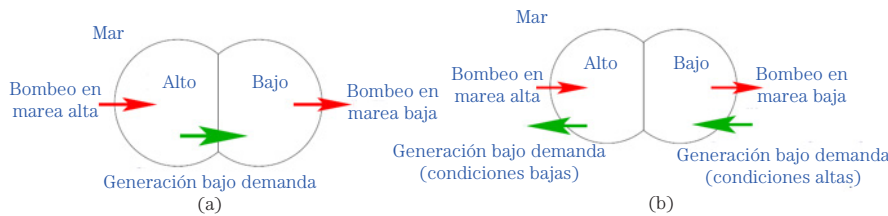
Asumamos ahora que el truco del bombeo se usa con marea baja. (Esto requiere que el depósito tenga un rango vertical de ¡30m!). La potencia generada por unidad de área es entonces:

$$\left(\frac{1}{2} \rho g \varepsilon_g (b + 2h)^2 - \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\varepsilon_b} b^2 \right) / T, \quad (\text{G.14})$$

donde T es el tiempo desde la marea alta hasta la marea baja. Podemos expresar esto como la máxima densidad de potencia disponible sin bombeo, $\varepsilon_g 2\rho gh^2/T$, escalado por un factor de incremento:

$$\left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right), \quad (\text{G.15})$$

que es aproximadamente un factor de 4. La Tabla G.4 muestra la densidad de potencia teórica que el bombeo podría suministrar. Desafortunadamente, este truco del bombeo no se explota al máximo por los costes económicos de construcción del depósito: una explotación total del bombeo requiere que la altura total de la presa sea aproximadamente 4 veces el rango de marea, y multiplicaría la energía generada por cuatro. Pero la cantidad de material necesario para construir una pared de altura H es proporcional a H^2 , por lo que los costes de construcción de una pared cuatro veces más alta se incrementarían en más de cuatro veces. Una inversión extra estaría probablemente mejor invertida en aumentar la poza horizontalmente en vez de verticalmente.



El truco del bombeo se puede usar, de todos modos, de forma gratuita cualquier día en el que el rango de las mareas naturales sea menor que el rango máximo: cuando hay marea alta se puede bombear un poco más para que llegue al máximo de los días de mareas vivas. La Tabla G.5 proporciona la potencia media generada si la altura de bombeo se fija a h , es decir, el rango en la poza es justo el doble que el de la marea. Doblar el rango vertical en días de mareas muertas es fácil, ya que estas mareas son típicamente la mitad de altas que las vivas. Bombear agua a la poza en días de marea muerta para conseguir aprovechar el mismo rango que

Figura G.4: Diferentes maneras de usar el truco de bombeo mareométrico. Los dos depósitos se encuentran a nivel de mar. (a) Una forma simple de usar dos depósitos es nombrar a uno como depósito alto y al otro depósito bajo; cuando el nivel del mar de alrededor está cerca de la marea alta, se deja entrar el agua al depósito alto, o se bombea dentro activamente (usando electricidad de otra fuente); y, de igual modo, cuando el nivel del mar está cerca de la marea baja, se vacía el depósito bajo, ya sea pasivamente o con bombeo activo; entonces, cada vez que la energía vale lo suficiente, se genera bajo demanda dejando pasar agua del depósito alto al bajo. (b) Otra forma que podría proporcionar más potencia por unidad de área es no tener flujos de agua entre los dos depósitos. Mientras que un depósito se está llenando o vaciando, el otro depósito puede estar proporcionando una potencia estable a la red, según la demanda. El bombeo se puede realizar con fuentes explotadas como el viento, o con potencia que sobra en la red (digamos, de las centrales nucleares), o para la otra mitad de la instalación, usando la potencia de un depósito para llenar o vaciar el otro.

en días de mareas vivas permite, por tanto, proporcionar aproximadamente el doble de potencia en días de mareas muertas que el conseguido sin bombeo. Así, un sistema con bombeo mostraría variaciones en la potencia cada dos semanas de justo un factor de 2 en vez de 4.

Obtener «siempre» energía mareomotriz usando dos depósitos

Aquí viene una buena idea: tener dos depósitos, uno de los cuales es el depósito «lleno» y el otro el depósito «vacío»; en cada marea alta, el depósito lleno se llena; en cada marea baja, el depósito vacío se vacía. Estos llenados y vaciados se podrían hacer pasivamente mediante compuertas, o activamente con bombas (con el truco mencionado en la Figura G.4). Cada vez que se requiere potencia, se deja que el agua fluya desde el depósito lleno al depósito vacío, o, dicho de otro modo, entre uno de los depósitos y el mar. El coste de capital de un esquema con dos depósitos puede ser mayor por la necesidad de paredes extra; pero la gran ganancia es que se dispone de potencia todo el tiempo, por lo que la instalación puede seguir a la demanda.

Tabla G.5: Densidad de potencia usando el truco del bombeo, asumiendo que la altura está limitada a la amplitud de la marea. Esta suposición se aplica, por ejemplo, en las mareas muertas, si el bombeo aumenta el rango de marea hasta el rango de las mareas vivas.

Amplitud de marea (medio rango) (m)	Incremento de altura b (m)	Potencia con bombeo (W/m ²)	Potencia sin bombeo (W/m ²)
1,0	1,0	1,6	0,8
2,0	2,0	6,3	3,3
3,0	3,0	14	7,4
4,0	4,0	25	13

Podemos incluso usar parte de la potencia generada por el depósito vacío para bombear agua extra al depósito lleno en marea alta, y, de manera similar, usar parte de la potencia del depósito lleno para vaciar aún más el depósito vacío en marea baja, como se ilustra en la Figura G.4. Este autobombeo podría incrementar la energía que proporciona la instalación sin necesidad de comprar energía a la red. Una maravillosa característica de la solución con dos depósitos es que el momento óptimo para *bombear* agua al depósito alto es la marea alta, que es también el momento óptimo para *generar* potencia con el depósito bajo. De igual modo, la marea baja es el momento perfecto para vaciar el depósito bajo, que es el mejor momento para generar potencia con el depósito alto. En una simulación simple, se ha visto que un sistema con dos depósitos en

un lugar con un rango de marea natural de 4 m puede, con un esquema de bombeo adecuado, proporcionar una potencia media de $4,5 \text{ W/m}^2$ [292]. El nivel de agua de uno de los depósitos se mantiene siempre por encima del nivel del mar; mientras que el del otro se mantiene siempre por debajo. Esta densidad de potencia de $4,5 \text{ W/m}^2$ es un 50 % mayor que la máxima densidad de potencia media posible en una presa de marea ordinaria en el mismo lugar (3 W/m^2). Además, la potencia estacionaria del sistema con dos depósitos sería más valiosa que la potencia intermitente y menos flexible de la común presa de marea.

Otra ventaja es que el sistema de dos depósitos podría también funcionar como instalación de almacenamiento con bombeo.

Notas y textos de consulta

Página

- 399 *...eficiencia del 90%...* Las turbinas tienen una eficiencia de aproximadamente 90 % para alturas de 3,7 m o más [293].
- 401 *50 MW [...] y 7 GW.* El potencial bruto de las costas españolas es de 50 MW si solo se considera la diferencia de alturas, mientras que asciende hasta 7 GW si se tienen en cuenta las olas de marea [294].
- 406 *En el estrecho de Gibraltar las velocidades de la corriente de marea oscilan entre 0,5 y 1,5 m/s.* Fuente: Proyecto de Excelencia FLEGER. Junta de Andalucía [295].
- 406 *Si tenemos en cuenta todos estos filtros, al final obtenemos una superficie de 10,46 km².* Fuente: [296].
- 410 *Obtener «siempre» energía mareomotriz usando dos depósitos.* Hay una planta mareomotriz con dos depósitos en Haishan, isla de Maoyan, China. Un único generador localizado entre los dos depósitos, como el que se muestra en la Figura G.4, proporciona una potencia continua, y genera 39 kW de media. Lectura adicional: [297, 298, 299, 300].

Para saber más sobre la fricción con el suelo y la variación del flujo con la profundidad, ver [301].

Para saber más sobre presas de marea, ver [292].

Apéndice H

Fabricación y transporte II

Energía importada

En 2017, Fan, Pan y Li [302] estimaron la huella ecológica de cada tonelada de bienes importada por un país empleando la intensidad media de carbono de las actividades económicas de dicho país (esto es, el ratio de sus emisiones de dióxido de carbono entre su producto interior bruto). Para ello, se basaron en la base de datos World Input-Output Database (WIOD) [303]. Los datos más recientes disponibles en 2017 en esta base de datos correspondían al año 2009. En España, el dióxido de carbono asociado a las importaciones (que debería añadirse a la huella oficial de carbono de 7 toneladas de CO_2 por persona y año) fue de, aproximadamente, 3 tCO_2 por persona durante el año 2009. En términos energéticos, algo así como 30 kWh/d por persona.

Veamos si podemos reproducir estas conclusiones de una forma diferente, utilizando los pesos de las importaciones.

La Figura H.3 muestra los datos sobre las importaciones de España en el año 2014 de tres maneras diferentes. En primer lugar, la columna de la izquierda indica el valor total de las importaciones según las regiones de origen de dichos bienes. A continuación, en la columna central, se presenta el valor monetario asociado a dichas importaciones, clasificado en función del tipo de producto importado [304]. Ambas categorías están expresadas en miles de millones de euros (mM€). En la categoría de «Diverso» hemos incluido varias categorías minoritarias como animales y vegetales; armas; arte y antigüedades; calzado y sombreros; metales preciosos; piedra y vidrio; pieles de animales; productos de madera y la propia categoría de otros del estudio original. Finalmente, en la columna de la derecha se pueden observar todas las importaciones marítimas (las cuales constituyeron el 77% en 2014 de todas las importaciones de España [305]) por peso y divididas en diferentes categorías [306]. El peso de dichas mercancías está expresado en millones de toneladas (Mt) y ascendió a 188 Mt totales en 2014.



Figura H.1: Fundición del acero.



Figura H.2: Mina de hierro, monte Vizmaya (Cantabria). Foto de Wikimedia Commons (Jesús Gómez).

El coste energético de los combustibles fósiles importados se incluye en las cuentas oficiales del consumo energético de España, sin embargo, el del resto de importaciones no. Para la mayoría de materiales, la energía asociada por unidad de masa es igual o mayor que 10 kWh por kg, que es la energía por unidad de masa de los combustibles fósiles. En particular, esto es cierto para todos los metales y las aleaciones, todos los polímeros y materiales compuestos, la mayoría de los productos de papel, y todas las cerámicas, entre otros. Las excepciones son las materias primas, como los minerales; y las cerámicas porosas, como el cemento, los ladrillos y la porcelana, cuyo coste energético es 10 veces menor; o la madera y algunas gomas y vidrios, cuyo coste energético es bastante menor que 10 kWh por kg [307].

Por lo tanto, podemos estimar la huella energética de nuestras importaciones simplemente empleando el peso de los productos manufacturados, si excluimos materiales como los minerales y la madera. Teniendo en cuenta los datos con los que trabajamos, vamos a meter la pata con algunos objetos realizados con madera o vidrio, pero, por suerte, esas meteduras de pata estarán equilibradas con nuestra subestimación del contenido energético de la mayoría de metales y plásticos y de bienes mucho más complejos, la mayoría de los cuales no tiene una energía asociada de 10, sino de 30 kWh por kg, o incluso más.

Para este cálculo utilizaremos las siguientes categorías de la columna de la derecha de la Figura H.3: los químicos, el material de construcción, el hierro, la siderurgia, la parte correspondiente a la maquinaria y la categoría de varios, obteniendo un total de unas 50 millones de toneladas, si excluimos los coches para considerarlos más adelante.

Emplearemos el coste energético mencionado con anterioridad, de 10 kWh por kg, para convertir estas 50 millones de toneladas a energía, y dividiremos este valor entre los 46 millones de personas que viven en España. Estos cálculos ofrecen un valor de unos 30 kWh/d por persona. Recordemos que esta cantidad únicamente tiene en cuenta el transporte marítimo, por lo que, si lo reescalamos para incluir el resto de medios de transporte, tenemos un valor de 39 kWh/d por persona.

En lo que respecta a los vehículos, se puede calcular de manera más precisa el coste energético por persona teniendo en cuenta que conocemos la energía asociada a un vehículo, 76 000 kWh (ver pág. 129). En 2014, se importaron aproximadamente 600 000 vehículos, por lo tanto, los coches importados presentan una energía asociada de 3 kWh/d por persona.

Hemos dejado fuera las categorías referentes a la alimentación: los cereales, las semillas, los abonos y los productos animales y vegetales,

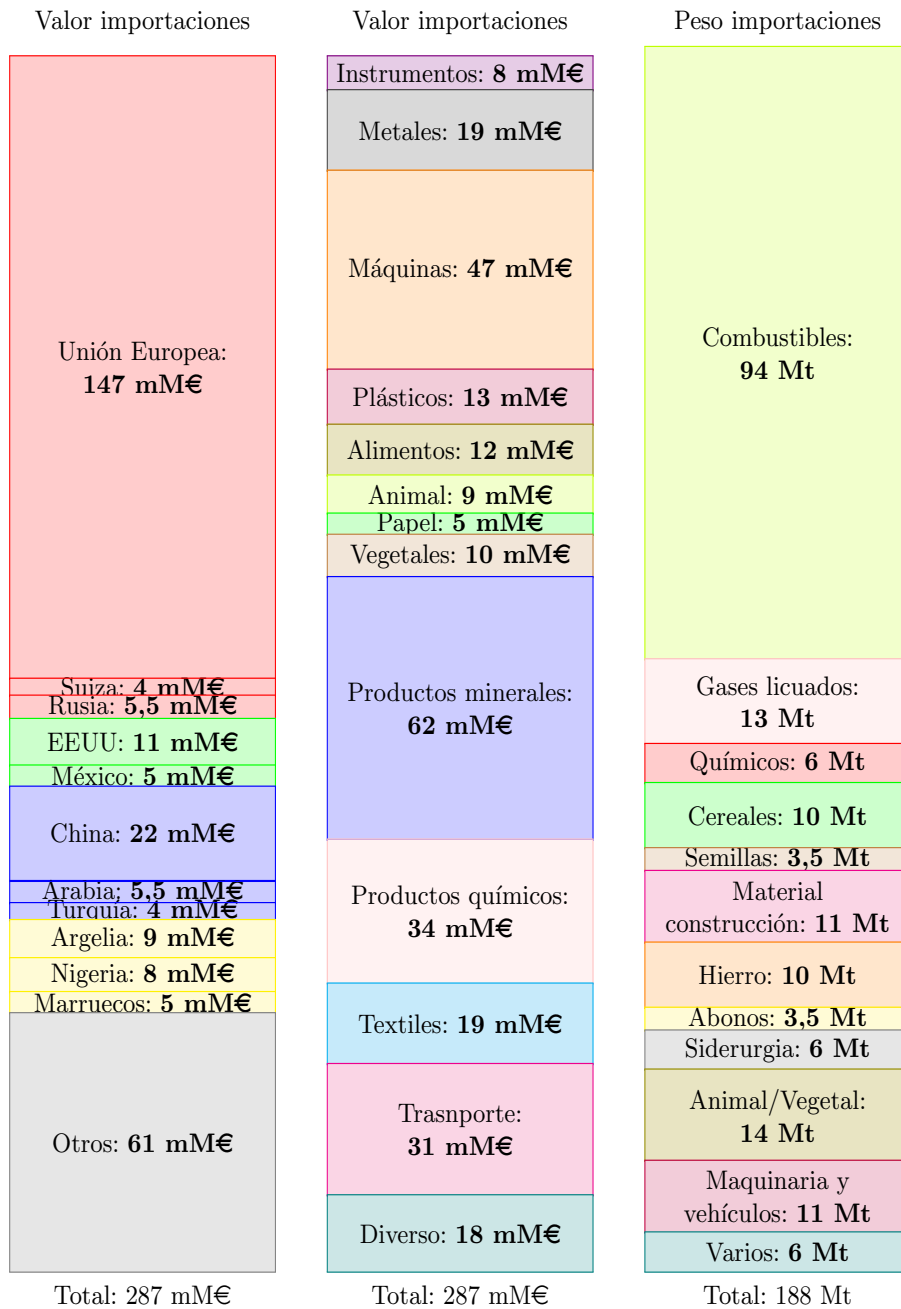


Figura H.3: Importaciones en España en 2014: valor monetario según el país o región de procedencia de la mercancía (primera pila), valor monetario según el tipo de mercancía (segunda pila) y peso de las importaciones marítimas (que representan el 77% del total de importaciones en España) según el tipo de mercancía (tercera columna).



Figura H.4: Edificio Singular, Pamplona.



Figura H.5: Acueducto de Segovia. Cuando las cosas se hacían para durar. Con casi 2000 años de antigüedad, su coste energético por persona y día es casi nulo.

así como los combustibles y los gases licuados, ya que ya han sido contabilizados en otros capítulos.

Sumando todas las aportaciones, hemos llegado a una estimación total de **42 kWh/d por persona** para la energía asociada a estas importaciones, algo por encima del cálculo que se había hecho al comenzar el capítulo, aunque cercano en cualquier caso. Sospechamos que los 42 kWh por persona y día están subestimados ya que la intensidad energética que estimamos de 10 kWh por kg es muy baja para la mayoría de los productos fabricados, como la maquinaria o los equipos eléctricos. Sin embargo, sin conocer los pesos de cada producto importado, esta es la mejor estimación que puede realizarse.

Ciclo de vida de los edificios

Las Tablas H.1 y H.2 presentan estimaciones de los requerimientos energéticos de los materiales de construcción y la propia construcción de edificios respectivamente. Esto incluye la energía empleada para transportar las materias primas a las fábricas, pero no la energía empleada para transportar el producto final al lugar de la construcción.

La Tabla H.3 utiliza los números de las tablas anteriores para estimar el coste energético para construir una casa de tres dormitorios. Los requerimientos de energía bruta amplían los límites incluyendo la energía asociada a la infraestructura urbana, como, por ejemplo, la requerida por la maquinaria que obtiene las materias primas. Por regla general, para calcular los requerimientos de energía bruta de un edificio, hay que doblar los requerimientos energéticos del proceso.

