



## Reseña

Un maestro de los datos y las estadísticas ofrece una visión del mundo tan sorprendente como iluminadora.

¿Es peligroso volar? ¿Qué es peor para el medioambiente, un coche o un móvil? ¿Cuánto pesan todas las vacas del mundo juntos y por qué ese dato importa? ¿Se puede medir la felicidad?

La misión de Vaclav Smil es convencernos de que los hechos importan. Científico medioambiental, analista de políticas públicas y autor tremendamente prolífico, es el referente de Bill Gates cuando se trata de entender el mundo.

En *Los números no mienten*, nos embarcamos con Smil en una fascinante expedición en busca de datos que desafían nuestras preconcepciones, al tiempo que nos invita a ver con nuevos ojos el impacto de las transformaciones del mundo moderno sobre la sociedad y el medioambiente. Basado en divertidos ejemplos, estadísticas y gráficas asombrosas, este libro es la combinación perfecta de ingenio, historia y ciencia que cambiará la manera en que vemos el mundo.

Es posible que los números no mientan, pero ¿qué verdad transmiten?

La crítica ha dicho...

«El título de Smil lo dice todo: para entender el mundo hay que examinar las líneas de tendencia, no los titulares. Un retrato fascinante, convincente y sobre todo realista del mundo actual y de hacia dónde nos dirigimos.»

Steven Pinker

«La palabra "erudito" se inventó para describir a gente como él.»

Bill Gates

«Uno de los pensadores más importantes del mundo sobre la historia del desarrollo y un maestro del análisis estadístico.»

The Guardian

## Índice

### [Introducción](#)

1. [Personas. Los habitantes de nuestro mundo](#)
2. [Países. Las naciones en la era de la globalización](#)
3. [Máquinas, diseños, aparatos. Los inventos que crearon el mundo moderno](#)
4. [Combustibles y electricidad. La energía de nuestras sociedades](#)
5. [Transporte. Cómo nos movemos](#)
6. [Alimentos. Energía para nosotros mismos](#)
7. [Medioambiente. Dañar y proteger nuestro mundo](#)

### [Epílogo](#)

### [Lecturas adicionales](#)

### [Agradecimientos](#)

### [Sobre Vaclav Smil](#)

## Introducción

*Los números no mienten* es un libro ecléctico que abarca desde las personas, las poblaciones y los países hasta el uso de la energía, la innovación técnica y las máquinas y dispositivos que definen nuestra civilización moderna. Por si eso fuera poco, concluye con varias observaciones sobre hechos relativos al suministro de alimentos y distintas opciones alimentarias, además del estado y la degradación del medioambiente. Estas son las grandes cuestiones que he abordado en mis libros desde los años setenta.

Por encima de cualquier otra consideración, esta obra trata de que los hechos cuadren. Pero eso no es tan fácil como podría parecer: aunque la World Wide Web rebosa de números, demasiados de ellos son cantidades reutilizadas de procedencia desconocida, a menudo expresadas en dudosas unidades. Por ejemplo, el PIB francés en 2010 fue de 2,6 billones de dólares, pero ese valor ¿está dado en moneda corriente o constante?; la conversión de euros a dólares ¿se hizo empleando la tasa de cambio actual o la paridad del poder adquisitivo?; ¿cómo podríamos saberlo?

Por el contrario, casi todas las cifras que aparecen aquí están sacadas de cuatro clases de fuentes primarias: estadísticas de ámbito mundial publicadas por organizaciones globales,<sup>1</sup> anuarios publicados por instituciones nacionales,<sup>2</sup> estadísticas históricas

---

<sup>1</sup> Que van desde Eurostat y la Agencia Internacional de la Energía Atómica hasta las Proyecciones de Población Mundial de la ONU y la Organización Mundial de la Salud.

<sup>2</sup> Mis favoritos, por su grado de detalle sin igual y la calidad de sus datos, son el Japan Statistical Yearbook y el Servicio Nacional de Estadísticas Agropecuarias (USDA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos.

recopiladas por las agencias nacionales<sup>3</sup> y artículos publicados en revistas científicas.<sup>4</sup> Una reducida proporción procede de monografías científicas, de estudios recientes realizados por grandes consultoras (conocidas por la fiabilidad de sus informes) o de encuestas de opinión efectuadas por organizaciones tan reconocidas como Gallup o el Pew Research Center.

Para entender lo que ocurre realmente en nuestro mundo, a continuación debemos situar los números en los contextos adecuados, esto es, en el histórico y el internacional. Por ejemplo, si empezamos por el contexto histórico, la unidad internacional de energía es el julio, y en la actualidad las economías ricas consumen cada año en torno a 150.000 millones de julios (150 gigajulios) de energía primaria per cápita (como referencia, una tonelada de petróleo en crudo equivale a 42 gigajulios); mientras que Nigeria, el país más poblado (y más rico en petróleo y gas natural) de África tiene un consumo medio de tan solo 35 gigajulios. La diferencia es impresionante: Francia o Japón utilizan casi cinco veces más energía per cápita; pero la comparación histórica revela la magnitud real de la brecha: Japón consumía esa cantidad de energía en 1958 (hace una generación de africanos) y Francia ya promediaba 35 gigajulios en 1880, lo que sitúa el acceso de Nigeria a la energía dos vidas humanas por detrás de Francia.

Algunos contrastes internacionales contemporáneos no son menos memorables. Comparar la tasa de mortalidad infantil

---

<sup>3</sup> Incluidas las ejemplares Historical Statistics of the United States, Colonial Times to 1970 y Historical Statistics of Japan.

<sup>4</sup> Desde Biogerontology hasta el International Journal of Life Cycle Assessment.

estadounidense con la del África subsahariana revela una brecha grande pero esperada. Y que Estados Unidos no esté entre los diez países con una menor mortalidad infantil no es tan sorprendente si se tiene en cuenta la elevada diversidad de su población y sus altas tasas de inmigración procedente de países menos desarrollados; pero ¡pocos imaginarían que ni siquiera se encuentra entre los primeros treinta países!<sup>5</sup> Esta sorpresa conduce, inevitablemente, a preguntarse por qué es así, y esta cuestión abre a su vez todo un universo de consideraciones sociales y económicas. La verdadera comprensión de los números (por separado o como parte de estadísticas complejas) requiere una combinación de conocimientos científicos y numéricos básicos.

La longitud (distancia) es la medida más fácil de interiorizar. La mayoría de nosotros tenemos una idea aproximada de lo que son diez centímetros (el ancho del puño de un adulto con el pulgar por fuera), un metro (aproximadamente la distancia de la cintura al suelo de alguien de estatura media) y un kilómetro (lo que en el tráfico urbano recorre un coche en un minuto). Con la velocidad (distancia/tiempo) ocurre lo mismo: caminar a paso rápido son 6 kilómetros por hora; un tren rápido interurbano, 300 kilómetros por hora; un avión de pasajeros propulsado por motores de reacción alcanza los 1.000 kilómetros por hora. En cuanto a la masa, por lo general nos es más difícil de «sentir»: un recién nacido normalmente pesa menos de 5 kilogramos; un cervatillo, menos de 50 kilogramos; algunos tanques de batalla pesan menos de 50 toneladas; y el peso

---

<sup>5</sup> En 2018, ocupaba el puesto 33 de los países de la OCDE.

máximo de un Airbus 380 al despegar es de más de 500 toneladas. El volumen también puede ser complicado: el depósito de gasolina de una berlina pequeña tiene menos de 40 litros; el volumen de una casa estadounidense pequeña no suele superar los 400 metros cúbicos. Hacernos una idea de la energía y la potencia (julios y vatios) o de la corriente eléctrica y la resistencia (amperios y ohmios) es difícil si no estamos acostumbrados a usar estas unidades, por lo que las comparaciones relativas, como la brecha entre el uso de energía en África y en Europa, son más sencillas.

El dinero presenta otras dificultades. La mayoría de nosotros somos conscientes de los niveles relativos de nuestros ingresos y ahorros, pero las comparaciones históricas a escala nacional e internacional deben tener en cuenta la inflación, y estas últimas deben considerar la fluctuación de las tasas de cambio y la variación en el poder de compra.

Además, hay diferencias cualitativas que los números no pueden reflejar, y tales consideraciones son de particular importancia al comparar preferencias alimentarias y dietas. Por ejemplo, el contenido de carbohidratos y proteínas por cada 100 gramos puede ser muy similar, pero lo que se considera pan en un supermercado de Atlanta (porciones cuadradas ya cortadas y envueltas en fundas de plástico) está —en un sentido muy literal— a una distancia oceánica de lo que un *maître boulanger* o un *Bäckermeister* ofrecería en su panadería en Lyon o Stuttgart.

A medida que los números crecen, los órdenes de magnitud (diferencias en potencias de diez) pasan a ser más informativos que



las cifras concretas: un Airbus 380 es un orden de magnitud más pesado que un tanque de batalla; un avión de pasajeros es un orden de magnitud más rápido que un coche en una autopista; y un cervatillo pesa un orden de magnitud más que un bebé. O si empleamos superíndices y signos de multiplicar de acuerdo con el sistema internacional de unidades, un recién nacido pesa  $5 \times 10^3$  gramos, o 5 kilogramos, y un Airbus 380 pesa más de  $5 \times 10^8$  gramos, o 500 millones de gramos. Cuando hablamos de números realmente grandes, no ayuda que los europeos (siguiendo el ejemplo de los franceses) se desvíen de la notación científica y no llamen a  $10^9$  un billón sino (*vive la différence!*) *un milliard* (lo que resulta en *une confusion fréquente*). El planeta pronto tendrá 8.000 millones de habitantes ( $8 \times 10^9$ ), en 2019 su producto económico (en términos nominales) fue de unos 90 billones de dólares ( $9 \times 10^{13}$ ) y consumió más de 500 trillones de julios de energía ( $500 \times 10^{18}$ , o  $5 \times 10^{20}$ ).

La buena noticia es que dominar buena parte de todo esto es más fácil de lo que la mayoría de la gente cree. Imaginemos que dejases a un lado tu teléfono móvil (nunca he tenido uno, ni he sentido que me perdiese nada por no tenerlo) durante unos minutos al día y estimases la longitud y la distancia con respecto a los objetos a tu alrededor, quizá comprobándolas con tu puño (recuerda: unos 10 centímetros) o (tras recuperar el móvil) mediante GPS. Ya que has hecho esto, podrías calcular el volumen de los objetos con los que te topas (la gente siempre subestima el volumen de los objetos finos pero grandes), y es algo simplemente entretenido calcular (sin ayuda electrónica) las diferencias en orden de magnitud cuando leas las

noticias más recientes sobre las desigualdades nacionales de renta entre los multimillonarios y los trabajadores de Amazon (¿cuántos órdenes de magnitud separan sus ingresos anuales?), o cuando veas una comparación de PIB per cápita medios (¿cuántos órdenes de magnitud es el de Reino Unido superior al de Uganda?). Estos ejercicios mentales te pondrán en contacto con las realidades físicas del mundo y mantendrán tus sinapsis activas. Para entender los números solo necesitamos un poco de interés.

Espero que este libro te ayude a comprender el verdadero estado de las cosas. Confío en que te sorprenda, que te lleve a maravillarte ante lo especial que es nuestra especie, ante nuestro ingenio y ante nuestra búsqueda de una mayor comprensión. Mi objetivo es demostrar no solo que los números no mienten, sino descubrir cuál es la verdad que expresan.

Una última nota sobre los números que aparecen aquí: todas las cantidades expresadas en dólares, salvo que se especifique lo contrario, son dólares estadounidenses, y todas las medidas se dan en el sistema internacional, con unas pocas excepciones justificadas, como las millas náuticas y las pulgadas para la madera estadounidense.

VACLAV SMIL  
*Winnipeg, 2020*

## Capítulo 1

### Personas

#### Los habitantes de nuestro mundo

##### *Contenido:*

- § 1. ¿Qué ocurre cuando tenemos menos niños?*
- § 2. ¿El mejor indicador de la calidad de vida? ¿Qué tal la mortalidad infantil?*
- § 3. El mejor retorno de la inversión: la vacunación*
- § 4. Por qué es difícil predecir la gravedad de una pandemia mientras está ocurriendo*
- § 5. Alcanzar mayor estatura*
- § 6. ¿Está la esperanza de vida por fin alcanzando un tope?*
- § 7. Cómo sudar mejoró nuestra capacidad de cazar*
- § 8. ¿Cuántas personas se necesitaron para construir la Gran Pirámide?*
- § 9. ¿Por qué las cifras de desempleo no cuentan toda la historia?*
- § 10. ¿Qué hace feliz a la gente?*
- § 11. El surgimiento de las megaciudades*

##### § 1. ¿Qué ocurre cuando tenemos menos niños?

La tasa de fertilidad (TF) es el número promedio de hijos que una mujer tiene a lo largo de la vida. La limitación física más evidente para esta magnitud es la duración del periodo fértil (desde la menarquia hasta la menopausia). La edad de la primera menstruación ha ido descendiendo desde en torno a los 17 años en

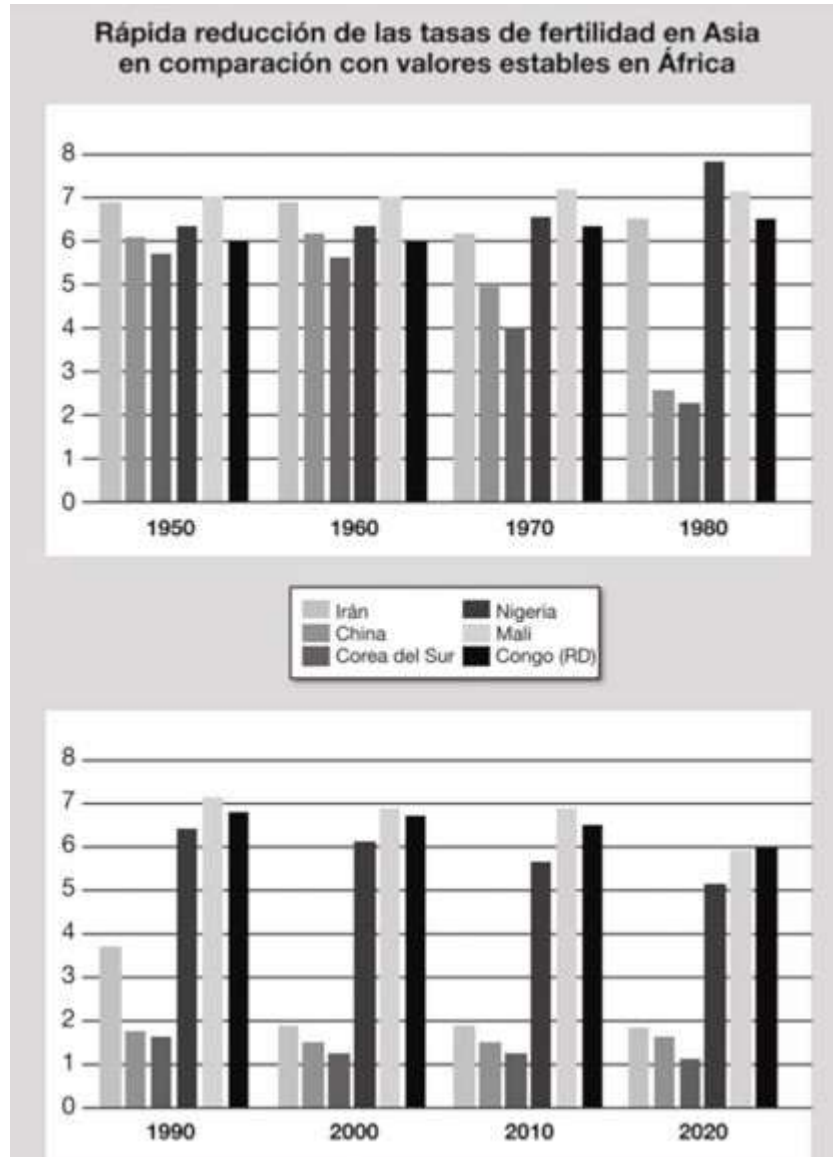
las sociedades preindustriales hasta menos de 13 años en el mundo occidental de hoy, mientras que el comienzo de la menopausia se ha adelantado ligeramente, hasta poco después de los 50 años, lo que resulta en un periodo fértil típico de alrededor de 38 años, en comparación con unos 30 años en las sociedades tradicionales.

Durante el periodo fértil ocurren entre 300 y 400 ovulaciones. Como cada embarazo impide diez ovulaciones, a las que hay que sumar otras cinco o seis debidas a la reducida probabilidad de concepción durante el por lo general prolongado periodo de lactancia, la tasa máxima de fertilidad es de unas dos docenas de embarazos. Con varios nacimientos múltiples, el total puede superar los 24 nacimientos vivos, confirmado por registros históricos de mujeres que tuvieron más de 30 hijos.

Pero las tasas máximas de fertilidad típicas en las sociedades que no practican el control de natalidad han sido siempre mucho menores, debido a la combinación de embarazos perdidos, niños mortinatos, infertilidad y mortalidad materna prematura.

Estas realidades reducen la fertilidad máxima del conjunto de la población hasta valores de entre 7 y 8; de hecho, tales tasas eran habituales en todos los continentes hasta bien entrado el siglo XIX, en partes de Asia hasta hace dos generaciones, y aún pueden encontrarse en el África subsahariana, donde Níger tiene un valor de 7,5 (muy inferior al tamaño de familia preferido: cuando se les pregunta, ¡el número promedio de hijos que las mujeres nigerinas prefieren es de 9,1!). Pero incluso en esa región la TF —aunque sigue siendo elevada— se ha reducido (hasta entre 5 y 6 en la

mayoría de esos países), y el resto del mundo presenta hoy en día TF moderadas, bajas o sumamente bajas.



La transición hacia este nuevo escenario comenzó en épocas distintas, no solo entre regiones y países, sino también en cada uno de ellos: Francia se adelantó mucho a Italia, Japón hizo lo propio frente a China (aunque la China comunista acabó tomando la drástica decisión de restringir a uno el número de hijos por familia).

Dejando eso a un lado, el deseo de tener menos hijos se ha visto impulsado por una combinación a menudo sinérgica de estándares de vida progresivamente más altos, mecanización de las labores agrícolas, sustitución de los animales y las personas por máquinas, industrialización y urbanización a gran escala, un creciente número de mujeres entre la población activa urbana, mayor cobertura de la educación universal, mejores condiciones sanitarias, un aumento de la tasa de supervivencia de los recién nacidos y pensiones públicas garantizadas.

La búsqueda histórica de la cantidad se convirtió, en algunos casos muy rápidamente, en una búsqueda de la calidad: las ventajas de una elevada fertilidad (que garantizaba la supervivencia en situaciones de alta mortalidad infantil y proporcionaba mano de obra adicional, así como protección para la vejez) empezaron a atenuarse hasta acabar desapareciendo, y las familias más reducidas invertían más en sus niños y en elevar su calidad de vida, empezando normalmente por una mejor nutrición (más carne y fruta fresca; más comidas fuera de casa) y acabando con vehículos utilitarios deportivos y vuelos a remotas playas tropicales.

Como suele suceder en las transiciones tanto sociales como técnicas, los pioneros tardaron mucho tiempo en lograr el cambio, mientras que algunos que se subieron al carro tardíamente completaron el proceso en apenas dos generaciones. El paso de una alta a una baja fertilidad tardó alrededor de dos siglos en Dinamarca y en torno a 170 años en Suecia. Por su parte, la fertilidad en Corea del Sur cayó de una TF superior a 6 a un nivel

por debajo del de sustitución en tan solo 30 años, e incluso antes de la introducción de la política de un solo hijo la fertilidad en China se había desplomado desde 6,4 en 1962 hasta 2,6 en 1980. Pero el récord lo ostenta un país inesperado: Irán. En 1979, cuando fue derrocada la monarquía y el ayatolá Jomeini regresó del exilio para instituir una teocracia, la fertilidad media en Irán rondaba 6,5, pero en el año 2000 se había reducido hasta el nivel de sustitución y desde entonces sigue disminuyendo.

El nivel de sustitución en fertilidad es aquel que mantiene la población estable. Es un valor en torno a 2,1, en el que esa décima adicional es necesaria para tener en cuenta las niñas que no sobreviven hasta la edad fértil. Ningún país ha sido capaz de detener el declive de la fertilidad en el nivel de sustitución. Una parte creciente de la humanidad vive en sociedades con niveles de fertilidad inferiores al de sustitución. En 1950, el 40 por ciento de la humanidad vivía en países con fertilidades por encima de 6, y la tasa media se situaba cerca de 5; en el año 2000, solo el 5 por ciento de la población mundial vivía en países con fertilidades superiores a 6, y la media (2,6) se aproximaba al nivel de sustitución. Para 2050, casi tres cuartas partes de la humanidad residirá en países con una fertilidad inferior a la de sustitución.

Este cambio casi global ha tenido enormes implicaciones demográficas, económicas y estratégicas. La importancia de Europa ha disminuido (en 1900, alrededor del 18 por ciento de la población mundial vivía en el continente; en 2020, lo hace solo el 9,5 por ciento) y Asia ha ascendido (60 por ciento del total mundial en

2020), pero las elevadas tasas de fertilidad regionales garantizan que casi el 75 por ciento de todos los nacimientos durante los 50 años que hay entre 2020 y 2070 se producirán en África.

¿Qué deparará el futuro a los países cuya fertilidad ha caído por debajo del nivel de sustitución? Si las tasas de fertilidad nacionales continúan cercanas a la de sustitución (sin descender por debajo de 1,7; en 2019, Francia y Suecia se situaban en 1,8), es bastante probable que en el futuro se produzcan rebotes. Si caen por debajo de 1,5, esos cambios de tendencia parecen cada vez más improbables: en 2019, se alcanzaron topes mínimos de 1,3 en España, Italia y Rumanía, y de 1,4 en Japón, Ucrania, Grecia y Croacia. Un progresivo declive demográfico (con todas las implicaciones sociales, económicas y estratégicas que trae consigo) parece ser el futuro que les espera a Japón y a muchos países europeos. Hasta ahora ninguna política gubernamental de fomento de la natalidad ha conseguido un cambio de rumbo sustancial, y la única opción evidente para evitar la despoblación pasa por abrir las puertas a la inmigración, algo que es poco probable que ocurra.

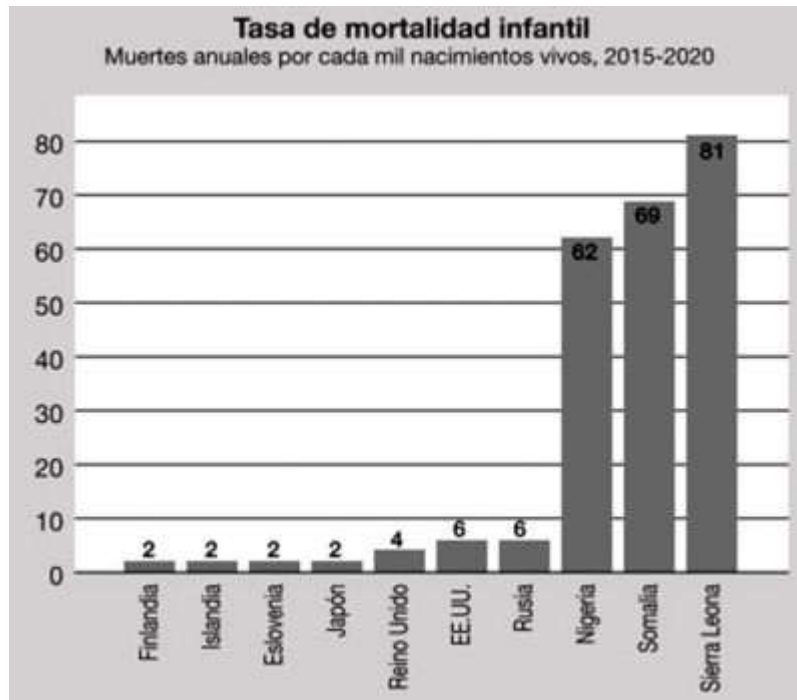
§ 2. ¿El mejor indicador de la calidad de vida? ¿Qué tal la mortalidad infantil?

Cuando buscan las magnitudes más reveladoras de la calidad de vida humana, los economistas —siempre prestos a reducirlo todo al dinero— prefieren recurrir a valores per cápita del producto interior bruto (PIB) o de la renta disponible. Ambas magnitudes son obviamente cuestionables. El PIB aumenta en una sociedad en la



que un incremento de la violencia requiere más labor policial, una mayor inversión en medidas de seguridad e ingresos más frecuentes en los hospitales; y la renta disponible media no nos dice nada sobre el grado de desigualdad económica o sobre la red social a disposición de las familias desfavorecidas. Aun así, estas magnitudes sí nos permiten establecer, a grandes rasgos, una buena clasificación de los países. Muy pocos preferían vivir en Irak (PIB nominal per cápita de en torno a 6.000 dólares en 2018) que en Dinamarca (PIB nominal per cápita de unos 60.000 dólares en 2018). Y la calidad de vida media es indudablemente más alta en Dinamarca que en Rumanía: ambas pertenecen a la Unión Europea, pero la renta disponible es un 75 por ciento más elevada en la primera.

Desde 1990, la alternativa más habitual ha sido utilizar el índice de desarrollo humano (IDH), una magnitud multivariable estructurada para proporcionar una mejor referencia. Combina la esperanza de vida al nacer y los logros educativos (valor medio y valor esperado de los años de escolarización) con el ingreso nacional bruto per cápita, pero (como cabría esperar) guarda una estrecha correlación con el PIB per cápita, lo que convierte a esta última variable en una medida de la calidad de vida tan buena como ese índice más elaborado.



Como magnitud de una sola variable para hacer comparaciones de calidad de vida rápidas y reveladoras, me inclino por usar la mortalidad infantil: el número de muertes durante el primer año de vida que se producen por cada mil nacimientos vivos.

La mortalidad infantil es un indicador muy potente porque es imposible alcanzar tasas bajas sin que se dé una combinación de varias condiciones críticas que definen la calidad de vida —buena atención sanitaria en general y atención prenatal, perinatal y neonatal adecuadas en particular; una correcta nutrición de madre e hijo; condiciones de vida y sanitarias decentes; acceso a la asistencia social para las familias desfavorecidas— y que se sustentan sobre el correspondiente gasto tanto público como privado, además de en infraestructuras e ingresos que puedan hacer sostenible el uso y el acceso a ellos. Así pues, una única variable captura toda una serie de requisitos previos para la

supervivencia casi universal del periodo más crítico de la vida: el primer año.

La tasa de mortalidad infantil en las sociedades preindustriales era uniforme y cruelmente elevada: incluso en 1850, Europa occidental y Estados Unidos registraban cifras de entre 200 y 300 (esto es, uno de cada cinco niños no sobrevivía los primeros 365 días). En 1950, la media occidental se había reducido hasta 35-65 (típicamente, uno de cada 20 recién nacidos moría durante su primer año), y hoy en día los valores más bajos en los países ricos están por debajo de 5 (una criatura de cada 200 no vive hasta su primer cumpleaños). Aparte de varios países muy pequeños —de Andorra a Anguila, pasando por Mónaco y San Marino—, este grupo con tasas de mortalidad infantil inferiores a 5 por 1.000 incluye unos 35 países que van desde Japón (con una tasa de 2) hasta Serbia (apenas por debajo de 5), de los cuales los más destacados demuestran por qué la medida no se puede utilizar para establecer una clasificación simplista sin hacer referencia a las condiciones demográficas más generales.

Los países con las tasas de mortalidad infantil más bajas son por lo general pequeños (con poblaciones de menos de 10 millones; en muchos casos menores de 5 millones) e incluyen a las sociedades más homogéneas del mundo (Japón y Corea del Sur en Asia; Islandia, Finlandia y Noruega en Europa) y, en su mayoría, tienen bajísimas tasas de natalidad. Evidentemente, es más difícil alcanzar y mantener tasas de mortalidad infantil muy reducidas en sociedades más grandes y heterogéneas, con altas tasas de

inmigración de países menos prósperos, y en países con tasas de natalidad más elevadas. En consecuencia, sería difícil replicar la tasa de Islandia (3) en Canadá (donde esta tiene un valor de 5), un país cuya población es más de 100 veces mayor y que cada año acoge a un número de recién llegados (procedentes de multitud de países, en particular de sociedades pobres en Asia) aproximadamente igual a la población total de Islandia. La misma realidad se vive en Estados Unidos, pero la tasa de mortalidad infantil relativamente elevada de este país (6) se ve sin duda influida (como ocurre, en menor medida, en Canadá) por una mayor desigualdad económica.

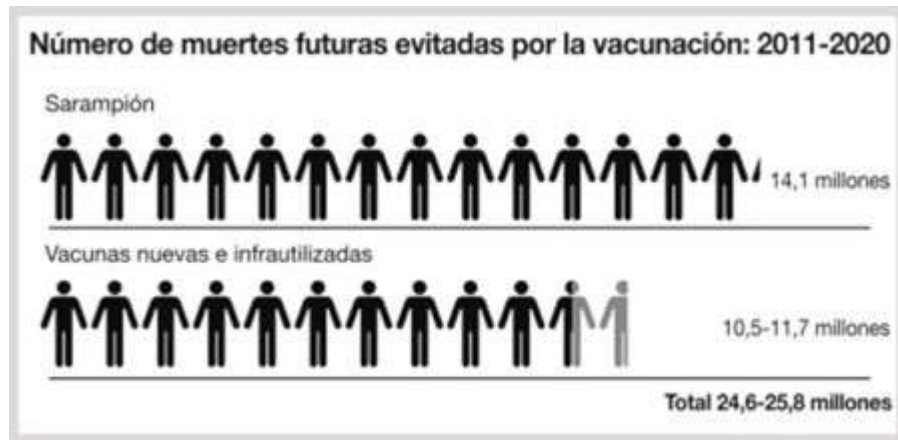
En este sentido, la mortalidad infantil es un indicador más preciso de la calidad de vida que la renta media o el índice de desarrollo humano, aunque es preciso matizar: ninguna magnitud por sí sola es un indicador plenamente satisfactorio para medir la calidad de vida de un país. De lo que no cabe duda es de que en una docena de países del África subsahariana la tasa de mortalidad infantil sigue siendo intolerablemente elevada (superiores a 60 por 1.000), similar a la de Europa occidental hace un siglo, tiempo que refleja la brecha de desarrollo que esos países deben cerrar para ponerse a la altura de las economías más prósperas.

### § 3. El mejor retorno de la inversión: la vacunación

La muerte debida a enfermedades infecciosas en la infancia y la niñez sigue siendo quizá el destino más cruel en el mundo moderno, y uno de los que más fácilmente se pueden evitar. Las medidas

necesarias para minimizar esta mortalidad prematura no pueden ordenarse según su importancia: el agua potable y una nutrición adecuada son tan esenciales como la prevención de enfermedades o unas correctas instalaciones sanitarias. Pero, si se juzgan por la relación entre sus costes y sus beneficios, la vacunación es la clara vencedora.

La vacunación moderna se remonta al siglo XVIII, cuando Edward Jenner la introdujo contra la viruela. Las vacunas contra el cólera y la peste se crearon antes de la Primera Guerra Mundial, y otras contra la tuberculosis, el tétanos y la difteria, antes de la Segunda Guerra Mundial. Entre los grandes avances de la posguerra estuvieron la vacunación rutinaria contra la tosferina (pertussis) y la polio. Hoy en día, la práctica habitual consiste en inocular a los niños con una vacuna pentavalente que evita la difteria, el tétanos, la tosferina y la polio, así como la meningitis, las otitis y las neumonías, tres infecciones causadas por la *Haemophilus influenza* de tipo B. La primera dosis se administra a las seis semanas del nacimiento; las otras dos se ponen a las diez y a las catorce semanas. Cada vacuna pentavalente cuesta menos de un dólar, y cada niño que la recibe reduce la probabilidad de infección entre quienes no están vacunados.



Habida cuenta de estas realidades, siempre ha sido evidente que la vacunación tiene una relación coste-beneficio extraordinariamente alta, aunque no resulta fácil cuantificarla. Pero, gracias a un estudio respaldado por la Fundación Bill & Melinda Gates y llevado a cabo por profesionales sanitarios estadounidenses en Baltimore, Boston y Seattle, por fin podemos cuantificar sus beneficios. El estudio se centró en el retorno de la inversión asociado a niveles de cobertura de vacunación estimados en casi cien países de ingresos bajos y medios durante la segunda década de este siglo, la década de las vacunas.

Los rangos de la ratio coste/beneficio se calcularon, por una parte, con base en los costes de las vacunas y de las cadenas de suministro y distribución; por otra, en estimaciones sobre los costes de morbilidad y mortalidad que se habían evitado. Por cada dólar invertido en vacunación, se espera ahorrar 16 en costes sanitarios, así como de pérdida de ingresos y de productividad causadas por las enfermedades y la muerte.

Cuando el análisis se llevó más allá del enfoque limitado al coste de enfermar y se fijó en los beneficios económicos en un sentido más

amplio, encontró que la ratio entre coste y beneficio era más de dos veces superior, alcanzando 44, con un rango de incertidumbre de 27 a 67. La mayor recompensa se obtenía al evitar el sarampión: el retorno multiplicaba por 58 la inversión.

La Fundación Bill & Melinda Gates hizo pública la cifra de un retorno de la inversión de 44 en una carta a Warren Buffett, el mayor donante de la fundación. ¡Hasta Buffett debió de quedar impresionado con tamaño retorno!

Aún queda mucho por hacer. Tras generaciones de avances, la cobertura de la vacunación básica en los países ricos es casi universal, en torno al 96 por ciento, y se han hecho grandes progresos en los países pobres, donde la cobertura ha aumentado de apenas el 50 por ciento en el año 2000 al 80 por ciento en 2016.

Lo más difícil quizá sea acabar con la amenaza de las enfermedades infecciosas. La polio puede que sea el mejor ejemplo de esta dificultad: la tasa de infección en todo el mundo cayó desde alrededor de 400.000 casos en 1985 a menos de 100 en el año 2000, pero en 2016 hubo 37 casos en regiones asoladas por la violencia del norte de Nigeria, Afganistán y Pakistán. Y como se ha visto recientemente con el virus del ébola, el zika y la COVID-19, surgirán nuevos riesgos de infección. Las vacunas siguen siendo la mejor manera de controlarlos.

§ 4. Por qué es difícil predecir la gravedad de una pandemia mientras está ocurriendo

Escribí este texto a finales de marzo de 2020, cuando la pandemia

de la COVID-19 estaba experimentando un crecimiento exponencial en Europa y Norteamérica. En lugar de limitarme a ofrecer una estimación o predicción más (y hacer así que el capítulo quedase de inmediato obsoleto), decidí que explicaría las incertidumbres que siempre complican nuestro juicio y nuestra interpretación de las estadísticas en situaciones estresantes como esta.

Los temores que genera una pandemia vírica se deben a una tasa de mortalidad relativamente elevada, pero es imposible determinarla mientras la infección se está propagando, y es difícil hacerlo incluso después de que la pandemia termine. El enfoque epidemiológico más habitual consiste en calcular la tasa de letalidad: las muertes confirmadas asociadas a un virus divididas entre el número total de casos. El numerador (los certificados de defunción que declaran la causa de muerte) es evidente, y en la mayoría de los países este conteo es muy fiable. Pero la elección del denominador introduce muchas incertidumbres. ¿Qué «casos»? ¿Solo las infecciones confirmadas en laboratorio, todos los casos sintomáticos (incluidas personas a las que no se les realizó ninguna prueba pero que mostraron los síntomas esperados) o el número total de infecciones incluidos los casos asintomáticos? Los casos confirmados se conocen con gran precisión, pero el número total de infecciones debe estimarse ya sea con base en estudios serológicos de la población que ya ha sufrido la enfermedad (encontrando los anticuerpos en la sangre), utilizando diversas ecuaciones de crecimiento para modelizar la propagación de la pandemia en el pasado, o bien suponiendo los multiplicadores más probables ( $x$



personas infectadas por cada y personas que murieron).



Un análisis detallado de la letalidad de la pandemia de la gripe de 2009 —que comenzó en Estados Unidos en enero de 2009, se prolongó en algunos lugares hasta agosto de 2010, y fue causada por un nuevo virus H1N1 con una particular combinación de genes de la gripe— pone de manifiesto la variedad de incertidumbres resultantes. Las muertes confirmadas siempre ocupaban el numerador, pero para el denominador había tres categorías distintas de la definición de los casos: casos confirmados en laboratorio, casos sintomáticos estimados y una estimación de las infecciones (basadas en serología o en hipótesis relativas a la proporción de infecciones asintomáticas). Las diferencias resultantes eran muy grandes: desde menos de 1 a más de 10.000 muertes por cada 100.000 personas.

Como cabría esperar, el enfoque basado en los casos confirmados en laboratorio da como resultado el riesgo más elevado (por lo general, entre 100 y 5.000 muertes), mientras que el que parte de

los casos sintomáticos ofrece un rango de entre 5 y 50 muertes, y colocar en el denominador la estimación de las infecciones da riesgos de apenas entre 1 y 10 muertes por cada 100.000 personas. ¡El primer enfoque da cifras de muertes hasta 500 veces superiores a las del último!

En 2020, con la propagación de la COVID-19 (provocada por un coronavirus, el SARS-CoV-2), nos enfrentamos a las mismas incertidumbres. Por ejemplo, el 30 de marzo de 2020, las estadísticas chinas oficiales reflejaban 50.006 casos y 2.547 muertes en Wuhan, el epicentro de la pandemia, donde lo peor parecía haber pasado. No había confirmación independiente de estas cifras sospechosas: el 17 de abril, los chinos aumentaron el número de víctimas en un 50 por ciento, hasta las 3.869, mientras que el número total de casos solo creció en 325. En el primer caso, la tasa de letalidad es del 5 por ciento; en el segundo, es del 7,7 por ciento; lo más probable es que nunca lleguemos a saber la cifra real. De cualquier forma, los denominadores solo incluyen los casos confirmados (o confirmados y sintomáticos): Wuhan es una ciudad de 11,1 millones de habitantes, y 50.000 casos supondrían que menos del 0,5 por ciento de ellos se habrían infectado, una proporción extraordinariamente baja en comparación con las cifras de personas afectadas cada año por la gripe.

Sin conocer el total de infecciones, podríamos tener una imagen más precisa si recurrimos al enfoque demográfico de la mortalidad, expresada como muertes debidas a causas específicas por cada 1.000 personas, y tomamos como referencia para nuestra

comparación el número anual de víctimas de la gripe estacional. Suponiendo que lo peor de la COVID-19 de 2020 en Wuhan ya ha pasado (y que las cifras totales oficiales reflejan la realidad), la muerte de alrededor de 3.900 personas supondría una mortalidad debida específicamente a la pandemia de 0,35/1.000. Los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades estadounidenses estiman que la gripe estacional de 2019-2020 infectará a entre 38 y 54 millones de personas en el país (de una población de unos 330 millones), y causará entre un mínimo de 23.000 y un máximo de 59.000 muertes. Tomar las medias de estos rangos —46 millones de personas infectadas y 41.000 muertes— implica que se infectaría en torno al 14 por ciento de los estadounidenses, y que morirían alrededor del 0,09 por ciento de todas las personas infectadas (tasa de mortalidad); la mortalidad total debida específicamente a la gripe estacional sería de 0,12/1.000, comparada con 0,35/1.000 para Wuhan a mediados de abril de 2020. La mortalidad de la COVID-19 en Wuhan sería por lo tanto unas tres veces mayor que la de la gripe estacional de 2019-2020 en Estados Unidos; lo cual debe ser motivo de preocupación, sin duda, pero no de pánico.

Como con cualquier otra pandemia, tendremos que esperar hasta que la COVID-19 llegue a su fin para tener una imagen más clara de cuán grave fue. Solo entonces seremos capaces de hacer las cuentas de verdad —o, puesto que quizá nunca lleguemos a conocer las cifras totales de infectados tanto a escala nacional como mundial, simplemente de ofrecer nuestras mejores estimaciones— y comparar los riesgos de mortalidad resultantes, que podrían diferir tanto como

las cifras para la pandemia de 2009.

Esta es una de las lecciones algebraicas más básicas: aunque conozcamos con precisión el numerador, a menos que sepamos el valor del denominador con una certeza comparable, no podemos calcular el cociente con precisión. Las incertidumbres nunca desaparecen por completo, pero, para cuando leas esto, tendremos una idea mucho mejor del alcance y la intensidad real de la última pandemia que cuando escribí estas líneas. Confío en que estés ahí para leerlas.

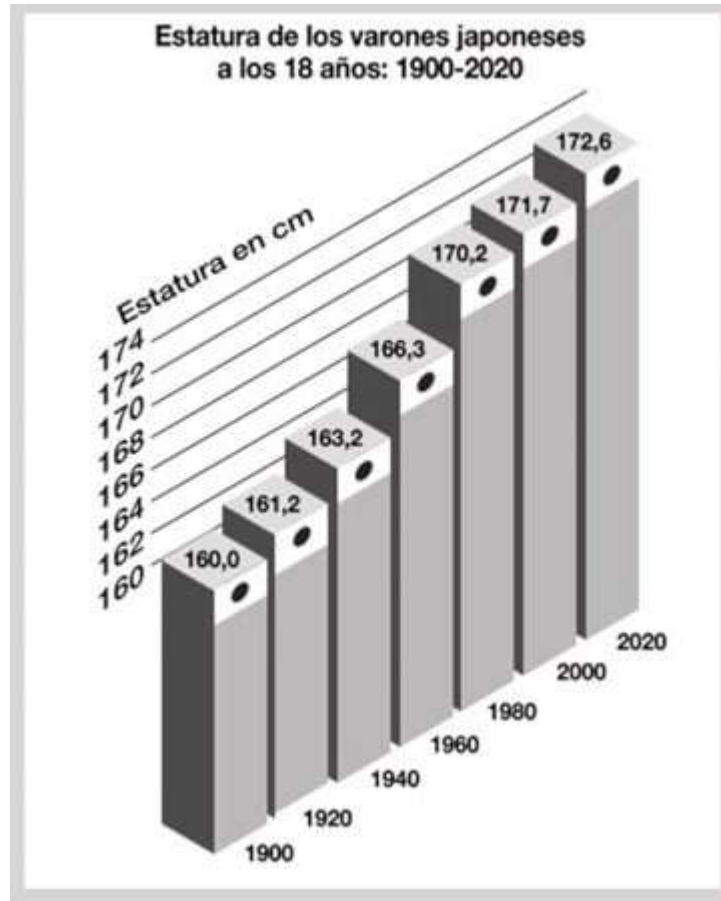
## § 5. Alcanzar mayor estatura

Como muchas otras investigaciones de la condición humana, los estudios sobre la estatura humana tienen sus orígenes tardíos en la Francia del siglo XVIII, donde, entre 1759 y 1777, Philibert Guéneau de Montbeillard midió a su hijo cada seis meses —desde su nacimiento hasta su decimoctavo cumpleaños— y el conde de Buffon publicó la tabla de las medidas del chico en el suplemento de 1777 a su famosa *Histoire Naturelle*. Pero el hijo de Montbeillard era alto para su época (al llegar a la edad adulta, alcanzó la estatura media de un holandés de hoy) y no tuvimos datos sistemáticos a gran escala de la estatura humana y el crecimiento de los niños y adolescentes hasta la década de 1830, cortesía de Édouard Mallet y Adolphe Quetelet.

Desde entonces hemos estudiado todos los aspectos de la estatura humana, desde su progresión esperada con la edad y su relación con el peso hasta sus determinantes nutricionales y genéticos,

pasando por las diferencias de género en los estirones de crecimiento. En consecuencia, conocemos —con gran precisión— la estatura esperada (y el peso) a distintas edades. Si una joven madre estadounidense acude al pediatra con un niño de dos años que mide 93 centímetros, le dirá que su hijo es más alto que el 90 por ciento de los niños de su edad.

Para quien tenga interés en la medición del progreso a largo plazo, así como en comparaciones internacionales reveladoras, una de las mejores consecuencias de los modernos estudios sistemáticos del crecimiento ha sido una bien documentada historia del aumento de la estatura media. Aunque el retraso en el crecimiento (un desarrollo deficiente que resulta en una baja estatura infantil para la edad del niño) sigue siendo habitual en muchos países pobres, su prevalencia global se ha reducido —principalmente gracias a la rápida mejora de la situación en China— de en torno al 40 por ciento en 1990 a alrededor del 22 por ciento en 2020. El aumento de la estatura fue una tendencia global del siglo XX.



Una mejor salud y una mejor nutrición —sobre todo un mayor consumo de proteína animal de alta calidad (leche y sus derivados, carne y huevos)— han impulsado el cambio, y una mayor estatura está relacionada con un número sorprendentemente grande de beneficios. Entre ellos por lo general no está una mayor esperanza de vida, pero sí un menor riesgo de enfermedades cardiovasculares, así como una mayor capacidad cognitiva, mayores ingresos totales a lo largo de la vida y un estatus social más elevado. La correlación entre la estatura y la renta se documentó por primera vez en 1915 y desde entonces se ha confirmado una y otra vez, para grupos que van desde los mineros indios del carbón a los consejeros delegados suecos. Aún más: ¡este último estudio demostró que esos consejeros

delegados eran más altos en las compañías con mayores activos!

Los resultados a largo plazo y a escala de toda la población mundial son igualmente fascinantes. La estatura media de los varones en la Europa preindustrial oscilaba entre 169 y 171 centímetros, mientras que la media global era de unos 167 centímetros. Abundantes datos antropométricos disponibles de doscientos países muestran un incremento medio a lo largo del siglo XX de 8,3 centímetros para las mujeres adultas y de 8,8 centímetros para los hombres. Aumentó la estatura de la población en todos los países de Europa y Norteamérica, mientras que las surcoreanas registraron el mayor incremento medio entre las mujeres (20,2 centímetros), y los iraníes el mayor entre los hombres, con 16,5 centímetros. Los datos detallados de Japón, registrados desde 1900 para ambos sexos a 12 edades diferentes entre los 5 y los 24 años, muestran que el crecimiento responde a las limitaciones y las mejoras alimentarias: entre 1900 y 1940, la estatura media de los chicos de 10 años aumentó en 0,15 centímetros al año, pero la escasez de alimentos en tiempo de guerra la redujo en 0,6 centímetros al año; el aumento anual solo prosiguió a partir de 1949, y durante la segunda mitad del siglo fue en promedio de 0,25 centímetros al año. De manera similar, el aumento de estatura en China se vio interrumpido por la mayor hambruna mundial (1959-1961), a pesar de lo cual los varones en las grandes ciudades promediaron un crecimiento de 1,3 centímetros al año durante la segunda mitad del siglo XX. Por el contrario, las mediciones durante ese periodo muestran que hubo aumentos mínimos en India y

Nigeria, nulos en Etiopía, y una ligera disminución en Bangladés.

¿Qué país tiene los ciudadanos más altos? Para los varones, el récord lo tienen los Países Bajos, Bélgica, Estonia, Letonia y Dinamarca; para las mujeres, Letonia, Países Bajos, Estonia, República Checa y Serbia. El grupo de edad de mayor estatura (cuya media supera los 182,5 centímetros) es el de los hombres neerlandeses nacidos durante el último cuarto del siglo XX. La leche ha sido un factor de crecimiento clave, tanto en Japón como en los Países Bajos. Antes de la Segunda Guerra Mundial, los varones neerlandeses eran más bajos que los estadounidenses, pero después de 1950 el consumo de leche en Estados Unidos se redujo, mientras que en los Países Bajos aumentó hasta los años sesenta (y sigue siendo más alto que en Estados Unidos). La lección es obvia: la manera más fácil de incrementar la probabilidad de que un niño llegue a ser más alto es que beba más leche.

§ 6. ¿Está la esperanza de vida por fin alcanzando un tope?

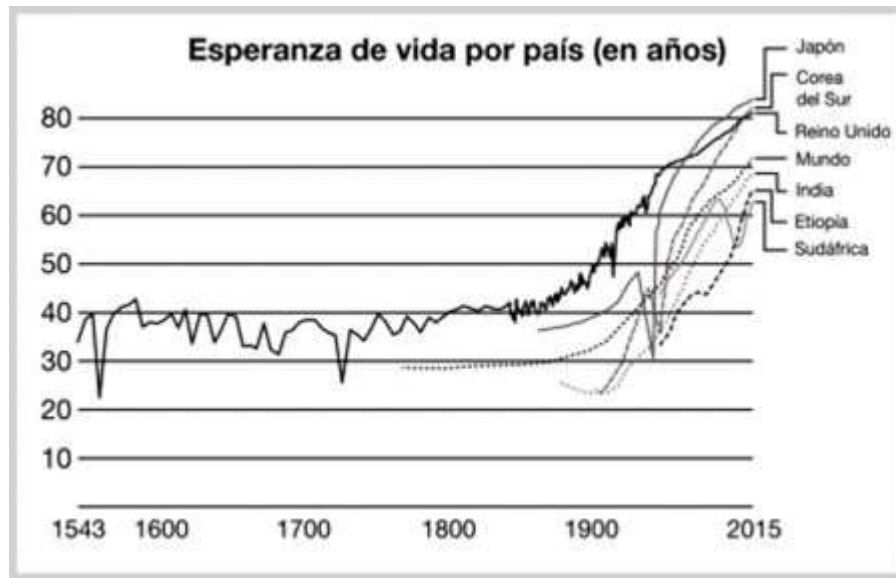
Ray Kurzweil, el futurista jefe de Google, dice que, si aguantas hasta 2029, los avances médicos empezarán a «añadir, cada año, un año adicional a tu esperanza de vida. No me refiero a la esperanza de vida basada en la fecha de nacimiento, sino a la esperanza de vida restante». Los lectores curiosos pueden calcular lo que esta tendencia implicaría para el crecimiento de la población mundial, pero aquí me limitaré a hacer un breve repaso de los datos reales de supervivencia.

En 1850, la esperanza de vida conjunta de hombres y mujeres



estaba en torno a los 40 años en Estados Unidos, Canadá, Japón y gran parte de Europa. Desde entonces, los valores han seguido un crecimiento impresionante y prácticamente lineal hasta casi duplicarse. Las mujeres viven más tiempo en todas las sociedades; hoy en día, la máxima longevidad se da entre las japonesas, con una media ligeramente superior a los 87 años.

Es probable que la tendencia continúe durante unas cuantas décadas, habida cuenta de que entre 1950 y 2000 la esperanza de vida de las personas mayores en los países ricos aumentó en unos 34 días cada año. Pero sin descubrimientos fundamentales que cambien la manera en que envejecemos, esta tendencia hacia una vida más longeva debería ir debilitándose hasta acabar interrumpiéndose. La trayectoria a largo plazo de la esperanza de vida de las mujeres japonesas —que aumentó desde 81,91 años en 1990 hasta 87,26 en 2017— encaja con una curva logística simétrica que ya está próxima a su asíntota en torno a los 90 años. La trayectoria en otros países ricos también refleja que se están acercando a un tope. Los registros de que disponemos para el siglo XX muestran dos periodos bien distintos de aumento de la longevidad: hasta 1950 predominó un aumento lineal y más rápido (de unos 20 años en medio siglo), seguido de un incremento más lento.



Si aún estamos lejos del límite de la duración de una vida humana, los mayores incrementos en supervivencia deberían registrarse entre las personas de mayor edad; esto es, quienes tienen entre 80 y 85 años deberían ver un mayor aumento que los de edades comprendidas entre 70 y 75 años. Eso fue en efecto lo que se constató en estudios realizados en Francia, Japón, Estados Unidos y Reino Unido entre la década de 1970 y principios de la de 1990. Desde entonces, sin embargo, los incrementos se han estabilizado. Puede que no exista una duración de vida programada en los genes, como tampoco hay un programa genético que nos limite a una determinada velocidad al correr (véase «Cómo sudar mejoró nuestra capacidad de cazar»). Pero la duración de la vida es una característica corporal que surge de la interacción de los genes con el entorno. Los genes pueden por su parte introducir límites biofísicos, como también pueden hacerlo efectos ambientales como fumar.

El récord mundial de duración de una vida humana fueron los 122

años que se supone que alcanzó Jeanne Calment, una mujer francesa que murió en 1997. Resulta extraño que, transcurridas más de dos décadas, siga ostentando el récord como la persona más longeva de la historia, y por un margen sustancial. (De hecho, el margen es tan grande que resulta sospechoso; su edad y su identidad están en tela de juicio.) El segundo supercentenario murió a los 119 años, en 1999, y desde entonces ninguna otra persona ha superado los 117 años.

Si crees que tienes muchas probabilidades de alcanzar los 100 años porque algunos de tus antepasados vivieron hasta esa edad, debes saber que se calcula que la heredabilidad de la duración de la vida es modesta, de entre el 15 y el 30 por ciento. Puesto que las personas tienden a casarse con otras similares a ellas —un fenómeno conocido como emparejamiento selectivo—, es probable que la heredabilidad real sea incluso inferior.

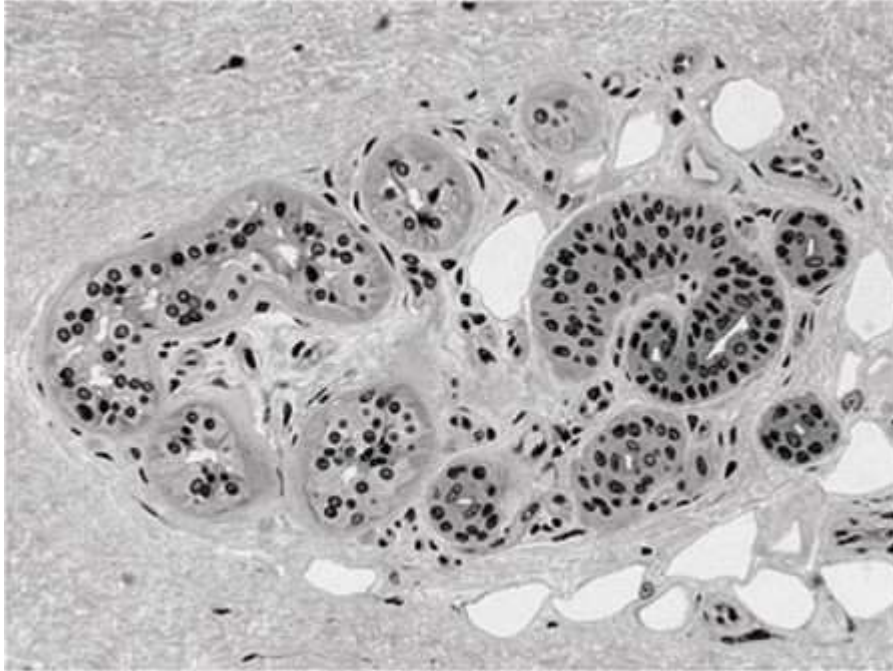
Por supuesto, como ocurre con cualquier cuestión compleja, siempre hay margen para distintas interpretaciones de los análisis estadísticos publicados. Kurzweil confía en que las intervenciones en la dieta y otros trucos le permitan prolongar su vida hasta que grandes avances científicos puedan preservarlo para siempre. Seguro que hay ideas sobre cómo podría lograrse esa preservación, entre ellas el rejuvenecimiento de las células humanas mediante la extensión de sus telómeros (las secuencias de nucleótidos en los extremos de un cromosoma que se deshilachan con la edad). Si funciona, quizá pueda elevar la edad máxima realista muy por encima de los 125 años.

Pero, de momento, el mejor consejo que puedo dar a todos, salvo a un reducido número de lectores extraordinariamente precoces, es que hagan planes a largo plazo, aunque quizá no tan largo como hasta el siglo XXII.

### § 7. Cómo sudar mejoró nuestra capacidad de cazar

Antes del desarrollo de los proyectiles de largo alcance, hace varias decenas de miles de años en África nuestros antepasados solo tenían dos maneras de conseguir carne: hurgando en los restos que dejaban tras de sí bestias más poderosas o persiguiendo a sus propias presas. Los humanos fuimos capaces de ocupar el segundo de estos nichos ecológicos gracias, en parte, a dos grandes ventajas del bipedismo.