Si distribuimos los 42 000 kWh obtenidos a lo largo de los 100 años de vida de un edificio, y lo duplicamos para estimar el coste energético bruto, la energía asociada a la construcción de una casa completa es aproximadamente de 2,3 kWh/d. Este es el coste energético de la estructura de la casa únicamente –ladrillos, tejas, vigas de los techos, etc.–.

Como comprobación se puede tomar el dato de residuos generados al demoler un edificio, que según el Plan Integrado de Residuos (PNIR) del Ministerio de Medio Ambiente es de 1130 kg por metro cuadrado demolido. Tomando como energía asociada del residuo un valor de 0,75 kWh/kg (la mayoría del residuo es hormigón y ladrillo y el resto de materiales tienen algo más de contenido energético), un piso de 100 m² tendría una energía asociada de 84 750 kWh, lo cual es un valor muy cercano a la estimación anterior.

Material	Energía asociada	
	(MJ/kg)	(kWh/kg)
Madera blanda secada al horno	3,4	0,94
Madera dura secada al horno	2,0	0,56
Madera dura secada al aire	0,5	0,14
Tablero	24,2	6,7
Tablero prensado	8,0	2,2
MDF	11,3	3,1
Madera contrachapada	10,4	2,9
Madera laminada pegada	11	3,0
Chapa de madera laminada	11	3,0
Paja	0,24	0,07
Tierra estabilizada	0,7	0,19
Granito importado	13,9	3,9
Granito local	5,9	1,6
Yeso	2,9	0,8
Cartón de yeso	4,4	1,2
Fibrocemento	4,8	1,3
Cemento	5,6	1,6
Hormigón en obra	1,9	0,53
Hormigón curado al vapor	2,0	0,56
Hormigón basculante prefabricado	1,9	0,53
Ladrillos de arcilla	2,5	0,69
Bloques de hormigón	1,5	0,42
Hormigón celular autoclavado	3,6	1,0
Plásticos	901	25
PVC	80	22
Caucho sintético	110	30
Pintura acrílica	61,5	17
Vidrio	12,7	3,5
Lana de vidrio	28	7,8
Aluminio	170	47
Cobre	100	28
Acero galvanizado	38	10,6
Acero inoxidable	51,5	14,3

Tabla H.1: Estimaciones de la energía asociada a materiales de construcción (asumiendo que se utilizan materiales vírgenes y no reciclados) [308].

Tabla H.2: Estimaciones de la energía asociada a suelos, paredes y techos [308].

	Energía asociada (kWh/m ²)
Paredes:	
– Estructura y fachada de madera, interior de cartón yeso	52
– Estructura de madera, fachada de ladrillo de arcilla, interior de cartón yeso	156
– Estructura de madera, fachada de aluminio, interior de cartón yeso	112
– Estructura de acero, fachada de ladrillo de arcilla, interior de cartón yeso	168
– Ladrillo de arcilla doble, interior de cartón yeso	252
– Cemento estabilizado con tierra apisonada	104
Suelos:	
– De madera elevada	81
– Placa de hormigón de 110 mm sobre el suelo	179
– Viga de hormigón en forma de T prefabricada de 220 mm	179
Techos:	
– Marco de madera, teja de hormigón, tejado de cartón yeso	70
– Marco de madera, teja de terracota, tejado de cartón yeso	75
– Marco de madera, hoja de acero, tejado cartón yeso	92

Tabla H.3: Estimaciones de la energía requerida para construir una casa de tres habitaciones.

	Área (m ²)	×	Densidad de energía (kWh/m ²)	=	Energía (kWh)
Suelos	100	×	81	=	8100
Techo	100	×	75	=	7500
Paredes externas	75	×	252	=	19 000
Paredes internas	75	×	100	=	7500
Total					42 100

Notas y textos de consulta

Sobre el análisis de ciclos de vida, www.greenbooklive.com tiene evaluaciones de ciclos de vida de productos de la construcción.

Algunas precauciones útiles acerca de análisis de ciclos de vida pueden encontrarse en: www.gdrc.org/uem/lca/life-cycle.html.

Más enlaces: www.epa.gov/ord/NRMRL/lcaccess/resources.htm.

Parte IV

Datos útiles

Apéndice I

Referencia rápida

Unidades del Sistema Internacional (SI)

El Sistema Internacional es el conjunto de unidades de medida que todos los ingenieros deberían usar para evitar confusiones. Está formado por siete unidades básicas (amperio, kelvin, segundo, metro, kilogramo, candela y mol) y un sinnúmero de unidades derivadas, todas ellas con prefijos para denotar múltiplos y submúltiplos. La definición de las siete unidades básicas se basan en fenómenos físicos fundamentales, medibles en cualquier parte del mundo.

Los nombres de algunas de las unidades del SI derivan del nombre propio de una persona, como el vatio, en honor a James Watt. En estos casos, la primera letra de su símbolo es mayúscula (W). Sin embargo, cuando se escribe el nombre completo ha de ir en minúsculas (vatio), con la excepción de «grado Celsius».

A continuación se muestra una tabla con las magnitudes a las que se hace referencia a lo largo de este libro.

Unidades SI		
Energía	un julio	1 J
Potencia	un vatio	1 W
Fuerza	un newton	1 N
Longitud	un metro	1 m
Tiempo	un segundo	1 s
Temperatura	un kelvin	1 K

Prefijo	kilo	mega	giga	tera	peta	exa
Símbolo	k	M	G	T	P	E
Factor	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}

Prefijo	centi	mili	micro	nano	pico	femto
Símbolo	c	m	μ	n	p	f
Factor	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}

Nuestras unidades preferidas para energía, potencia y eficiencias de transporte

A medir	En nuestras unidades	Símbolo	Conversión a SI
Energía	un kilovatio hora	1 kWh	3 600 000 J
Potencia	un kilovatio hora por día	1 kWh/d	$(1000/24) \text{ W} \approx 40 \text{ W}$
Fuerza	un kilovatio hora por 100 km	1 kWh/100 km	36 N
Tiempo	una hora	1 h	3600 s
	un día	1 d	$24 \times 3600 \text{ s} \approx 10^5 \text{ s}$
	un año	1 a	$365,25 \times 24 \times 3600 \text{ s} \approx \pi \times 10^7 \text{ s}$
Fuerza por masa	kilovatio hora por tonelada kilómetro	1 kWh/t-km	$3,6 \text{ m/s}^2 (\approx 0,37 \text{ g})$

Unidades adicionales y símbolos

A medir	Nombre de la unidad	Símbolo	Valor
Humanos	personas	p	
Masa	tonelada	t	1 t = 1000 kg
	gigatonelada	Gt	1 Gt = $10^9 \times 1000 \text{ kg} = 1 \text{ Pg}$
Transporte	persona kilómetro	p-km	
Transporte	tonelada kilómetro	t-km	
Volumen	litro	l	1 l = 0,001 m ³
Área	kilómetro cuadrado	km ²	1 km ² = 10 ⁶ m ²
	hectárea	ha	1 ha = 10 ⁴ m ²

Millones, billones y otros prefijos

La abreviatura m se utiliza a veces para referirse a millones, pero esta abreviatura es incompatible con el SI –piensa en mg (miligramo) por ejemplo–. Por tanto, no usamos m para referirnos a millón como hacen algunas personas, sino que lo hemos sustituido por M. Por ejemplo, usamos Mtep para millones de toneladas equivalentes de petróleo, y MtCO₂ para millones de toneladas de CO₂. En algunos casos en los que el contexto deja claro su significado, hemos usado el prefijo compuesto mM para referirnos a miles de millones, como por ejemplo 3 mM€.

Respecto a los billones, hemos de tener mucha precaución a la hora de emplearlos, ya que el billón español equivale a un millón de millones, es decir, 10¹², mientras que el billón inglés son solo mil millones, o, lo que es lo mismo, 10⁹. Una diferencia de tres órdenes de magnitud.

Unidades molestas

Hay un montón de unidades comúnmente usadas que son molestas por varias razones. Algunas de ellas las analizamos a continuación para ayudarte a traducir las historias que lees en los medios de comunicación.

Hogares

El término «hogar» se utiliza comúnmente cuando se describe la potencia de las instalaciones renovables. Por ejemplo, «Los nuevos aerogeneradores de Acciona, que alcanzan los 182,5 m de altura, producen electricidad para 6000 hogares». El término «hogar» se define por la Asociación Eólica Británica (British Wind Energy Association) como **4700 kWh al año**. Esto supone 0,54 kW, o **13 kWh** al día. (Algunas organizaciones diferentes utilizan 4000 kWh/año por hogar).

El término «hogar» nos molesta porque nos preocupa que la gente lo confunda con *el consumo total de los ocupantes de una casa* –pero esto último es realmente unas 24 veces mayor–. El término «hogar» cubre el consumo doméstico medio de *electricidad* de una casa. Solo eso: ni la calefacción de la casa, ni el lugar de trabajo de sus ocupantes, ni su transporte, ni todas las cosas que requieren energía y que la sociedad hace para ellos.

A propósito, cuando se habla de las emisiones de CO₂ de un «hogar», la tasa oficial aparece como 4 toneladas de CO₂ por hogar al año.

Centrales térmicas

Las ideas sobre ahorro energético a veces se expresan en términos de centrales térmicas. Por ejemplo, según un informe de la *BBC* acerca de instalar bombillas LED en los semáforos: «Los ahorros de energía serían enormes –mantener los semáforos del Reino Unido funcionando requiere el equivalente a dos centrales térmicas de tamaño medio–».

¿Qué se quiere decir con *central térmica de tamaño medio*? ¿10 MW? ¿50 MW? ¿100 MW? ¿500 MW? No tenemos ni idea. Una búsqueda en Google nos indica que algunas personas piensan que es 30 MW, otras 250 MW, algunas otras 500 MW (lo más común) y otras 800 MW. ¡Qué unidad más inútil!

Definitivamente quedaría más claro en el artículo sobre los semáforos expresar lo que está diciendo con un porcentaje, ¿no?: «Mantener los semáforos del Reino Unido funcionando requiere 11 MW de electricidad, lo que supone el 0,03% del consumo eléctrico en el Reino Unido». Esto revela cómo de «enormes» serían los ahorros de energía.

La Figura I.1 muestra la potencia de las centrales térmicas de carbón españolas, que te puede ayudar si alguna vez te topas con esta unidad de potencia.

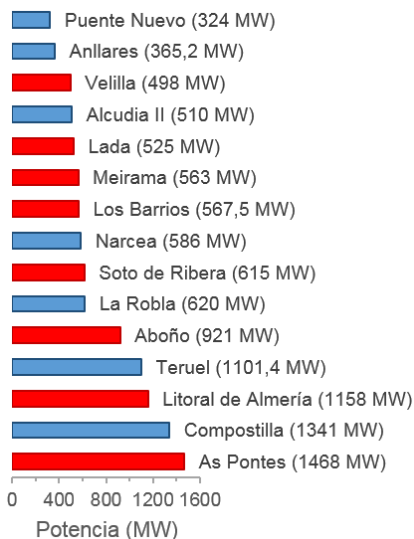


Figura I.1: Potencia de las centrales españolas de carbón. Hemos resaltado en azul aquellas centrales que todavía no han realizado las obras de mejora para poder operar a partir de 2020. En total tenemos 1900 MW, repartidos por toda España, lo que aproximadamente equivale a 1 kWh por persona y día.

Coches sacados de las carreteras

Algunos anuncios describen las reducciones de CO₂ en términos del «número equivalente de coches que se sacarían de las carreteras». Por ejemplo, Richard Branson, director de la compañía inglesa de trenes Virgin Trains, dijo que si se cambia la flota a 20% biodiésel –por cierto, ¿no consideras intolerable llamar a un tren «tren ecológico de biodiésel» cuando se alimenta con un 80% de combustibles fósiles y solo con un 20% de biodiésel?– perdón, que nos distraemos. Richard Branson dijo que *si* se cambia la flota a 20% biodiésel –enfaticamos el «*si*» porque la gente como Branson está siempre publicitándose para anunciar que están *pensando en* hacer las cosas bien, pero algunas de estas iniciativas fanfarrias son después canceladas sin decir nada, como la idea de remolcar los aviones en los aeropuertos para hacerlos más verdes–, perdón, nos hemos distraído otra vez. Richard Branson dijo que *si* se cambia la flota a 20% biodiésel, se conseguiría una reducción de 34500 toneladas de CO₂ al año, lo que es equivalente a «23 000 coches sacados de la carretera». Esta afirmación nos revela la tasa de conversión:

«un coche sacado de las carreteras» ↔ -1,5 toneladas de CO₂ al año.

Calorías

La caloría es una unidad molesta porque en el ámbito dietético a la kilocaloría se le llama caloría. 1 caloría de esas de comida = 1000 calorías «de verdad».

$$2500 \text{ kcal} = 3 \text{ kWh} = 10\,000 \text{ kJ} = 10 \text{ MJ}.$$

Barriles

Una molesta unidad que a la comunidad del petróleo le encanta, al igual que las toneladas equivalentes de petróleo (tep). ¿Por qué no se pueden atener a una sola unidad? Un barril de petróleo equivale a 6,1 GJ o 1700 kWh.

Los barriles son doblemente molestos porque hay múltiples definiciones de barril, cada una con un volumen diferente.

Aquí está todo lo que necesitas saber sobre barriles de petróleo. Un barril tiene 42 galones americanos, o 159 litros. Un barril de petróleo tiene 0,1364 toneladas de petróleo. Un barril de crudo tiene una energía de 5,75 GJ. Un barril de petróleo pesa 136 kg. Una tonelada de crudo equivale a 7,33 barriles y 42,1 GJ. La tasa de contaminación del crudo es 400 kg de CO₂ por barril (www.chemlink.com.au/conversions.htm). Esto significa que, cuando el precio del petróleo es de 100 \$ por barril, el coste de la energía es de 6 c\$ por kWh. Si se considera un impuesto de emisiones de 250 \$ por tonelada de CO₂ para los combustibles fósiles, este impuesto incrementaría el precio del barril de petróleo en 100 \$.

Tonelada

Las toneladas son molestas porque hay toneladas cortas, toneladas largas y toneladas métricas. Pero están lo suficientemente cerca como para que no nos preocupemos por distinguir entre ellas. 1 tonelada corta (2000 lb) = 907 kg; 1 tonelada larga (2240 lb) = 1016 kg; 1 tonelada métrica (o tonelada) = 1000 kg.

BTU y julios

BTU (British Thermal Unit) es molesta porque ni es parte del Système International, ni es una medida útil. Al igual que los inútiles julios, es

una unidad demasiado pequeña, por lo que hay que introducir prefijos tontos como «cuadrillón» (10^{15}) para hacer un uso práctico de ella.

1 kJ es 0,947 BTU. 1 kWh es 3409 BTU.

Un «quad» es 1 cuadrillón de BTU = 293 TWh.

Unidades divertidas

Tazas de té

Tabla I.1: Conversión masa – volumen de CO_2 .

Masa de CO_2	↔	Volumen
2 kg CO_2	↔	1 m ³
1 kg CO_2	↔	500 litros
44 g CO_2	↔	22 litros
2 g CO_2	↔	1 litro

¿Es esta una manera para hacer que los paneles solares suenen bien? «Una vez se hayan instalado los 7000 paneles fotovoltaicos, se espera que generen 180 000 kWh de electricidad renovable cada año –suficiente energía como para hacer **nueve millones de tazas de té**–». Esta afirmación significa, por tanto, que 1 kWh equivale a 50 tazas de té.

Como unidad de volumen, 1 taza americana (la mitad de una pinta americana) equivale oficialmente a 0,24 l; pero una taza de té o café contiene normalmente unos 0,18 l. Para elevar la temperatura de 50 tazas de agua, suponiendo 0,18 l por taza, de 15°C a 100°C se necesita 1 kWh.

Por lo que «nueve millones de tazas de té al año» es otra forma de decir «20 kW».

Volúmenes

Un contenedor tiene 2,4 m de ancho por 2,6 m de alto por (6,1 o 12,2) metros de largo (para TEU y FEU respectivamente).

Un TEU es el tamaño de un contenedor pequeño de 20 pies –un volumen interior de unos 33 m³–. La mayoría de los contenedores que se ven hoy en día son contenedores de 40 pies con un tamaño de 2 TEU. Un contenedor de 40 pies (FEU) pesa 4 toneladas y puede llevar 26 toneladas de carga; su volumen es de 67,5 m³.

Una piscina olímpica tiene un volumen de unos 3000 m³.

Un autobús de dos pisos tiene un volumen de 100 m³.

Un globo aerostático tiene un volumen de 2500 m³.

La gran pirámide de Giza tiene un volumen de 2 500 000 m³.



Figura I.2: Un contenedor de 20 pies (1 TEU).

Áreas

El área de la superficie de la Tierra es $500 \times 10^6 \text{ km}^2$; el área terrestre o continental es $150 \times 10^6 \text{ km}^2$.

Nuestra casa típica española tiene 4 habitaciones y 91 m^2 . En los EE. UU., el tamaño medio de una vivienda unifamiliar es 2330 pies cuadrados (216 m^2).

Tabla I.2: Áreas habituales y equivalencia en m^2 .

Hectárea	=	10^4 m^2
Acre	=	4050 m^2
Milla cuadrada	=	$2,6 \text{ km}^2$
Pie cuadrado	=	$0,093 \text{ m}^2$
Yarda cuadrada	=	$0,84 \text{ m}^2$

Tabla I.3: Uso del suelo en España.

Uso del suelo	Área por persona (m^2)	Porcentaje
Cultivos	4144	37,7
– herbáceos	2913	26,5
– leñosos	1081	9,8
– prados	150	1,4
Bosques	1995	18,1
Pastizal	1950	17,7
Matorral	1858	16,9
Sin vegetación	550	5
Superficies artificiales	408	3,7
– edificación	123	1,1
– viales/aparcamiento/peatonal	101	0,9
– suelo no edificado	85	0,8
– zonas verdes	36	0,3
– extracción y vertidos	29	0,3
– otras construcciones	19	0,2
– láminas de agua	16	0,1
Agua (sin mares ni océanos)	75	0,7
– embalses	48	0,4
– cursos de agua	19	0,2
– resto	8	0,1
Humedales	22	0,2
Total	11 002	100

Fuente: Fundación BBVA [309], [310].