La primera de ellas es nuestra forma de respirar. Un cuadrúpedo solo puede inhalar una sola vez por cada ciclo locomotor, porque su pecho debe absorber el impacto de las extremidades delanteras. Nosotros, sin embargo, podemos elegir otros ritmos, lo cual nos permite un uso más eficiente de la energía. La segunda (y más importante) ventaja es nuestra extraordinaria capacidad para regular nuestra temperatura corporal, que nos permite hacer algo que los leones no pueden hacer: correr durante mucho tiempo y a pleno esfuerzo bajo el sol de mediodía.



*Sección microscópica de glándulas sudoríparas humanas.*

La clave está en el sudor. Los dos animales de gran tamaño que hemos utilizado sobre todo para el transporte sudan con profusión en comparación con otros cuadrúpedos: en una hora, un caballo puede perder unos 100 gramos de agua por metro cuadrado de su piel, mientras que un camello llega a perder hasta 250 gramos de agua por metro cuadrado. Sin embargo, un humano puede fácilmente exudar 500 gramos de agua por metro cuadrado de piel, suficiente para eliminar calor a un ritmo de entre 550-600 vatios. Las tasas máximas de sudor por hora pueden superar los 2 kilogramos por metro cuadrado, y la máxima cantidad de sudor registrada es el doble en periodos breves.

Somos las superestrellas del sudor, y necesitamos serlo. Un aficionado que corra un maratón a un ritmo lento consumirá energía a un ritmo de 700-800 vatios, mientras que un

experimentado maratoniano que recorra los 42,2 kilómetros en 2,5 horas metabolizará a un ritmo de 1.300 vatios.

Y tenemos otra ventaja cuando perdemos agua: no tenemos que recuperar el déficit de inmediato. Los humanos podemos tolerar un grado considerable de deshidratación temporal siempre que nos rehidratemos al cabo de alrededor de un día. De hecho, los mejores maratonianos solo beben unos 200 mililitros por hora durante una carrera.

Juntas, estas ventajas hicieron posible que nuestros antepasados no tuviesen rival como predadores diurnos y con alta temperatura. No podían correr más rápido que un antílope, por supuesto, pero en un día caluroso sí podían pisarle los talones hasta que este acabase desplomándose exhausto.

Hay casos documentados de estas persecuciones de larga distancia en tres continentes, en los que intervienen algunos de los cuadrúpedos más veloces. En Norteamérica, los tarahumaras del noroeste de México podían dar alcance a ciervos. Más al norte, los payutes y los navajos podían agotar a berrendos. En Sudáfrica, durante la estación seca, los bosquimanos del Kalahari perseguían hasta agotarlos a diversos antílopes e incluso ñúes y cebras. En Australia, algunos aborígenes daban alcance a canguros.

Estos corredores habrían tenido una ventaja sobre los corredores modernos que utilizan costosas zapatillas deportivas: el hecho de que corriesen descalzos no solo reducía su gasto energético alrededor de un 4 por ciento (una ventaja no trivial en carreras largas), también reducía el riesgo de sufrir lesiones graves en los

tobillos o las piernas.

En la carrera de la vida, los humanos no somos ni los más rápidos ni los más eficientes. Pero gracias a nuestra capacidad de sudar somos, sin duda, los más persistentes.

## § 8. ¿Cuántas personas se necesitaron para construir la Gran Pirámide?

Teniendo en cuenta el tiempo transcurrido desde la construcción de la Gran Pirámide de Keops (hace casi 4.600 años), la estructura — aunque desprovista del pulido revestimiento de piedra caliza que la hacía brillar en la distancia— permanece extraordinariamente bien conservada, por lo que no cabe discusión sobre su forma exacta (un poliedro con una base poligonal regular), su altura original (146,6 metros, incluido el desaparecido piramidión o piedra angular) y su volumen (unos 2,6 millones de metros cúbicos).



*Las grandes pirámides de Guiza.*

Sin embargo, puede que nunca sepamos cómo se construyó, porque todas las explicaciones habituales tienen sus problemas. Para construir una rampa única y larga se habría necesitado una enorme cantidad de material, mientras que subir piedras mediante rampas más cortas que rodeasen la pirámide habría sido complicado (como también lo habría sido levantar y subir más de dos millones de piedras hasta ponerlas en su sitio). Pero que no sepamos cómo se erigió no significa que no podamos decir con un cierto grado de confianza cuántas personas se necesitaron para construirla.

Debemos partir del límite temporal de dos décadas, la duración del reinado de Keops (que murió en torno al año 2530 a. C.). A Heródoto, que escribía más de veintiún siglos después de que la pirámide se completara, le contaron durante su visita a Egipto que allí habían trabajado cuadrillas de cien mil obreros en periodos de tres meses para finalizar la estructura. En 1974, Kurt Mendelssohn, un físico británico de origen alemán, estimó la mano de obra en 70.000 trabajadores temporales y hasta 10.000 albañiles permanentes. Pero estas son grandes sobrestimaciones, y podemos aproximarnos a la cifra real recurriendo a la insoslayable física.

La energía potencial de la Gran Pirámide (la que se necesita para elevar la masa por encima del nivel del suelo) es de unos 2,4 billones de julios. Este cálculo es bastante sencillo: es simplemente el producto de multiplicar la aceleración debida a la gravedad por la masa de la pirámide y por su centro de masa (una cuarta parte de su altura). Aunque la masa no se puede determinar, porque depende de la densidad de la piedra caliza de Tura y del mortero



empleado para construir la estructura, estoy suponiendo un valor medio de 2,6 toneladas por metro cúbico, y por lo tanto una masa total de en torno a 6,75 millones de toneladas.

Los humanos podemos transformar en trabajo útil alrededor del 20 por ciento de la energía de los alimentos, lo cual para hombres laboriosos asciende a 440 kilojulios por día. Así pues, levantar las piedras requeriría unos 5,5 millones de jornadas laborables (2,4 billones divididos entre 440.000), o el equivalente a 275.000 días durante el periodo de dos décadas, algo que podrían conseguir unas 900 personas que trabajasen 10 horas al día durante 300 días al año. Podría necesitarse un número similar de trabajadores para colocar las piedras en la estructura a medida que se elevaba y pulir los sillares de revestimiento (a diferencia de muchos bloques interiores, que estaban sin desbastar). Para cortar 2,6 millones de metros cúbicos de piedra en 20 años, el proyecto habría necesitado unos 1.500 canteros que trabajasen 300 días al año y produjesen 0,25 metros cúbicos de piedra per cápita utilizando cinceles de cobre y mazos de diabasa. De manera que, en total, la fuerza laboral para la construcción habría estado compuesta por unos 3.300 trabajadores. Aunque hubiese que multiplicar por dos esta cifra para tener en cuenta a los diseñadores, organizadores y supervisores, así como la mano de obra necesaria para el transporte, la reparación de herramientas, la construcción y mantenimiento de los alojamientos *in situ*, la preparación de comidas y el lavado de la ropa, el número total no llegaría a los 7.000 trabajadores.

Durante la época de la construcción de la pirámide, la población total de Egipto era de entre 1,5 y 1,6 millones de personas, y por lo tanto el contingente desplegado, de menos de 10.000, no habría supuesto ninguna imposición extraordinaria sobre la economía del país. Lo difícil habría sido organizar a los trabajadores; planificar el suministro ininterrumpido de sillares, incluido el granito para las estructuras internas (en particular, la cámara central y la inmensa Gran Galería con su falsa bóveda), que tenía que llegar por barco desde el sur de Egipto, a unos 800 kilómetros de Guiza; y ofrecer alojamiento, ropa y comida a las cuadrillas de trabajadores en el lugar.

En los años noventa, los arqueólogos descubrieron un cementerio para los trabajadores, así como los cimientos de un asentamiento utilizado para albergar a los constructores de las dos pirámides posteriores de Guiza, que indicaban que en el emplazamiento no vivían más de 20.000 personas. La rápida secuencia de construcción de dos pirámides adicionales (para Kefrén, el hijo de Keops, a partir del 2520 a. C.; y para Micerino, desde el 2490 a. C.) es el mejor testimonio del hecho de que habían llegado a dominar la construcción de pirámides hasta tal punto que el levantamiento de esas enormes estructuras pasó a ser un proyecto de construcción más para los diseñadores, gestores y trabajadores del Antiguo Reino.

§ 9. ¿Por qué las cifras de desempleo no cuentan toda la historia?

Es bien sabido que muchas estadísticas económicas no son muy de fiar, y el motivo para ello a menudo tiene que ver con lo que se incluye en la medida y lo que se deja fuera. El producto interior bruto constituye un buen ejemplo de una magnitud que no considera las externalidades medioambientales, como la contaminación atmosférica e hídrica, la erosión del suelo, la pérdida de biodiversidad y los efectos del cambio climático.



*Hombres desempleados hacen cola para conseguir alimentos durante la Gran Depresión.*

Medir el desempleo es también un ejercicio de exclusión. La mejor manera de ver las posibilidades quizá sea fijándose en los datos detallados de Estados Unidos. Los consumidores ocasionales de noticias económicas estadounidenses solo estarán al tanto de la cifra oficial, que situaba el desempleo total en el país en el 3,5 por ciento en diciembre de 2019. Pero este es solo uno de los seis

métodos distintos que la Oficina de Estadísticas Laborales usa para cuantificar «la infrautilización de la mano de obra».

Aquí están, en orden ascendente (con cifras, repito, de diciembre de 2019). Personas desempleadas durante 15 semanas o más como porcentaje de la población activa civil: 1,2 por ciento. Personas que han perdido su empleo y han realizado trabajos temporales: 1,6 por ciento. Desempleo total como porcentaje de la población activa civil (cifra oficial): 3,5 por ciento. Total de desempleados más trabajadores inactivos (aquellos que han dejado de buscar empleo), como porcentaje de la población activa civil y de los trabajadores inactivos: 3,7 por ciento. La categoría anterior, ampliada con todas las personas solo «vinculadas marginalmente» a la población activa (que realizan trabajos temporales u ocasionales): 4,2 por ciento. Y, por último, la categoría anterior más aquellos que trabajan solo a tiempo parcial por motivos económicos (esto es, que preferirían trabajar a tiempo completo): 6,7 por ciento. Estas seis magnitudes presentan una importante disparidad de valores: la tasa oficial de desempleo (U-3) era únicamente la mitad de la cifra integral (U-6), cuyo valor era más de cinco veces mayor que el de la magnitud más restrictiva (U-1).

Si una persona pierde su empleo, solo cuenta como desempleada si persiste en buscar una nueva ocupación; de lo contrario, nunca vuelve a formar parte de las estadísticas. Esta es la razón por la que, cuando intentamos aproximarnos a la tasa de desempleo «real», debemos fijarnos en la tasa de población activa (el número de personas dispuestas a trabajar como porcentaje del total de la

población), que ha disminuido en fechas recientes. En 1950, en Estados Unidos dicha tasa era de solo el 59 por ciento y, tras una subida casi continuada durante medio siglo, alcanzó un valor máximo de 67,3 por ciento durante la primavera de 2000; el posterior descenso la llevó hasta un 62,5 por ciento en otoño de 2005; a partir de entonces, un lento aumento hizo que llegase hasta 63,2 a finales de 2019. Por descontado, hay diferencias sustanciales entre los grupos: la tasa más elevada, para hombres entre 35 y 44 años de edad, ronda el 90 por ciento.

Las cifras de desempleo en Europa ponen de relieve lo difícil que es relacionarlas con el tejido social de un país o con la satisfacción personal de sus habitantes. La tasa más baja, apenas superior al 2 por ciento, se da en República Checa; por su parte, España ha soportado años de elevado desempleo —más del 26 por ciento en 2013 y más del 14 por ciento en 2019 para el conjunto de la población, e incluso después de haber descendido ligeramente, todavía afecta a un 33 por ciento para los jóvenes en 2019 (esta cifra refleja, como es evidente, una realidad deprimente para cualquiera que se incorpore a la población activa)—. Y sin embargo, la puntuación de felicidad de los checos (véase el capítulo siguiente) es solo un 8 por ciento superior a la de los españoles, y su tasa de suicidios, ligeramente superior a los 8 por 100.000 habitantes, es tres veces más elevada que en España. Es cierto que los hurtos son más habituales en Barcelona que en Praga, pero la media española es apenas superior a la británica, a pesar de que la tasa de desempleo en Reino Unido es una cuarta parte de la española.

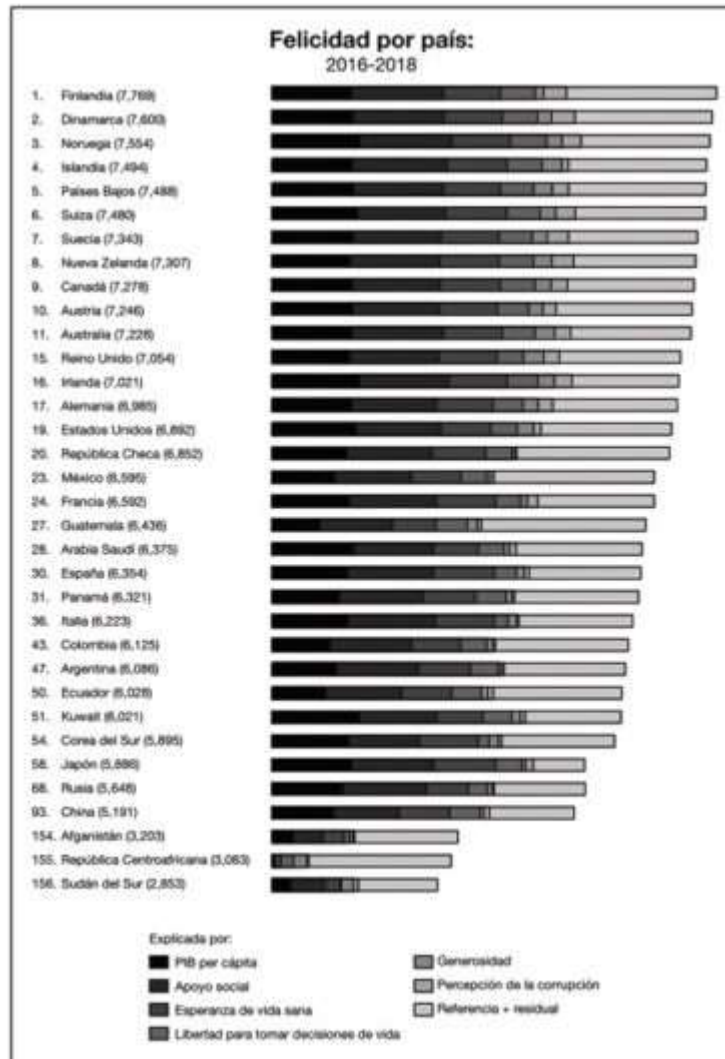
Como es obvio, las complejas realidades del (des)empleo nunca se pueden reflejar en una cifra total. Muchas personas que han estado formalmente desempleadas lo han sobrellevado gracias al apoyo de sus familias y a arreglos de trabajo informal. Muchos de quienes están empleados a tiempo completo se sienten insatisfechos con su suerte, pero no pueden cambiar de trabajo con facilidad o en absoluto, debido a sus capacidades o a sus circunstancias familiares. Puede que los números no mientan, pero la percepción que de ellos tenga cada persona sí puede variar.

#### § 10. ¿Qué hace feliz a la gente?

Para responder a esta pregunta, sería muy útil saber qué sociedades se consideran a sí mismas sustancialmente más felices que otras; desde 2012, esto es tan fácil como consultar la última edición del *World Happiness Report*, publicado anualmente en Nueva York por la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas. En 2019 (resumiendo datos y encuestas del periodo 2016-2018), Finlandia fue el país más feliz del mundo por segunda vez consecutiva, seguido de Dinamarca, Noruega e Islandia; los Países Bajos y Suiza figuraban justo por encima de Suecia, lo que significa que los países nórdicos ocuparon cinco de los primeros siete puestos. Completaban los diez primeros Nueva Zelanda, Canadá y Austria. El segundo grupo de diez empezaba con Australia y terminaba en República Checa: Reino Unido estaba en el número 15, Alemania en el 17 y Estados Unidos en el 19.

Esto es lo que aparece en los medios, que admiran a los tan felices

nórdicos y señalan cómo las (mal distribuidas) riquezas estadounidenses no pueden comprar la felicidad.



De lo que rara vez se informa es de los entresijos del cálculo de estas puntuaciones nacionales: el PIB per cápita, el apoyo social (que se determina preguntando si, cuando tienen problemas, las personas cuentan con familiares o amigos a los que recurrir), la expectativa de vida sana (extraída de la evaluación por parte de la Organización Mundial de la Salud de cien factores distintos relacionados con la salud), la libertad para tomar decisiones vitales

(que se puntúa en función de la respuesta a la pregunta: «¿Está usted satisfecho o insatisfecho con la libertad para elegir lo que quiere hacer con su vida?»), generosidad («¿Ha donado dinero a la beneficencia en el último mes?») y percepción de la corrupción (en el sector público y en el privado).

Como ocurre con todos los índices, este contiene una mezcla de componentes, entre los que están un indicador ampliamente cuestionado (el PIB nacional expresado en dólares estadounidenses), respuestas que no pueden compararse fácilmente entre culturas (percepción de la libertad para elegir) y puntuaciones basadas en variables objetivas y esclarecedoras (esperanza de vida sana). Esta mezcolanza por sí sola indica que cualquier clasificación precisa debería interpretarse con escepticismo, una sensación que no hace sino reforzarse mucho más si nos fijamos detenidamente en aquello de lo que nunca se informa en los medios: los valores concretos por país (¡precisos hasta la tercera cifra decimal!). Por coincidencia, en 2019 di charlas en los tres países más felices del mundo, pero, como es evidente, fui incapaz de percibir que los finlandeses (7,769) son un 2,2 por ciento más felices que los daneses (7,600), quienes a su vez son un 0,6 más felices que los noruegos. Lo absurdo de todo esto salta a la vista. Incluso Canadá, que ocupa el noveno lugar, tiene una puntuación total que es tan solo un 6,3 por ciento inferior a la de Finlandia. Habida cuenta de todas las incertidumbres intrínsecas en torno a las variables que componen el indicador y su suma simplista y sin calibrar sus pesos relativos, ¿no sería más preciso y más honesto (y, por supuesto, menos merecedor de



atención por parte de los medios) al menos redondear las puntuaciones hasta el número entero más cercano? O, mejor aún, ¿no hacer una clasificación individual y limitarse a decir qué diez o veinte países forman el grupo de cabeza?

Además, está la notable ausencia de correlación entre la felicidad y los suicidios: si se traza una gráfica con ambas variables para todos los países europeos se observa una completa falta de relación. De hecho, algunos de los países más felices tienen tasas de suicidio relativamente elevadas, mientras que en algunos lugares bastante infelices la frecuencia de suicidios es muy baja.

Pero, aparte de ser nórdicas y ricas, ¿qué hace felices a las personas? Los países cuyo puesto parece mal situado ofrecen algunos indicios fascinantes. Que Afganistán, la República Centroafricana y Sudán del Sur sean los tres países menos felices de los 156 que componen la clasificación es, por desgracia, de esperar (las guerras civiles llevan demasiado desgarrándolos). Pero ¿que México (un narcoestado con tasas de violencia y asesinatos extraordinariamente altas) ocupe el puesto vigésimo tercero por delante de Francia? ¿Guatemala por delante de Arabia Saudí? ¿Panamá por delante de Italia? ¿Colombia por delante de Kuwait? ¿Argentina por delante de Japón? ¿Y Ecuador por delante de Corea del Sur? Parece claro que estas parejas componen un patrón sorprendente: el segundo país de cada pareja es más rico (a menudo, muchísimo más), más estable, menos violento y ofrece una vida considerablemente más fácil que el primer país, cuyos rasgos comunes son obvios: puede que todos ellos sean relativamente

pobres, convulsos e incluso violentos, pero son antiguas colonias españolas, y por lo tanto mayoritariamente católicos. Y todos ellos están entre los cincuenta países más felices (Ecuador ocupa el puesto 50), bastante por delante de Japón (58) y a gran distancia de China (93), el país que los ingenuos occidentales ven como un verdadero paraíso económico repleto de compradores felices. Pero aunque Louis Vuitton se esté haciendo de oro en China, ni los descomunales centros comerciales ni el liderazgo de un partido omnisciente hacen felices a los chinos; hasta los ciudadanos de Nigeria (85), un país disfuncional y mucho más pobre, se sienten más felices.

Las lecciones son claras: si no puedes encajar entre los diez primeros países (no eres nórdico, holandés, suizo, neozelandés o canadiense), conviértete al catolicismo y empieza a aprender *castellano*. ¡Buena suerte con eso!<sup>6</sup>

## § 11. El surgimiento de las megaciudades

La modernidad implica muchas cosas —crecimiento de la riqueza y de la movilidad; comunicaciones baratas e instantáneas; abundancia de alimentos asequibles; mayor esperanza de vida—, pero un observador extraterrestre que con regularidad enviase sondas de reconocimiento a la Tierra quedaría impresionado con un cambio fácilmente observable desde el espacio: el acelerado ritmo de la urbanización a medida que las ciudades se iban extendiendo, como amebas, hacia las zonas rurales que las rodeaban, creando

---

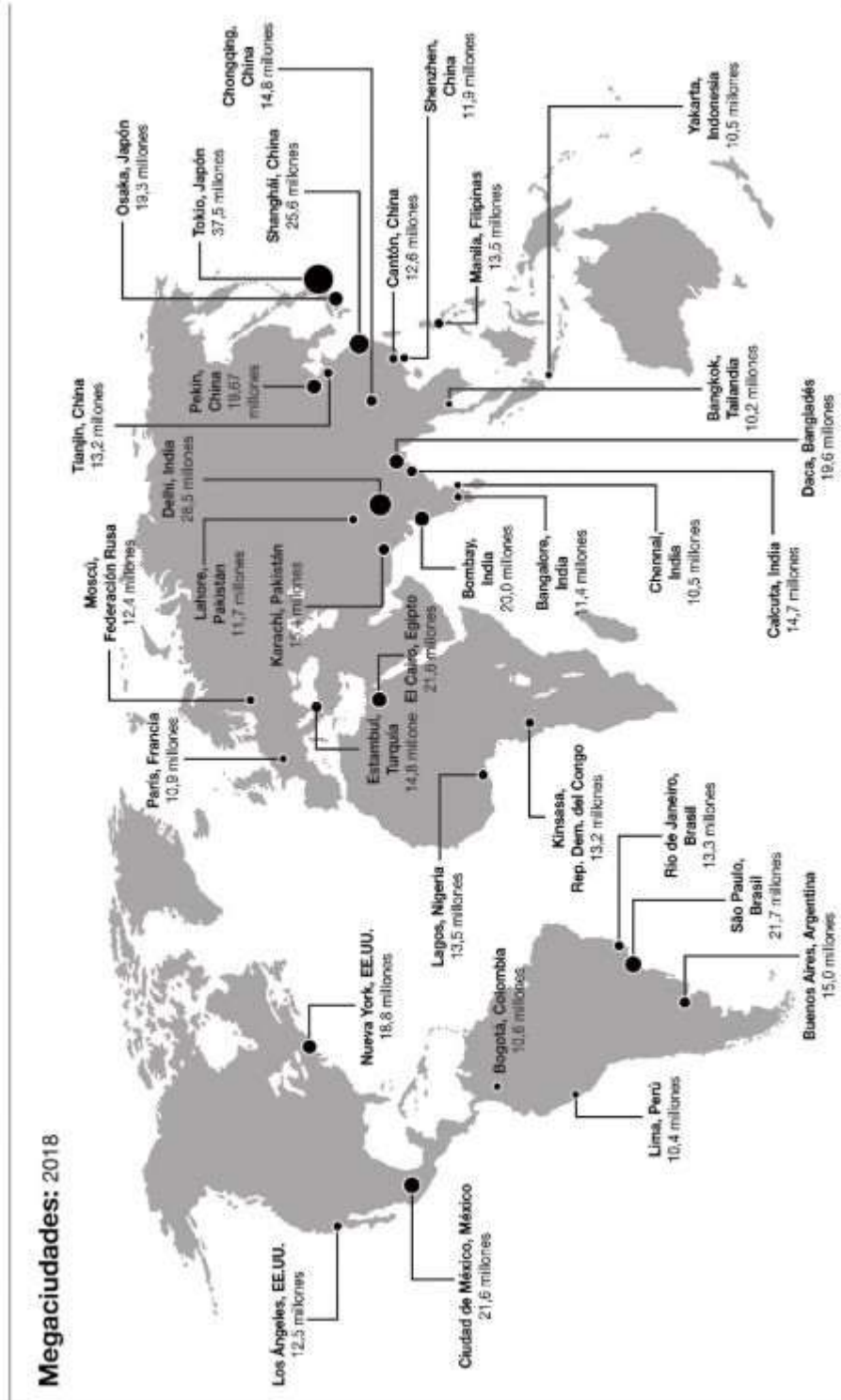
<sup>6</sup> En castellano en el original. (*N. del T.*)

inmensas manchas de luz nocturna.

En 1800, menos del 2 por ciento de la población mundial vivía en ciudades; en 1900, ese porcentaje aún era de tan solo del 5 por ciento. Para 1950 había alcanzado el 30 por ciento, y 2007 fue el primer año en que más de la mitad de la humanidad vivía en ciudades. En 2016, un amplio estudio llevado a cabo por Naciones Unidas encontró 512 ciudades con una población superior al millón de habitantes, de las cuales 45 superaban los 5 millones y 31 rebasaban los 10 millones. Este último grupo recibe un nombre especial: «megaciudades».

Esta incesante concentración de la humanidad en ciudades cada vez más grandes ha estado impulsada por las ventajas que se derivan de la aglomeración de personas, conocimiento y actividades, a menudo debidas a la coubicación de empresas afines: a escala global, pensemos en Londres y Nueva York, las capitales financieras, y Shenzhen, en la provincia china de Cantón, la capital de la electrónica de consumo. Las economías de escala conllevan muchos ahorros; las interacciones entre productores, proveedores y consumidores son más fáciles de gestionar; las empresas tienen acceso a conjuntos de mano de obra numerosos y con experiencias diversas; y a pesar de las aglomeraciones y los problemas medioambientales, la calidad de vida en las grandes ciudades atrae talento, hoy en día a menudo procedente del mundo entero. Las ciudades son lugares de innumerables sinergias y oportunidades de inversión, y ofrecen posibilidades superiores de educación y carreras enriquecedoras. Este es el motivo por el que muchas

ciudades más pequeñas —como ocurre también con las zonas rurales circundantes— están perdiendo población mientras las megaciudades no dejan de crecer.



No es sencillo clasificarlas en función de su tamaño, porque una variedad de límites administrativos arroja cifras distintas de cuándo las megaciudades se consideran como unidades funcionales. Tokio, la mayor megaciudad del planeta, tiene ocho definiciones jurisdiccionales o estadísticas distintas, desde los 23 distritos de la ciudad antigua, con menos de 10 millones de habitantes, hasta la Región de la Capital Nacional, con casi 45 millones. La que usa el ayuntamiento de la ciudad es la de la Región Metropolitana del Gran Tokio (Tokyo daitoshiken), que se define por un radio de hasta 70 kilómetros desde el enorme Edificio del Gobierno Metropolitano (Tokyo tocho) en Shinkuju; dicha región alberga actualmente a 39 millones de personas.

El crecimiento de las megaciudades ofrece un ejemplo perfecto de la menguante influencia de Occidente y el ascenso de Asia. En 1900, 9 de las 10 ciudades más grandes del mundo estaban en Europa y Estados Unidos. En 1950, Nueva York y Tokio eran las únicas megaciudades; la tercera, Ciudad de México, se sumó en 1975. A finales del siglo pasado, la lista había crecido hasta 18 megaciudades, y en 2020 alcanzó las 35, con un total de más de quinientos millones de habitantes. Tokio (que tiene más habitantes que Canadá y genera una producción económica igual a la mitad de la de toda Alemania) sigue ocupando el primer puesto, y 20 de las 35 megaciudades (casi el 60 por ciento) están en Asia. Hay cinco en Latinoamérica, dos en Europa (Moscú y París), tres en África (El Cairo, Lagos y Kinsasa) y tres en Norteamérica (México, Nueva York y Los Ángeles).

Ninguna de ellas obtiene una puntuación alta en todos los principales criterios de calidad de vida: Tokio es limpia, sus áreas residenciales no muy alejadas del centro urbano son notablemente tranquilas, el transporte público es ejemplar y la tasa de delincuencia es muy baja; pero las viviendas son muy pequeñas y los desplazamientos diarios son largos y agotadores. Las megaciudades chinas —todas construidas por migrantes de las zonas rurales a quienes (hasta fecha reciente) se les negaba el derecho a vivir en ellas— se han convertido en escaparates de arquitectura novedosa y refulgentes proyectos públicos, pero la calidad del aire y del agua es baja, y sus habitantes están sometidos a vigilancia continua ante la mínima infracción social. Por su parte, las megaciudades africanas son lugares donde las normas escasean: Lagos y Kinsasa son la perfecta encarnación de la desorganización, la miseria y la degradación medioambiental. Pero todo esto tiene poca importancia; cada megaciudad, ya sea Tokio (con el mayor número de restaurantes con estrella Michelin), Nueva York (con la proporción más elevada de población nacida en el extranjero) o Río de Janeiro (con una tasa de homicidios que se aproxima a los 40 por 100.000 habitantes), no deja de atraer gente. Naciones Unidas prevé la aparición de diez nuevas megaciudades antes de 2030: seis en Asia (entre ellas, Ahmedabad e Hyderabad en India), tres en África (Johannesburgo, Dar es-Salam y Luanda) y Bogotá en Colombia.

## Capítulo 2

### Países

#### Las naciones en la era de la globalización

##### *Contenido:*

*§ 12. Las prolongadas tragedias de la Primera Guerra Mundial*

*§ 13. ¿Es Estados Unidos realmente excepcional?*

*§ 14. Por qué Europa debería estar más satisfecha consigo misma*

*§ 15. Brexit: las realidades que más importan no cambiarán*

*§ 16. Inquietud sobre el futuro de Japón*

*§ 17. ¿Hasta dónde puede llegar China?*

*§ 18. India frente a China*

*§ 19. Por qué la producción industrial sigue siendo importante*

*§ 20. Rusia y Estados Unidos: las cosas nunca cambian*

*§ 21. Imperios en declive: nada nuevo bajo el sol*

#### § 12. Las prolongadas tragedias de la Primera Guerra Mundial

Pocos centésimos aniversarios resonaron con tanta fuerza como el que, en noviembre de 2018, señaló el final del primer conflicto armado verdaderamente global. La enorme carnicería de la guerra marcó la memoria de una generación, pero su herencia más trágica fue el dominio comunista en Rusia (1917), fascista en Italia (1922) y nazi en Alemania (1933) que resultaron de ella. Estos acontecimientos condujeron a la Segunda Guerra Mundial, que causó aún más muertes y dejó legados directos e indirectos —como la rivalidad entre la OTAN y Rusia o la división de Corea— que aún

perturban nuestra vida.



*Batalla del Somme, 1916: soldados británicos y un tanque Mark 1.*

Aunque la Segunda Guerra Mundial fue más mortífera, se puede argumentar que la primera guerra constituyó el desastre crucial, pues dio lugar a gran parte de lo que vino después. Es cierto que en la segunda guerra se desplegaron avances mucho mayores en la capacidad destructiva, como los cazas más rápidos impulsados por motores de explosión; gigantescos bombarderos cuatrimotores (los B-17); misiles (los alemanes V-1 y V-2); y, al final de la guerra, las bombas nucleares que destruyeron Hiroshima y Nagasaki.

En comparación, la Primera Guerra Mundial, con sus frentes de trincheras y prácticamente inmóviles, fue un conflicto sin duda menos dinámico. Pero una mirada más atenta muestra que los avances puramente técnicos fueron de hecho cruciales para que su duración se prolongase y aumentase el número de víctimas.

Dejando a un lado el uso de gases venenosos en combate (que



nunca se ha repetido a tal escala), varios modos clave de combate moderno se desarrollaron, e incluso perfeccionaron, durante el primero de los dos conflictos. Los primeros submarinos con motor diesel se utilizaron en largas incursiones para atacar convoyes de barcos mercantes. Los primeros tanques se desplegaron en combate. Se efectuaron los primeros bombardeos, usando tanto dirigibles como aeroplanos. En 1914, se botó el primer portaaviones de combate. En 1916, los franceses probaron con éxito transmisores portátiles que permitían la comunicación por voz desde el aire hasta la superficie, y aire a aire en 1917, dando comienzo al largo camino hacia componentes electrónicos cada vez más pequeños y prácticos. Pero entre todos estos desarrollos debemos señalar la trascendental innovación que permitió a una Alemania sometida a bloqueo soportar la guerra en sus dos frentes durante cuatro años: la síntesis del amoníaco. Cuando comenzó la guerra, la Armada británica interrumpió las importaciones alemanas de nitratos chilenos necesarios para fabricar explosivos. Sin embargo, gracias a una extraordinaria coincidencia, los alemanes pudieron abastecerse de nitratos de producción doméstica. En 1909, Fritz Haber, profesor de la Universidad de Karlsruhe, había completado la larga investigación para sintetizar amoníaco a partir de sus componentes. Nitrógeno e hidrógeno se combinaban a alta presión y en presencia de un catalizador para producir amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). En octubre de 1913, BASF —entonces el mayor conglomerado químico mundial, liderado por Carl Bosch— había aplicado comercialmente el proceso en la primera fábrica de amoníaco del mundo, situada en la

localidad alemana de Oppau. Este amoniaco sintético iba a utilizarse en la producción de fertilizantes sólidos como el nitrato de sodio o el nitrato de amonio (véase «El mundo sin amoniaco sintético»).

Pero la guerra comenzó menos de un año más tarde y en lugar de convertir el amoniaco en fertilizante, BASF empezó a producirlo en masa para transformarlo en ácido nítrico, que se destinaría a la síntesis de explosivos para la guerra. En abril de 1917 se inauguró una fábrica de amoniaco más grande en Leuna, al oeste de Leipzig, y la producción conjunta de ambas plantas bastó para sostener la producción alemana de explosivos hasta el final de la contienda.

La nueva capacidad de la industria para encontrar maneras de sortear cualquier penuria contribuyó a dilatar la Primera Guerra Mundial, y añadió millones de víctimas más. Este episodio atterradoramente moderno desmiente la imagen primitiva que se tiene de la guerra, tan a menudo caracterizada por sus prolongados compases de espera en trincheras embarradas, y despejó el camino hacia una carnicería aún mayor al cabo de una generación.

### § 13. ¿Es Estados Unidos realmente excepcional?

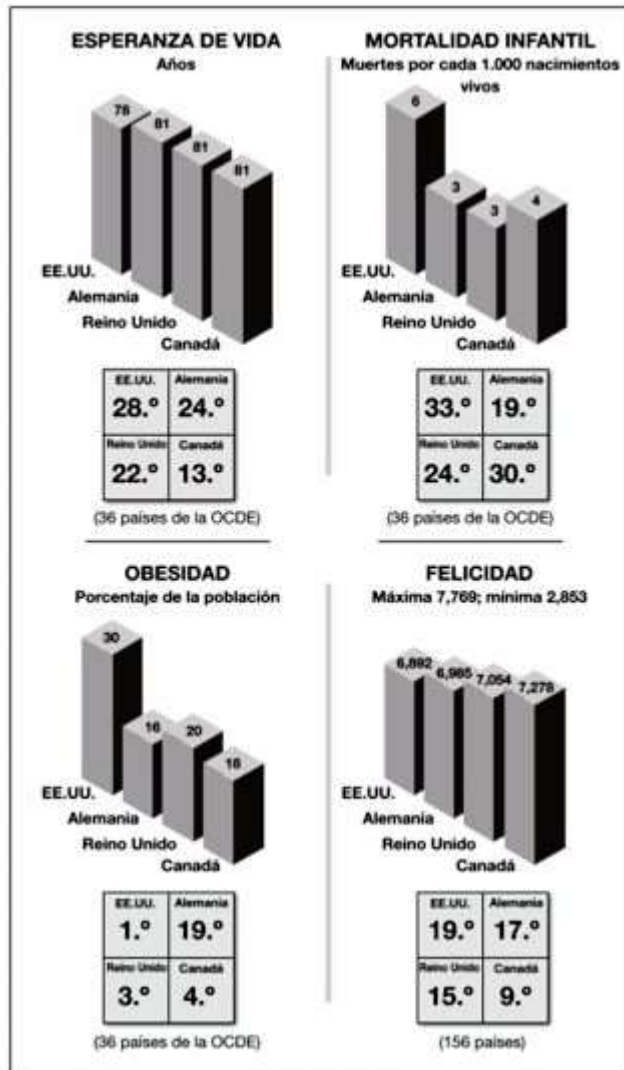
La creencia en el «excepcionalismo estadounidense» —esa particular combinación de ideales, ideas y amor por la libertad convertida en algo muy potente gracias a los grandes logros técnicos y económicos— goza de buena salud. Hasta el expresidente Obama, conocido por su manera de gobernar alejada de las emociones, y por lo tanto reticente en un principio a respaldar el excepcionalismo, ha

cambiado de opinión. En los comienzos de su presidencia (en abril de 2009), expresó su creencia básicamente negándola: «Creo en el excepcionalismo estadounidense de la misma manera en que imagino que los británicos creen en el excepcionalismo británico y los griegos en el excepcionalismo griego». En mayo de 2014, ya había dado su brazo a torcer: «Creo de todo corazón en el excepcionalismo estadounidense».

Pero tales proclamas no significan nada si no están respaldadas por los datos. Y aquí lo que importa de verdad no es tanto el volumen del producto interior bruto de un país o el número de ojivas nucleares o patentes que posee, sino las variables que reflejan realmente el bienestar físico e intelectual de sus ciudadanos. Estas variables no son más que la vida, la muerte y el conocimiento.

La mortalidad infantil es un excelente indicador de una amplia variedad de circunstancias, entre las que están la renta, la calidad de la vivienda, la nutrición, la educación y la inversión en atención sanitaria. Muy pocos bebés mueren en los países ricos en los que la gente vive en buenas viviendas y donde padres bien formados (y bien nutridos) alimentan adecuadamente a sus hijos y tienen acceso a atención médica (véase «¿El mejor indicador de la calidad de vida? ¿Qué tal la mortalidad infantil?»). ¿Qué puesto ocupa Estados Unidos entre los cerca de doscientos países que hay en el mundo? La última comparación disponible muestra que, con 6 muertes a lo largo del primer año por cada mil nacimientos vivos, Estados Unidos no figura entre los primeros 25 países. Su mortalidad infantil es mucho más alta que la de Francia (4), Alemania (3) y

Japón (2). La tasa estadounidense es un 50 por ciento superior a la de Grecia (4), un país que los medios de comunicación presentan como un caso perdido desde la crisis financiera.



No sirve como excusa decir que los países europeos tienen poblaciones homogéneas: en Francia y Alemania abundan los inmigrantes recientes (basta con visitar Marsella o Düsseldorf). Lo que más importa es el conocimiento de los padres, la buena nutrición, el grado de desigualdad económica y el acceso universal a la sanidad. (Estados Unidos es, de manera notoria, el único país

rico moderno sin sanidad universal.)

Si nos fijamos en el final del viaje, el resultado es casi idénticamente pobre: Estados Unidos, cuya esperanza de vida es de casi 79 años para ambos sexos, ni siquiera figura entre los veinticuatro primeros países del mundo, y se sitúa —de nuevo— por detrás de Grecia (en torno a 81 años), así como de Corea (casi 83). Los canadienses viven en promedio tres años más y los japoneses (alrededor de 84) casi seis años más que sus homólogos estadounidenses.

Los logros educativos de los alumnos estadounidenses (o la ausencia de ellos) se analizan en detalle en cada nueva edición del informe del Programa Internacional para la Evaluación de Estudiantes de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (informe PISA). Los resultados más recientes (2018) para estudiantes de quince años muestran que, en matemáticas, Estados Unidos queda justo por debajo de Rusia, Eslovaquia y España, pero muy lejos de Canadá, Alemania y Japón. Los escolares estadounidenses se sitúan justo por debajo de la puntuación media del informe PISA (497 frente a 501); en lectura, quedan apenas por encima (498 frente a 496), a gran distancia de todos los países occidentales ricos y populosos. El informe PISA, como cualquier estudio de este tipo, tiene sus debilidades, pero las grandes diferencias en clasificaciones relativas dejan algo claro: no hay ni el menor atisbo de ningún logro educativo estadounidense que sea excepcional.

Puede que a los lectores estadounidenses estos datos les resulten desazonadores, pero no tienen nada de discutibles. En Estados

Unidos es más probable que los bebés mueran y es menos probable que los alumnos de educación secundaria aprendan más que sus iguales en otros países ricos. Los políticos pueden buscar por todas partes las evidencias del excepcionalismo estadounidense, pero no las encontrarán en los números, que es donde importa.

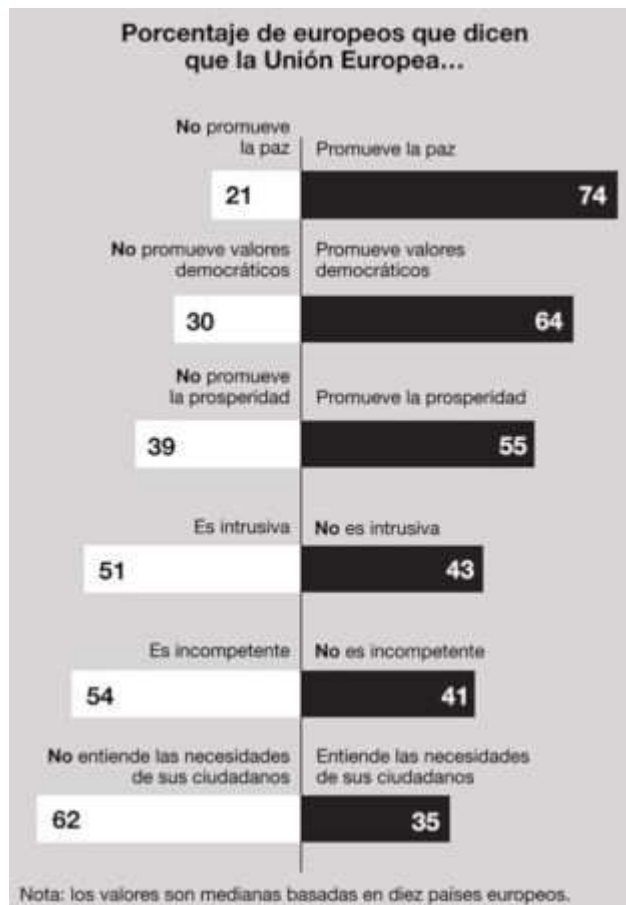
§ 14. Por qué Europa debería estar más satisfecha consigo misma

El 1 de enero de 1958, Bélgica, Francia, Italia, Luxemburgo, los Países Bajos y la República Federal de Alemania formaron la Comunidad Económica Europea (CEE) con el propósito de consolidar la integración económica y el libre comercio en el seno de una unión aduanera.

Aunque los objetivos inmediatos eran explícitamente económicos, las aspiraciones de la CEE siempre fueron mucho más elevadas. En el documento de fundación, el Tratado de Roma, los estados miembros se declararon resueltos «a sentar las bases de una unión cada vez más estrecha entre los pueblos europeos» y a «asegurar, mediante una acción común, el progreso económico y social de sus respectivos países, eliminando las barreras que dividen Europa». En aquel entonces, estos objetivos parecían muy poco realistas: Europa estaba dividida no solo por prejuicios entre países y desigualdades económicas, sino también, de manera fundamental, por el Telón de Acero, que se extendía desde el Báltico hasta el mar Negro; Moscú controlaba los países situados al este del Telón.

El control soviético se reafirmó tras el fracaso de la Primavera de

Praga en 1968 (el intento de llevar a cabo reformas en Checoslovaquia acabó con la invasión soviética del país), mientras que la CEE siguió aceptando nuevos miembros: Reino Unido, Irlanda y Dinamarca en 1973; Grecia en 1981; España y Portugal en 1986. Más tarde, tras el colapso de la URSS en 1991, se abrió el camino hacia la integración paneuropea. En 1993, el Tratado de Maastricht estableció la Unión Europea; en 1999, se creó una moneda común, el euro; actualmente, 27 países forman la Unión.



La Unión Europea tiene casi 450 millones de habitantes, menos del 6 por ciento de la población total del planeta, pero genera casi el 20 por ciento de la producción económica mundial, frente al 25 por ciento de Estados Unidos. Representa el 15 por ciento de las

exportaciones globales de bienes —una tercera parte más que Estados Unidos—, que incluyen automóviles, aviones de pasajeros, fármacos y productos de lujo. Además, la mitad de sus 27 miembros figuran entre los primeros 30 países en calidad de vida, medida según el índice de desarrollo de las Naciones Unidas.

Y a pesar de todo ello, la Unión Europea asiste a crecientes problemas y desafección. Los vínculos de unión se están debilitando, y Reino Unido finalmente la ha abandonado.

Dentro de Europa, los líderes de opinión ofrecen incontables explicaciones para este nuevo humor centrífugo: el excesivo control burocrático que ejerce Bruselas, la reafirmación de la soberanía nacional y las malas decisiones económicas y políticas (en particular, la adopción de una moneda común sin responsabilidad fiscal común).

Debo confesar que estoy perplejo. Yo, que nací durante la ocupación nazi, que crecí del lado equivocado del Telón de Acero y mi historia familiar es típica de los orígenes nacionales y lingüísticos de Europa, a menudo complicados, veo la Europa actual —con todos sus defectos— como un resultado asombroso, demasiado bueno para creérselo. Sin duda, todos estos logros merecen redoblar los esfuerzos y los acuerdos para volver a unificarla.

Sin embargo, se han dado por descontadas décadas de paz y prosperidad, y los fallos y dificultades (algunos inevitables, otros imperdonables) han servido para reavivar antiguos prejuicios y animosidades. Mi deseo para Europa: hagan que funcione. El fracaso a la hora de conseguirlo es algo que no se puede tomar a la



ligera.

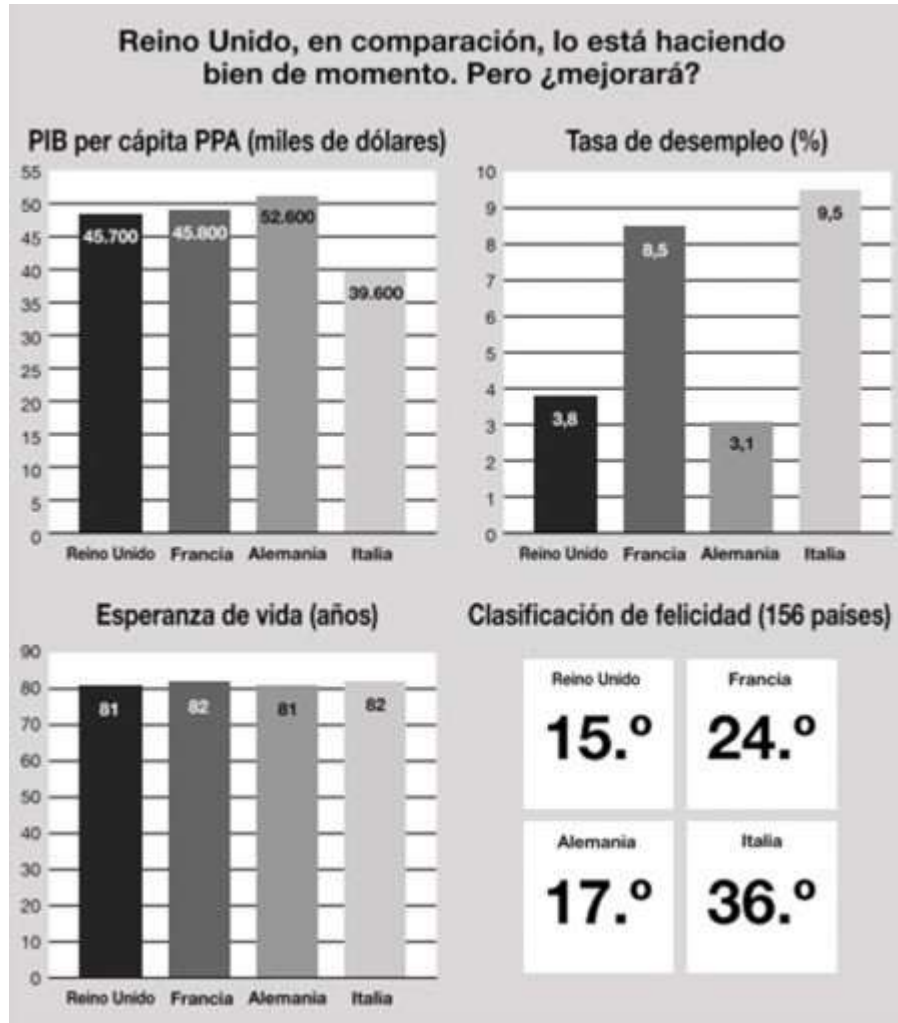
§ 15. Brexit: las realidades que más importan no cambiarán

¿Qué será realmente diferente en el Reino Unido pos Brexit? Por descontado, muchas cuestiones han cambiado ya durante el inesperadamente prolongado periodo previo al acontecimiento, y la mejor manera de describir lo que ha ocurrido es usando palabras que la lengua inglesa adquirió gracias a la última invasión exitosa de las islas: el país ha atravesado un desconcertante periodo de acusaciones, acritud, repudios, falsas ilusiones, falseamientos, quimeras, recriminaciones y una civilidad puesta a prueba.

Pero ¿qué cambiará de verdad dentro de cinco o diez años en lo que se refiere a los elementos determinantes de la vida del país? Vayamos a lo esencial. Todos tenemos que comer, y las sociedades modernas han alcanzado una increíble capacidad de producir una gran diversidad de alimentos a un coste por lo general asequible. Tenemos que suministrar energía a nuestros edificios, nuestras industrias y nuestro transporte mediante flujos constantes de combustible y electricidad. Debemos producir —y renovar— los cimientos materiales de nuestras sociedades a base de fabricación, construcción y mantenimiento. Y necesitamos unas infraestructuras adecuadas (escuelas, sanidad, cuidado de ancianos) para educar a las personas y cuidar de ellas cuando enferman o se hacen mayores. Todo lo demás es secundario.

En todos estos frentes, la valoración está clara. Reino Unido no ha sido autosuficiente en cuanto a la producción de alimentos desde

hace varios siglos. Su dependencia de las importaciones se ha duplicado desde un 20 por ciento a principios de los años ochenta a un 40 por ciento en años recientes, y a corto plazo nada que no sea un severo racionamiento de alimentos (y la ausencia de productos frescos en invierno) podría reducir de manera sustancial esta dependencia de las importaciones. Tres cuartas partes de ellas proceden de la Unión Europea, pero los agricultores españoles y los productores de beicon daneses seguirán tan dispuestos a exportar sus productos siempre que los consumidores británicos los compren, por lo que no habrá aranceles o precios que acaben con la demanda.



La última vez que Reino Unido fue exportador neto de energía (petróleo y gas del mar del Norte) fue en 2003, y en años recientes el país ha importado entre el 30 y el 40 por ciento de su energía primaria, principalmente gas. De nuevo, no habrá grandes variaciones en el futuro próximo, y el bien abastecido mercado global de la energía garantizará que los precios de importación sigan siendo asequibles.

Reino Unido, que en otros tiempos fue inventor y pionero sin rival de la producción industrial basada en la ciencia (a fin de cuentas, es el país de Michael Faraday, Isambard Kingdom Brunel, James

Clerk Maxwell y Charles Algernon Parsons), ya está más desindustrializado que Canadá, históricamente el país occidental más desprovisto de industrias. En 2018, la producción industrial supuso el 9 por ciento del PIB británico, en comparación con el 10 por ciento en Canadá; el 11 por ciento en Estados Unidos; el 19, 21 y 27 por ciento, y, respectivamente, en otras superpotencias industriales como Japón, Alemania y Corea del Sur... y el 32 por ciento en Irlanda, cuyo porcentaje ahora supera incluso el 29 por ciento de China. Aun así, una vez más, ningún cambio repentino en los acuerdos políticos podrá revertir esta tendencia histórica.

Como en el resto de Europa, el moderno sistema educativo británico ha hecho demasiado hincapié en la cantidad por encima de la calidad, su sistema sanitario opera con muchas —y muy analizadas— limitaciones (como ilustran claramente la sucesión de informes sobre trabajadores del Sistema Nacional de Salud desbordados y hospitales sobrecargados), y su población envejecida requerirá más recursos. La tasa de dependencia de las personas mayores en el país (el número de personas de más de 65 años como porcentaje de todas las personas económicamente activas con edades comprendidas entre 20 y 64 años), que en 2020 es del 32 por ciento —aún ligeramente inferior a la de Francia y Alemania— aumentará hasta alcanzar el 47 por ciento en 2050. Ninguna intervención gubernamental, ninguna declaración de soberanía recobrada y de ruptura con los burócratas de Bruselas tendrá efecto alguno sobre este proceso inexorable.

Habida cuenta de estas realidades fundamentales, un observador

racional debe preguntarse qué diferencias tangibles, qué beneficios evidentes podría traer consigo la reafirmación de la insularidad británica. Los autobuses se pueden cubrir con falsas proclamas, es fácil hacer promesas extravagantes, los sentimientos de orgullo o satisfacción pueden resultar convincentes durante un instante, pero ninguno de estos intangibles cambiarán aquello en lo que Reino Unido se ha convertido: una nación envejecida; un país desindustrializado y agotado, cuyo PIB per cápita a día de hoy es apenas ligeramente superior a la mitad del de Irlanda (algo que a Swift, Gladstone o Churchill les resultaría absolutamente inconcebible); otra potencia venida a menos cuya reivindicación de excepcionalidad se asienta en que tiene demasiados príncipes atribulados y que exporta series televisivas de época ambientadas en mansiones rurales con demasiados sirvientes.

## § 16. Inquietud sobre el futuro de Japón

El 2 de septiembre de 1945, representantes del Gobierno japonés firmaron la declaración de rendición en la cubierta del USS Missouri, anclado en la bahía de Tokio. Así concluyó la que fue quizá la más temeraria de todas las guerras modernas, cuyo desenlace había decidido la superioridad técnica estadounidense incluso antes de que comenzase. Japón ya había perdido en términos materiales cuando atacó Pearl Harbor: en 1940, Estados Unidos producía en torno a diez veces más acero que Japón, una diferencia que no hizo más que aumentar durante la guerra.



La devastada economía japonesa no superó su pico previo a la guerra hasta 1953. Pero, para entonces, se habían plantado los cimientos del espectacular ascenso del país. Pronto sus populares exportaciones iban desde los primeros transistores de radio (Sony) a los primeros gigantescos buques petroleros (Sumitomo). El primer Honda Civic llegó a Estados Unidos en 1973; en 1980 los automóviles japoneses ya suponían el 30 por ciento del mercado estadounidense. En 1973-1974, Japón, dependiente por completo de las importaciones de crudo, sufrió un fuerte golpe cuando la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) decidió quintuplicar el precio de sus exportaciones de petróleo, pero el país se adaptó rápidamente al orientarse hacia la eficiencia energética, y en 1978 se convirtió en la segunda mayor economía del mundo por detrás de Estados Unidos. En 1985, el yen era tan potente que

Estados Unidos, sintiéndose amenazado por las importaciones japonesas, forzó la devaluación de la moneda. Pero incluso después de este giro la economía siguió creciendo: en los cinco años que siguieron al 1 de enero de 1985, el valor del índice Nikkei se triplicó con creces.

Era demasiado bueno para ser verdad; de hecho, el éxito reflejaba el desarrollo de una enorme burbuja económica impulsada por los desorbitados precios de las acciones bursátiles y de las propiedades inmobiliarias. En enero de 2000, diez años después de su pico, el valor del índice Nikkei era la mitad que en 1990, y solo en fechas recientes ha superado siquiera esa cota tan baja.

Fabricantes de referencia de dispositivos electrónicos de consumo, como Sony, Toshiba e Hitachi, ahora tienen dificultades para presentar beneficios. Toyota y Honda, marcas conocidas en épocas pasadas por su fiabilidad sin rival, ahora llaman a revisión a millones de sus vehículos. Desde 2014, los airbags defectuosos de Takata han supuesto la mayor retirada histórica del mercado de un componente industrial. En 2013, las inestables baterías GS de ion de litio de Yuasa provocaron problemas en el nuevo Boeing 787. Si a esto se suman los frecuentes cambios de gobierno, el tsunami de marzo de 2011 seguido del desastre de Fukushima, la constante inquietud que provoca la impredecible Corea del Norte y el deterioro de las relaciones con China y Corea del Sur, la situación parece ciertamente preocupante.