Potencia

Si añadimos el sufijo «e» a la potencia, quiere decir que estamos explícitamente hablando de potencia eléctrica. Así, por ejemplo, la potencia de salida de una central térmica podría ser 1 GW(e), mientras que usa energía química a una velocidad de 2,5 GW. De igual modo, el sufijo «t» puede añadirse para indicar que una cantidad de potencia es potencia térmica. Los mismos sufijos pueden añadirse para cantidades de energía. «Mi casa utiliza 2 kWh(e) de electricidad al día».

Si añadimos el sufijo «p» a una potencia, esto indica que es potencia «pico», o capacidad. Por ejemplo, 10 m² de paneles fotovoltaicos podrían tener una potencia de 1 kWp.

$$1 \text{ kWh/d} = \frac{1}{24} \text{ kW.}$$

$$1 \text{ tep/año} = 1,33 \text{ kW.}$$

La gasolina sale de los surtidores a una velocidad aproximada de medio litro por segundo. Lo que equivale a 5 kWh por segundo, o 18 MW. Una recarga rápida de un coche eléctrico puede realizarse a una potencia de 50 kW, lo que es unas 300 veces más lento que llenar un depósito de gasolina. Esta es la principal limitación que presentan los vehículos eléctricos para realizar viajes largos.

La potencia de un coche de Fórmula 1 es de 700 kW.

El consumo eléctrico español es de 16 kWh por persona y día, o de 31 GW totales.

Caja I.1: Relación de otras unidades de energía y potencia con el kilovatio hora y el kilovatio hora por día.

	1000 BTU por hora	=	0,3 kW	=	7 kWh/d
1 caballo de potencia (1 cv o 1 hp o 1 ps)		=	0,75 kW	=	18 kWh/d
			1 kW	=	24 kWh/d
1 therm		=	29,31 kWh		
1000 BTU		=	0,2931 kWh		
1 MJ		=	0,2778 kWh		
1 GJ		=	277,8 kWh		
1 tep (tonelada equivalente de petróleo)		=	11 630 kWh		
1 kcal		=	1,163 × 10 ⁻³ kWh		
1 kWh	=	0,03412	3412	3,6	86 × 10 ⁻⁶
		therms	BTU	MJ	tep
					859,7 kcal

Consumo de potencia mundial

El consumo de potencia mundial es de 18,2 TW. El consumo de electricidad mundial es de 2,72 TW.

Factores de conversión útiles

Para cambiar de TWh al año a GW, divide entre 9.

1 kWh/p/d es lo mismo que 1,92 GW (o 17 TWh/a) en España.

Para cambiar de mpg (millas por galón inglés) a km por litro, divide entre 3.

A temperatura ambiente, $1 kT = \frac{1}{40}$ eV.

A temperatura ambiente, $1 kT$ por molécula = 2,5 kJ/mol.

El producto de la constante de Boltzmann (k) por la temperatura en Kelvin (T) es una unidad de energía que se utiliza para hablar cómodamente de energía a nivel molecular. Otra unidad más estándar para estos niveles energéticos es el electrónvoltio (eV).

Lectura del contador

Cómo convertir las medidas del contador de gas a kilovatio hora:

- Si el contador indica **metros cúbicos**, coge el número de unidades usadas y multiplícalo por 11,42 para obtener el número de kWh.

Poder calorífico de combustibles

Petróleo crudo: 37 MJ/l; 10,3 kWh/l.

Gas natural: 38 MJ/m³. (El metano tiene una densidad de 1,819 kg/m³).

1 tonelada de carbón: 29,3 GJ; 8000 kWh.

Energía de fusión del agua ordinaria: 1800 kWh por litro.

Ver también la tabla de la página 254 (Tabla 26.1) y de la página 364 (Tabla D.1).

Capacidades térmicas

La capacidad térmica del aire es 1 kJ/kg/°C, o 29 J/mol/°C. La densidad del aire es 1,2 kg/m³. Por lo que la capacidad térmica del aire por unidad de volumen es 1,2 kJ/m³/°C.

Calor latente de vaporización del agua: 2257,92 kJ/kg. Capacidad térmica del vapor de agua: 1,87 kJ/kg/°C. Capacidad térmica del agua: 4,2 kJ/l/°C.

La densidad del vapor es 0,590 kg/m³.

Tabla I.4: Intensidad de energía de los diferentes modos de transporte de EE. UU.

	kWh/t-km
Aguas continentales	0,083
Tren	0,083
Camión	0,75
Aire	2,8
Oleoducto	0,056
Gasoducto	0,47
Contenedor en aguas int.	0,056
Envíos por aguas int. a granel	0,056
Petrolero en aguas int.	0,028

Fuente: [311].

Presión

Presión atmosférica: 1 bar $\approx 10^5$ Pa (pascales). Presión bajo 1000 m de agua: 100 bar. Presión bajo 3000 m de agua: 300 bar.

Dinero

Hemos asumido la siguiente tasa de cambio en lo relativo a aspectos económicos: 1 € = 1,22 \$.

Factores de conversión de gases de efecto invernadero

Tabla I.5: Intensidad de carbono de la producción de electricidad (g CO₂ por kWh de electricidad).

País	g CO ₂ /kWh(e)
Suecia	12
Francia	52
Finlandia	117
Canadá	149
Austria	151
Bélgica	172
Luxemburgo	205
Dinamarca	207
España	246
Reino Unido	278
Portugal	287
Italia	331
Irlanda	413
EE. UU.	433
Alemania	447
Países Bajos	464
Grecia	520
Japón	544

Fuente: IEA Statistics 'CO₂ emissions from fuel combustion 2018', datos de 2016.

Tabla I.6: Emisiones asociadas a la combustión.

Tipo de combustible	Emisiones (g CO ₂ por kWh de energía química)
Gas natural	190
Gas de refinería	200
Etano	200
Gas licuado de petróleo (GLP)	210
Queroseno	240
Petróleo	240
Diésel	250
Petróleo pesado	260
Nafta	260
Coque	300
Carbón	300
Coque de petróleo	340

Fuente: DEFRA's Environmental Reporting Guidelines for Company Reporting on Greenhouse Gas Emissions.

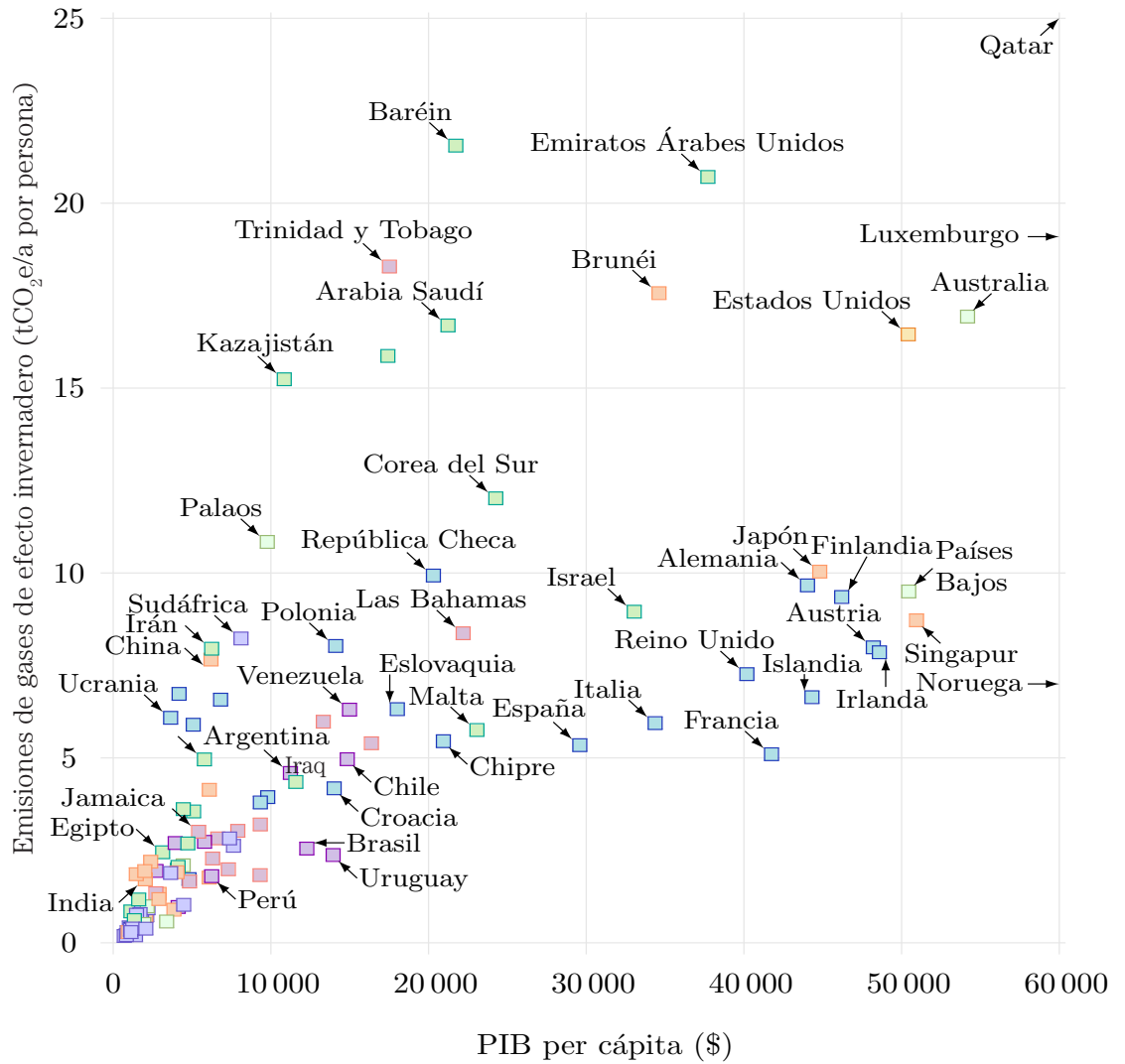


Figura I.3: Emisiones de efecto invernadero al año por persona frente al producto interior bruto per cápita en US \$. Información obtenida del informe «Climate Data Explorer» de 2017, del Instituto Mundial de Recursos (World Resources Institute).



Figura I.4: Emisiones de efecto invernadero al año por persona frente al uso energético diario por persona. Información obtenida del informe «Climate Data Explorer» de 2017, del Instituto Mundial de Recursos (World Resources Institute).

Apéndice J

Población y superficies

La Figura J.1 muestra las superficies de varias regiones frente a sus poblaciones. Las líneas diagonales corresponden con densidades de población constantes. La diagonal central marca la densidad de población del mundo, 56 habitantes por km². Bangladesh, sobre la diagonal que se encuentra más a la derecha, tiene una densidad de población de más de 1000 habitantes por km²; mientras que España presenta únicamente una densidad de población de 92 habitantes por km². La densidad media europea es de 71 habitantes por km², encontrándose la mayoría de países, como se puede ver en la Figura J.3, por encima de la densidad media mundial. En el otro extremo se encuentran países como Canadá, Australia o Libia, cuyas densidades de población son todas ellas menores a 4 habitantes por km². Las regiones ricas en superficie y cuyas densidades de población son menores que la media mundial son: Rusia, Canadá, Oceanía, Australia, Brasil y Estados Unidos.

Tabla J.1: Densidades de población de los continentes y del mundo. Estos datos se muestran de manera gráfica en la Figura J.1 y en la Figura J.2.

Región	Población	Superficie (km ²)	Densidad (hab./km ²)	Área por hab. (m ²)
Mundo	7 569 779 460	134 984 721	56,0	17 832
África	1 255 594 000	30 070 668	41,8	23 949
América	1 004 987 000	41 818 264	24,0	41 610
Asia	4 554 792 460	44 458 247	102,5	9 760
Europa	713 066 340	10 112 768	70,5	14 182
Oceanía	41 339 660	8 524 774	4,8	206 212

Fuente: [312] .

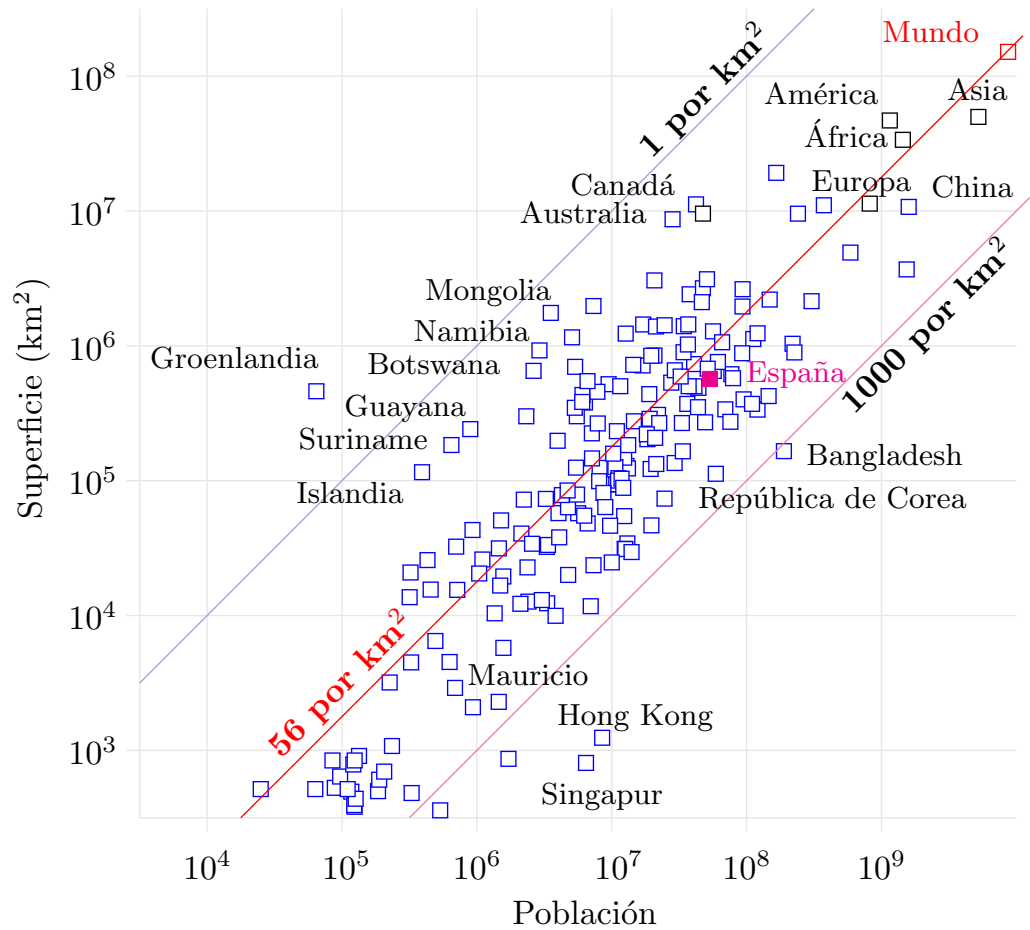


Figura J.1: Poblaciones y superficies de los países y regiones del mundo. Ambas escalas son logarítmicas. Cada diagonal identifica una densidad de población; los países con mayores densidades de población se aproximan hacia la esquina inferior derecha, y aquellos con densidades menores de población se aproximan a la superior izquierda. Estos datos pueden encontrarse en la Tabla J.2. Fuente: [312].

Tabla J.2: Países y sus densidades de población. Las poblaciones por encima de 50 millones de habitantes y las superficies superiores a 5 millones de kilómetros cuadrados están marcadas en **negrita**. Estos datos, correspondientes al año 2017 [312], se muestran en la gráfica de la Figura J.1.