Y hay un problema aún más profundo y fundamental. A largo plazo, el destino de los países está marcado por las tendencias

demográficas. Japón no solo es, de entre las grandes economías mundiales, la que está envejeciendo más rápido (hoy en día una de cada cuatro personas es mayor de 65 años; en 2050, ese porcentaje rondará el 40 por ciento), sino que su población también está decreciendo. Los 127 millones actuales menguarán hasta 97 millones en 2050, y se prevé que haya escasez de mano de obra joven tanto en la construcción como en sanidad. ¿Quién mantendrá las considerables y admirablemente eficientes infraestructuras de transporte del país? ¿Quién cuidará de los millones de ancianos? En 2050, habrá más personas mayores de 80 años que niños.

El destino de los principales países del mundo ha seguido trayectorias particulares de crecimientos y retrocesos, pero quizá la mayor diferencia en sus recorridos ha sido cuánto tiempo permanecieron en su apogeo: algunos tuvieron un estancamiento relativamente prolongado, seguido de un declive progresivo (tanto el imperio británico como los Estados Unidos del siglo XX encajan en este patrón); otros vivieron un rápido ascenso hasta un breve pico, seguido de una caída más o menos rápida. Está claro que Japón pertenece a esta última categoría. Su rápida irrupción tras la Segunda Guerra Mundial terminó a finales de los años ochenta, y ha ido cuesta abajo desde entonces: en el periodo de una sola generación, pasó de la pobreza a ser una admirada —y temida— superpotencia económica, y a continuación al estancamiento y el retroceso de una sociedad envejecida. El Gobierno japonés ha intentado encontrar alguna salida, pero no es fácil aplicar reformas radicales en un país políticamente dividido que es incapaz de



considerar siquiera un volumen moderado de inmigración y que tampoco ha alcanzado una verdadera paz con sus vecinos.

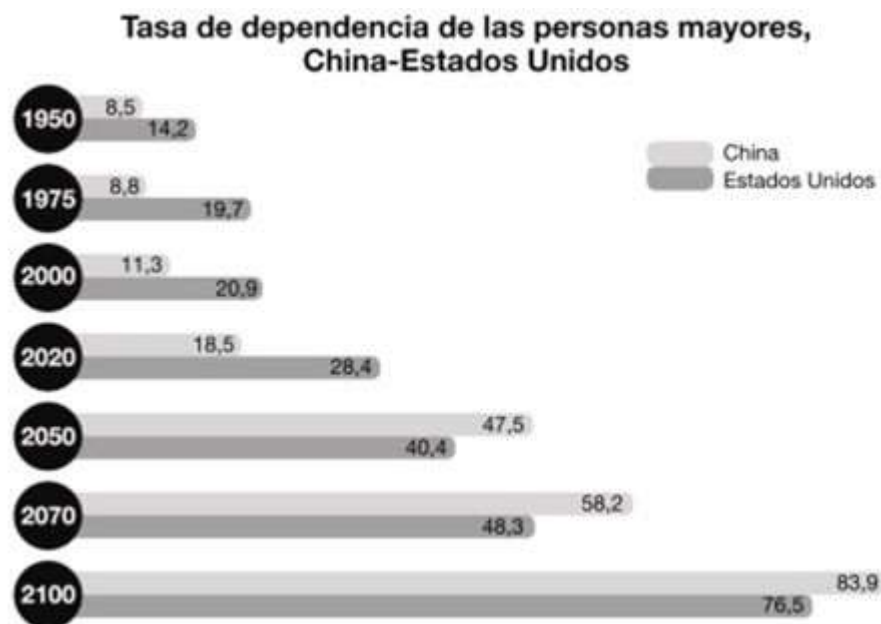
### § 17. ¿Hasta dónde puede llegar China?

Algunos hitos se ven venir con años de antelación. ¿Cuántos artículos se han escrito sobre cómo China superará a Estados Unidos para convertirse en la mayor economía del mundo en —elige una fecha— 2015, 2020 o 2025? El año depende de la variable que usemos. Ya ha ocurrido en términos de paridad de poder adquisitivo (PPA), que compara la producción económica de distintos países eliminando las distorsiones que provocan las fluctuaciones en las tasas de cambio de sus monedas nacionales. Según el Fondo Monetario Internacional (FMI), en 2019 el PIB de China ajustado por PPA era un 32 por ciento superior al de Estados Unidos.

Por otra parte, si nos basamos en la tasa de cambio yuan-dólar, Estados Unidos tiene una amplia ventaja: en torno al 50 por ciento en 2019 (21,4 billones de dólares frente a 14,1 billones). Pero incluso con la reciente ralentización en el crecimiento del PIB chino —de valores de dos cifras a una tasa oficial de entre el 6 y el 7 por ciento anual, y en realidad aún menor—, sigue siendo considerablemente más alto que el crecimiento estadounidense. Así pues, es solo cuestión de tiempo que China pase a ocupar el primer puesto, incluso en términos nominales.

El camino hasta ser el número uno comenzó en 1978, cuando el país adoptó la modernización económica, dejando atrás tres décadas de una pésima gestión. Durante décadas, China ha sido el mayor

productor mundial de cereal, carbón y cemento, y durante años el principal exportador de productos manufacturados en general y de electrónica de consumo en particular. Esto no tiene nada de sorprendente: China es el país más poblado del mundo (1.400 millones de habitantes en 2016), y su economía nueva y modernizada requiere una producción económica proporcional a su tamaño.



Pero, en términos relativos, China dista de ser un país rico: el generoso cálculo del PPA que hizo el Banco Mundial situó el PIB per cápita chino en 19.504 dólares en 2019, en el puesto 73 en la clasificación mundial, por detrás de Montenegro y Argentina, y apenas por delante de República Dominicana, Gabón y Barbados; una posición nada impresionante. Todo el mundo ha oído hablar de esos chinos ricos que compran propiedades inmobiliarias en Vancouver y Londres, y relojes con diamantes engastados en las Galeries Lafayette de París, pero son una minúscula minoría.

El PIB y el número de *nouveaux riches* son medidas engañosas de la calidad de vida real en China. El medioambiente no ha dejado de deteriorarse. La contaminación atmosférica en las ciudades del país es extraordinariamente alta: según la Organización Mundial de la Salud, el nivel máximo aceptable de partículas con diámetros inferiores a los 2,5 nanómetros es de 25 microgramos por metro cúbico de aire, pero muchas ciudades chinas han superado en muchas ocasiones los 500. Algunas ciudades han llegado incluso a máximos por encima de los 1.000 microgramos por metro cúbico. En 2015, Pekín promedió 80, comparados con los menos de 10 de Nueva York. Esos niveles de polución sumamente elevados provocan que la incidencia de las enfermedades respiratorias y cardíacas aumente, y que disminuya la esperanza de vida.

La contaminación hídrica también es endémica. Casi la mitad de los habitantes de las zonas rurales chinas carecen de instalaciones sanitarias modernas. El país tiene menos terreno cultivable per cápita que India y, a diferencia de Japón, que es mucho más pequeño, nunca podría depender en gran medida de las importaciones. Los recursos petrolíferos y de gas natural de China son inferiores a los estadounidenses, y hoy en día las importaciones de crudo suponen más del 60 por ciento del consumo total, mientras que Estados Unidos es ahora un pequeño importador. Y es mejor no pensar en un desastre como el de Fukushima en un país en el que muchos de los nuevos reactores nucleares se han construido a toda prisa en provincias costeras densamente pobladas, o en una nueva pandemia que comience en uno de sus

populares mercados de animales vivos.

Por último, la población del país está envejeciendo a bastante velocidad —esta es la razón por la que el Partido Comunista abandonó en 2015 su política de hijo único— y, como consecuencia, su ventaja demográfica ya está reduciéndose. La proporción entre personas económicamente activas y personas dependientes alcanzó su valor máximo en 2010, y a medida que disminuye también lo hará el dinamismo industrial chino.

Todo esto lo hemos visto antes. Comparemos el Japón de 1990, cuyo ascenso parecía desafiar a todo el mundo occidental, con el Japón de 2020, tras 30 años de estancamiento económico (véase «Inquietud sobre el futuro de Japón»). Esta quizá sea la idea que más ayude a atisbar el probable contraste entre la China de 2020 y la de 2050.

## § 18. India frente a China

¿India como número uno? No es descartable: India pronto ocupará el lugar de China como país más poblado del mundo. La pregunta es si también se elevará hasta desafiar a China como potencia económica.

Al menos desde el desmoronamiento del Imperio romano, las sucesivas dinastías chinas han ejercido el poder sobre más personas que cualquier otro Gobierno. En 1912, cuando terminó el dominio imperial, China tenía alrededor de 428 millones de habitantes; 542 millones en 1949, cuando los comunistas se hicieron con el poder; 1.270 millones en el año 2000; en torno a

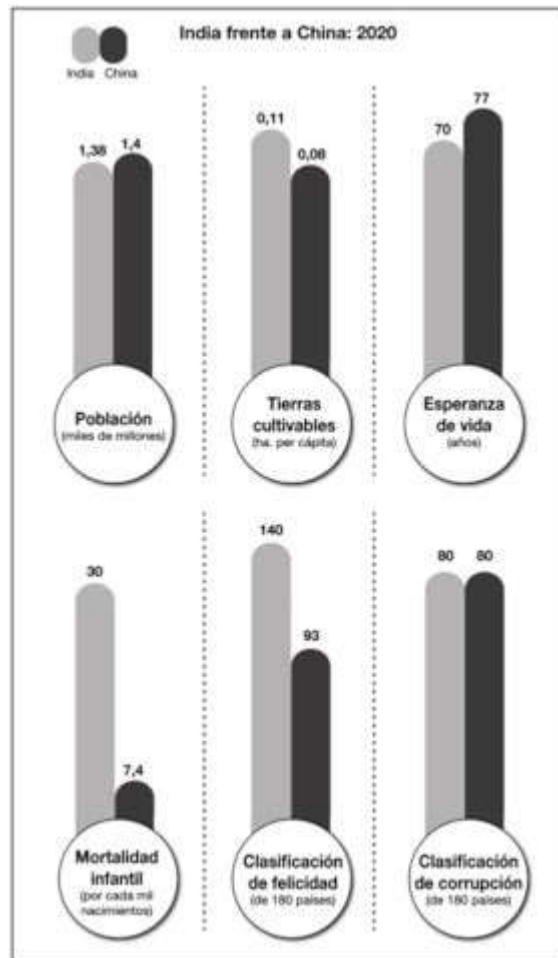
1.400 millones a finales de 2019. La ralentización de su crecimiento es consecuencia directa de la política de hijo único, adoptada en 1979 y abolida en 2015 (véase el capítulo anterior). Entretanto, la población de India creció desde los 356 millones de 1950 hasta 1.050 millones en 2000 y 1.370 millones a finales de 2019.

La ventaja de China se ha ido reduciendo a gran velocidad. Y dada la fiabilidad de las previsiones demográficas a corto plazo, parece evidente que India superará a China como muy tarde en 2025 (según la última previsión de Naciones Unidas), quizá incluso ya en 2023.

Por el momento resulta fascinante comparar los dos megaestados. Ambos países practican el aborto selectivo de muchas niñas, creando así una proporción anómala entre los sexos al nacer. La proporción normal es de 1,06 varones por cada mujer, pero en India este valor es de 1,12, y en China de 1,15.

Ambos países están plagados de corrupción: el más reciente índice de percepción de corrupción, de Transparencia Internacional, sitúa a India y a China en el puesto 80 de los 180 países que contempla. (Dinamarca es el país menos corrupto y Somalia el más.) En ambos países, la desigualdad económica, medida usando el coeficiente de Gini, es muy alta: en torno a 48 en India y 51 en China (comparada con 25 en Dinamarca, 33 en Reino Unido y 38 en Estados Unidos). En ambos países, las clases adineradas compiten en consumo ostentoso y coleccionan coches caros y residencias palaciegas. Mukesh Ambani, presidente de Reliance Industries Limited, posee la residencia privada más cara del mundo: su Antilia, un rascacielos

de 27 plantas completado en 2012, tiene unas vistas perfectas de las barriadas chabolistas de Bombay.



Pero también existen diferencias fundamentales. Su rápido crecimiento económico desde 1980 ha convertido a China, con diferencia, en el más rico de los dos países, con un PIB nominal (según la estimación del FMI para 2019) casi cinco veces mayor que el de India (14,1 billones de dólares frente a 2,9 billones). En 2019, la renta media per cápita de China, medida en términos de paridad de poder de adquisitivo, era (según el FMI) más del doble que la de India (20.980 dólares frente a 9.030 dólares).

Por otra parte, China es un Estado de partido único sometido a un

firme control y dirigido por un politburó de siete hombres de edad avanzada, mientras que India, pese a sus muchas imperfecciones, sigue siendo un país innegablemente democrático. En 2019, Freedom House asignó a India 71 puntos en su índice de libertad, frente a los míseros 11 puntos de China (Reino Unido obtuvo 94 puntos y Canadá 99).

Otra comparación es igualmente reveladora: uno de los mayores logros tecnológicos chinos es aplicar una férrea censura en internet y una vigilancia muy intrusiva como parte del nuevo y ubicuo Sistema de Crédito Social; uno de los grandes logros tecnológicos indios es su desproporcionada contribución al liderazgo corporativo en el ámbito de la alta tecnología, tanto dentro como fuera de sus fronteras. Muchos emigrantes indios han alcanzado puestos de liderazgo en Silicon Valley: Sundar Pichai en Google, Satya Nadella en Microsoft, Shantanu Narayen en Adobe y Sanjay Jha, antiguo director ejecutivo de Global Foundries, son solo los más prominentes.

Será fascinante ver en qué medida India logra replicar el éxito económico de China. Y China, por su parte, debe afrontar la pérdida del dividendo demográfico: desde 2012 su tasa de dependencia —el número de personas en edad de trabajar dividido entre el número de quienes son demasiado jóvenes o demasiado mayores para trabajar— ha ido aumentando (ahora se sitúa ligeramente por encima del 40 por ciento). La cuestión es si el país se hará viejo antes de que pueda llegar a ser realmente rico. Ambos países afrontan enormes problemas medioambientales, y los dos tendrán

dificultades para alimentar a su población, pero India tiene un 50 por ciento más de terrenos agrícolas.

Una última complicación: estas dos potencias nucleares aún no han firmado un tratado vinculante para poner fin a su disputa territorial en torno al Himalaya. Han llegado al enfrentamiento violento sobre esta cuestión, en particular en 1962. La situación puede complicarse cuando dos potencias emergentes están separadas por una frontera en disputa.

A pesar de todo, esta no es la mayor dificultad inmediata a la que se enfrenta India. Más acuciantes son la necesidad de reducir cuanto antes aún más su tasa de fertilidad (en igualdad de condiciones, esto hace que aumente la renta per cápita), las complicaciones asociadas a mantener una autosuficiencia alimentaria básica (un país de más de 1.400 millones de habitantes es demasiado grande para depender de las importaciones) y encontrar la manera de frenar el deterioro de las relaciones entre los hindúes y los musulmanes del país.

### § 19. Por qué la producción industrial sigue siendo importante

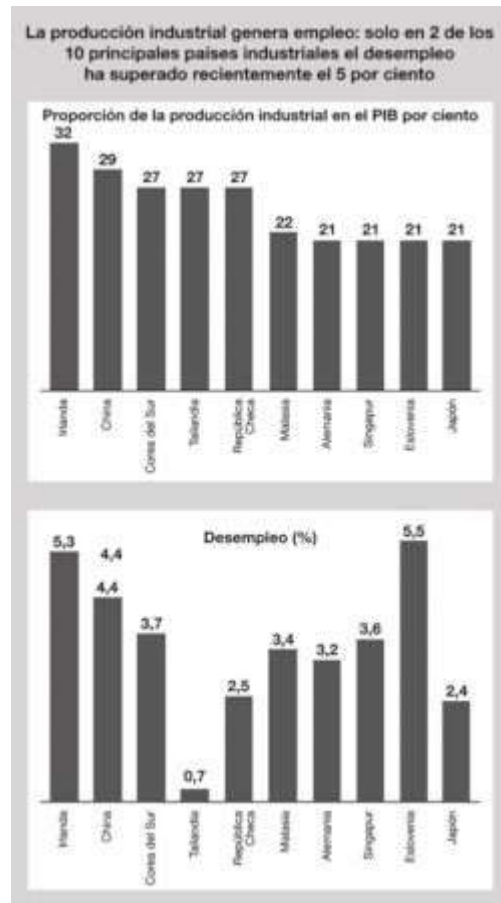
La producción industrial se ha hecho a la vez más grande y más pequeña. Entre 2000 y 2017, el valor mundial de los productos manufacturados se duplicó con creces, pasando de 6,1 billones de dólares a 13,2 billones. Entretanto, la importancia *relativa* está disminuyendo rápidamente, siguiendo los pasos del previo retroceso de la agricultura (que ahora constituye solo el 4 por ciento de la producción económica mundial). Según las estadísticas nacionales



uniformes de Naciones Unidas, la contribución del sector manufacturero a la producción económica global disminuyó desde un 25 por ciento en 1970 a menos del 16 por ciento en 2017.

Este declive se ha dejado notar en las bolsas, que valoran muchas compañías de servicios por encima de las mayores empresas manufactureras. A finales de 2019, Facebook —ese proveedor constante de *selfies*— tenía una capitalización en el mercado de casi 575.000 millones de dólares, cerca de tres veces superior a la de Toyota, el principal fabricante mundial de turismos. Y SAP, el mayor proveedor europeo de software, valía en torno a un 60 por ciento más que Airbus, el principal fabricante europeo de aviones de pasajeros.

Aun así, la producción industrial sigue siendo importante para la salud de la economía de un país, porque ningún otro sector puede generar un número similar de empleos bien remunerados. Tomemos el ejemplo de Facebook, que a finales de 2019 contaba con unos 43.000 empleados, frente a los aproximadamente 370.000 que Toyota tuvo durante el año fiscal de 2019. Fabricar objetos sigue siendo importante.



Las cuatro principales economías siguen siendo las cuatro potencias industriales, que en 2018 sumaban el 60 por ciento de la producción industrial mundial. China encabezaba la lista con alrededor del 30 por ciento, seguida por Estados Unidos (en torno al 17 por ciento), Japón y Alemania. Pero había diferencias sustanciales en cuanto a la importancia relativa de la fabricación para sus economías. El sector aportó más del 29 por ciento al PIB chino en 2018, cifra que fue del 21 por ciento en Japón y Alemania, y de solo el 12 por ciento para Estados Unidos.

Si ordenamos los países según el valor per cápita de la producción industrial, entonces Alemania, con unos 10.200 dólares en 2018, ocupa el primer lugar de los cuatro, seguida por Japón, con

alrededor de 7.900 dólares, Estados Unidos, con unos 6.800, y China, con solo 2.900. Pero el líder global es ahora Irlanda, un país que, hasta su incorporación a la Unión Europea (entonces conocida como Comunidad Económica Europea) en 1973, solo tenía un pequeño sector industrial. Su bajo impuesto de sociedades (12,5 por ciento) ha atraído a muchísimas multinacionales, que ahora producen el 90 por ciento de las exportaciones industriales del país. El valor per cápita de la producción industrial irlandesa ha superado los 25.000 dólares, por delante de los 15.000 de Suiza. Cuando pensamos en la industria suiza, pensamos en compañías nacionales tan famosas como Novartis y Roche (farmacéuticas) o el Grupo Swatch (relojes como Longines, Omega, Tissot y otras marcas). Cuando pensamos en la industria irlandesa, pensamos en Apple, Johnson & Johnson o Pfizer, todas ellas extranjeras.

Entre los países donde los bienes manufacturados suponen más del 90 por ciento del total del comercio de mercancías se encuentran no solo China e Irlanda, también Bangladés, República Checa, Israel y Corea del Sur. Alemania se aproxima al 90 por ciento; en Estados Unidos, este porcentaje no llega al 70 por ciento.

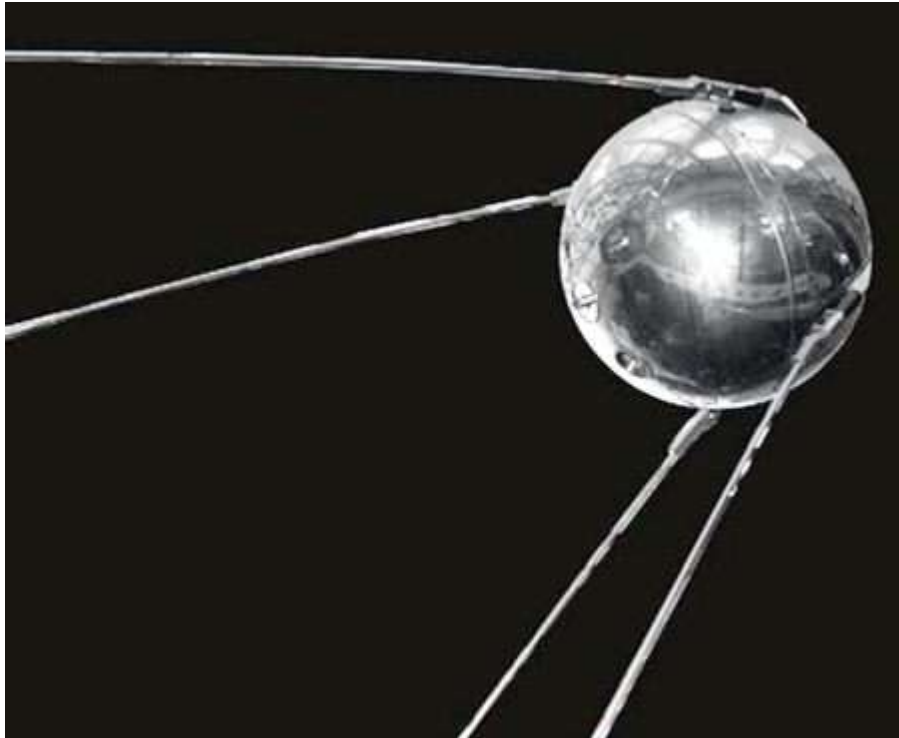
El balance neto del comercio internacional de productos manufacturados es también revelador porque indica dos cosas: la medida en que un país puede satisfacer su propia necesidad de productos y la demanda de sus productos en el extranjero. Como cabría esperar, Suiza, Alemania y Corea del Sur tienen grandes superávits, mientras que Estados Unidos alcanzó en 2018 otro déficit récord en comercio de bienes, con 891.000 millones de

dólares, unos 2.700 dólares per cápita: el precio que los estadounidenses pagan por importar electrónica, ropa, zapatos, muebles y aparatos de cocina procedentes de Asia.

Pero Estados Unidos disfrutó durante generaciones, hasta 1982, de superávits en el comercio industrial; mientras que China tuvo déficits crónicos hasta 1989. ¿Qué posibilidades hay de que Estados Unidos corrija su enorme desequilibrio en el comercio de productos manufacturados con China, o de que India reproduzca el éxito industrial de China?

## § 20. Rusia y Estados Unidos: las cosas nunca cambian

Las tensiones entre Rusia y Estados Unidos que surgieron durante la segunda década del siglo XXI no son más que la última reencarnación de la vieja rivalidad entre superpotencias. En agosto de 2019, Estados Unidos se retiró del Tratado sobre Fuerzas Nucleares de Rango Intermedio con Rusia; ambas partes están desarrollando nuevos misiles; y los dos países se han enfrentado sobre el futuro de la ex república soviética de Ucrania.



*El Sputnik.*

Si echamos la vista atrás, es evidente que uno de los momentos decisivos de su enfrentamiento de décadas tuvo lugar el viernes 4 de octubre de 1957, cuando la Unión Soviética lanzó el Sputnik 1, el primer satélite artificial. Técnicamente, fue una cuestión modesta: una esfera de 58 centímetros de diámetro, de casi 84 kilogramos y de la que brotaban cuatro antenas en forma de varillas. Aunque sus tres baterías de plata-zinc suponían el 60 por ciento de la masa total, solo proporcionaban 1 vatio de potencia, suficiente para emitir unos pitidos rápidos y agudos a 20,007 y 40,002 megahercios durante tres semanas. El satélite orbitó el planeta 1.440 veces antes de precipitarse hacia una llameante muerte el 4 de enero de 1958. El Sputnik no debería haber sido ninguna sorpresa. Tanto los soviéticos como los estadounidenses habían anunciado su intención de poner satélites en órbita durante el Año Geofísico Internacional

(1957-1958), y los soviéticos incluso publicaron algunos detalles técnicos antes del lanzamiento. Pero no fue así como el público percibió a finales de 1957 la pequeña esfera con sus pitidos.

El mundo occidental reaccionó con asombro; Estados Unidos, con bochorno. Bochorno que no hizo sino intensificarse en diciembre, cuando el cohete Vanguard TV3, cuyo lanzamiento se había adelantado apresuradamente para contrarrestar el efecto del Sputnik, estalló en la plataforma de Cabo Cañaveral apenas dos segundos después del despegue. Miembros de la delegación soviética ante Naciones Unidas preguntaron a sus homólogos estadounidenses si querían recibir asistencia técnica en el marco del programa soviético para países subdesarrollados.

Esta humillación pública dio lugar a llamamientos para acelerar el programa espacial estadounidense, para eliminar la aparente brecha técnica y para fomentar la educación en matemáticas y ciencia. La sacudida que recibió el sistema educativo del país fue quizá la mayor de la historia.

Todo esto tuvo una enorme importancia para mí. En octubre de 1957, yo era un adolescente en Checoslovaquia y, todos los días, cuando iba andando al colegio, miraba hacia la Alemania occidental, inaccesible tras alambradas de espino y campos minados. Era como si fuese otro planeta. Poco antes, el primer ministro soviético Nikita Jrushchov había dicho a Occidente: «Os enterraremos», y ahora sus pavoneos sobre la supremacía de la ciencia y la ingeniería encontraban el respaldo de la reacción cercana al pánico de Estados Unidos. La más reciente demostración

del poder soviético nos hizo temer a muchos que nuestra generación no llegaría a ver su final.

Pero resultó que nunca había existido una verdadera brecha científica o técnica: Estados Unidos enseguida logró una decisiva primacía al lanzar satélites de comunicaciones, para la previsión meteorológica y destinados al espionaje. Menos de una docena de años después de la sorpresa del Sputnik, Neil Armstrong y Buzz Aldrin pisaron la Luna, un lugar al que ningún cosmonauta soviético llegaría jamás.

Y once años después del Sputnik, el imperio soviético flaqueó — aunque solo de manera temporal— durante la Primavera de Praga, cuando Checoslovaquia intentó adoptar una forma más libre de gobierno (aún comunista). Como resultado, incluso los checos que no eran miembros del Partido Comunista pudieron obtener pasaportes para viajar a Occidente. Así fue como, en agosto de 1969, mi mujer y yo aterrizamos en Nueva York, apenas unas semanas antes de que las fronteras volvieran a cerrarse durante dos décadas.

En 1975, poco después de que nos trasladásemos de Estados Unidos a Canadá, la primera gran exposición en el recién construido Centro de Convenciones de Winnipeg estuvo dedicada al programa espacial soviético. En el vestíbulo principal, una réplica a escala real del Sputnik colgaba de unos cables. Mientras subía las escaleras mecánicas con la mirada puesta en esa esfera brillante, retrocedí en el tiempo hasta el 4 de octubre de 1957, cuando para mí los pitidos del satélite no expresaban las glorias de la ingeniería y la ciencia,

sino el temor a que el poder soviético perdurase durante el resto de mi vida.

Conseguimos salir de allí, pero, como dicen los franceses, *plus ça change, plus c'est la même chose*.