Región	Población	Superficie (km ²)	Densidad (hab./km ²)	Área por hab. (m ²)
Afganistán	35530081	652860	54,4	18375
Albania	2873457	28750	99,9	10005
Alemania	82695000	357 380	231,4	4322
Andorra	76965	470	163,8	6107
Angola	29784193	1246700	23,9	41 858
Antigua y Barbuda	102012	440	231,8	4313
Arabia Saudí	32938213	2149690	15,3	65 264
Argelia	41318142	2381740	17,3	57 644
Argentina	44271041	2780400	15,9	62 804
Armenia	2930450	29740	98,5	10149
Aruba	105264	180	584,8	1710
Australia	24598933	7741220	3,2	314697
Austria	8809212	83879	105	9522
Azerbaiyán	9862429	86600	113,9	8781
Bahamas	395361	13880	28,5	35107
Baréin	1492584	771	1935,9	517
Bangladesh	164669751	147630	1115,4	897
Barbados	285719	430	664,5	1505
Belarús	9507875	207600	45,8	21835
Bélgica	11372068	30530	372,5	2685
Belice	374681	22970	16,3	61305
Benín	11175692	114760	97,4	10269
Bermudas	65441	50	1308,8	764
Bhután	807610	38394	21,0	47540
Bolivia	11051600	1098580	10,1	99405
Bosnia y Herzegovina	3507017	51210	68,5	14602
Botswana	2291661	581730	3,9	253846
Brasil	209288278	8515770	24,6	40689
Brunei Darussalam	428697	5770	74,3	13459
Bulgaria	7075991	111000	63,7	15687
Burkina Faso	19193382	274220	70,0	14287
Burundi	10864245	27830	390,4	2562
Cabo Verde	546388	4030	135,6	7376
Camboya	16005373	181040	88,4	11311
Camerún	24053727	475440	50,6	19766
Canadá	36708083	9984670	3,7	272002
Chad	14899994	1284000	11,6	86175
Chile	18054726	756096	23,9	41878
China	1386395000	9562911	145,0	6898

Región	Población	Superficie (km ²)	Densidad (hab./km ²)	Área por hab. (m ²)
Chipre	1179551	9250	127,5	7842
Colombia	49065615	1141749	43,0	23270
Comoras	813912	1861	437,4	2286
Corea del Norte	25490965	120540	211,5	4729
Costa Rica	4905769	51100	96,0	10416
Croacia	4125700	56590	72,9	13716
Cuba	11484636	109880	104,5	9568
Curazao	161014	444	362,6	2758
Dinamarca	5769603	42922	134,4	7439
Djibouti	956985	23200	41,2	24243
Dominica	73925	750	98,6	10145
Ecuador	16624858	256370	64,8	15421
Egipto	97553151	1001450	97,4	10266
El Salvador	6377853	21040	303,1	3299
Emiratos Arabes Unidos	9400145	83600	112,4	8893
Eslovenia	2066748	20270	102,0	9808
España	46572028	505940	92,1	10864
Estados Unidos	325719178	9831510	33,1	30184
Estonia	1315480	45230	29,1	34383
Etiopía	104957438	1104300	95,0	10521
Fiji	905502	18270	49,6	20177
Filipinas	104918090	300000	349,7	2859
Finlandia	5511303	338420	16,3	61405
Francia	67118648	549087	122,2	8181
Gabón	2025137	267670	7,6	132174
Gambia	2100568	11300	185,9	5379
Georgia	3717100	69700	53,3	18751
Ghana	28833629	238540	120,9	8273
Gibraltar	34571	10	3457,1	289
Granada	107825	340	317,1	3153
Grecia	10760421	131960	81,5	12263
Groenlandia	56171	410450	0,1	7307151
Guam	164229	540	304,1	3288
Guatemala	16913503	108890	155,3	6438
Guinea	12717176	245860	51,7	19333
Guinea Ecuatorial	1267689	28050	45,2	22127
Guinea-Bissau	1861283	36130	51,5	19411
Guayana	777859	214970	3,6	276361
Haití	10981229	27750	395,7	2527
Honduras	9265067	112490	82,4	12141
Hong Kong	7391700	1105	6689,3	149
Hungría	9781127	93030	105,1	9511
India	1339180127	3287259	407,4	2455

Región	Población	Superficie (km ²)	Densidad (hab./km ²)	Área por hab. (m ²)
Indonesia	263991379	1910931	138,1	7239
Irán	81162788	1745150	46,5	21502
Iraq	38274618	435050	88,0	11367
Irlanda	4813608	70280	68,5	14600
Isla de Man	84287	570	147,9	6763
Isla de San Martín	32125	54,4	590,5	1693
Islandia	341284	103000	3,3	301801
Islas Caimán	61559	264	233,2	4289
Islas Feroe	49290	1396	35,3	28322
Islas Marshall	53127	180	295,2	3388
Islas Salomón	611343	28900	21,2	47273
Islas Turcas y Caicos	35446	950	37,3	26801
Islas Vírgenes (EE.UU.)	107268	350	306,5	3263
Islas Vírgenes Británicas	31196	150	208	4808
Israel	8712400	22070	394,8	2533
Italia	60551416	301340	200,9	4977
Jamaica	2890299	10990	263	3802
Japón	126785797	377962	335,4	2981
Jordania	9702353	89320	108,6	9206
Kazajstán	18037646	2724902	6,6	151067
Kenya	49699862	580370	85,6	11677
Kirguistán	6201500	199949	31,0	32242
Kiribati	116398	810	143,7	6959
Kosovo	1830700	10887	168,2	5947
Kuwait	4136528	17820	232,1	4308
Laos	6858160	236800	29,0	34528
Lesotho	2233339	30360	73,6	13594
Letonia	1940740	64490	30,1	33230
Líbano	6082357	10450	582,0	1718
Liberia	4731906	111370	42,5	23536
Libia	6374616	1759540	3,6	276023
Liechtenstein	37922	160	237	4219
Lituania	2827721	65286	43,3	23088
Luxemburgo	599449	2590	231,4	4321
Macao	622567	30,3	20546,8	49
Madagascar	25570895	587295	43,5	22967
Malasia	31624264	330800	95,6	10460
Malawi	18622104	118480	157,2	6362
Maldivas	436330	300	1454,4	688
Mali	18541980	1240190	15,0	66886
Malta	465292	320	1454	688
Mariana	55144	460	119,9	8342
Marruecos	35739580	446550	80,0	12495

Región	Población	Superficie (km ²)	Densidad (hab./km ²)	Área por hab. (m ²)
Mauricio	1264613	2040	619,9	1613
Mauritania	4420184	1030700	4,3	233180
México	129163276	1964380	65,8	15209
Micronesia	105544	700	150,8	6632
Moldavia	3549750	33850	104,9	9536
Mónaco	38695	2	19347,5	52
Mongolia	3075647	1564120	2,0	508550
Montenegro	622471	13810	45,1	22186
Mozambique	29668834	799380	37,1	26943
Myanmar	53370609	676590	78,9	12677
Namibia	2533794	824290	3,1	325318
Nauru	13649	20	682,5	1465
Nepal	29304998	147180	199,1	5022
Nicaragua	6217581	130370	47,7	20968
Níger	21477348	1267000	17,0	58992
Nigeria	190886311	923770	206,6	4839
Noruega	5282223	385178	13,7	72920
Nueva Caledonia	280460	18580	15,1	66248
Nueva Zelanda	4793900	267710	17,9	55844
Omán	4636262	309500	15,0	66756
Países Bajos	17132854	41540	412,4	2425
Pakistán	197015955	796100	247,5	4041
Palau	21729	460	47,2	21170
Panamá	4098587	75420	54,3	18401
Papua Nueva Guinea	8251162	462840	17,8	56094
Paraguay	6811297	406752	16,7	59717
Perú	32165485	1285220	25,0	39956
Polinesia Francesa	283007	4000	70,8	14134
Polonia	37975841	312680	121,5	8234
Portugal	10293718	92225	111,6	8959
Puerto Rico	3337177	8870	376,2	2658
Qatar	2639211	11610	227,3	4399
Reino Unido	66022273	243610	271,0	3690
Rep. Centroafricana	4659080	622980	7,5	133713
República Checa	10591323	78870	134,3	7447
República de Corea	51466201	100280	513,2	1948
República del Congo	5260750	342000	15,4	65010
República Dem. Congo	81339988	2344860	34,7	28828
República Dominicana	10766998	48670	221,2	4520
República Eslovaca	5439892	49035	110,9	9014
Rumanía	19586539	238390	82,2	12171
Rusia	144495044	17098250	8,5	118331
Rwanda	12208407	26340	463,5	2158

Región	Población	Superficie (km ²)	Densidad (hab./km ²)	Área por hab. (m ²)
Saint Kitts y Nevis	55345	260	212,9	4698
Samoa	196440	2840	69,2	14457
Samoa Americana	55641	200	278,2	3594
San Marino	33400	60	556,7	1796
San Vicente	109897	390	281,8	3549
Santa Lucía	178844	620	288,5	3467
Santo Tomé y Príncipe	204327	960	212,8	4698
Senegal	15850567	196710	80,6	12410
Serbia	7022268	88360	79,5	12583
Seychelles	95843	460	208,4	4800
Sierra Leona	7557212	72300	104,5	9567
Singapur	5612253	719	7805,6	128
Siria	18269868	185180	98,7	10136
Somalia	14742523	637660	23,1	43253
Sri Lanka	21444000	65610	326,8	3060
Sudán	40533330	1879357	21,6	46366
Sudán del Sur	12575714	644330	19,5	51236
Suecia	10067744	447420	22,5	44441
Suiza	8466017	41290	205,0	4877
Suriname	563402	163820	3,4	290769
Swazilandia	1367254	17360	78,8	12697
Tailandia	69037513	513120	134,5	7432
Tanzania	57310019	947300	60,5	16529
Tayikistán	8921343	141376	63,1	15847
Timor-Leste	1296311	14870	87,2	11471
Togo	7797694	56790	137,3	7283
Tonga	108020	750	144,0	6943
Trinidad y Tobago	1369125	5130	266,9	3747
Túnez	11532127	163610	70,5	14187
Turkmenistán	5758075	488100	11,8	84768
Turquía	80745020	785350	102,8	9726
Tuvalu	11192	30	373,1	2680
Ucrania	44831159	603550	74,3	13463
Uganda	42862958	241550	177,4	5635
Uruguay	3456750	176220	19,6	50979
Uzbekistán	32387200	447400	72,4	13814
Vanuatu	276244	12190	22,7	44128
Venezuela	31977065	912050	35,1	28522
Vietnam	95540800	330967	288,7	3464
Yemen	28250420	527970	53,5	18689
Zambia	17094130	752610	22,7	44027
Zimbabwe	16529904	390760	42,3	23640

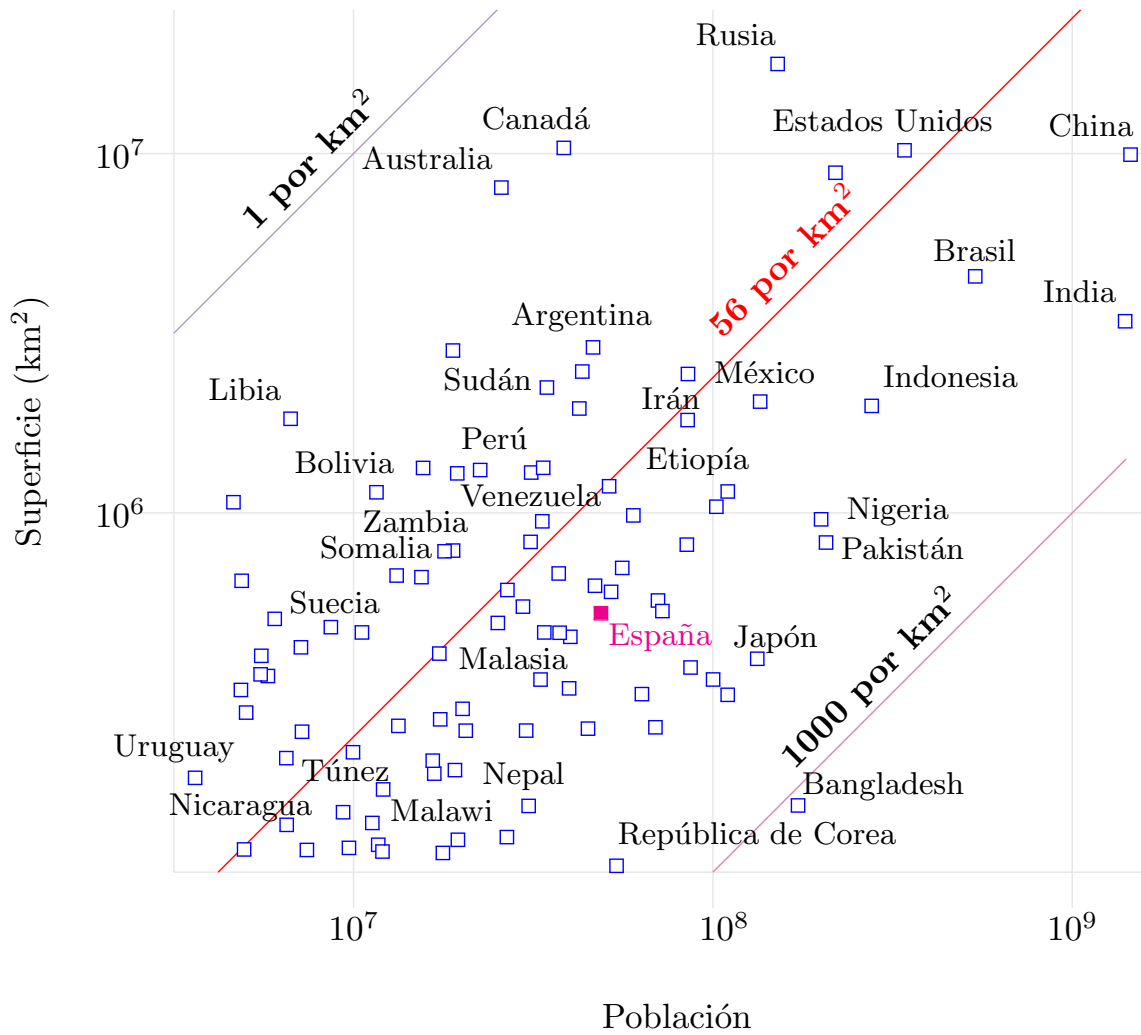


Figura J.2: Poblaciones y superficies de los países y regiones del mundo. Ambas escalas son logarítmicas. Las diagonales muestran densidades de población constantes. Esta figura es un detalle de la Figura J.1.

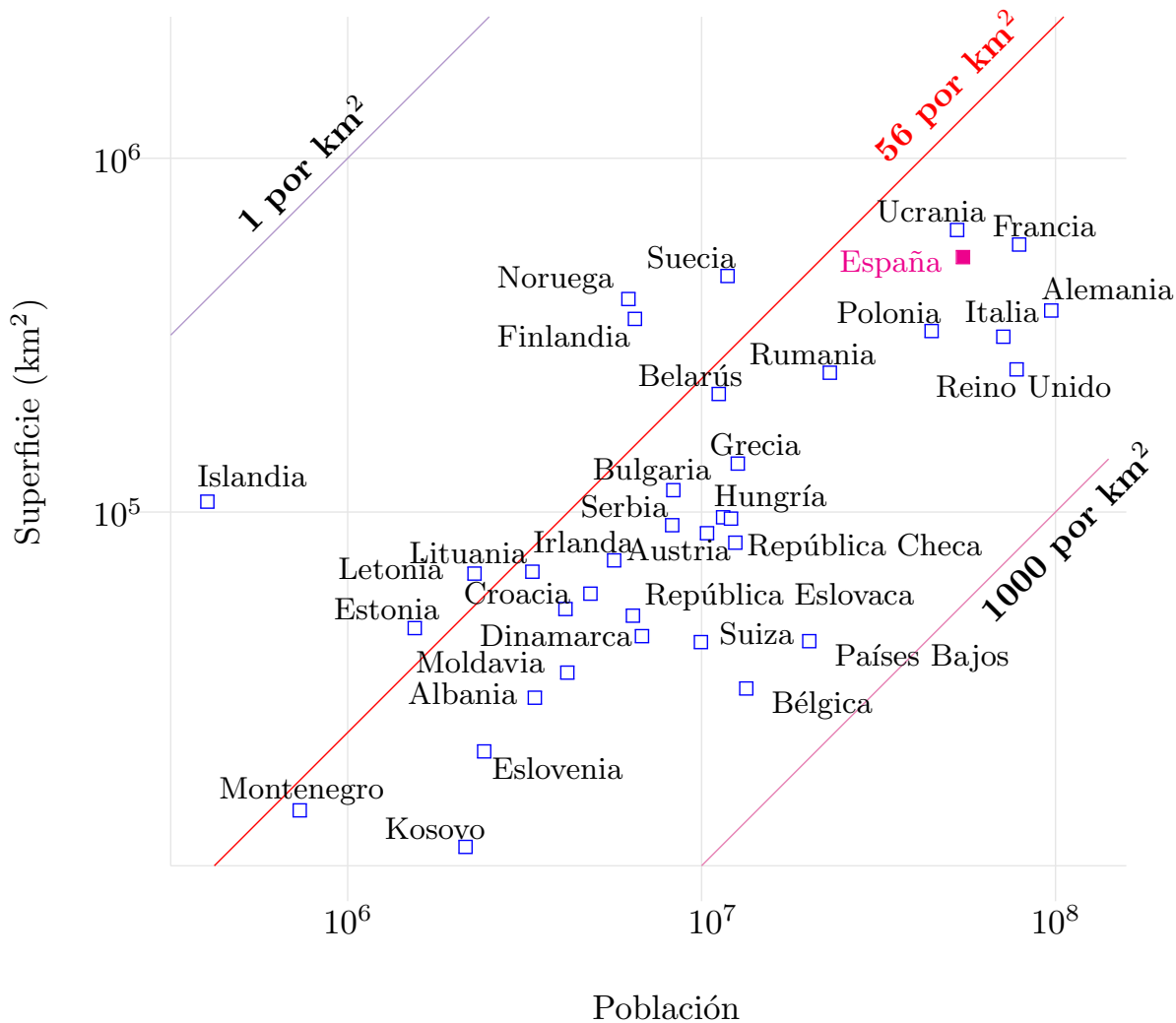


Figura J.3: Poblaciones y superficies de los países europeos.

Apéndice K

Historia energética española

Tabla K.1: Desglose de las fuentes de energía primaria en España en 2016.

Fuente primaria	kWh/p/d	kWh(e)/p/d
Petróleo crudo importado	45,3	
Crudo nacional	1,1	
Derivados del petróleo importados	8,6	2,4
Gas natural importado	12	5,3
Uranio importado	10,6	3,2
Carbón importado		6,3
Carbón nacional		0,5
Hidráulica		2,2
Eólica		2,9
Solar		2,2
Biomasa	3,5	1,2

Fuente: [313].

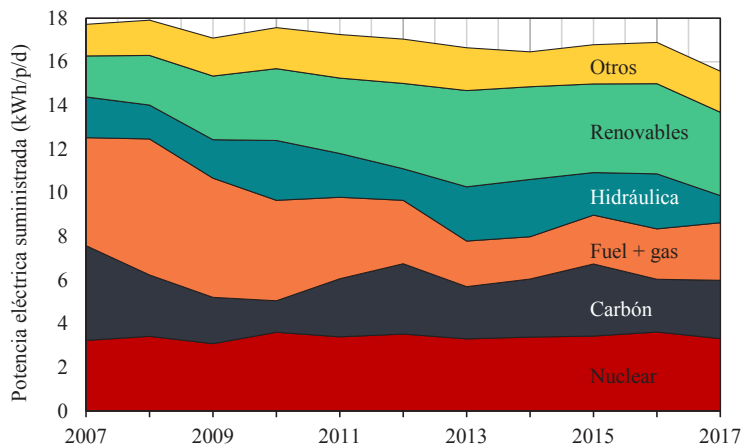


Figura K.1: Potencia eléctrica suministrada según el tipo de fuente de energía en kWh por persona y día en España. Fuente: [314].

Figura K.2: Demanda de electricidad en España (en kWh/p/d) durante dos semanas de diciembre de 2017. Los dos picos de demanda corresponden con las 11 de la mañana y las 8 de la tarde de cada día, respectivamente. Si deseas conocer la demanda nacional en GW, el techo de escala de 20 kWh por persona y día se corresponde con 38 GW de consumo para toda España. Fuente: [314].