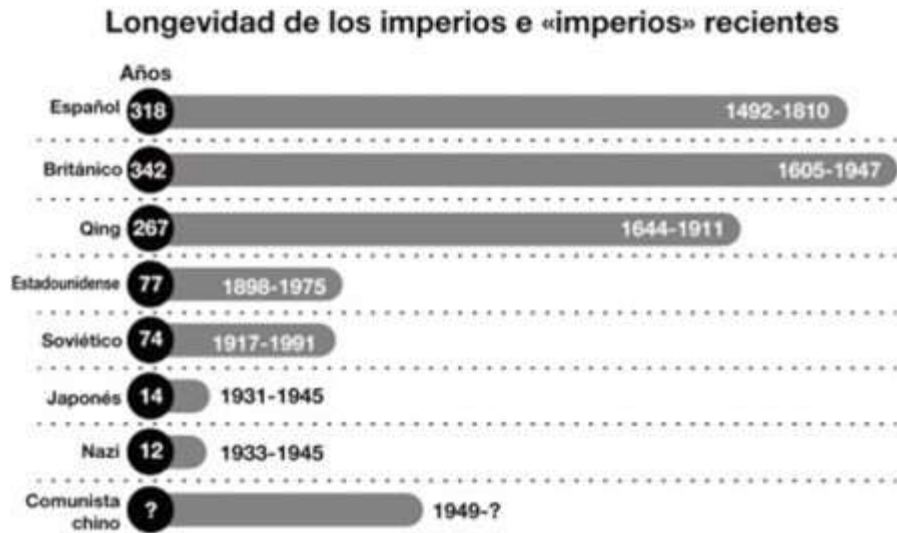
## § 21. Imperios en declive: nada nuevo bajo el sol

Mantener un imperio, ya sea real (con un emperador o emperatriz) o *de facto* (definido por la fuerza económica y militar, y sostenido por la proyección del poder y por alianzas variables), nunca ha sido fácil. Comparar la longevidad de los imperios es difícil, debido a sus distintos grados de centralización y ejercicio práctico del control territorial, político y económico efectivo. Pero hay un dato que sobresale: a pesar de las crecientes capacidades militares, técnicas y económicas de los principales países, mantener grandes imperios durante periodos prolongados es cada vez más difícil.

Cuando, en 2011, Samuel Arbesman, que por aquel entonces trabajaba en el Instituto de Ciencias Sociales Cuantitativas de la Universidad de Harvard, analizó la duración de 41 imperios antiguos que existieron entre 3000 a. C. y 600 d. C., descubrió que en promedio duraron 220 años, pero que la distribución era muy poco uniforme: aquellos que duraron menos de 200 años eran unas seis veces más habituales que los que sobrevivieron durante ocho siglos. Aún más: los tres imperios más longevos —el elamita en Mesopotamia, que duró diez siglos; el Antiguo y el Nuevo Reino en Egipto, cada uno cinco siglos— alcanzaron la madurez antes del año 1000 a. C. (Elam, en torno a 1600 a. C.; los reinos egipcios, en 2800



y 1500 a. C.).



Y aunque no han escaseado los imperios desde el año 600 d. C., un análisis más detenido revela que su longevidad no ha aumentado. Por supuesto, China continuó teniendo alguna forma de gobierno imperial hasta 1911, pero eso incluyó una docena de dinastías diferentes —incluidas las establecidas por invasores extranjeros, como la dinastía mongola Yuan (1279-1368) y la dinastía manchú Qing (1644-1911)— que ejercieron diversos grados de control sobre unos territorios menguantes y crecientes, a menudo con endebles pretensiones sobre las regiones septentrionales y occidentales, más allá del núcleo Han.

Las fechas de los imperios español y británico son muy debatibles. Si tomamos 1492 como comienzo del Imperio español y 1810 como su fin *de facto*, esto supone poco más de tres siglos de gobierno desde Madrid (o, a partir de 1584, desde El Escorial). En cuanto al Imperio británico, podemos fijar su inicio en 1497 (el viaje de Giovanni Caboto a Norteamérica) o en 1604 (el Tratado de Londres

que puso fin a la guerra anglo-española), y su final (dejando a un lado las restantes microposeciones de territorios de ultramar, desde Anguilla hasta Turks y Caicos) en 1947 (la pérdida de India) o 1960 (cuando Nigeria, el país más poblado de África, logró la independencia). Las últimas fechas nos darían una duración de 356 años.

No hubo ni un solo imperio capaz de sobrevivir el siglo XX. La última dinastía china, la Qing, terminó en 1911 tras un dominio de 267 años, y el nuevo imperio comunista se estableció en 1949. El Imperio soviético, sucesor del de los Romanov, acabó recuperando el control de la mayor parte de los territorios antes dominados por los zares (las grandes excepciones fueron Finlandia y partes de Polonia), y tras la Segunda Guerra Mundial amplió su control a los países de Europa oriental y central cuando cayó el Telón de Acero desde el Báltico hasta el mar Negro.

Durante los años de la Guerra Fría, el imperio les pareció imponente a los planificadores de la OTAN y a los responsables políticos de Washington, pero desde dentro (viví bajo su yugo hasta los 26 años) su aspecto era menos formidable. Aun así, fue una sorpresa que acabase disolviéndose con tanta facilidad; duró desde la primera semana de noviembre de 1917 hasta la última de diciembre de 1991: 74 años y un mes, la media de vida de un hombre europeo.

Las agresiones japonesa y alemana fueron, por fortuna, aún más breves. Los soldados japoneses empezaron a ocupar Manchuria en septiembre de 1931; a partir de 1937, el ejército se hizo con varias provincias del este de China; desde 1940, pasó a controlar Vietnam,

Camboya, Tailandia y Birmania, así como el conjunto de Indonesia salvo una pequeña parte; en junio de 1942 ocupó Attu (la isla más occidental de la cadena alaskaña de las Aleutianas) y la isla de Kiska, a unos 300 kilómetros al oeste. Japón perdió estos dos enclaves más occidentales apenas 13 meses más tarde, y firmó su capitulación el 2 de septiembre de 1945; así pues, la expansión imperial duró casi 14 años. Por su parte, el Tercer Reich alemán, que iba a durar mil años, desapareció 12 años y 3 meses después de que Hitler fuese nombrado *Reichskanzler* el 30 de enero de 1933. ¿Y el «imperio» estadounidense? Incluso si creyéramos en su existencia real y si fijamos su comienzo en 1898 (la guerra hispano-estadounidense y la toma de control de las Filipinas, Puerto Rico y Guam), ¿deberíamos creer que sigue en pie? La Segunda Guerra Mundial fue el último conflicto importante en el que Estados Unidos logró una victoria decisiva; el resto (las guerras de Corea, Vietnam, Afganistán, Irak) fueron una combinación difícil de clasificar de (costosas) derrotas y agotamiento mutuo. Ni siquiera la breve guerra del Golfo de 1990-1991 fue una victoria evidente, ya que condujo directamente (12 años más tarde) a la invasión de Irak y a años de *impasse* (2003-2011). Y el peso de la producción económica del país en el total mundial ha ido disminuyendo gradualmente desde su particular máximo en 1945 (cuando todas las grandes economías habían sido destruidas o bien estaban extenuadas por la guerra), y demasiados países en la supuesta órbita imperial estadounidense se han mostrado poco dispuestos a someterse y seguir sus dictados. Parece evidente que no se trata de un «imperio» cuya duración

pueda establecerse.

¿Quién debería prestar la máxima atención a estas lecciones de la desaparición de los imperios? Claramente, el Partido Comunista chino, que intenta sofocar al Tíbet y Sinkiang, cuyas políticas no le han granjeado ningún amigo verdadero a lo largo de las extensas fronteras del país y le han llevado a extralimitarse en el mar de China Meridional, y cuya decisión de hacer fuertes inversiones (en la línea de la Ruta de la Seda) en los países más pobres de Asia y África busca comprar influencia política a largo plazo. El partido celebró en octubre de 2019 los setenta años de la última reencarnación del dominio imperial; a la vista de la historia de la duración de los imperios modernos, ¿qué probabilidades hay de que siga existiendo dentro de otros setenta años?

## Capítulo 3

### Máquinas, diseños, aparatos

#### Los inventos que crearon el mundo moderno

##### *Contenido:*

*§ 22. Cómo la década de 1880 creó el mundo moderno*

*§ 23. Cómo los motores eléctricos mueven la civilización moderna*

*§ 24. Transformadores: esos dispositivos silenciosos y pasivos*

*§ 25. Por qué aún no deberíamos dar al diesel por acabado*

*§ 26. Capturar el movimiento: de los caballos a los electrones*

*§ 27. Del fonógrafo al streaming*

*§ 28. La invención de los circuitos integrados*

*§ 29. La maldición de Moore: por qué el progreso técnico lleva más tiempo del que pensamos*

*§ 30. La irrupción de los datos: demasiados y demasiado rápido*

*§ 31. Ser realistas sobre la innovación*

§ 22. Cómo la década de 1880 creó el mundo moderno

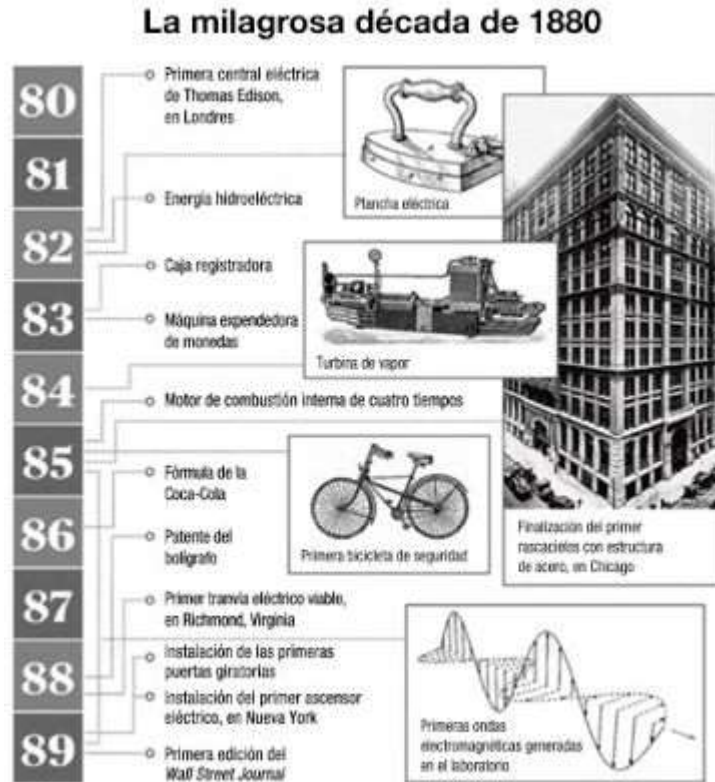
Según los adoradores del mundo electrónico, las postrimerías del siglo XX y las dos primeras décadas del XXI han traído consigo una cantidad inusitada de inventos trascendentales. Pero se trata de un malentendido categorial, pues los más recientes avances han sido variaciones de dos antiguos descubrimientos fundamentales: los microprocesadores (véase «La invención de los circuitos integrados») y la aplicación práctica de una parte del espectro electromagnético, las ondas de radio. Microchips más potentes y más especializados

controlan hoy desde los robots industriales hasta el piloto automático de los aviones de pasajeros, pasando por los fuegos de las cocinas y las cámaras digitales, mientras que la marca de comunicaciones más popular a escala global ha venido usando ondas de radio de frecuencia ultraalta (UHF, por sus siglas en inglés).

De hecho, puede que la época de mayor inventiva en la historia humana haya sido la década de 1880. ¿Hay un conjunto de descubrimientos e inventos primordiales que definan una época y que hayan marcado el mundo moderno más que la electricidad y el motor de combustión interna?

La electricidad por sí sola, sin los microchips, basta para crear un mundo sofisticado y próspero (como el que tuvimos en los años sesenta). Pero un mundo electrónico dominado por el microchip depende por completo de un suministro de electricidad cuyo diseño fundamental aún está en deuda con los sistemas de generación de energía térmica e hidroeléctrica, que llegaron ambos al mercado comercial en 1882 y que aún proporcionan más del 80 por ciento de la electricidad mundial. Y aspiramos a que esté disponible al menos el 99,9999 por ciento del tiempo, para que pueda servir como piedra angular de todo lo electrónico.

Sumemos a lo anterior los logros de Benz, Maybach y Daimler, cuyos éxitos con los motores de gasolina inspiraron a Rudolf Diesel a idear una alternativa más eficiente tan solo una década más tarde (véase «Por qué aún no deberíamos dar al diesel por acabado»).



A finales siglo XIX también disponíamos de diseños conceptuales del más eficiente de todos los motores de combustión interna: la turbina de gas. Y fue en la década de 1880 cuando los experimentos de Heinrich Hertz demostraron la existencia de las ondas electromagnéticas (producidas por la oscilación de campos eléctricos y magnéticos, cuya longitud de onda va aumentando desde los muy cortos rayos cósmicos a los rayos X, la radiación ultravioleta, visible e infrarroja, las microondas y las ondas de radio). Décadas antes, James Clerk Maxwell había predicho su existencia, pero fue Hertz quien nos introdujo en la práctica en el mundo inalámbrico.

Pero la década de 1880 también se deja sentir en muchos otros sentidos de nuestra vida. Hace más de diez años, en *Creating the Twentieth Century*, tracé los orígenes de varias experiencias cotidianas para los estadounidenses a través de artefactos y

acciones triviales que se remontan a esa década milagrosa. Una mujer se despierta hoy en una ciudad estadounidense y prepara una taza de café Maxwell House (que se vende desde 1886). Se plantea comer tortitas Aunt Jemima, sus favoritas (a la venta desde 1889), pero opta por el paquete de Quaker Oats (disponibles desde 1884). Repasa su blusa con una plancha eléctrica (patentada en 1882), se pone desodorante (disponible desde 1888), pero no puede envolver su almuerzo porque se le han acabado las bolsas de papel marrón (el proceso de fabricación de papel de estroza resistente se comercializó en la década de 1880).

Para ir a su trabajo toma el tren ligero (descendiente directo de los tranvías eléctricos que empezaron a circular en las ciudades estadounidenses en la década de 1880), está a punto de ser atropellada por una bicicleta (cuya versión moderna —con ruedas del mismo tamaño y transmisión de cadena— es otra creación de la década de 1880: véase «¡Los motores son más antiguos que las bicicletas!»), y franquea una puerta giratoria (que se introdujo en un edificio de Filadelfia en 1888) para entrar en un rascacielos con estructura de acero (el primero se completó en Chicago en 1885). Hace una parada en un quiosco del primer piso, compra un ejemplar del *Wall Street Journal* (en circulación desde 1889) a un hombre que apunta la compra en su caja registradora (patentada en 1883). A continuación, sube hasta el décimo piso en un ascensor (el primero eléctrico se instaló en un edificio de Nueva York en 1889), se detiene en una máquina expendedora (que, en su forma moderna, se introdujo en 1883) y compra una lata de Coca-Cola



(cuya fórmula data de 1886). Antes de ponerse a trabajar anota varios recordatorios con su bolígrafo (patentado en 1888).

La década de 1880 fue milagrosa: nos proporcionó avances tan dispares como desodorantes, luces baratas, ascensores fiables y la teoría del electromagnetismo, aunque, perdidos en efímeros tuits y en el chismorreo de Facebook, no somos conscientes de la magnitud de esta.

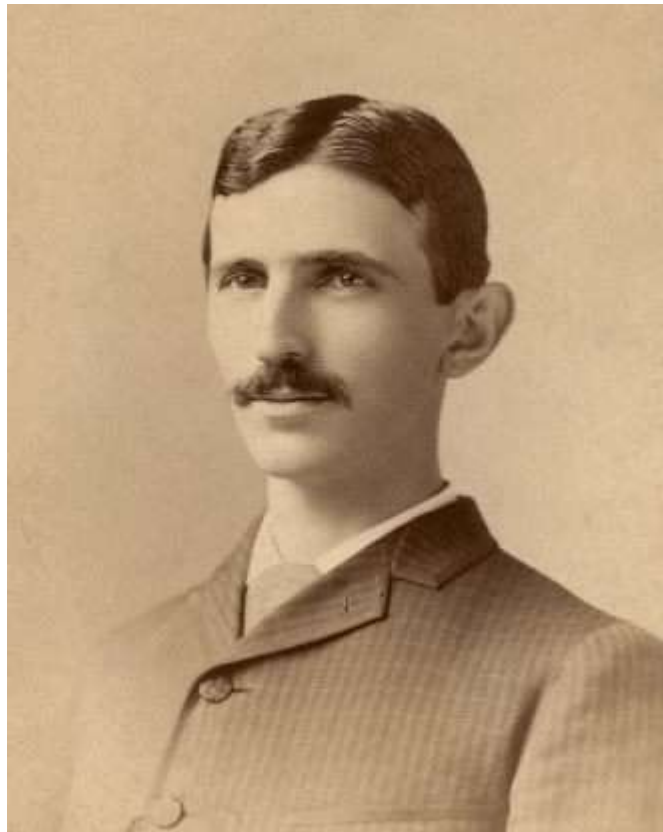
### § 23. Cómo los motores eléctricos mueven la civilización moderna

Los aparatos eléctricos experimentaron grandes avances durante la década de 1880 —el decenio de las primeras centrales eléctricas, las bombillas duraderas y los transformadores—, pero los avances en los motores eléctricos se produjeron con retraso.

Los rudimentarios motores de corriente continua (CC) se remontan a la década de 1830, cuando Thomas Davenport, de Vermont, patentó el primer motor estadounidense y lo utilizó para mover una imprenta, y Moritz van Jacobi, de San Petersburgo, usó sus motores para propulsar un pequeño barco de ruedas de paletas en el río Nevá. Pero esos aparatos impulsados por baterías no podían competir con la máquina de vapor. Transcurrió más de un cuarto de siglo hasta que Thomas Edison comercializó por fin una pluma eléctrica que creaba plantillas para duplicar documentos de oficina y también se movía gracias a un motor de corriente continua. A partir de 1882, a medida que se fue extendiendo la producción comercial de electricidad, los motores eléctricos se volvieron algo

habitual, y en 1887 los fabricantes estadounidenses vendían en torno a 10.000 unidades al año, algunas de las cuales movían los primeros ascensores eléctricos. Eso sí, todos ellos se alimentaban de corriente continua.

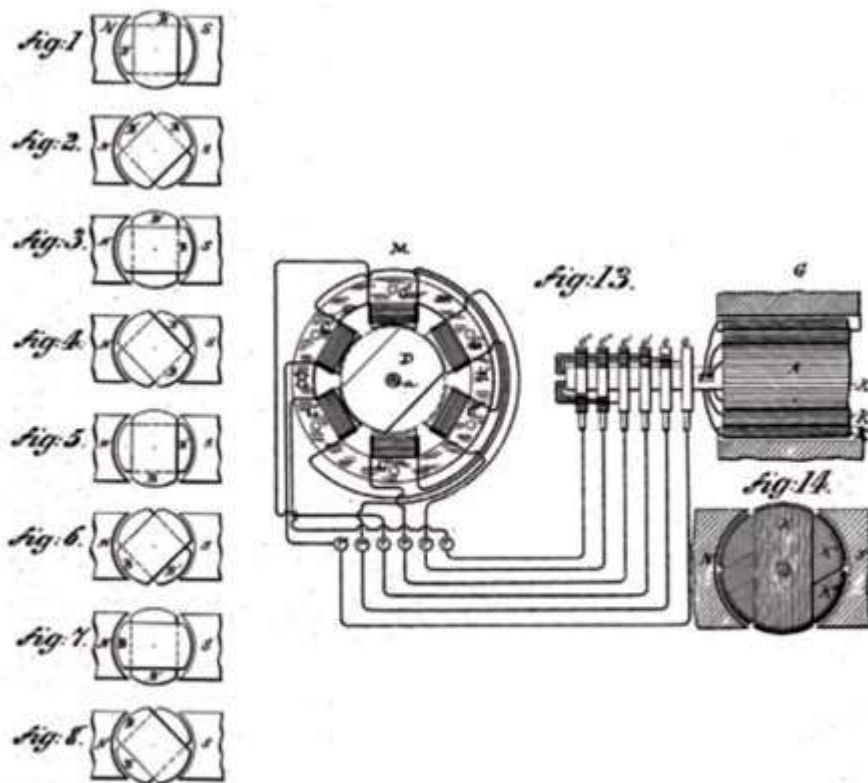
Fue Nikola Tesla, serbio de nacimiento y antiguo empleado de Edison, quien fundó su propia compañía para desarrollar un motor capaz de alimentarse de corriente alterna (CA). Los objetivos eran el abaratamiento de costes, la durabilidad, la facilidad de uso y la seguridad.



*El joven Nikola Tesla.*

Pero Tesla no fue el primero en hacerlo público: en marzo de 1888, el ingeniero italiano Galileo Ferraris pronunció una conferencia sobre motores de corriente alterna ante la Real Academia de Ciencia

de Turín, y publicó sus resultados un mes más tarde. Esto es, un mes antes de la correspondiente conferencia de Tesla en el Instituto Estadounidense de Ingenieros Eléctricos. Sin embargo, fue Tesla, con la ayuda del generoso respaldo económico de inversores estadounidenses, quien diseñó no solo los motores de inducción de corriente alterna, sino también los necesarios transformadores de corriente alterna, así como el sistema de distribución. Las dos patentes básicas para su motor polifásico se concedieron en 1888. Entre esa fecha y 1891, Tesla solicitó una treintena larga de patentes.



Ilustraciones adjuntas a la patente de Tesla en Estados Unidos para un motor eléctrico de corriente alterna.

En un motor polifásico, cada polo electromagnético en el estator (el armazón estático) tiene múltiples bobinas, por cada una de las

cuales circulan corrientes alternas de igual frecuencia y amplitud pero distinta fase (en un motor de tres fases, estas difieren en un tercio de periodo).

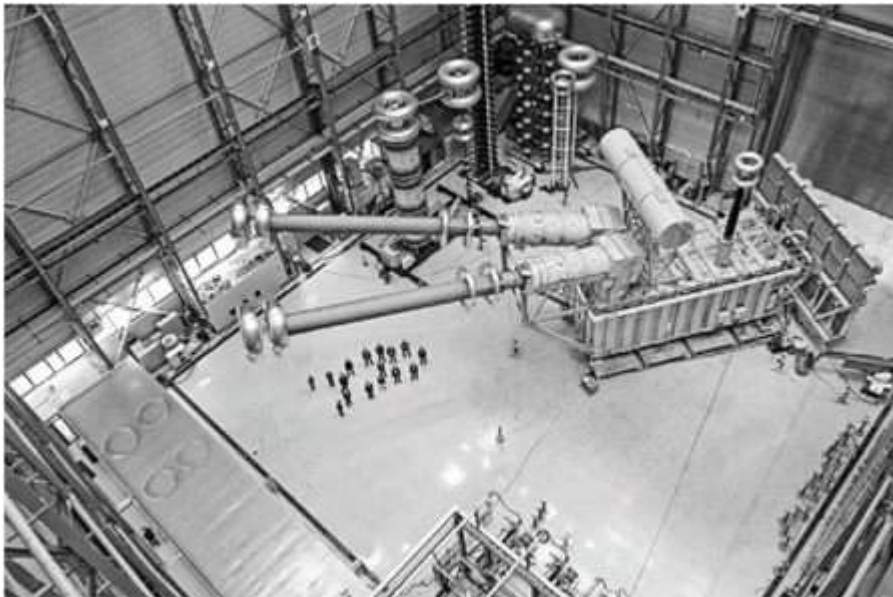
George Westinghouse adquirió las patentes sobre corriente alterna de Tesla en julio de 1888. Un año más tarde, la empresa de Westinghouse empezó a vender el primer pequeño electrodoméstico eléctrico: un ventilador con un motor de corriente alterna de 125 vatios. La primera patente de Tesla fue de un motor bifásico; los hogares modernos de hoy utilizan muchos motores eléctricos monofásicos pequeños; las máquinas trifásicas, más grandes y eficientes, son de uso habitual en la industria. Mijaíl Osipóvich Dolivo-Dobrovolski, un ingeniero ruso que trabajaba como electricista jefe para la alemana AEG, construyó el primer motor de inducción trifásico en 1889.

En la actualidad, cada año se venden alrededor de 12.000 millones de pequeños motores no industriales, incluidos unos 2.000 millones de diminutos dispositivos de corriente continua (de hasta 4 milímetros de diámetro), que necesitan una potencia de apenas una pequeña fracción de vatio. En el otro extremo del espectro están los motores de entre 6,5 y 12,2 megavatios que impulsan los trenes de alta velocidad (TGV) franceses, mientras que la potencia de los motores estacionarios más grandes que se usan en compresores de potencia, ventiladores y cintas transportadoras superan los 60 megavatios. Esta combinación de ubicuidad y rango de potencia pone de manifiesto que los motores eléctricos son unos dinamizadores verdaderamente indispensables de la civilización

moderna.

§ 24. Transformadores: esos dispositivos silenciosos y pasivos  
Nunca me han gustado las afirmaciones exageradas sobre inminentes avances científicos y técnicos, como la fusión barata, los viajes supersónicos de bajo coste o la terraformación de otros planetas. Pero sí me gustan los aparatos sencillos que hacen gran parte del trabajo fundamental de la civilización moderna, en particular los que lo llevan a cabo de manera discreta, o incluso invisible.

Ningún aparato encaja mejor con esta descripción que un transformador. Puede que quienes no son ingenieros sean vagamente conscientes de la existencia de tales aparatos, pero no tienen ni idea de cómo funcionan ni de en qué medida son absolutamente imprescindibles para su día a día.



*El mayor transformador del mundo, de Siemens para China.*

Los cimientos teóricos se establecieron a principios de la década de

1830, con el descubrimiento de la inducción electromagnética por parte de Michael Faraday y Joseph Henry. Cada uno por separado demostró que un campo magnético variable puede inducir una corriente de un voltaje más alto (lo que se conoce como «elevación») o más bajo («reducción»). Pero hubo que esperar otro medio siglo hasta que Lucien Gaulard, John Dixon Gibbs, Charles Brush y Sebastian Ziani de Ferranti diseñaran los primeros prototipos útiles de transformadores. A continuación, un trío de ingenieros húngaros —Ottó Bláthy, Miksa Déri y Károly Zipernowsky— mejoraron el diseño al construir un transformador toroidal (con forma de rosquilla), que mostraron al público en 1885.

Al año siguiente, un trío de ingenieros estadounidenses —William Stanley, Albert Schmid y Oliver B. Shallenberger, que trabajaban para George Westinghouse— presentaron un diseño mejorado. El aparato enseguida adoptó la forma del clásico transformador Stanley que ha mantenido desde entonces: un núcleo central de hierro hecho de delgadas chapas de acero al silicio, una parte con forma de «E» y otra con forma de «I» para que sea fácil insertar en su lugar bobinas de cobre.

En su alocución ante el Instituto Estadounidense de Ingenieros Eléctricos en 1912, Stanley se maravilló —con razón— ante la manera en que el aparato proporcionaba «una solución tan completa y sencilla a un problema difícil. Lo cual deja en evidencia los intentos mecánicos de regulación. Maneja con gran soltura, certeza y economía las cantidades ingentes de energía que se le aportan o se extraen de él. Es muy fiable, fuerte y seguro. En este

amasijo de acero y cobre, unas fuerzas extraordinarias se equilibran de una forma tan delicada que resultan casi imperceptibles».

Las mayores encarnaciones modernas de este longevo diseño han hecho posible transmitir electricidad a largas distancias. En 2018, Siemens entregó el primero de siete transformadores de 1.100 kilovoltios, todo un récord, que permitirán llevar el suministro eléctrico a varias provincias chinas conectadas a una línea de corriente continua de alta tensión y 3.300 kilómetros de longitud.

El número de transformadores ha superado cualquier cantidad que Stanley hubiese podido imaginar, gracias al auge de los dispositivos portátiles que hay que recargar. En 2016, la producción global de teléfonos inteligentes excedió la cifra de 1.800 millones de unidades, cada uno ellos con su correspondiente cargador que incorpora un pequeño transformador. No tenemos que desmontar el cargador de nuestro teléfono para ver el núcleo de ese minúsculo dispositivo: en internet puede verse cómo se despieza el cargador de un iPhone, uno de cuyos componentes de mayor tamaño es el transformador.

Pero muchos cargadores contienen transformadores aún más diminutos. Son dispositivos no Stanley (esto es, sin bobinas de cable) que utilizan el efecto piezoeléctrico —la capacidad de un cristal sometido a tensión de producir una corriente, y de una corriente de tensionar o deformar un cristal—. Las ondas sonoras que inciden sobre uno de esos cristales pueden generar una corriente, y una corriente que fluya por el cristal puede producir sonido. Así, una corriente puede utilizarse para crear otra de un voltaje muy distinto.

La innovación más reciente es la de los transformadores electrónicos. Comparados con los dispositivos tradicionales, son de un volumen y una masa mucho menores, y resultarán de particular importancia para integrar fuentes intermitentes de electricidad — eólica y solar— en la red eléctrica, así como para hacer posibles las microrredes de corriente continua.

### § 25. Por qué aún no deberíamos dar al diesel por acabado

El 17 de febrero de 1897, Moritz Schröter, profesor de ingeniería teórica en la Universidad Técnica de Múnich, llevó a cabo la prueba para la certificación oficial del nuevo motor de Rudolf Diesel. El objetivo de dicha prueba era verificar la eficiencia de la máquina, y demostrar así su adecuación para el desarrollo comercial.

El motor, de 4,5 toneladas, mostró un rendimiento impresionante: a su plena potencia de 13,4 kilovatios (18 caballos de vapor, equivalente a la de una pequeña motocicleta moderna), su eficiencia neta alcanzó el 26 por ciento, mucho mejor que cualquier motor de gasolina contemporáneo. Con manifiesto orgullo, Diesel escribió a su mujer:

*«Ningún otro diseño ha logrado lo que el mío, por lo que puedo tener la orgullosa conciencia de ser el primero en mi especialidad».*

Ese mismo año, la eficiencia neta alcanzó el 30 por ciento, el doble que los motores Otto de gasolina de la época.

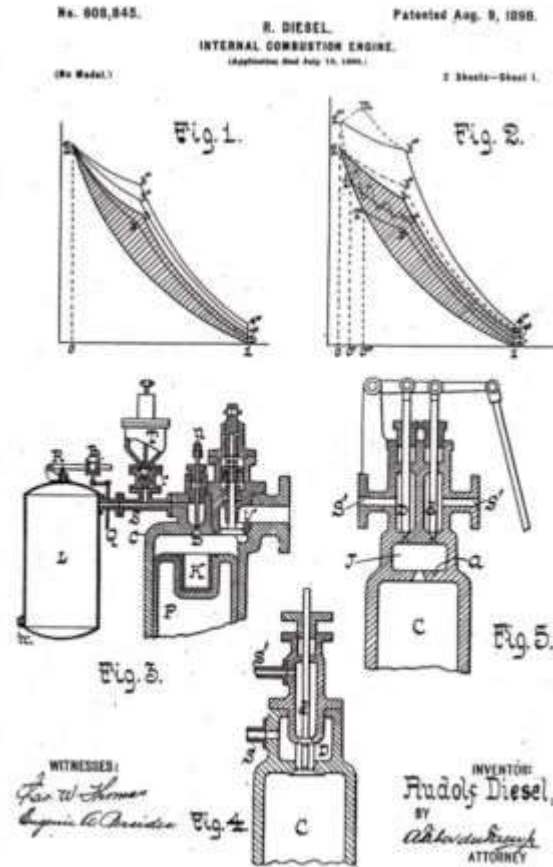
Con el tiempo, esa brecha en la eficiencia se ha estrechado, pero los



motores diesel actuales siguen siendo al menos entre un 15 y un 20 por ciento más eficientes que sus rivales de gasolina. Los diesel tienen varias ventajas: utilizan combustible de una mayor densidad de energía (contiene casi un 12 por ciento más energía que el mismo volumen de gasolina, de ahí que un vehículo pueda recorrer una distancia mayor con un depósito de igual volumen); su autoignición implica ratios de compresión el doble de altas que las de los motores de gasolina (lo que resulta en una combustión más completa y en gases de escape más fríos); pueden quemar combustible de peor calidad, y por lo tanto más barato; y los modernos sistemas de inyección electrónica pueden pulverizar el combustible en sus cilindros a presiones más elevadas, lo cual redundará en una mayor eficiencia y un escape más limpio.

Pero, por desgracia, en 1897 a esa prueba de récord no le siguió un rápido despliegue comercial. Resultó errónea la conclusión de Diesel de que tenía «una máquina perfectamente vendible» y de que «el resto vendrá de forma automática por su propia valía».

Hubo que esperar hasta 1911 para que el buque danés Selandia se convirtiese en el primer carguero transatlántico con un motor diesel, y solo pasada la Primera Guerra Mundial los diesel llegaron a dominar el tráfico marítimo. La tracción ferroviaria pesada fue su primera conquista terrestre, seguida por el transporte pesado por carretera, los vehículos todoterreno y la maquinaria agrícola y para la construcción.



Patente estadounidense de Rudolf Diesel  
para su nuevo motor de combustión interna.

El primer automóvil diesel, el Mercedes-Benz 260D, llegó en 1936. Hoy en día, alrededor del 40 por ciento de todos los coches de pasajeros en la Unión Europea son diesel, mientras que en Estados Unidos (donde la gasolina es más barata) los diesel suponen solo el 3 por ciento.

La esperanza inicial de Rudolf Diesel era que empresarios pequeños e independientes utilizaran su motor como herramientas de descentralización industrial, pero, más de 120 años más tarde, lo que ha ocurrido es justo lo contrario. Los diesel son los indiscutibles facilitadores de la producción industrial enormemente centralizada, y los insustituibles motores principales de la globalización. Los

diesel impulsan prácticamente todos los buques portacontenedores, así como los cargueros de vehículos y de mercancías a granel, como petróleo, gas natural licuado, menas, cemento, fertilizantes y cereales.

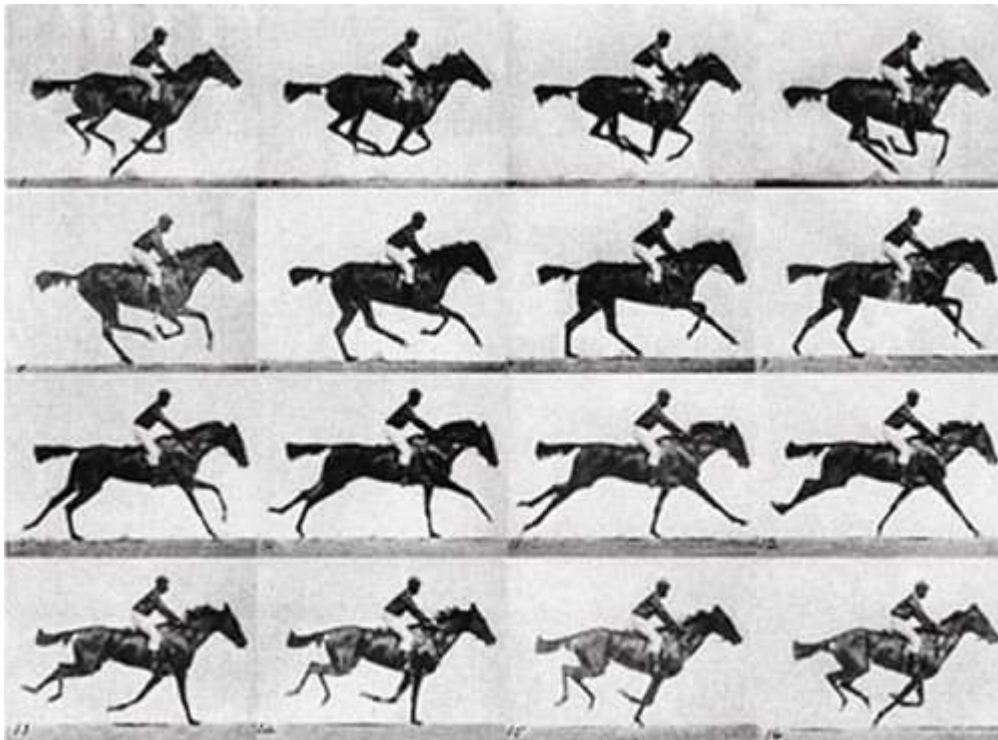
La mayoría de los productos que los lectores de este libro comen o llevan puestos son transportados al menos una vez, y con frecuencia muchas veces, mediante máquinas diesel, a menudo desde otros continentes: ropa desde Bangladés, naranjas de Sudáfrica, petróleo en crudo desde Oriente Próximo, bauxita de Jamaica, automóviles desde Japón, ordenadores de China. Sin los reducidos costes de funcionamiento, la alta eficiencia y fiabilidad y la gran durabilidad de los motores diesel, habría sido imposible lograr el grado de globalización que define actualmente la economía moderna.

A lo largo de más de un siglo de uso, los motores diesel han visto mejorar tanto su capacidad como su eficiencia. Las máquinas de mayor tamaño que hoy en día se utilizan en el transporte marítimo proporcionan más de 81 megavatios (109.000 caballos de vapor) y su eficiencia neta máxima rebasa ligeramente el 50 por ciento, superior a la de las turbinas de gas, que ronda el 40 por ciento (véase «Por qué las turbinas de gas son la mejor opción»).

Los motores diesel no van a desaparecer. No disponemos de alternativas para el transporte a gran escala capaces de seguir integrando la economía global de manera tan asequible, eficiente y fiable como las máquinas diesel.

## § 26. Capturar el movimiento: de los caballos a los electrones

El fotógrafo inglés Eadweard Muybridge (1830-1904) consolidó su fama en Estados Unidos en 1867 cuando llevó un estudio móvil al valle de Yosemite y produjo impresiones en plata de gran tamaño de sus extraordinarias vistas panorámicas. Cinco años más tarde, fue contratado por Leland Stanford, que entonces presidía la Central Pacific Railroad, antes había sido gobernador de California, y posteriormente fundó la universidad epónima en Palo Alto. Stanford —que también criaba caballos— desafió a Muybridge a zanjar una ancestral disputa: las cuatro patas de un caballo al galope ¿están en el aire a la vez o no?



*El caballo al galope de Muybridge.*

Muybridge tuvo dificultades para demostrar una cosa u otra. En 1872 tomó (y perdió) una única imagen de un caballo al trote con los cuatro cascos en el aire. Pero perseveró y acabó encontrando

una solución: capturar objetos en movimiento con cámaras cuyo obturador era capaz de aperturas tan breves como una milésima de segundo.

El experimento decisivo se llevó a cabo el 19 de junio de 1878 en la finca de Stanford en Palo Alto. Muybridge montó una serie de cámaras de placa de cristal activadas por las pisadas a lo largo de la pista, utilizó una sábana blanca como fondo para mejorar el contraste, y copió las imágenes resultantes como una secuencia de fotografías instantáneas (siluetas) en el disco de un sencillo aparato circular que llamó «zoopraxiscopio», en el que una rápida sucesión de instantáneas simulaba el movimiento.

Sallie Gardner, el caballo que Stanford había ofrecido para la prueba, claramente tenía los cuatro cascos en el aire al galope. Pero el momento de suspensión aérea no se producía como se había retratado en cuadros famosos, de los cuales el más notable quizá sea *Derby en Epsom, 1821*, de Théodore Géricault, que ahora se exhibe en el Louvre y que muestra las cuatro patas del animal extendidas. En realidad, ocurría cuando las patas del caballo estaban bajo su cuerpo, justo antes del instante en que se daba impulso con sus extremidades posteriores.

Este trabajo condujo a la obra magna de Muybridge, que preparó para la Universidad de Pensilvania. A partir de 1883, comenzó una extensa serie de imágenes en las que plasmó la locomoción animal y humana. Para su creación usó 24 cámaras fijadas en paralelo a una pista de 36 metros de longitud con dos conjuntos de 12 baterías portátiles en cada extremo. La pista tenía un fondo marcado, y los

animales o personas activaban los obturadores al romper una serie de cuerdas tensas.

El producto final fue un libro con 781 placas, publicado en 1887. Este compendio mostraba no solo animales domésticos corriendo (perros y gatos, vacas y cerdos), sino también un bisonte, un ciervo, un elefante y un tigre, así como un avestruz a la carrera y un loro volando. Las secuencias humanas plasmaban carreras, ascensos, descensos, levantamientos, lanzamientos, una escena de lucha libre, un niño gateando y una mujer vertiendo un cubo de agua sobre otra mujer.

Los 1.000 fotogramas por segundo de Muybridge enseguida pasaron a ser 10.000. En 1940, el diseño patentado de una cámara de espejo rotatorio elevó la cifra a un millón por segundo. En 1999, Ahmed Zewail obtuvo el Premio Nobel en Química por el desarrollo de un espectrógrafo capaz de capturar los estados de transición de las reacciones químicas a una escala de femtosegundos (esto es,  $10^{-15}$  segundos, una milésima de billonésima de segundo).

Hoy en día, podemos usar intensos pulsos láser ultrarrápidos para capturar eventos separados por apenas attosegundos ( $10^{-18}$  segundos). Esta resolución temporal permite ver lo que hasta hace nada había estado oculto a cualquier acceso experimental directo: el movimiento de los electrones a escala atómica.

Se pueden ofrecer muchos ejemplos para ilustrar el extraordinario progreso científico e ingenieril que hemos hecho desde las últimas décadas del siglo XIX, y varios casos impresionantes —como el de la eficacia luminosa de la luz (véase «Por qué la luz solar sigue siendo

la mejor») o el coste de la electricidad ajustado por la renta y el rendimiento (véase «El verdadero coste de la electricidad») — se detallan en este libro, pero no se me ocurre ningún otro avance que refleje un contraste como el que existe entre los descubrimientos de Eadweard Muybridge y Ahmed Zewail: de zanjar una disputa sobre la suspensión en el aire de los cascos de los caballos a observar el revoloteo de los electrones.

### § 27. Del fonógrafo al *streaming*

Cuando Thomas Edison murió en 1931, a los 84 años, era titular de casi 1.100 patentes en Estados Unidos y más de 2.300 en todo el mundo. Con diferencia, la más famosa era su patente de la bombilla, aunque ni la idea de hacer el vacío en un recipiente de cristal ni la de usar un filamento incandescente habían sido suyas. Más fundamental fue la concepción por parte de Edison, enteramente *ex novo*, del sistema completo de generación, transmisión y conversión de electricidad que puso en funcionamiento, primero en Londres y a continuación en el bajo Manhattan, en 1882.



*Thomas Edison con su fonógrafo.*

Pero, en cuanto a pura originalidad que raya en lo mágico, nada es comparable a la patente estadounidense n.º 200.521 de Edison, concedida el 19 de febrero de 1878, para el primer método en toda la historia concebido para oír un sonido grabado.

El fonógrafo (un aparato para la grabación y reproducción mecánicas de sonido) nació a partir del telégrafo y el teléfono. Edison pasó años intentado mejorar el primero —la mayoría de sus primeras patentes estaban relacionadas con telégrafos-impresoras— y había estado interesado en el segundo desde su aparición en 1876. Edison obtuvo sus primeras patentes relacionadas con el



teléfono en 1878. Se percató de que, si reproducía a alta velocidad una cinta de telégrafo grabada, los sonidos que oía recordaban a voces humanas. ¿Qué ocurriría si grababa un mensaje telefónico conectando una aguja al diafragma del receptor, generaba una cinta perforada y a continuación la reproducía? Diseñó un pequeño aparato con un cilindro estriado envuelto en papel de aluminio capaz de recibir y registrar con facilidad los movimientos del diafragma. *«Entonces grité “Mary had a little lamb...” —recordó Edison más tarde—. Ajusté el reproductor y la máquina lo reprodujo a la perfección. Nada me había sorprendido tanto en mi vida. Todo el mundo estaba asombrado. Las cosas que funcionaban a la primera siempre me dieron miedo.»*

Enseguida sacó el fonógrafo en una gira que lo llevó incluso a la Casa Blanca. Su publicidad lo llamaba (de manera incongruente) «El logro final de Thomas Edison». El deseo del inventor era que cada familia estadounidense acabase comprando una de estas máquinas. En los últimos años de la década de 1880, introdujo importantes mejoras en su diseño, al usar cilindros recubiertos de cera (ideados originalmente por colegas de Alexander Graham Bell, inventor del teléfono) y un motor eléctrico alimentado con una batería, y al presentarlo como una grabadora de voces familiares y una caja de música, así como un dictáfono para las empresas y audiolibro para los ciegos.

Sin embargo, las ventas nunca fueron espectaculares. Los cilindros de cera, en particular en sus primeras versiones, eran frágiles, difíciles de fabricar y por lo tanto caros. En 1887, la American

Graphophone Company había obtenido la patente para una versión del aparato que le haría competencia, aunque su precio tampoco era asequible (equivalía a unos 4.000 dólares actuales).

Durante la década de 1880, Edison se dedicó a sacar al mercado y mejorar las luces eléctricas, también a inventar y diseñar sistemas de generación y transmisión de electricidad. Pero en 1898 empezó a vender el fonógrafo Edison Standard por 20 dólares (unos 540 dólares al cambio actual). Un año más tarde llevó el modelo Gem, más barato, por solo 7,50 dólares (Sears, Roebuck & Co. vendía una cama de hierro a un precio similar). Pero, para 1912, cuando Edison estaba produciendo en masa cilindros irrompibles de celuloide, ya se habían impuesto los discos de goma laca para el gramófono (patentado inicialmente por Emile Berliner en 1887).

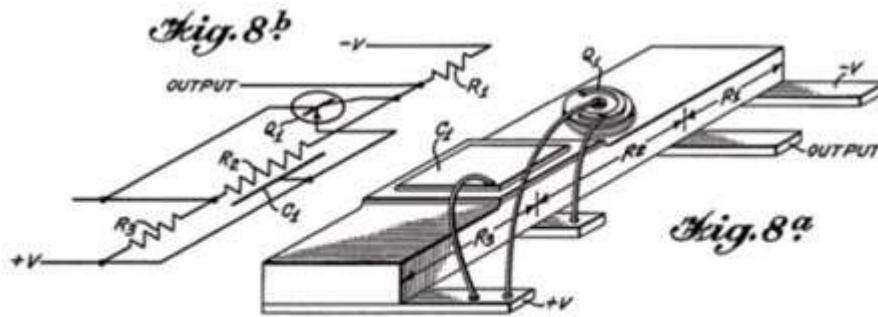
A Edison siempre le costó desvincularse de sus primeros inventos. Los últimos cilindros para el fonógrafo se fabricaron en octubre de 1929. Los discos planos con un surco en espiral, que se usaban en el gramófono, siguieron siendo el formato dominante durante la mayor parte del siglo XX, hasta que fueron apareciendo uno tras otro nuevos modos de registro de sonido. La venta de LP alcanzó su máximo en Estados Unidos en 1978, la de casetes compactos lo hizo una década más tarde, y la de CD —que aparecieron en 1984—, en 1999. Esas ventas se redujeron a la mitad apenas siete años más tarde, y ahora han sido superadas por las descargas de música, incluido el *streaming* inalámbrico y gratuito. ¿Qué habría pensado Edison de estos métodos inmateriales de reproducción del sonido?

## § 28. La invención de los circuitos integrados

En 1958, once años después de que los Laboratorios Bell reinventasen el transistor, se hizo evidente que los semiconductores solo lograrían conquistar el mercado de la electrónica si se sometían a una importante miniaturización. No había mucho margen de mejora a base de soldar a mano los distintos componentes en los circuitos, pero, como suele ocurrir, la solución apareció justo cuando se la necesitaba.

En julio de 1958, a Jack S. Kilby, de Texas Instruments, se le ocurrió la idea del circuito monolítico. Su solicitud de patente lo describía como «un novedoso circuito electrónico miniaturizado fabricado a partir de un cuerpo de material semiconductor que contiene una unión *p-n* por difusión tal que todos los componentes del circuito electrónico están completamente integrados en el cuerpo del material semiconductor». Además, Kilby hizo hincapié en que «no existe un límite para la complejidad o la configuración de los circuitos que se pueden fabricar mediante este método».

Era una excelente idea, pero su ejecución —tal y como se describía en la solicitud de patente Kilby, de febrero de 1959— era impracticable, porque las conexiones del cableado se elevaban, formando un arco, sobre la superficie de la oblea, lo que dificultaba mucho la fabricación de un componente plano. Kilby sabía que esto no funcionaría, y por eso añadió una nota sobre otras maneras de establecer las conexiones. Como ejemplo, mencionaba la posibilidad de depositar oro sobre la delgada capa de óxido de silicio en la superficie de la oblea.



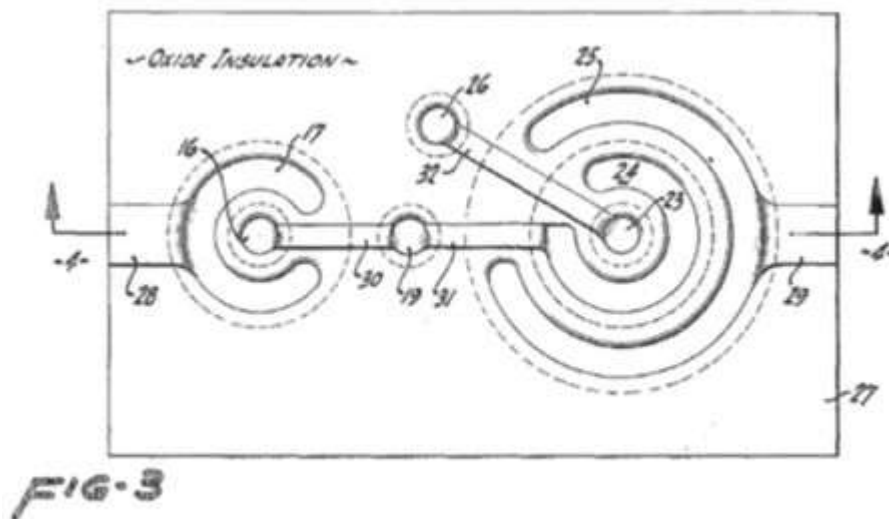
Círculo integrado: patente de Kilby con «cables volantes».

Sin que Kilby lo supiera, en enero de 1959, Robert Noyce, entonces director de investigación en Fairchild Semiconductor, esbozó en su cuaderno de laboratorio una versión mejorada de la misma idea. «Sería deseable fabricar varios dispositivos sobre una única pieza de silicio, para así poder incorporar las interconexiones entre los dispositivos como parte del proceso de fabricación, y de esta manera reducir el tamaño, el peso, etcétera, así como el coste por cada elemento activo», escribió Noyce. Además, el dibujo que acompañaba a la solicitud de patente de Noyce de julio de 1959 no contenía cables volantes, sino que representaba claramente un transistor plano y «pistas en forma de franjas de metal depositadas en vacío o de alguna otra manera que se extienden adheridas a la capa de óxido aislante para establecer las conexiones eléctricas hacia y entre las distintas regiones del cuerpo de semiconductor sin cortocircuitar las uniones».

La patente de Noyce se concedió en abril de 1961; la de Kilby, en julio de 1964. Los pleitos llegaron hasta el Tribunal Supremo, que en 1970 desestimó el caso, confirmando así la decisión de un tribunal inferior que reconocía la prioridad de Noyce. Esa decisión no tuvo consecuencias prácticas, porque en 1966 las dos compañías

habían acordado compartir sus licencias de producción, y los orígenes del circuito integrado se convirtieron en otro caso destacado de invenciones independientes y concurrentes. La idea conceptual básica era idéntica; ambos inventores recibieron la Medalla Nacional de la Ciencia y los dos accedieron al Salón Nacional de la Fama de los Inventores. Noyce solo vivió hasta los 62 años, pero Kilby sobrevivió hasta compartir un Premio Nobel en Física en 2000, a la edad de 77 años, cinco antes de su muerte.

Texas Instruments llamó a los nuevos diseños «elementos micrológicos». Fueron los escogidos para controlar los misiles balísticos intercontinentales y para ayudar a llevar al hombre a la Luna.



Circuito integrado: patente plana de Noyce.

Su progreso posterior, que se recoge en la Ley de Moore, aún vigente (véase «La maldición de Moore: por qué el progreso técnico lleva más tiempo del que pensamos»), ha sido uno de los acontecimientos definitorios de nuestra época. En 1971, los circuitos integrados básicos habían madurado en microprocesadores simples con miles

de componentes, que a continuación avanzaron hasta diseños que hicieron asequibles los ordenadores personales a partir de mediados de los años ochenta.

En 2003, la cifra total de componentes había superado los 100 millones, y en 2015 alcanzó los 10.000 millones de transistores. Esto supone un crecimiento acumulado de ocho órdenes de magnitud desde 1965, un aumento medio del 37 por ciento anual, de forma que el número de componentes en un área determinada se doblaba aproximadamente cada dos años. Esto significa que, para tener la capacidad de los dispositivos más recientes, a mediados de los años sesenta habrían hecho falta componentes de un tamaño 100 millones de veces mayor. En la célebre expresión del físico Richard Feynman: «Al fondo hay mucho espacio».

§ 29. La maldición de Moore: por qué el progreso técnico lleva más tiempo del que pensamos

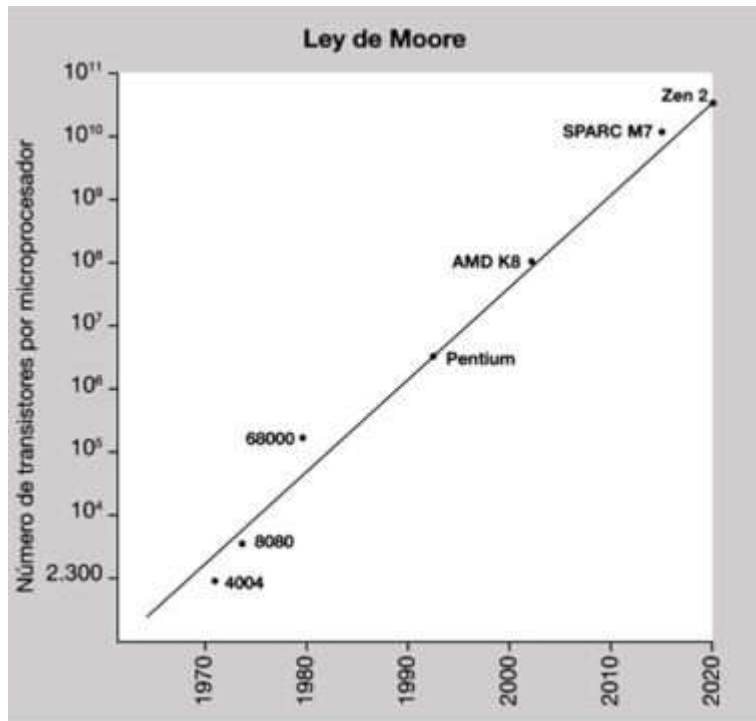
En 1965, Gordon Moore —entonces director de I+D en Fairchild Semiconductor— señaló que «con costes mínimos de componentes, la complejidad ha aumentado a una velocidad aproximada de un factor dos anual [...]. Ciertamente, a corto plazo cabe esperar que este ritmo continúe, o incluso se incremente». A largo plazo, la velocidad a la que se doblaba acabó siendo de unos dos años, un crecimiento exponencial a un ritmo del 35 por ciento anual. Esta es la Ley de Moore.

A medida que los componentes se han vuelto más pequeños, más densos, más rápidos y más baratos, han hecho que aumente la

potencia y se reduzcan los costes de muchos productos y servicios, en particular de los ordenadores y los teléfonos móviles. El resultado ha sido una revolución de la electrónica.

Pero esta revolución ha sido tanto una suerte como una desgracia, pues ha tenido el efecto no deseado de elevar las expectativas sobre el progreso técnico. Se nos aseguró que el rápido progreso enseguida traería consigo coches autónomos eléctricos, la cura personalizada para el cáncer y la impresión 3D instantánea de corazones y riñones. Incluso se nos dice que despejará el camino para la transición mundial de los combustibles fósiles a las energías renovables.

Pero el tiempo que tarda en doblarse la densidad de transistores no es un buen indicador del progreso técnico en un sentido amplio. La vida moderna depende de muchos procesos que mejoran a un ritmo muy lento, entre los que cabe destacar la producción de alimentos y energía, y el transporte de bienes y personas. Un ritmo lento que no solo era predominante en los avances previos a 1950, sino también para mejoras e innovaciones esenciales que coincidieron con el desarrollo de los transistores (cuya primera aplicación comercial fue en audífonos en 1952).