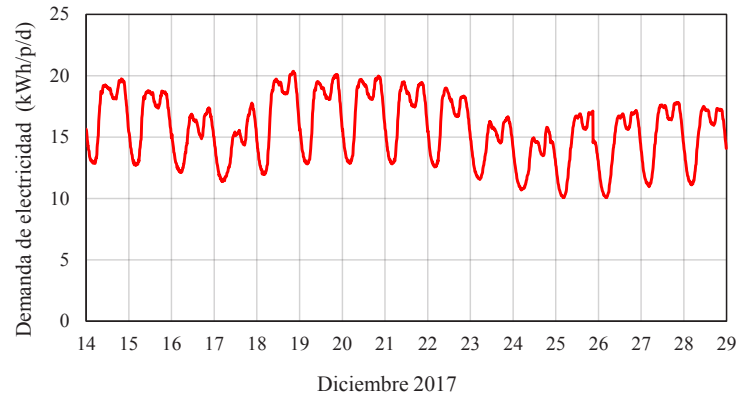


Figura K.3: Coste del kWh el 17 de diciembre de 2017. El coste medio de la energía para este día corresponde con 12,5 cts. €/kWh. Incluyendo los impuestos correspondientes, el precio al consumidor asumido en este libro para la energía eléctrica es de 17 cts. €/kWh. El coste de generación eléctrica promedio anual en 2017 fue de 5,2 cts. €/kWh. Fuente: Red Eléctrica de España [315].

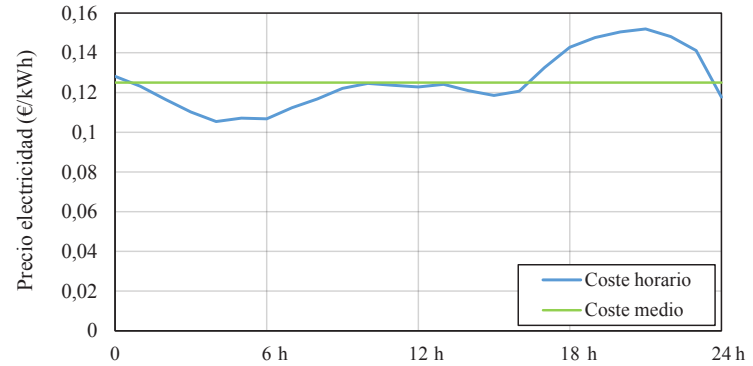
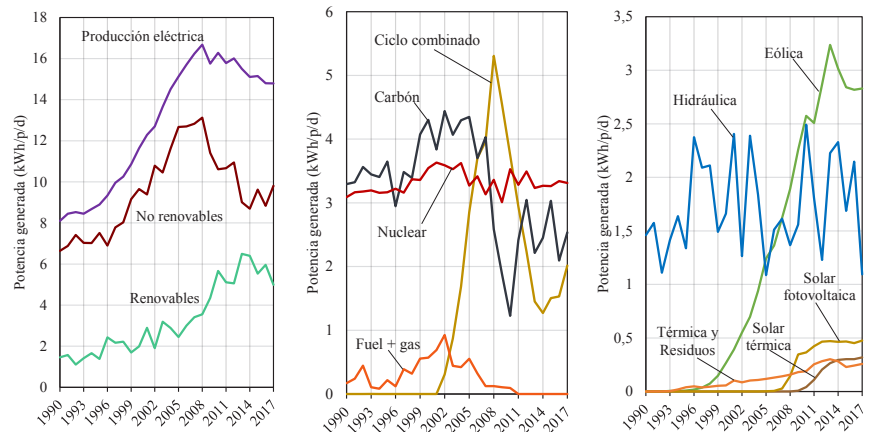


Figura K.4: Historia de la generación eléctrica de España expresada en kWh por persona y día desde el año 1990 hasta la actualidad. La primera gráfica muestra la producción total y qué parte ha sido generada con fuentes no renovables y renovables. Las otras dos gráficas desglosan estos dos grupos según la tecnología empleada. Fuente: [314].



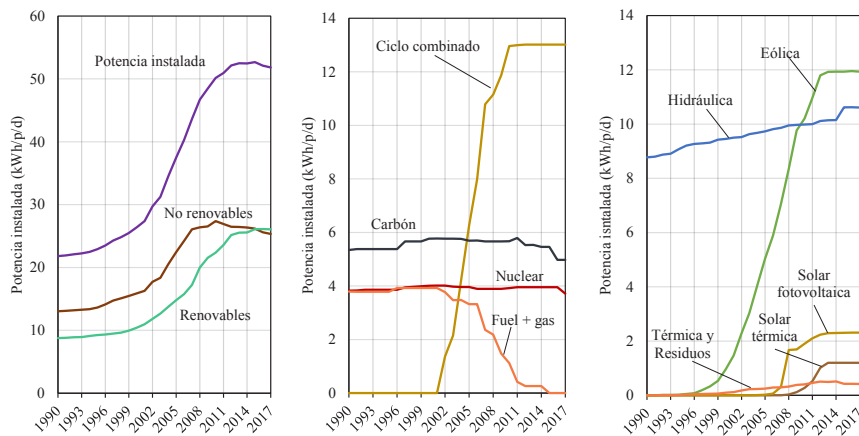


Figura K.5: Historia de la potencia instalada en España expresada en kWh por persona y día desde el año 1990 hasta la actualidad. De nuevo, se muestra la potencia instalada en términos totales y el desglose de las distintas tecnologías dentro de las fuentes de generación renovables y no renovable. Fuente: [314].

Bibliografía

- [1] International Energy Agency, Medium-term coal market report 2016, Informe Técnico (2016).
- [2] *The Independent*, Merkel announces end of German nuclear era. <http://www.independent.co.uk/news/world/europe/merkelannounces-end-of-german-nuclear-era-2291091.html>
- [3] European Commission, Press release database. http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-15-5285_en.htm
- [4] R. Wert, Now that's some high quality H2O — car runs on water! <https://jalopnik.com/177788/now-thats-some-highquality-h2o---car-runs-on-water>
- [5] BBC News, Global warming 'biggest threat'. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/3381425.stm>
- [6] A. H. F. Neftel, E. Moor, H. Lötscher, H. Oeschger, U. Siegenthaler, B. Stauffer, Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network, Trend report, a compendium of data on global change, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A (2005).
- [7] A. H. F. Neftel, E. Moor, H. Lötscher, H. Oeschger, U. Siegenthaler, B. Stauffer, Historical CO₂ record from the siple station ice core, Trend report, a compendium of data on global change, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A (1994). <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/siple.html>
- [8] P. Tans, D. R. Keeling, Scripps institution of oceanography. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>
- [9] D. Etheridge, L. Steele, R. Langenfelds, R. Francey, J.-M. Barnola, V. Morgan, Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores, Trend report, a compendium of data on global change, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A (1998). <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/lawdome.html>
- [10] U. Siegenthaler, E. Monnin, K. Kawamura, R. Spahni, J. Schwander, B. Stauffer, T. F. Stocker, J.-M. Barnola, H. Fischer, Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO₂ changes during the past millennium, *Tellus B* 57 (1) (2005) 51-57. doi:10.1111/j.1600-0889.2005.00131.x.
- [11] A. Indermühle, T. Stocker, F. Joos, H. Fischer, H. Smith, M. Wahlen, B. Deck, D. Mastroianni, J. Tschumi, T. Blunier, R. Meyer, B. Stauffer, Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica, *Nature* 398 (6723) (1999) 121-126.
- [12] W. Jevons, *The Coal Question: An Enquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coalmines*, Macmillan, 1866. <http://oll.libertyfund.org/titles/317>
- [13] P. Malanima, Energy crisis and growth 1650-1850: the European deviation in a comparative perspective, *Journal of Global History* 1 (1) (2006) 101-121. doi:10.1017/S1740022806000064.
- [14] PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, HYDE: History database of the global environment. <http://themasites.pbl.nl/tridion/en/themasites/hyde/>
- [15] National Bureau of Economic Research, NBER macrohistory database. <http://www.nber.org/databases/macrophistory/contents/>
- [16] J. Hatcher, *The history of the British coal industry: Before 1700, towards the age of coal*, Vol. 1, Clarendon Press, 1993.
- [17] M. W. Flinn, *The history of the British coal industry: 1700-1830, the Industrial Revolution*, Vol. 2, Clarendon Press, Oxford University Press, 1984.
- [18] R. Church, A. Hall, J. Kanefsky, *The history of the British coal industry: 1830-1913, Victorian Pre-Eminence*, Vol. 3, Clarendon Press, Oxford University Press, 1984.
- [19] B. Supple, *The history of the British coal industry: 1913-1946, the political economy of decline*, Vol. 4, Clarendon Press, Oxford University Press, 1988.
- [20] W. Ashworth, M. Pegg, *The history of the British coal industry: 1946-1982, the nationalized industry*, Vol. 5, Clarendon Press, Oxford University Press, 1986.
- [21] Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. 7.3 The Carbon Cycle and the Climate System. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter7-1.pdf>

- [22] G. Marland, T. Boden, R. Andres, Global, regional, and national fossil fuel CO₂ emissions. In trends: A compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis Center (2008).
<http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/overview>
- [23] A. Charney, J. G. and Arakawa, D. J. Baker, B. Bolin, R. E. Dickinson, R. M. Goody, C. E. Leith, H. M. Stommel, C. I. Wunsch, Carbon dioxide and climate: A scientific assessment, Informe Técnico, The National Academies Press (1979).
<https://www.nap.edu/catalog/12181/carbon-dioxide-and-climate-a-scientific-assessment>
- [24] T. Tin, Climate change: faster, stronger, sooner, Informe Técnico, WWF (2008).
http://assets.panda.org/downloads/wwf_science_paper_october_2008.pdf
- [25] MIT issues statement regarding research on Paris Agreement. <https://news.mit.edu/2017/mit-issues-statement-research-paris-agreement-0602>
- [26] B. Dudley, BP statistical review of world energy, Informe Técnico, BP.
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [27] A. Dessler, E. Parson, *The Science and Politics of Global Climate Change: A Guide to the Debate*, Cambridge University Press, 2009.
- [28] G. J. Treloar, P. E. Love, R. H. Crawford, Hybrid life-cycle inventory for road construction and use, *Journal of construction engineering and management* 130 (1) (2004) 43-49.
- [29] A. Sanz, P. Vega, M. Mateos, Cuentas ecológicas del transporte en España, Informe Técnico, Ecologistas en Acción y Grupo de Estudios y Alternativas 21 (2014).
- [30] El papel de los acompañantes como factor distractor en la conducción, Informe Técnico, Castrol, BP, RACE.
- [31] Bombardier commercial aircraft. www.bombardier.com
- [32] J.E. Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, M. McFarland, Aviation and the global atmosphere, Informe Técnico, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1999).
<https://www.ipcc.ch/report/aviation-and-the-global-atmosphere-2/>
- [33] J. Crace, Michael O'Leary in his own words.
<https://www.theguardian.com/business/2009/jun/04/michael-oleary-ryanair-airline-industry>
- [34] Boeing.
<http://www.boeing.com/commercial/747/>
- [35] M. Kling, I. Hough, Air travel carbon and energy efficiency, Informe Técnico, Brighter Planet (2011).
<http://static.brighterplanet.com/science/publications/aviation/aviation.pdf>
- [36] C. L. Nickol, Silent aircraft initiative concept risk assessment, Informe Técnico, NASA (February 2008).
<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20080012497>
- [37] Atlas de radiación solar en España utilizando datos del SAF de clima de EUMETSAT, Informe Técnico, AEMET (2012).
http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf
- [38] W. Shockley, H. J. Queisser, Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells, *Journal of Applied Physics* 32 (3) (1961) 510-519. doi:10.1063/1.1736034.
- [39] Avance del sistema eléctrico español 2017, Informe Técnico, REE (2017).
http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_electrico_2017_v3.pdf
- [40] Renewable energies global status report 2017, Informe Técnico, REN21 (2017).
https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017-Full-Report_English.pdf
- [41] Gráficos significativos energía solar fotovoltaica, Informe Técnico, IES (2017).
https://www.ies.upm.es/sfs/IES/IES-UPM/Portada/2017_01_17%20datos%20fotovoltaica%20en%20Espa%C3%B1a.pdf
- [42] Estrategia «más alimento, menos desperdicio», Informe Técnico, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2017).
http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/temas/estrategia-mas-alimento-menos-desperdicio/Definiciones_cifras.aspx
- [43] Preparatory study on food waste across EU 27, Informe Técnico, European Commission (2010). doi:10.2779/85947.
http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/bio_foodwaste_report.pdf
- [44] Biomasa: cultivos energéticos, Informe Técnico, IDAE, ITGA de Navarra (2007).
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_cultivos_energeticos_07_4bd9c8e7.pdf
- [45] N. Brosse, A. Dufour, X. Meng, Q. Sun, A. Ragauskas, *Miscanthus*: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 6 (5) (2012) 580-598.
- [46] H. Rogner, World energy assessment – energy and the challenge of sustainability, Informe Técnico (2000).
- [47] Bayer Crop Science, Potential of gm winter oilseed rape to reduce the environmental impact of farming whilst improving farmer incomes, Informe Técnico (2003).
- [48] G. Francis, R. Edinger, K. Becker, A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socioeconomic development in degraded areas in india: Need, potential and perspectives of *jatropha* plantations, *Natural Resources Forum* 29 (1) (2005) 12-24.
- [49] B. Asselbergs, J. Bokhorst, R. Harms, J. van Hemert, L. van der Noort, C. ten Velden, R. Vervuurt, L. Wijnen, L. van Zon, Size does matter – the possibilities of cultivating *jatropha* curcas for biofuel production in cambodia, Informe Técnico (2006).

- [50] M. R. Schmer, K. P. Vogel, R. B. Mitchell, R. K. Perrin, Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass, *Proceedings of the National Academy of Science* 105 (2) (2008) 464-469.
- [51] H. Shapouri, J. Duffield, M. Graboski, Estimating the net energy balance of corn ethanol, Informe Técnico (2006).
- [52] Royal Commission on Environmental Pollution, Biomass as a renewable energy source, Informe Técnico (2004).
- [53] Royal Society working group on biofuels, Sustainable biofuels: prospects and challenges, Informe Técnico (2008).
- [54] Energy for Sustainable Development Ltd, English partnerships sustainable energy review, Informe Técnico (2003).
- [55] M. D. Archer, J. Barber, Photosynthesis and photoconversion, *Molecular to Global Photosynthesis* 2 (2004) 1-41.
- [56] J. S. Boyer, Plant productivity and environment, *Science* 218 (4571) (1982) 443-448.
- [57] J. L. Monteith, Climate and the efficiency of crop production in Britain, *Biological Science* 281 (980) (1997).
- [58] Gobierno de Navarra, Datos de temperatura de 2016 en la estación meteorológica de la ETSIA en la UPNA. <http://meteo.navarra.es/>
- [59] IDAE, Análisis del consumo energético del sector residencial en España, Proyecto Sech-Spahousec, Madrid, Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético (2011).
- [60] UPNA, Pliego de prescripciones técnicas para contratación del suministro de gas natural, Datos de consumo, UPNA (2008).
- [61] C. F. de Pinedo, Informe de evaluación del programa de planes energéticos en las administraciones públicas, Plan de Acción 2008-2012, Gobierno de Navarra (2009).
- [62] REE, El sistema eléctrico español, Avance 2016, Red Eléctrica de España (2016).
- [63] IDAE, Plan de acción 2008-2012, Informe Técnico, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2007).
- [64] MINETUR, BOE-A-2013-1005, Informe Técnico, Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013).
- [65] L. Serri, A. Sempreviva, T. Pontes, J. Murphy, K. Lynch, D. Airoldi, J. Hussey, C. Rudolph, I. Karagali, Resource data and GIS tool for offshore renewable energy projects in Europe, Informe Técnico, Hydraulics and Mar Time Research Centre (2012).
- [66] B. Lomborg, *The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world*, Vol. 1, Cambridge University Press Cambridge, 2001.
- [67] J. Aymamí, A. García, O. Lacave, L. Lledó, M. Mayo, S. Parés, Análisis del recurso. atlas eólico de España. Informe Técnico PER 2011-2020, Meteosim Truwind and IDAE (2011).
- [68] P. Higgins, A. Foley, The evolution of offshore wind power in the United Kingdom, *Renewable and sustainable energy reviews* 37 (2014) 599-612.
- [69] J. Halkema, Wind energy: Facts and fiction, *Energy and Environment*.
- [70] BOSCH, Ficha de producto: Lavadora WVH30547EP. <http://www.bosch-home.es/>
- [71] A. Shehabi, S. J. Smith, D. A. Sartor, R. E. Brown, M. Herrlin, J. G. Koomey, E. R. Masanet, N. Horner, I. L. Azevedo, W. Lintner, United states data center energy usage report.
- [72] A. Shehabi, S. Smith, D. Sartor, R. Brown, M. Herrlin, J. Koomey, E. Masanet, N. Horner, I. Azevedo, W. Lintner, United States data center energy usage report.
- [73] Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, Recurso de energía de oleaje. <http://www.enola.ihcantabria.com/>
- [74] T. Faber, *Fluid dynamics for physicists*, Cambridge University Press, 1995.
- [75] D. Mollison, Wave climate and the wave power resource, *Hydrodynamic of Ocean Wave-Energy Utilization* (1986) 133-156.
- [76] O. P. Mollison, D. and Buneman, S. H. Salter, Wave power availability in the NE Atlantic, *Nature* 263(5574) (1976) 223-226.
- [77] D. Mollison, The UK wave power resource, Wave Energy (Institution of Mechanical Engineers – Seminar) (1991) 1-6.
- [78] Wavegen, Islay limpet project monitoring – final report, Informe Técnico (2002). <https://www.waveandtidalknowledgenetwork.com/wp-content/uploads/legacy-files/00112.pdf>
- [79] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Estudio de costes y rentas de las explotaciones agrarias, Informe Técnico, Gobierno de España (2013).
- [80] J. M. MacDonald, The economic organization of US broiler production. Economic information bulletin no. 38, Informe Técnico, Economic Research Service, US Department of Agriculture (2008). <https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=44256>
- [81] C. Gellings, K. Parmenter, Energy efficiency in fertilizer production and use, Informe Técnico, C. W. Gellings and K. Blok, editors, Efficient Use and Conservation of Energy, Encyclopedia of Life Support Systems (2004). www.eolss.net
- [82] Global fertilizer trade map 2017 (2017). <http://www.fertilizer.org/>
- [83] C. Hall, A. Figueroa, B. Fernhall, J. A. Kanaley, Energy expenditure of walking and running: comparison with prediction equations, *Medicine and science in sports and exercise* 36 (2004) 2128-2134.
- [84] D. Coley, Emission factors for walking and cycling, Informe Técnico (2001). <http://centres.exeter.ac.uk/cee/publications/reports/91.html>
- [85] C. Weber, H. Matthews, Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States, *Environ. Sci. Technol.* 42 (10) (2008) 3508-3513. doi:10.1021/es702969f.

- [86] W. Shepherd, D. Shepherd, *Energy Studies*, Imperial College Press, 2003.
- [87] Tabla de mareas y solunares de España (2017). <http://www.tablademareas.com/es>
- [88] G. J. Treloar, P. E. Love, R. H. Crawford, Hybrid life-cycle inventory for road construction and use, *Journal of construction engineering and management* 130 (1) (2004) 43-49.
- [89] Cadagua suma en 2016 cinco plantas desaladoras con una producción de más de 335 000 m³ de agua al día (2017). <https://newsroom.ferrovial.com/es/noticias/cadagua-suma-en-2016-cinco-plantas-desaladoras-con-una-produccion-de-mas-de-335-000-m3-de-agua-al-dia/>
- [90] G. Hammond, C. Jones, Inventory of carbon & energy (ICE), Informe Técnico (2006).
- [91] Ecoembes, Presentación de resultados 2017. <https://www.ecoembes.com/sites/default/files/reciclaje-en-datos-2017.pdf>
- [92] Ecovidrio, Informe de sostenibilidad 2017. <https://ecovidrio.es/sites/default/files/2019-11/Informe-de-sostenibilidad-2017.pdf>
- [93] E. Williams, Energy intensity of computer manufacturing: hybrid assessment combining process and economic input-output methods, *Environ Sci. Technol.* 38 (22) (2004) 6166-6174.
- [94] R. Kuehr, *Computers and the Environment: Understanding and Managing their Impacts* (Eco-Efficiency in Industry and Science), Springer, 2003.
- [95] A. González, A. Chase, N. Horowitz, What we know and don't know about embodied energy and greenhouse gases for electronics, appliances, and light bulbs, ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings (2012).
- [96] C. Rydh, M. Karlstrom, Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries, *Resources Conservation and Recycling* 34 (4) (2002) 289-309.
- [97] R. amiga, Roba amiga: la ropa usada como un recurso rentable y social. <https://www.robaamiga.cat/es/noticias/roba-amiga-la-ropa-usada-como-un-recurso-rentable-y-social/>
- [98] A. Ucuncu, Energy recovery from mixed paper waste, Informe Técnico (1993). <http://www.p2pays.org/ref/11/10059.pdf>
- [99] A. Erdinler, P. Vesilind, Energy recovery from mixed waste paper 11, *Waste Management and Research* 11 (6) (1993) 507-513. doi:10.1177/0734242X9301100605.
- [100] H. Norrstrom, Low waste technology in pulp and paper industries, *Pure and Appl. Chem.* 52 (8) (1980) 1990-2004.
- [101] R. Denison, Wood in our future: the role of life-cycle analysis: proceedings of a symposium, National Academy Press, 1997, Ch. 7, Life-cycle assessment for paper products.
- [102] G. Treloar, P. Love, R. Crawford, Hybrid life-cycle inventory for road construction and use, *J Journal of Construction, Engineering and Management* 130 (1) (2004) 43-49.
- [103] A. Burnham, M. Wang, Y. Wu, Development and applications of GREET 2.7 — the transportation vehicle-cycle model, Informe Técnico (2007). <http://www.transportation.anl.gov/software/GREET/publications.html>
- [104] Ministerio de Fomento, Catálogo y evolución de la red de carreteras, Informe Técnico, Gobierno de España (2015). https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/CARRETERAS/CATYEVO_RED_CARRETERAS/
- [105] DGT, Series históricas - parque de vehículos. <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/series-historicas/>
- [106] Nielsen Holdings N.V., Informe nielsen 360, Informe Técnico, Nielsen Holdings N.V. (2016). <http://recursos.anuncios.com/files/859/52.pdf>
- [107] J. W. Tester, B. J. Anderson, A. S. Batchelor, D. D. Blackwell, R. DiPippo, E. Drake, J. Garnish, B. Livesay, M. C. Moore, K. Nichols, et al., The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century, Massachusetts Institute of Technology 209.
- [108] Plataforma Tecnológica Española de Geotermia, Análisis del sector de la energía geotérmica en España, Informe Técnico (2015). <http://www.geoplat.org/portfolio-items/portfolio-item-12/>
- [109] S. Schwartz, The costs of U. S. nuclear weapons. <https://www.nti.org/analysis/articles/costs-us-nuclear-weapons/>
- [110] Banco Mundial, Datos sobre gasto militar en el mundo. <http://datos.bancomundial.org/>
- [111] Gobierno de Navarra, Balance energético de Navarra, Informe Técnico (2015).
- [112] Wisconsin Project on Nuclear Arms Control, Israel's plutonium production. <https://www.wisconsinproject.org/israel-plutonium-production/>
- [113] World Nuclear Association, Uranium enrichment. <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx>
- [114] A. Gil, La universidad apuesta por el ahorro responsable. http://www.expansion.com/2014/02/04/entorno/aula_abierta/1391504658.html
- [115] Oficina Verde Universidad de Zaragoza, Consumo energético de la UZ en 2015. <https://oficinaverde.unizar.es/consumo-energetico-de-la-uz-electricidad-y-gas>
- [116] IDAE, Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía, Informes y estadísticas — Consumo de energía final. <http://sieeweb.idae.es/consumofinal/>
- [117] M. Z. Jacobson, M. A. Delucchi, Z. A. Bauer, S. C. Goodman, W. E. Chapman, M. A. Cameron, C. Bozonnat, L. Chobadi, H. A. Clonts, P. Enevoldsen, et al., 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world, *Joule* 1 (2017) 15-17.

- [118] E. Lorenzo, Sobre el papel de la energía en la historia. Volumen I, PROGENSA, 2006.
- [119] P. Malanima, Energy crisis and growth 1650-1850: the european deviation in a comparative perspective, *Journal of Global History* 1 (1) (2006) 101-121.
- [120] J. García Nieto, Andro4all, La triste realidad de dejar el cargador enchufado cuando no estás cargando nada. <https://andro4all.com/2018/03/triste-realidad-dejar-cargador-enchufado-consumo>
- [121] 20 Minutos, Qué gasto supone dejar el cargador enchufado si no cargas el móvil. <https://www.20minutos.es/noticia/3289012/0/por-que-nodejar-cargador-enchufado-sin-cargar-movil/>
- [122] P. Cazzola, M. Gerner, Global EV outlook 2016, Informe Técnico, Agencia Internacional de la Energía (2016).
- [123] D. Myall, D. Ivanov, W. Larason, M. Nixon, H. Moller, Accelerated reported battery capacity loss in 30 kwh variants of the Nissan Leaf, Preprints (2018030122). doi:10.20944/preprints201803.0122.v1.
- [124] M. Coumans, Tesla battery range data. https://docs.google.com/spreadsheets/d/1c3m9wqlxPBo8ziDY-Vm5cHRzNCHZbtI_2vVhIXksX9Jc/edit#gid=657708069
- [125] IDAE, Cálculo de consumo energético de los trenes. <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/bases-de-datosherramientas/calculo-de-consumo-energetico-de-los-trenes;> véanse también el informe de Metro Madrid: https://www.metro-madrid.es/sites/default/files/web/pdf/INFORME_ANUAL_2017_accessible.pdf y de Metro Barcelona https://www.tmb.cat/documents/20182/94438/Dades+viatgers+bus+metro+2019_CA_EN/3f6c014d-4dd3-46d0-b688-26989e763677.
- [126] CROW, Manual de Diseño para el Tráfico de Bicicletas (2011).
- [127] IDAE, Consumo de carburante y emisiones de CO₂ en coches nuevos. <http://coches.idae.es/>
- [128] Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, Atlas de la movilidad residencia-trabajo de la Comunidad de Madrid 2017. <http://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/general/territorio/atlasmovilidad2017/INDEX.html>
- [129] C. U. T. for Europe, Detailed summary of achievements 2006. <http://www.fuelcellbuses.eu/>
- [130] Peggy Hollinger, Las aerolíneas innovan para superar el problema del peso. [http://www.expansion.com/empresas/transporte/2016/12/15/5851a558268e3ed86f8b4610.html/](http://www.expansion.com/empresas/transporte/2016/12/15/5851a558268e3ed86f8b4610.html)
- [131] Airbus, A320neo family sets new standards with 20 percent reduced fuel burn. <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2014/09/a320neo-family-sets-new-standards-with-20-reduced-fuel-burn.html>
- [132] Carbon Trust, Micro-CHP accelerator — interim report, Informe Técnico, Cambridge Energy Research Group, Cambridge (2007). <https://wiki.ucl.ac.uk/download/attachments/11962817/carbon+trust+-+2007+-+micro-chip+accelerator+-+interim+report.pdf>
- [133] R. Eden, R. Bending, Gas/electricity competition in the UK, Informe Técnico, Cambridge Energy Research Group, Cambridge (1985).
- [134] Drake landing solar community. www.dlsc.ca
- [135] Instituto Nacional de Estadística, Encuesta de hogares y medio ambiente, Boletín informativo (2009). <http://www.ine.es/revistas/cifraine/0609.pdf>
- [136] GI energy, Ground source and air source heat pumps (2017). <http://www.gienergy.net/>
- [137] Heat pumps: Long awaited way out of the global warming. (2017). <https://www.hptcj.or.jp/e/>
- [138] J. Hansen, M. Sato, P. Kharecha, G. Russell, D. Lea, M. Siddall, Climate change and trace gases, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 365 (2007) 1925-1954. doi:10.1098/rsta.2007.2052. pubs.giss.nasa.gov/abstracts/2007/Hansenetal2.html
- [139] B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer, *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge University Press, 2005. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf
- [140] Compañía sueca Vattenfall. <http://blogs.reuters.com/environment/2008/09/09/a-silver-bullet-or-just-greenwash/>
- [141] BP statistical review of world energy june 2018. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [142] P. Jackson, S. Kershaw, Reducing long term methane emissions resulting from coal mining, *Energy Conversion and Management* 37 (6-8) (1996) 801-806. doi:10.1016/0196-8904(95)00259-6.
- [143] P. C. Thakur, H. G. Little, W. G. Karis, Global coalbed methane recovery and use, *Energy Conversion and Management* 37 (6-8) (1996) 789-794.
- [144] World Energy Council, World energy resources 2016, Informe Técnico, World Energy Council (2016). <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>
- [145] UK Government, Underground coal gasification: evidence statement of global warming potential, Informe Técnico, Department for Business, Energy and Industrial Strategy (2015). <https://www.gov.uk/government/publications/underground-coal-gasification-evidence-statement-of-global-warming-potential>
- [146] Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency, Uranium 2018: Resources, production and demand ('Red Book'), Informe Técnico (2018). <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf>
- [147] Asociación nuclear mundial. <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures.aspx>

- [148] M. Weightman, Report of the investigation into the leak of dissolver product liquor at the thermal oxide reprocessing plant (HORP), Sellafield, notified to HSE on 20 april 2005, Informe Técnico (2007).
www.onr.org.uk/periodic-safety-review/thorpreport.pdf
- [149] M. Ragheb, Fukushima earthquake and tsunami station blackout accident, Informe Técnico (2005).
<https://web.archive.org/web/20121218200907/https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Fukushima%20Earthquake%20and%20Tsunami%20Station%20Blackout%20Accident.pdf>
- [150] M. Steinberg, V. Dang, Preliminary design and analysis of a process for the extraction of lithium from seawater, in: Symposium on United States lithium resources and requirements by the year 2000, 1976.
www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7351225
- [151] T. Tsuruta, Removal and recovery of lithium using various microorganisms, *Journal of bioscience and bioengineering* 100 (5) (2005) 562-566. doi:10.1263/jbb.100.562.
- [152] R. Chitrakar, Y. Kanoh, H. and Miyai, K. Ooi, Recovery of lithium from seawater using manganese oxide adsorbent ($H_16Mn_16O_4$) derived from $Li_6Mn_6O_4$, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 40 (9) (2001) 2054-2058.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie000911h>
- [153] J. Ongena, G. Van Oost, Energy for future centuries. Will fusion be an inexhaustible, safe and clean energy source? (2006).
<http://www.euro-fusionscipub.org/wp-content/uploads/2014/11/EFDR00001.pdf>
- [154] D. Eckhartt, Nuclear fuels for low-beta fusion reactors: Lithium resources revisited, *Journal of Fusion Energy* 14 (4) (1995) 329-341. doi:10.1007/BF02214511.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02214511>
- [155] Scitech connect.
www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7200593
- [156] S. Tsuchiya, Highly efficient separation of lithium chloride from seawater, *Journal Am. Chem. Sol.* 124 (18) (2002) 4936-4937.
- [157] P. Hodgson, *Nuclear Power, Energy and the Environment*, Imperial College Press, 1999.
- [158] W. J. Nuttall, *Nuclear Renaissance*, Institute of Physics Publishing, 2004.
- [159] H. H. Rogner, Energy resources, in: World Energy Assessment. Energy and the challenge of sustainability, UNDP, 2000, Ch. 5.
http://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/environment-energy/sustainable_energy/world_energy_assessmentenergyandthechallengeofsustainability.html
- [160] R. Williams, Advanced Energy Supply Technologies, in: *World Energy Assessment: Energy and the challenge of sustainability*, United Nations Development Programme, Nueva York, 2000, Ch. 8.
http://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/environment-energy/sustainable_energy/world_energy_assessmentenergyandthechallengeofsustainability.html
- [161] Renewable energy and nuclear power.
www.feasta.org/documents/wells/contents.html?one/horelacy.html
- [162] C. P. Zaleski, The future of nuclear power in France, the EU and the world for the next quarter-century (2005).
http://www.npolicy.org/article_file/The_Future_of_Nuclear_Power_in_France_the_EU_and_the_World_for_the_Next_Quarter_Century.pdf
- [163] Renewables 2017 global status report, Informe Técnico, REN21 (2017).
https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf
- [164] G. Asplund, Sustainable energy systems with HVDC transmission, in: *IEEE Power Engineering Society General Meeting 2* (2004) 2299-2303. doi:10.1109/PES.2004.1373296.
- [165] M. P. Bahrman, B. K. Johnson, The ABCs of HVDC transmission technologies, *IEEE Power and Energy Magazine* 5 (2) (2007) 32-44. doi:10.1109/MPAE.2007.329194.
- [166] L. Carlsson, «Classical» HVDC: still continuing to evolve, Modern Power Systems.
<http://www.modernpowersystems.com/features/featureclassical-hvdc-still-continuing-to-evolve/>
- [167] F. Trieb, G. Knies, A renewable energy and development partnership EU-ME-NA for large scale solar thermal power & desalination in the Middle East and in North Africa, Informe Técnico, TransMediterranean Renewable Energy Cooperation TREC (Abril 2004).
http://www.menarec.org/resources/Sanaa+paper+and+annex_15-04-2004.pdf
- [168] E. d. M. van Voorthuysen, Two scenarios for a solar world economy, *International Journal of Global Environmental Issues* 8 (3) (2008) 233-247. doi:10.1504/IJGENVI.2008.018638.
<https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJGENVI.2008.018638>
- [169] Gemasolar factsheet, Informe Técnico, Torresol Energy.
<https://masdar.ae/en/masdar-clean-energy/projects/gemasolar>
- [170] J. Schlaich, *The solar chimney: electricity from the Sun*, National Book Network, 1995.
<https://books.google.es/books?id=CVy6Nh57MdMC>
- [171] J. Schlaich, R. Bergermann, G. Schiel, Wolfgang and Weinrebe, Design of commercial solar updraft tower systems—utilization of solar induced convective flows for power generation, *Journal of Solar Energy Engineering* 127 (2005) 117-124. doi:10.1115/1.1823493.
- [172] C. Dennis, Solar energy: Radiation nation, *Nature* 443 (7107) (2006) 23-24.