El maíz, el más importante cultivo estadounidense, ha visto cómo su rendimiento promedio aumenta en un 2 por ciento anual desde 1950. El rendimiento del arroz, el principal alimento de primera necesidad en China, ha venido creciendo en torno a un 1,6 por ciento anual a lo largo de los últimos cincuenta años. A lo largo del siglo XX, la eficiencia con la que los turbogeneradores de vapor transforman energía térmica en electricidad aumentó cada año en alrededor del 1,5 por ciento; por otra parte, si comparamos los turbogeneradores de vapor de 1900 con las centrales eléctricas de ciclo combinado de 2000 (que conjugan turbinas de gas con calderas de vapor), ese incremento anual asciende al 1,8 por ciento. Los avances en iluminación han sido más impresionantes que en cualquier otro ámbito de la conversión de electricidad, pero entre 1881 y 2014 la eficacia luminosa (lúmenes por vatio) aumentó en tan solo un 2,6 por ciento para la iluminación de interior, y en un



3,1 por ciento para la de exterior (véase «Por qué la luz solar sigue siendo mejor»).

La velocidad de los viajes intercontinentales aumentó de alrededor de 35 kilómetros por hora para los grandes transatlánticos en 1900 a los 885 kilómetros por hora del Boeing 707 en 1957, un incremento medio del 5,6 por ciento anual. Pero la velocidad de los aviones de pasajeros se ha mantenido básicamente constante desde entonces: el Boeing 787 se desplaza unos pocos puntos porcentuales más rápido que el 707. Entre 1973 y 2014, la eficiencia de combustible de los nuevos automóviles de pasajeros en Estados Unidos (incluso tras dejar fuera los monstruosos vehículos utilitarios deportivos y camionetas) creció a un ritmo anual de apenas el 2,5 por ciento, de 17,4 a 6,4 litros cada 100 kilómetros. Y, por último, el coste energético del acero (coque, gas natural y electricidad), el metal esencial de nuestra civilización, se redujo de en torno a 50 gigajulios por tonelada a menos de 20 entre 1950 y 2010; esto es, una variación anual de alrededor del -1,7 por ciento.

Los elementos fundamentales energéticos, materiales y de transporte que hacen posible el funcionamiento de la civilización moderna y limitan su ámbito de acción están mejorando de manera lenta pero gradual. Tanto las ganancias en rendimiento como las reducciones de coste por lo general oscilan entre el 1,5 y el 3 por ciento.

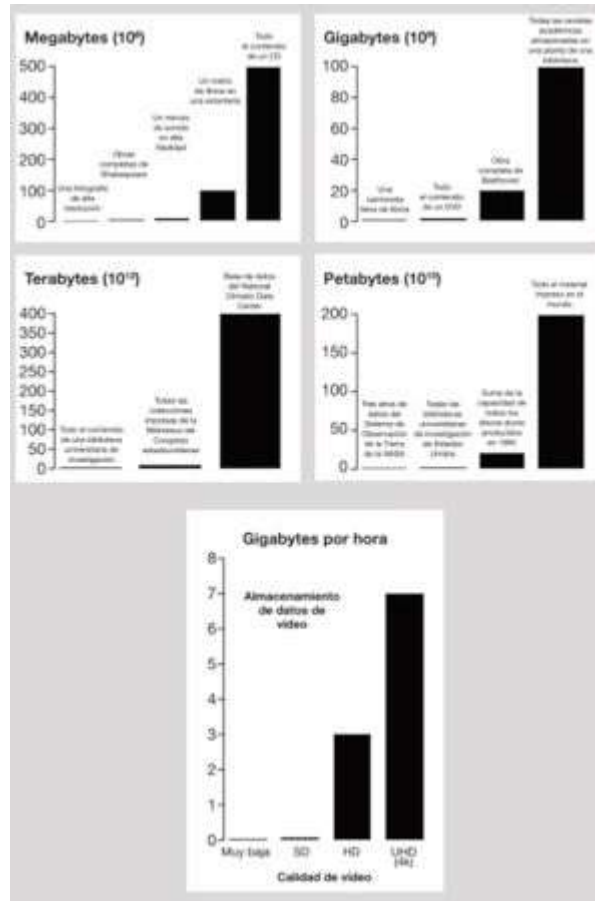
Así pues, fuera del mundo dominado por los microchips, la innovación sencillamente no sigue la Ley de Moore, sino que avanza a un ritmo en orden de magnitud inferior al de esta.

### § 30. La irrupción de los datos: demasiados y demasiado rápido

En épocas pasadas, la información solo se almacenaba en el cerebro humano, y los bardos de antaño podían pasar horas contando historias de conflictos y conquistas. Después se inventó el almacenamiento externo.

Los pequeños cilindros y tabletas de barro inventados en Sumeria, en el sur de Mesopotamia, hace unos cinco mil años, solían contener apenas una docena de caracteres cuneiformes en ese antiguo idioma, equivalente a unos pocos cientos ( $10^2$ ) de bytes. La *Oresteia*, una trilogía de tragedias griegas escrita por Esquilo en el siglo V a. C., suma en torno a 300.000 ( $10^5$ ) bytes. Algunos senadores adinerados en la Roma imperial poseían bibliotecas que albergaban cientos de pergaminos; una colección extensa contenía al menos 100 megabytes ( $10^8$  bytes).

La imprenta de Johannes Gutenberg, que empleaba tipos móviles, supuso un cambio radical. En 1500, menos de medio siglo tras su introducción, las imprentas europeas habían publicado más de 11.000 nuevas ediciones de libros. Esta extraordinaria irrupción vino acompañada de avances en otras formas de almacenamiento de la información. Primero llegaron los grabados y xilografías de partituras musicales, ilustraciones y mapas. A continuación, en el siglo XIX, las fotografías, las grabaciones sonoras y las películas.



Entre los nuevos modos de almacenamiento de la información que se incorporaron durante el siglo XX están las cintas magnéticas y los discos de larga duración, y a principios de la década de 1960 los ordenadores ampliaron el alcance de la digitalización hasta las imágenes médicas (una mamografía digital ocupa 50 megabytes), las películas de animación (2-3 gigabytes), las transferencias financieras intercontinentales y, con el tiempo, el masivo correo electrónico no deseado o *spam* (del que se envían más de 100 millones de mensajes por minuto). Esta información almacenada en forma digital enseguida sobrepasó al total de los materiales impresos. La totalidad de las obras y los poemas de Shakespeare ascienden a 5 megabytes, el equivalente de una sola fotografía de

alta resolución, de 30 segundos de sonido de alta fidelidad o de 8 segundos de vídeo de alta definición en *streaming*.

Así pues, los materiales impresos se han visto reducidos a ser un componente marginal de toda la información almacenada. En el año 2000, todos los libros de la Biblioteca del Congreso estadounidense sumaban más de  $10^{13}$  bytes (más de 10 terabytes), lo cual suponía menos del 1 por ciento del conjunto de la colección (del orden de  $10^{15}$  bytes, unos 3 petabytes), si se tienen en cuenta todas las fotografías, mapas, películas y grabaciones sonoras.

En el siglo XXI, la información se genera a una velocidad cada vez mayor. En su más reciente sondeo de los datos que se generan por segundo, de 2018, el servicio de computación en la nube Domo contabilizó, solo en Estados Unidos, más de 97.000 horas de vídeo transmitido por Netflix, casi 4,5 millones de vídeos visionados en YouTube, algo más de 18 millones de solicitudes de previsión meteorológica en el Weather Channel y más de 3.000 billones de bytes (3,1 petabytes) en otros datos usados en internet. En 2016, la tasa anual de creación de datos en todo el mundo superó los 16 zettabytes (1 ZB equivale a  $10^{21}$  bytes) y, para 2025, se espera que aumente en otro orden de magnitud hasta unos 160 zettabytes ( $10^{23}$  bytes). Según Domo, en 2020 se generan cada segundo 1,7 megabytes de datos por cada una de las casi 8.000 millones de personas que pueblan el planeta.

Estas cifras suscitan varias preguntas evidentes. Solo se puede almacenar una pequeña parte del aluvión de datos, pero ¿qué parte debería ser esta? Las dificultades de almacenamiento son evidentes

incluso si solo se preserva un 1 por ciento de este flujo de datos. Para lo que sea que decidamos almacenar, la siguiente pregunta es: ¿durante cuánto tiempo deberían preservarse los datos? Ningún almacenamiento tiene que durar para siempre, pero ¿cuál es su longevidad óptima?

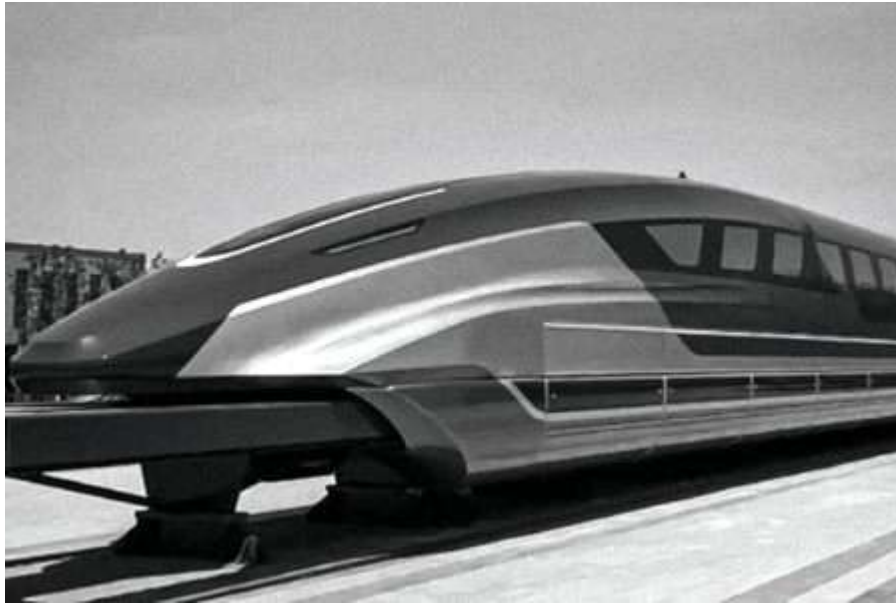
En el sistema internacional de unidades (en el cual mil es  $k = 10^3$  y un millón es  $M = 10^6$ ), el prefijo más alto es yotta- ( $Y = 10^{24}$ , un billón de billones). Dentro de una década tendremos esa cantidad de bytes, y será cada vez más difícil analizarlos, aunque esta sea una tarea encomendada cada vez en mayor medida a máquinas. Una vez que empecemos a crear más de 50 billones de bytes de información por persona y por año, ¿habrá alguna posibilidad real de hacer un uso efectivo de ella? Al fin y al cabo, existen diferencias fundamentales entre datos acumulados, información útil y conocimiento profundo.

### § 31. Ser realistas sobre la innovación

Las sociedades modernas están obsesionadas con la innovación. A finales de 2019, las búsquedas en Google ofrecían 3.210 millones de resultados para «innovación», superando de largo a «terrorismo» (481 millones), «crecimiento económico» (en torno a mil millones) y «calentamiento global» (385 millones). Hemos de creer que la innovación abrirá cualquier puerta imaginable: a esperanzas de vida muy por encima de los cien años, a la fusión de la conciencia humana y la inteligencia artificial, a una energía solar prácticamente gratuita.

Esta genuflexión acrítica ante el altar de la innovación es errónea en dos sentidos: ignora las importantes y fundamentales aventuras que han acabado en fracaso tras gastar ingentes sumas de dinero en investigación, y tiene bien poco que decir sobre por qué tan a menudo nos aferramos a prácticas inferiores incluso aunque sepamos que existen maneras de proceder superiores.

El reactor reproductor rápido, así llamado porque produce más combustible nuclear del que consume, es uno de los ejemplos más notables de un prolongado y costoso fracaso de la innovación. En 1974, General Electric predijo que, para el año 2000, alrededor del 90 por ciento de la electricidad en Estados Unidos procedería de reactores reproductores rápidos. General Electric se limitaba a reflejar una expectativa muy extendida: durante los años setenta los gobiernos de Francia, Japón, la Unión Soviética, Reino Unido y Estados Unidos invirtieron grandes sumas en el desarrollo de los reproductores. Pero los elevados costes, problemas técnicos e inquietudes medioambientales llevaron a la cancelación de los programas británico, francés, japonés y estadounidense (así como de los más modestos programas alemán e italiano), mientras que China, India, Japón y Rusia aún mantienen en funcionamiento reactores experimentales. Después de que el mundo dedicase en conjunto más de 100.000 millones de dólares al cambio actual a lo largo de seis décadas de esfuerzo, todavía no se han obtenido resultados comerciales.



*Prototipo de tren de levitación magnética presentado en 2019 por la China Railway Rolling Stock Corporation.*

Algunas otras innovaciones fundamentales que se prometieron pero que aún no han tenido concreción práctica son los automóviles impulsados con hidrógeno (pilas de combustible), los trenes de levitación magnética (*maglev*) y la energía termonuclear. Esta última quizá sea el ejemplo más notorio de una innovación que nunca acaba de llegar.

La segunda categoría de innovaciones fallidas —cosas que seguimos haciendo aunque sabemos que no deberíamos— abarca desde prácticas cotidianas a conceptos teóricos.

Dos ejemplos incómodos son el horario de verano y el proceso de embarque en los aviones. ¿Por qué seguimos cambiando la hora dos veces al año, con la justificación del ahorro energético, cuando sabemos que ese ahorro en realidad no es tal? Ahora se tarda más en embarcar en los vuelos comerciales que durante los años setenta, a pesar de que sabemos que existen varios métodos más

rápidos que los ineficientes de hoy en día. Por ejemplo, podríamos sentar a los pasajeros siguiendo una pirámide invertida, o bien hacerlos embarcar por la parte delantera y la trasera al mismo tiempo (distribuyéndolos para evitar cuellos de botella), o simplemente acabar con la asignación de asientos.

¿Y por qué medimos el progreso de las economías mediante el producto interior bruto? El PIB no es más que el valor total de todos los bienes y servicios producidos en un país durante un año. Crece no solo cuando la calidad de vida mejora y la economía progresa, sino también cuando a las personas o al medioambiente les ocurren cosas malas. Si aumenta la venta de alcohol, hay más conductores ebrios frente al volante, más accidentes, más ingresos en urgencias, más lesiones y más personas acaban en la cárcel, el PIB crece. Si hay más tala ilegal en el trópico, más deforestación y pérdida de biodiversidad, y aumentan las ventas de madera, de nuevo el PIB crece. Sabemos que no deberíamos hacerlo, pero seguimos rindiendo pleitesía a una elevada tasa de crecimiento del PIB, con independencia de cuál sea su origen.

La mente humana tiene muchas preferencias irracionales: nos encanta especular sobre innovaciones descabelladas y disparatadas, pero en lugar de molestarnos en resolver los problemas cotidianos confiamos en que lleguen innovaciones prácticas que aún no se han concretado. ¿Por qué no mejoramos el proceso de embarque en los aviones en lugar de engañarnos con espejismos de trenes *hyperloop* y vida eterna?



## Capítulo 4

### Combustibles y electricidad

#### La energía de nuestras sociedades

##### *Contenido:*

*§ 32. Por qué las turbinas de gas son la mejor opción*

*§ 33. Electricidad nuclear: una promesa incumplida*

*§ 34. Por qué necesitamos combustibles fósiles para obtener electricidad del viento*

*§ 35. ¿Qué tamaño puede llegar a tener una turbina?*

*§ 36. La lenta irrupción de las células fotovoltaicas*

*§ 37. Por qué la luz solar sigue siendo la mejor*

*§ 38. Por qué necesitamos baterías más grandes*

*§ 39. Por qué no es fácil tener buques portacontenedores eléctricos*

*§ 40. El verdadero coste de la electricidad*

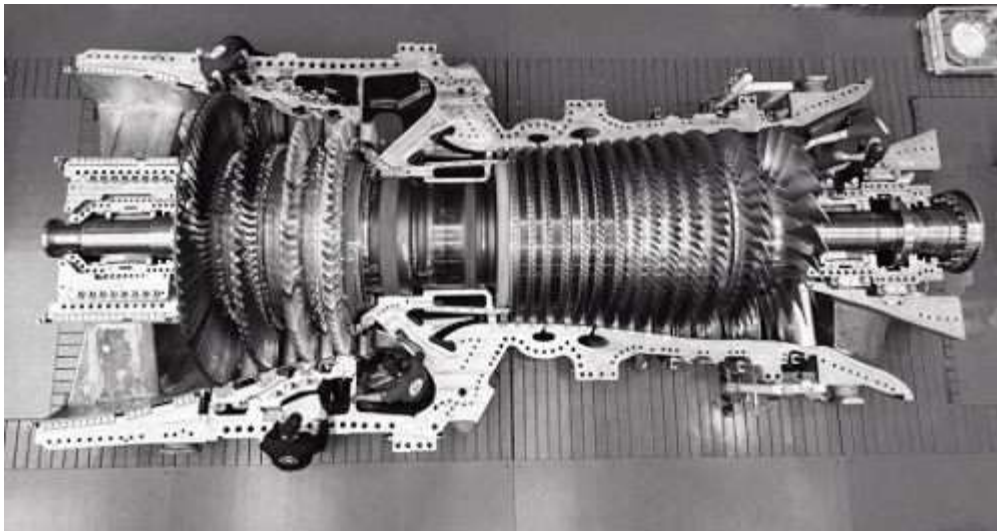
*§ 41. El ritmo inevitablemente lento de las transiciones energéticas*

§ 32. Por qué las turbinas de gas son la mejor opción

En 1939, la primera turbina de gas industrial empezó a generar electricidad en una central eléctrica municipal en la localidad suiza de Neuchâtel. La máquina, instalada por Brown Boveri, emitía los gases de escape sin aprovechar su calor, y el compresor de la turbina consumía casi tres cuartas partes de la potencia generada. Todo ello resultaba en una eficiencia del 17 por ciento, en torno a los 4 megavatios.

La disrupción de la Segunda Guerra Mundial y las dificultades económicas que vinieron después hicieron de la turbina de Neuchâtel una excepción pionera hasta 1949, cuando Westinghouse y General Electric introdujeron sus primeros diseños de potencia limitada. No hubo prisa por instalarlas, ya que el mercado estaba dominado por las grandes centrales de carbón, que generaban la energía menos costosa. Para 1960, la turbina de gas más potente alcanzó los 20 megavatios, aún un orden de magnitud inferior a la potencia producida por la mayoría de los turbogeneradores de vapor.

En noviembre de 1965, el gran apagón eléctrico ocurrido en la región noreste de Estados Unidos hizo que muchos cambiasen de opinión: las turbinas de gas podían funcionar a plena carga en cuestión de minutos. Pero el aumento de los precios del petróleo y el gas, junto con una ralentización de la demanda de electricidad, impidieron la rápida expansión de la nueva tecnología.



*Interior de una turbina de gas de gran tamaño.*

El cambio no se produjo hasta finales de los años ochenta; en 1990,

casi la mitad de toda la capacidad nueva de generación de electricidad instalada en Estados Unidos provenía de turbinas de gas cada vez más potentes, fiables y eficientes.

Pero incluso una eficiencia superior al 40 por ciento produce gases de escape a unos 600 grados Celsius, temperatura suficiente para generar vapor en una turbina de vapor aneja. Este tándem de turbina de gas y turbina de vapor —una turbina de gas de ciclo combinado (TGCC)— que se desarrolló por primera vez a finales de los años sesenta, tiene una eficiencia, en el mejor de los casos, superior al 60 por ciento. No hay otro motor primario que sea menos derrochador.

Hoy en día, Siemens ofrece una TGCC pensada para compañías eléctricas que opera con una eficiencia del 63 por ciento y que produce 593 megavatios, una potencia casi cuarenta veces superior a la de la máquina de Neuchâtel. La turbina de gas 9HA de General Electric proporciona 571 megavatios cuando funciona por sí sola (generación de ciclo sencillo) y 661 megavatios (con una eficiencia del 63,5 por ciento) cuando se conecta a una turbina de vapor (TGCC).

Las turbinas de gas son los suministradores ideales de potencia de pico y los mejores sistemas de respaldo para la intermitente generación eólica y solar. En Estados Unidos son en estos momentos con diferencia la opción más asequible para nuevas instalaciones de generación eléctrica. Se estima que el coste nivelado de la electricidad (una medida del coste de un proyecto energético a lo largo de su ciclo de vida) para nuevas instalaciones

que entren en funcionamiento en 2023 rondará los 60 dólares por megavatio-hora para los turbogeneradores de vapor de carbón con captura parcial de carbono, 48 dólares por megavatio-hora para solares fotovoltaicas, y 40 dólares por megavatio-hora para eólicas en tierra, pero menos de 30 dólares por megavatio-hora para turbinas de gas convencionales y menos de 10 dólares por megavatio-hora para TGCC.

Las turbinas de gas también se utilizan en todo el mundo para la producción combinada de electricidad y calor. En muchas industrias se necesitan vapor y agua caliente, que también se utilizan para alimentar los sistemas de calefacción central, particularmente habituales en muchas grandes ciudades europeas. Estas turbinas se han utilizado incluso para calentar e iluminar invernaderos holandeses de grandes dimensiones, que obtienen el beneficio adicional del dióxido de carbono que se genera, ya que acelera el crecimiento de las plantas. Las turbinas de gas también impulsan los compresores en muchas empresas industriales y en las estaciones de bombeo de oleoductos de larga distancia.

El veredicto es claro: ninguna otra máquina de combustión combina tantas ventajas como las turbinas de gas modernas. Son compactas, fáciles de transportar y de instalar, relativamente silenciosas, asequibles y eficientes, ofrecen un rendimiento casi instantáneo y pueden funcionar sin refrigeración por agua. Todo lo anterior hace de ellas máquinas sin rival a la hora de proporcionar tanto energía mecánica como calor.

¿Qué hay de su longevidad? La turbina de Neuchâtel dejó de

funcionar en 2002, tras 63 años en funcionamiento; no fue debido a ningún fallo de la máquina, sino a una avería del generador.

### § 33. Electricidad nuclear: una promesa incumplida

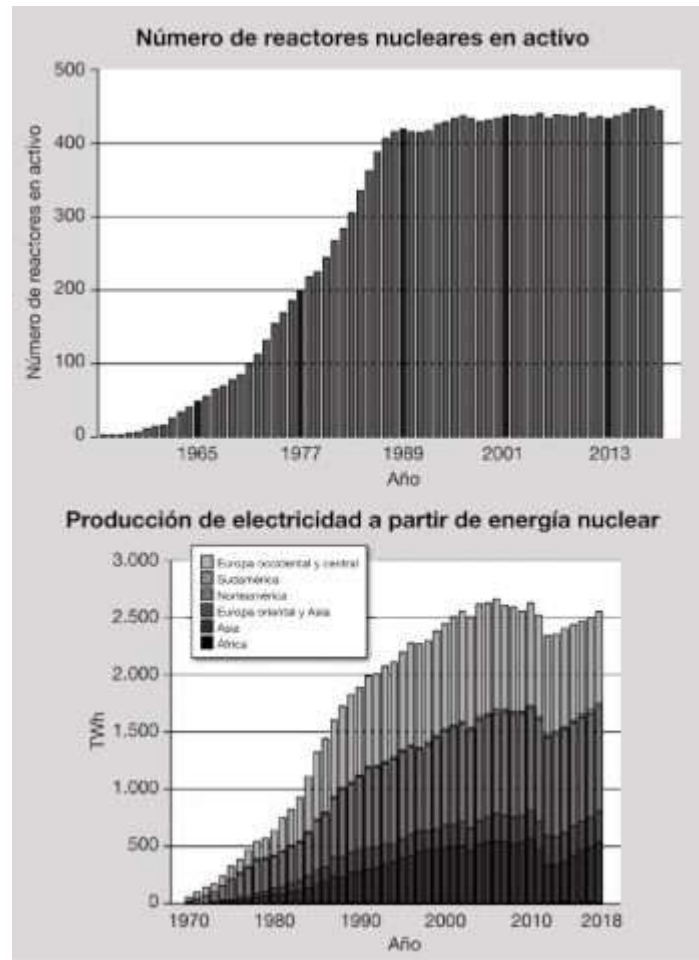
La era de la generación comercial de electricidad nuclear se inició el 17 de octubre de 1956, cuando la reina Isabel II activó Calder Hall, en la costa noroeste de Inglaterra. Sesenta años es tiempo suficiente para emitir un juicio sobre la tecnología, y aún no he sido capaz de superar mi valoración de hace más de una década: «un exitoso fracaso».

La parte exitosa está bien documentada. Tras un comienzo lento, la construcción de reactores empezó a acelerarse a finales de los años sesenta, y en 1977 más del 10 por ciento de la electricidad en Estados Unidos procedía de la fisión, cifra que se elevó hasta el 20 por ciento en 1991. Esta es una penetración más rápida que la que fotovoltaicas y turbinas eólicas han conseguido desde los años noventa.

A finales de 2019, en el mundo había 449 reactores en funcionamiento (y 53 en construcción), muchos de ellos con factores de planta superiores al 90 por ciento. Esta magnitud mide el porcentaje de la potencia máxima que el reactor produce de media a lo largo de un año; es más del doble de electricidad que la suma de células fotovoltaicas y turbinas eólicas. En 2018, la energía nuclear proporcionó la cuota más elevada de electricidad en Francia (en torno al 72 por ciento); el 50 por ciento en Hungría; los reactores suizos aportaron el 38 por ciento; en Corea del Sur, esta cifra fue

del 24 por ciento; por su parte, en Estados Unidos no alcanzó el 20 por ciento.

La parte de «fracaso» es la relativa a las expectativas insatisfechas. La afirmación de que la electricidad a partir de energía nuclear sería «demasiado barata para medirla» no es apócrifa: es lo que Lewis L. Strauss, presidente de la Comisión Estadounidense para la Energía Atómica en 1954, declaró a la Asociación Nacional de Escritores Científicos en Nueva York en septiembre de ese año. Después llegarían otras afirmaciones igualmente atrevidas. En 1971, Glenn Seaborg, Premio Nobel y por aquel entonces presidente de la Comisión para la Energía Atómica, predijo que, en el año 2000, los reactores nucleares generarían prácticamente toda la electricidad mundial. Seaborg imaginaba gigantescos «nuplejos» que desalarían el agua marina; satélites geoestacionarios impulsados por reactores nucleares compactos para la difusión de programas televisivos; petroleros movidos por energía nuclear; y explosivos nucleares que alterarían el curso de los ríos y permitirían excavar ciudades subterráneas. Además, la propulsión nuclear llevaría hombres a Marte.



Pero el proyecto de generar electricidad a partir de la fisión nuclear se estancó durante los años ochenta, cuando cayó la demanda de electricidad en las economías ricas y se multiplicaron los problemas con los reactores nucleares. Tres de estos fallos fueron alarmantes: los accidentes en Three Mile Island, Pensilvania, en 1979; en Chernóbil, Ucrania, en 1986; y en Fukushima, Japón, en 2011, proporcionaron argumentos adicionales a quienes se oponían a la fisión para cualquier uso.

Entretanto, ha habido sobrecostos en la construcción de nuevas centrales nucleares y una frustrante incapacidad de encontrar una forma segura y permanente de almacenar los residuos del proceso

(actualmente dispuestos de forma temporal en las propias centrales). Como tampoco ha habido gran éxito a la hora de pasar a reactores más seguros y menos costosos que el diseño de reactor dominante de agua presurizada, que son básicamente versiones trasladadas a tierra de los utilizados en los submarinos estadounidenses de los años cincuenta.

Como consecuencia, el público occidental sigue teniendo dudas, las empresas productoras de electricidad se muestran recelosas, Alemania y Suecia tienen previsto clausurar toda su industria nuclear, e incluso Francia se plantea reducirla. Los reactores que están en construcción en todo el mundo no podrán compensar la capacidad que se perderá a medida que los reactores antiguos vayan cerrándose en los próximos años.

Las únicas economías destacadas que cuentan con importantes planes de expansión están en Asia, con China e India a la cabeza, pero incluso estos países pueden hacer poco por invertir la disminución en el porcentaje de electricidad que se genera en todo el mundo procedente de la energía nuclear. Dicho porcentaje alcanzó su valor máximo de casi un 18 por ciento en 1996, cayó hasta el 10 por ciento en 2018, y se espera que remonte hasta apenas el 12 por ciento en 2040, según la Agencia Internacional de la Energía.

Hay muchas cosas que podríamos hacer —empezando por mejorar el diseño de los