- [173] EnviroMission: Tower of power.
<http://www.enviromission.com.au>
- [174] Solar Air Tech, LLC.
<http://www.solarairpower.com/>
- [175] Orkustofnun, Energy statistics in Iceland, Informe Técnico (2015).
<https://orkustofnun.is/gogn/os-onnur-rit/Orkutolur-2017-enska-A4.pdf>
- [176] A. G. Finat, R. Liberali, Concentrating solar power: from research to implementation, Luxembourg: European Communities (2007).
- [177] F. Trieb, Concentrating solar power for the mediterranean region, Informe Técnico, German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics, Section Systems Analysis and Technology Assessment, estudio encargado por el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación Natural y Seguridad Nuclear de Alemania. (Abril 2005).
http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/MED-CSP_complete_study.pdf
- [178] Solar Millennium: Von der Sonne profitieren.
<http://www.solarmillennium.de/>
- [179] M. Gimeno-Gutiérrez, R. Lacal-Aránzategui, Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage, JRC Scientific and Policy Report, European Commission (2013).
- [180] International Water Power & Dam Construction, Pumped storage in Spain.
<http://www.waterpowermagazine.com/features/featurepumped-storage-in-spain/>
- [181] Reuters Staff, Loss of wind causes Texas power grid emergency.
<https://www.reuters.com/article/us-utilities-ercot-wind/loss-of-wind-causes-texas-power-grid-emergency-idUSN2749522920080228?feedType=RSS&feedName=domesticNews>
- [182] Reuters Staff, Spain wind power hits record, cut ordered.
<https://www.reuters.com/article/spain-power/spain-windpower-hits-record-cut-ordered-idUSL057816620080305>
- [183] Red Eléctrica de España.
<http://www.ree.es/es/>
- [184] Ángel Fernández Homar, La incineración de los residuos sólidos urbanos: Aporte energético y ambiental, Informe Técnico, AE-VERSU (2013).
- [185] TERSA, Planta de valorización energética.
http://www.teresa.cat/es/planta-de-valorizacionenergetica_2172
- [186] U.S. Energy Information Administration, Biomass explained. waste-to-energy (municipal solid waste).
https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass_waste_to_energy
- [187] Gobierno de Canarias, En Canarias hay 319 desaladoras con una capacidad de producción de agua potable superior a 660 000 m³/día.
<https://www.gobiernodecanarias.org/noticias/hemeroteca/agpa/Aguas/24759/canarias-319-desaladoras-capacidad-produccion-agua-potable-superior-660.000-m-dia>
- [188] B. Peñate Suárez, Desalación de aguas en Canarias.
<https://mas.canarias7.es/blogs/ventanaverde/2015/11/desalacion-de-aguas-en-canaria.html>
- [189] Dynamic Demand, A dynamically-controlled refrigerator: Results of a preliminary test-run, Informe (2005).
http://www.dynamicdemand.co.uk/pdf_fridge_test.pdf
- [190] Policy to support the energy efficiency and demand side management. Program for the electricity sector through the standard offer incentive scheme, Informe Técnico, Department of Energy, Republic of South Africa (2010).
http://www.energy.gov.za/files/policies/Standard_Offer_Policy.pdf
- [191] H. Sharman, Why wind power works for Denmark, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 158 (2) (2005) 66-72. doi:10.1680/cien.2005.158.2.66.
<https://doi.org/10.1680/cien.2005.158.2.66>
- [192] Microgrids, Fair Isle.
<http://www2.ee.ic.ac.uk/daniel.mewton09/yr2proj/fairisle.htm>
- [193] D. Scott, Daily and Sunday Express, Future is electric for tiny Fair Isle attempting to attract new residents.
<https://www.express.co.uk/news/uk/833490/Futureelectric-tiny-Fair-Isle-attract-new-residents>
- [194] BBC News, Plan for 24-hour-a-day Fair Isle power moves forward.
<http://www.bbc.com/news/uk-scotland-north-east-orkneyshetland-40726806>
- [195] T. Horiba, Lithium-ion battery systems, *Proceedings of the IEEE* 102 (6) (2014) 939-950. doi:10.1109/JPROC.2014.2319832.
- [196] G. J. May, A. Davidson, B. Monahov, Lead batteries for utility energy storage: A review, *Journal of Energy Storage* 15 (Supplement C) (2018) 145-157. doi:10.1016/j.est.2017.11.008.
- [197] J. R. Morante, El almacenamiento de la electricidad.
https://www.empresaeiciente.com/wp-content/uploads/2018/06/guia_26_el-almacenamiento-de-la-electricidad.pdf
- [198] X. Tan, Q. Li, H. Wang, Advances and trends of energy storage technology in microgrid, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 44 (1) (2013) 179-191. doi: 10.1016/j.ijepes.2012.07.015.
- [199] S. Lemofouet-Gatsi, Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors, Tesis doctoral, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (2006). doi:10.5075/epfl-thesis-3628.
<https://infoscience.epfl.ch/record/89165>
- [200] I. Buchmann, Battery University.
www.batteryuniversity.com

- [201] Xtronics, Fuel volumetric and gravimetric energy density compared. https://xtronics.com/wiki/Energy_density.html
- [202] A. I. Stan, M. Swierczynski, D. I. Stroe, R. Teodorescu, S. J. Andreason, Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications – an overview, in: 2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014, pp. 713-720. doi:10.1109/OPTIM.2014.6850936.
- [203] G. Kear, A. A. Shah, F. C. Walsh, Development of the allvanadium redox flow battery for energy storage: a review of technological, financial and policy aspects, *International Journal of Energy Research* 36 (11) (2012) 1105-1120. doi:10.1002/er.1863.
- [204] Index Mundi, Vanadium: Estimated world production, by country. https://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/vanadium/vanadium_t7.html
- [205] M. Godschalk, G. Bakema, 20,000 ATEs systems in the Netherlands in 2020 – major step towards a sustainable energy supply, Infome, If Technology (2010). <https://pdfs.semanticscholar.org/bdb6/9cf8f80a7c6de-4f5eae17c002cce47cf9159.pdf>
- [206] C. Budischak, D. Sewell, H. Thomson, L. Mach, D. E. Veron, W. Kempton, Cost-minimized combinations of wind power, solar power and electrochemical storage, powering the grid up to 99.9% of the time, *Journal of Power Sources* 225 (2013) 60-74.
- [207] EurObserv ER, Solid biomass barometer, 2017.
- [208] EurObserv ER, Biogas barometer, 2017.
- [209] EurObserv ER, Biofuels barometer, 2017.
- [210] Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid. <http://www.ies.upm.es/>
- [211] B. Trincado, El cierre del parque nuclear europeo costará medio billón de euros. https://cincodias.elpais.com/cincodias/2017/08/01/companias/1501605136_249012.html
- [212] Renewable power generation costs in 2017, Informe Técnico, IRENA–International Renewable Energy Agency (2018). <https://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017>
- [213] J. P. García Montes, C. Míguez Gómez, F. Monedero Gómez, I. Rico Arroyo, Síntesis del estudio Parque de bombas de calor en España, Informe Técnico, IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2016).
- [214] Energías Renovables, Cortes-La Muela, la mayor central de bombeo de Europa, se pone en marcha. <https://www.energias-renovables.com/hidraulica/cortesla-muela-la-mayor-central-de-bombeo-20131015>
- [215] Zabalgarbi. <http://www.zabalgarbi.com/es/>
- [216] Compañía de las tres R, Zabalgarbi y Zubieta, ¿por y para qué dos incineradoras? <https://tresresnavarra.wordpress.com/2017/02/18/zabalgarbi-y-zubieta-por-y-para-que-dos-incineradoras/>
- [217] D. Hess, Fernübertragung regelbarer Solarenergie von Nordafrika nach Mitteleuropa, Trabajo fin de grado, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2013).
- [218] NREL National REnewable Energy Laboratory, 2016 bioenergy industry status report, Informe Técnico (2016). <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70397.pdf>
- [219] IDAE, Informe de precios de la biomasa para usos térmicos. <http://www.idae.es/estudios-informes-y-estadisticas>
- [220] World Nuclear Agency, Nuclear power in China. <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>
- [221] Are EU cohesion policy funds well spent on roads?, Special Report 5, European Court of Auditors (2013).
- [222] Ministerio de Fomento. Gobierno de España, Catálogo y evolución de la red de carreteras. http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/CARRETERAS/CATYEVO_RED_CARRETERAS/
- [223] FIAB. Federación Española de Industrias de Alimentación y Bebidas. <http://fiab.es/>
- [224] M. Nolla, X. Cros, Hábitos de aprovechamiento de la alimentación en los españoles, Informe Técnico, AECOC (2016). <https://www.aecoc.es/guias/foodwaste-habitos-de-aprovechamiento-de-la-alimentacion-de-los-espanoles/>
- [225] R. Bonacina, F. Bonelli, G. B. Vacchi, M. P. Mazzucchelli, The luxury and cosmetics financial factbook, Informe Técnico, EY (2017).
- [226] Miguel González, *El País*, España se compromete con la OTAN a aumentar en un 80% su gasto militar para 2024. https://politica.elpais.com/politica/2017/12/26/actualidad/1514312944_214046.html
- [227] N. C. Crawford, U.S. costs of wars through 2014: \$4.4 trillion and counting, Costs of War, Brown University.
- [228] J. E. Stiglitz, L. J. Bildmes, The three trillion dollar war, 2008.
- [229] D. L. Elliott, L. Wendell, G. Gower, An assessment of the available windy land area and wind energy potential in the contiguous United States, Informe Técnico, Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States) (1991).
- [230] Z. Kowalik, Tide distribution and tapping into tidal energy, *Oceanologia* 46 (3) (2004) 291-331.
- [231] R. G. Quayle, M. J. Changery, Estimates of coastal deepwater wave energy potential for the world, in: *OCEANS 81, IEEE* (1981) 903-907.
- [232] J. Hansen, M. Sato, P. Kharecha, G. Russell, D. W. Lea, M. Siddall, Climate change and trace gases, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365 (1856) (2007) 1925-1954. doi:10.1098/rsta.2007.2052. <http://rsta.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsta.2007.2052>

- [233] E. A. Davidson, I. A. Janssens, Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change, *Nature* 440 (7081) (2006) 165-173. doi:10.1038/nature04514.
- [234] H. J. Schnellhuber, W. P. Cramer, *Avoiding dangerous climate change*, Cambridge University Press, 2006.
- [235] C. Le Quéré, C. Rödenbeck, E. T. Buitenhuis, T. J. Conway, R. Langenfelds, A. Gomez, C. Labuschagne, M. Ramonet, T. Nakazawa, N. Metzl, N. Gillett, M. Heimann, Saturation of the southern ocean CO₂ sink due to recent climate change, *Science* 316 (5832). doi:10.1126/science.1136188.
- [236] W. S. Broecker, S. Sutherland, W. Smethie, T.-H. Peng, G. Ostlund, Oceanic radiocarbon: Separation of the natural and bomb components, *Global Biogeochemical Cycles* 9 (2) (1995) 263-288. doi:10.1029/95GB00208.
- [237] J. Houghton, L. Meira Filho, B. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell, *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Informe Técnico, Intergovernmental Panel on Climate Change (1995).
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_sar_wg_I_full_report.pdf
- [238] B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer, Carbon dioxide capture and storage, Informe Técnico, Intergovernmental Panel on Climate Change (2005).
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf
- [239] H. J. Herzog, What future for carbon capture and sequestration?, *Environmental Science & Technology* 35 (7) (2001) 148-153.
<https://pubs.acs.org/doi/pdfplus/10.1021/es012307j>
- [240] H. Herzog, Assessing the feasibility of capturing CO₂ from the air, Informe Técnico, Massachusetts Institute of Technology (2003).
https://www.ocf.berkeley.edu/~step/Journal_Club/paper1_02092010.pdf
- [241] J. David, H. Herzog, The cost of carbon capture, in: Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, Australia, 2000.
http://sequestration.mit.edu/pdf/David_and_Herzog.pdf
- [242] K. S. Lackner, P. Grimes, G. Associates, H.-J. Ziock, Capturing Carbon Dioxide From Air, in: First National Conference on Carbon Sequestration, Washington DC, 2001.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.177.7831>
- [243] D. W. Keith, M. Ha-Duong, J. K. Stolaroff, Climate strategy with CO₂ capture from the air, *Climatic Change* 74 (1-3) (2006) 17-45. doi:10.1007/s10584-005-9026-x.
- [244] R. D. Schuling, P. Krijgsman, Enhanced weathering: An effective and cheap tool to sequester CO₂, *Climatic Change* 74 (1-3) (2006) 349-354. doi:10.1007/s10584-005-3485-y.
- [245] B. Judd, D. Harrison, I. Jones, Engineering ocean nourishment, in: World Congress on Engineering, Londres, UK, 2008.
http://www.iaeng.org/publication/WCE2008/WCE2008_pp1315-1319.pdf
- [246] S. Chisholm, P. Falkowski, J. Cullen, Dis-crediting ocean fertilization, *Science* 294 (2001) 309-310.
<http://www.bio.miami.edu/prince/Chisholm.pdf>
- [247] I. S. Jones, The cost of carbon management using ocean nourishment, *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 6 (4) (2014) 391-400. doi:10.1108/IJCCSM-11-20120063.
- [248] D. L. Elliott, L. Wendell, G. Gower, An assessment of the available windy land area and wind energy potential in the contiguous United States, Informe Técnico, Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States) (1991).
- [249] D. MacKay, *Sustainable energy – Without the hot air*, UIT Cambridge, 2008.
- [250] A. Braslow, A history of suction-type laminar-flow control with emphasis on flight research, Monographs in aerospace history, NASA History Office, Office of Policy and Plans, NASA Headquarters, 1999.
- [251] J. E. Green, Civil aviation and the environment – the next frontier for the aerodynamicist, *The Aeronautical Journal* 110 (1110) (2006) 469-486. doi:10.1017/S0001924000001378.
- [252] R. Grant, *Flight: The complete history of aviation*, DK, 2008.
- [253] J. E. Green, Civil aviation and the environment – the next frontier for the aerodynamicist, *The Aeronautical Journal* 110 (1110) (2006) 469-486.
- [254] P. Rajpal, *5 thinkings to win: How the global leaders are achieving breakthrough business results*, On Books International (2017).
- [255] J.E. Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, M. McFarland, Aviation and the global atmosphere, Informe Técnico, IPCC– Intergovernmental Panel on Climate Change (1999).
<https://www.ipcc.ch/report/aviation-and-the-global-atmosphere-2/>
- [256] Airliners, Boeing 747-400.
<http://www.airliners.net/aircraft-data/boeing-747-400/100>
- [257] Wandering albatross (*Diomedea exulans*).
<http://www.wildanimalsonline.com/birds/wanderingalbatross.php>
- [258] D. Hansford, Alaska bird makes longest nonstop flight ever measured.
<https://www.nytimes.com/2010/05/25/science/25migrate.html>
- [259] QPS Marine, FAST CAT 104 Wave Piercer 2016 (2016).
<http://www.goldcoastyachts.com/home-files/Fast%20Cat.pdf>
- [260] Lun (ekranoplan) ground effect flying boat /anti-ship warfare aircraft.
https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=522
- [261] G. Taylor, Are you missing the boat? The ekranoplan in the 21st century – its possibilities and limitations, in: J. Pinkster (Ed.), 18th Fast Ferry Conference (2018).
- [262] H. Tennekes, *The simple science of flight*, MIT Press, 1997.

- [263] W. Shyy, M. Berg, D. Ljungqvist, Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles, *Progress in Aerospace Sciences* 35 (5) (1999) 455-505. doi:10.1016/S0376-0421(98)00016-5.
- [264] N. Brosse, A. Dufour, X. Meng, Q. Sun, A. Ragauskas, *Miscanthus*: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 6 (5) (2012) 580-598.
- [265] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España, Anuario de estadística de MAPAMA. <http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/>
- [266] Agri for Energy, Biofuel production by farmers – best practice examples. https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/agriforenergy_biofuel_production_by_farmers.pdf
- [267] M. Bender, Economic feasibility review for community-scale farmer cooperatives for biodiesel, *Bioresource Technology* 70 (1) (1999) 81-87.
- [268] C.-L. Su, Y.-M. Lee, Development status and life cycle inventory analysis of biofuels in Taiwan, *Energy Policy* 37 (2) (2009) 754-758.
- [269] The Royal Society, Sustainable biofuels: prospects and challenges, Informe Técnico (2008). https://royalsociety.org/~media/royal_society_content/policy/publications/2008/7980.pdf
- [270] H. Shapouri, J. A. Duffield, M. Wang, The energy balance of corn ethanol: An update, Informe Técnico, U.S. Department of Agriculture (2001). http://industrializedcyclist.com/Corn_Ethanol_E_Balance.pdf
- [271] P. W. Gallagher, W. C. Yee, H. S. Baumes, 2015 energy balance for the corn-ethanol industry, Informe Técnico, U.S. Department of Agriculture (2016). <https://www.usda.gov/oce/reports/energy/2015EnergyBalanceCornEthanol.pdf>
- [272] M. R. Schmer, K. P. Vogel, R. B. Mitchell, R. K. Perrin, Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (2) (2008) 464-469.
- [273] G. Francis, R. Edinger, K. Becker, A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations, in: Natural Resources Forum, Vol. 29, Wiley Online Library, 2005, pp. 12-24.
- [274] B. Asselbergs, J. Bokhorst, R. Harms, J. Hemert, L. Noort, C. Velden, R. Vervuurt, L. Wijnen, L. Zon, L. Woltjer, Size does matter: The possibilities of cultivating *Jatropha curcas* for biofuel production in Cambodia, Expertise Centrum voor Duurzame Ontwikkeling: Universiteit Van Amsterdam (2006).
- [275] R. Putt, Algae as a biodiesel feedstock: A feasibility assessment, Draft Submitted to Center for Microfibrous Materials Manufacturing (2007).
- [276] W. A. Amos, Updated cost analysis of photobiological hydrogen production from *Chlamydomonas reinhardtii* green algae: Milestone completion report, Informe Técnico, National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US) (2004).
- [277] Acciona Energía, Planta de biomasa de Sangüesa. <https://www.acciona-energia.com/es/areas-de-actividad/otras-tecnologias/biomasa/instalaciones-destacadas/planta-de-biomasa-de-sang%C3%BCesa/>
- [278] FEMP – Federación Española de Municipios y Provincias, Estudio del potencial de reducción de emisiones en los vertederos municipales, Informe Técnico (2011). <http://www.redciudadesclima.es/sites/default/files/b168f33ddf6a49c7d32b5b6dd0d6662b.pdf>
- [279] Ministerio de Fomento, Documento Básico HS Salubridad. Código Técnico de la Edificación, Calidad del aire interior, Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo (2013).
- [280] Ministerio de Fomento, Documento de Apoyo al DB-HE Ahorro Energético. Código Técnico de la Edificación, Cálculo de parámetros característicos de la envolvente, Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo (2015).
- [281] IDAE, Escala de calificación energética, Edificios de nueva construcción, Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético (2009).
- [282] IDAE, Calificación energética de edificios. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calificacion_de_eficiencia_energetica_de_edificios_prov_1701_e1a02950.pdf
- [283] Comunidad de Madrid, Guía del estándar Passivhaus, Edificios de consumo energético casi nulo, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2011).
- [284] Passive House Institute. <http://www.passiv.de/en/index.php>
- [285] Plataforma de Edificación Passivhaus. <http://www.plataforma-pep.org/>
- [286] G. Taylor, Tidal friction in the Irish Sea, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 220 (1920) 1-33.
- [287] C. Garret, P. Cummins, The power potential of tidal currents in channels, *Proc. Royal Society A* 461 (2060) (2005) 2563-2572. doi.org/10.1098/rspa.2005.1494.
- [288] C. Garret, P. Cummins, The efficiency of a turbine in a tidal channel, *Journal of Fluid Mechanics* 588 (2007) 243-251. journals.cambridge.org/production/action/cjoGetFulltext?fulltextid=1346064.
- [289] Z. Kowalik, Tide distribution and tapping into tidal energy, *Oceanologia* 46 (3) (2004) 291-331.
- [290] J. F. Sleath, *Sea bed mechanics*, Wiley, 1984.
- [291] E. Wilson, M. Balls, Tidal power generation, in: P. Novak (Ed.), *Developments in Hydraulic Engineering*, Taylor and Francis, 1990, Ch. 2.

- [292] D. MacKay, Enhancing electrical supply by pumped storage in tidal lagoons (2007).
<http://www.inference.org.uk/sustainable/book/tex/Lagoons.pdf>
- [293] C. Baker, J. Walbancke, P. Leach, Tidal lagoon power generation scheme in Swansea Bay, Informe Técnico (2006).
- [294] P. Mayorga, J. Hanssen, S. Robles, M. Bruno, Technical assessment of ocean energies exploitation in Andalucía (Spain), *Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* (2011).
- [295] M. Calero Quesada, J. Sánchez Garrido, J. García Lafuente, Mapa de los flujos de energía en el estrecho de Gibraltar para su aprovechamiento como fuente de energía renovable. Proyecto de Excelencia FLEGER (RNM-3738), Informe Técnico, Junta de Andalucía (2012).
- [296] J. Juanes González, El potencial energético útil de las corrientes marinas en el estrecho de Gibraltar, Ph.D. thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid (2007).
- [297] T. Shaw, M. Watson, Flexible power generation from the tides, *Engineering Sustainability* 156 (2) (2003) 119-123.
- [298] L. Blunden, A. Bahaj, Tidal energy resource assessment for tidal stream generators, *Proc. IMechE* 221 (Part A) (2007) 137-146.
- [299] R. Charlier, Sustainable co-generation from the tides: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7 (3) (2003) 187-213.
- [300] R. Charlier, A «sleeper» awakes: tidal current power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7 (6) (2003) 515-529.
- [301] J. Sleath, *Sea bed mechanics*, Wiley, 1984.
- [302] J.-L. Fan, X. Pan, J.-Q. Li, Production-based and consumption-based CO₂ transfers among major economies: A flow chart analysis, *Energy Procedia* 105 (2017) 3499-3506.
- [303] WIOD World Input-Output Database.
<http://www.wiod.org/home>
- [304] A. Simoes, ¿Qué importa España? (2014).
http://atlas.media.mit.edu/es/visualize/tree_map/hs92/import/esp/all/show/2014/
- [305] Puertos del Estado, Sistema portuario de titularidad estatal. Anuario estadístico 2014, Informe Técnico, Puertos del Estado y Ministerio de Fomento (2014).
- [306] ANAVE, Marina mercante y transporte marítimo, Informe Técnico, Asociación de navieros españoles (2014).
<http://www.anave.es/>
- [307] Department of Engineering, Materials selection and processing (2002).
<http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/>
- [308] B. Lawson, Building materials, energy and the environment: towards ecologically sustainable development, Royal Australian Institute of Architects, 1997.
- [309] F. Goerlich, Áreas rurales y coberturas del suelo, Fundación BBVA, Documentos de Trabajo 2 (2013) 15-16.
- [310] E. Reig, F. Goerlich, I. Cantarino, Delimitación de áreas rurales y urbanas a nivel local, Fundación BBVA (2016) 33-34.
- [311] C. L. Weber, H. S. Matthews, Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States, *Environmental Science and Technology* 42 (10) (2008) 3508-3513. doi: 10.1021/es702969f.
- [312] Banco Mundial, Datos demográficos y de superficie de los países.
<http://datos.bancomundial.org/>
- [313] R. Rodríguez, J. C. Romero, Diagramas Sankey del sector energético español.
https://www.comillas.edu/Documentos/BP/sankey_energy.html
- [314] Red Eléctrica de España, Estructura de generación.
<http://www.ree.es/es/>
- [315] Red Eléctrica de España, Sistema de información del operador del sistema, precio de la energía.
<https://www.esios.ree.es/es>

Sobre los autores

Este libro ha sido escrito por siete investigadores de la Universidad Pública de Navarra (UPNA), basándose en la publicación previa de David J. C. MacKay *Sustainable energy – Without the hot air*. A continuación, se recoge una breve presentación de los autores de esta adaptación para que el lector conozca a los «culpables» de que exista este libro. Esperamos que hayáis disfrutado de su lectura tanto como nosotros de la escritura.



Javier Samanes Pascual

Currículum

Javier Samanes (Pamplona, 1990) es investigador en la UPNA, donde obtuvo los títulos de Ingeniero Industrial, máster en Energías Renovables y doctor en Energías Renovables. En su tesis doctoral estudió la mejora de la eficiencia y el control de convertidores de potencia para aerogeneradores de gran potencia. Es uno de los fundadores de la asociación APERNA (Asociación para la Promoción de Energías Renovables en Navarra). Le gusta ocupar su tiempo libre leyendo, practicando deporte, viajando y, por supuesto, embarcándose en todo tipo de proyectos (como este libro).

Mi consumo

Para que sirva de ejemplo al lector, y con el objetivo de animarle a hacer lo mismo, los autores del libro hemos calculado nuestra «pila» de consumo. En mi caso, vivo en una casa de pueblo, que, a pesar de haber sido reformada y aislada recientemente, y de que la consigna de temperatura del termostato nunca supera los 19 °C, tiene un consumo de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) de 9,6 kWh/p/d. Necesito el coche para ir al trabajo, recorro 80 km todos los días. Además de esto, tanto por ocio como por trabajo, suelo volar bastante. En el resto de aspectos de mi día a día, no me alejo de los datos del ciudadano medio que hemos estudiado a lo largo del libro. No estoy orgulloso, pero, teniendo en cuenta todo esto, mi consumo, con 129,9 kWh/d, supera holgadamente la media.

Transporte mercancías: 18 kWh/d
Fabricación cosas: 25 kWh/d
Alimentación: 12 kWh/d
Elec.: 4,4 kWh/d
Calef. refrigerig: 11,6 kWh/d
Avión: 9,6 kWh/d
Coche: 49,3 kWh/d

Consumo de Javier:
129,9 kWh/d.

Julio Pascual Miqueleiz



Curriculum

Julio Pascual Miqueleiz (Pamplona, 1985), es profesor de Ingeniería Eléctrica en la UPNA, donde obtuvo los títulos de Ingeniero Industrial, máster en Energías Renovables y doctor en Energías Renovables. En su tesis doctoral estudió estrategias de gestión energética basadas en la predicción meteorológica para viviendas con energías renovables y baterías. Actualmente sigue trabajando en esta línea de investigación, así como en el análisis de grandes plantas fotovoltaicas. Su tiempo libre lo dedica a cacharrear, montar, desmontar, arreglar, romper, pintar, leer... y, por supuesto, a hablar de renovables cuando le dejan.

Mi consumo

En casa vivimos dos personas que consumimos 13,2 kWh/d cada una en calefacción principalmente, y, en menor medida, en electricidad y ACS. En el trabajo, además, consumo gas (para calefacción) y electricidad (luz y ordenador) por valor de unos 5,6 kWh/d. Para ir a trabajar no uso el coche, pero para desplazarme más lejos, ya sea por trabajo o por ocio, consumo en valor medio unos 7,6 kWh/d. Mi alimentación no dista de la media, así que debo consumir unos 12 kWh/d. Mi afán por acumular cosas considero que es similar al de la media, con la diferencia de que no tengo coche propio, así que me apunto unos 15 kWh/d. Finalmente, en el transporte de mercancías, me apunto la media de 18 kWh/d. En total consumo unos 71,4 kWh/d, algo menos que la media, aunque se puede mejorar, quizás reduciendo los desplazamientos, ahorrando en calefacción y reduciendo el uso de envases.

Transporte
mercancías:
18 kWh/d

Fabricación
cosas:
15 kWh/d

Alimentación:
12 kWh/d

Elec.: **5,4 kWh/d**

Calef. refriger:
13,4 kWh/d

Avión: **4,1 kWh/d**

Coche: **3,5 kWh/d**

Consumo de Julio:
71,4 kWh/d.



Alberto Berrueta Irigoyen

Currículum

Alberto Berrueta (Estella, 1989) es profesor de Ingeniería Eléctrica en la UPNA, donde obtuvo los títulos de Ingeniero Industrial, máster en Energías Renovables y doctor en Energías Renovables. En su tesis doctoral, estudió el uso de sistemas de almacenamiento para mejorar la integración en la red eléctrica de las energías renovables. Especialmente investigó sobre el funcionamiento y envejecimiento de las baterías de litio. Es uno de los fundadores de la asociación APERNA. En su tiempo libre le gusta practicar bádminton, cocinar y charlar sobre cualquier tema relacionado con la ciencia y la tecnología.

Mi consumo

Yo diría que mi consumo energético es relativamente normal, con la única particularidad de que vivo cerca del trabajo y no necesito tener un coche propio. Vivo en un piso con un buen aislamiento térmico, por lo que necesito muy poca energía para mantenerlo a una temperatura habitable en invierno y hago tres o cuatro viajes al año en avión, en los que no suelo salir de Europa. Por lo demás, me considero un consumidor habitual en cuanto a agua caliente, electricidad y bienes de consumo (aparatos electrónicos, ropa, libros, etc.).

Transporte
mercancías:
18 kWh/d

Fabricación
cosas:
15 kWh/d

Alimentación:
12 kWh/d

Elec.: **4,9 kWh/d**

Calef.: **3,9 kWh/d**

Avión:
13,7 kWh/d

Coche: **3,3 kWh/d**

Consumo de Alberto:
70,8 kWh/d.

Miguel Araiz Vega



Currículum

Miguel Araiz Vega (Estella, 1991) es ingeniero industrial y doctor en Energías Renovables por la UPNA donde realizó la tesis doctoral sobre el desarrollo de un generador termoeléctrico para la producción de electricidad a partir del calor de gases de escape de una caldera de combustión. Actualmente sigue trabajando como investigador en temas relacionados con la refrigeración, intercambio de calor y energías renovables. Le encanta viajar y ha estado viviendo una temporada en Alemania y en Australia. Es un apasionado de la música y la tecnología.

Mi consumo

Aunque mis viajes en avión y en tren a otros países, ya sea por trabajo o por ocio, suman unos cuantos kWh, utilizo siempre que puedo la bicicleta para mis desplazamientos diarios. Esto hace que el consumo debido al transporte no sea tan elevado. Vivo, con otras tres personas, en un piso antiguo, de ahí que el consumo por calefacción sea uno de los más altos. Además, en casa nos gusta mucho cocinar, y se nota el uso intensivo que hacemos del horno en el gasto de electricidad.

Transporte
mercancías:
18 kWh/d

Fabricación
cosas:
15 kWh/d

Alimentación:
12 kWh/d

Elec.: **5,3 kWh/d**

Calef. refrigerig:
13 kWh/d

Avión:
6,8 kWh/d

Coche: **5,4 kWh/d**

Consumo de Miguel:
75,5 kWh/d.



Leyre Catalán Ros

Currículum

Leyre Catalán Ros (Barañáin, 1993) es ingeniera industrial por la UPNA y también cuenta con un máster sobre sistemas energéticos por la Högs-kolan i Gävle (Suecia). Actualmente, se encuentra realizando la tesis doctoral tratando de desarrollar prototipos para la generación de electricidad mediante efecto Seebeck en anomalías geotérmicas superficiales de alta entalpía y origen volcánico. Es la presidenta de APERNA. En su tiempo libre le gusta viajar, cocinar e indagar sobre nuevas tecnologías.

Mi consumo

He de confesar que antes de analizar con detenimiento mi consumo me consideraba una consumidora normal de energía, o incluso por debajo de la media: vivo en un piso nuevo y por tanto muy bien aislado (tanto que apenas es necesario poner la calefacción), voy en bicicleta a trabajar, no tengo coche... Sin embargo, he descubierto que mi pasión por viajar contribuye prácticamente a la mitad de mi consumo, especialmente debido a los viajes en avión.

Transporte mercancías: 18 kWh/d
Fabricación cosas: 15 kWh/d
Alimentación: 12 kWh/d
Elec.: 4,9 kWh/d
Calef.: 3,9 kWh/d
Avión: 41,1 kWh/d
Coche: 3,3 kWh/d

Consumo de Leyre:
98,2 kWh/d.

Patricia Aranguren Garacochea



Currículum

Patricia Aranguren Garacochea (Pamplona, 1988) es ingeniera industrial y doctora en Energías Renovables por la UPNA, gracias a su investigación sobre la recuperación del calor residual a través de la termoelectricidad. Actualmente es profesora del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la UPNA. Su labor investigadora y docente se centra en la transmisión de calor, ingeniería térmica, CFD, energía solar térmica y termoelectricidad. Le encanta viajar y descubrir nuevos lugares, culturas y perspectivas de vivir la vida.

Mi consumo

En casa vivimos cuatro personas, y consumimos 5,6 kWh/d/p en calefacción, ACS y electricidad; justo la cantidad que consumo en el trabajo. Todos los desplazamientos cortos los hago andando o en bicicleta, pero me considero una viajera empedernida y por ello mi consumo en transporte asciende a 19,4 kWh/d. Respecto a la alimentación y las cosas que poseo, me apunto la media española (menos 10 kWh/d por no tener coche), así como en el transporte de mercancías; 12, 15 y 18 kWh/d, respectivamente. En total consumo 75,6 kWh/d, por debajo de la media, gracias a mi bajo consumo en coche y calefacción.

Transporte
mercancías:
18 kWh/d

Fabricación
cosas:
15 kWh/d

Alimentación:
12 kWh/d

Elec.: **4,8 kWh/d**

Calef.: **6,4 kWh/d**

Avión:
13,7 kWh/d

Coche: **5,7 kWh/d**

Consumo de Patricia:
75,6 kWh/d.



David Arricibita de Andrés

Currículum

David Arricibita de Andrés (Pamplona, 1990) es ingeniero industrial por la UPNA y cuenta con un máster en Energías Renovables y un doctorado en Energías Renovables por la misma universidad. Su investigación se centra en el estudio de posibles esquemas de control para la conexión de plantas fotovoltaicas en redes muy débiles. Friki de la tecnología y socio de la asociación APERNA; en su tiempo libre le gusta practicar baloncesto.

Mi Consumo

Vivo en un piso de una habitación y además estoy muy poco en casa, por lo que mi consumo de calefacción, ACS y electricidad es muy bajo, sumando un total de 5,2 kWh/d. Donde sí que aumenta mi consumo es en los desplazamientos en coche, ya que lo utilizo a diario para ir a trabajar e incluso para viajes cortos, por lo que hago un consumo medio de unos 16,4 kWh/d. No soy un asiduo de los aviones o trenes, donde mi consumo estimado es de 5,5 kWh/d. Como tengo buen saque, me apunto 15 kWh/d en comida, algo más de la media, pero el resto de consumos estimo que andan en un valor medio.

Transporte
mercancías:
18 kWh/d

Fabricación
cosas:
25 kWh/d

Alimentación:
15 kWh/d

Elec.: **5 kWh/d**

Calef.: **5,8 kWh/d**

Avión: **5,5 kWh/d**

Coche:
16,4 kWh/d

Consumo de David:
90,7 kWh/d.

Agradecimientos

Esta es la primera vez que nos hemos enfrentado al reto de escribir un libro, y el resultado que tienes entre las manos no habría sido posible sin la ayuda de varias personas, a quienes nos gustaría mostrar nuestro agradecimiento.

En primer lugar, a Andoni Urtasun y a Pablo Sanchis, compañeros del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Comunicación de la Universidad Pública de Navarra, por las interesantes discusiones que hemos mantenido dentro y fuera del trabajo durante los meses que ha durado la escritura del libro y por las minuciosas revisiones técnicas a las que sometieron al primer borrador.

En segundo lugar, a Edurne Aranguren, técnica de Publicaciones de la Universidad Pública de Navarra, por las más que detalladas revisiones de todas las versiones que ha tenido esta obra, y por su optimismo contagioso que nos ha ayudado a superar cada una de las fases del proceso de edición.

Nos gustaría agradecer también a nuestros familiares, especialmente padres y hermanos, que han sido los primeros lectores sin formación técnica en ingeniería o sostenibilidad. Sus comentarios han servido para hacer este libro más atractivo para todos.

Por último, pero no por ello menos importante, a nuestras parejas y amigos. Sin la diversión y los momentos de desconexión que ellos nos brindan, definitivamente no habría sido posible conseguir este resultado.

A todos ellos, gracias.

SI QUEREMOS ACABAR CON NUESTRA ADICCIÓN AL PETRÓLEO, CARBÓN Y GAS, ¿QUÉ OPCIONES TENEMOS?

¿CUÁNTA ENERGÍA RENOVABLE SE PUEDE GENERAR EN ESPAÑA EN COMPARACIÓN CON SU CONSUMO?

¿PUEDEN LOS PAÍSES DESARROLLADOS VIVIR DE SUS PROPIAS ENERGÍAS RENOVABLES?

¿PUEDEN LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS RESOLVER NUESTROS PROBLEMAS CON EL DIÓXIDO DE CARBONO?

¿CÓMO SERÍA EL PLAN MUNDIAL PARA ABASTECER-NOS DE ENERGÍA DE FORMA SOSTENIBLE?

Si alguna vez te has preguntado cuánta energía utilizamos y de dónde proviene (y de dónde podría provenir), pero estás harto de palabrería, este es tu libro.

El recurso renovable es «enorme», pero nuestro consumo también es «enorme». Para comparar cosas «enormes» necesitamos números, no adjetivos. Este libro acaba con todas las afirmaciones contradictorias de la prensa, gobiernos y grupos de presión sea cual sea su ideología. Te ofrece los números y hechos que necesitas, en porciones fáciles de digerir, para que puedas entender el problema y construir tus propias conclusiones.

Si te has desesperado pensando que está todo perdido, lee este libro. Encontrarás una discusión honesta, realista y con algún toque de humor.

Este libro ha sido escrito por un grupo de siete profesores e investigadores de la Universidad Pública de Navarra, de las áreas de ingeniería eléctrica y térmica, unidos por las energías renovables.



upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa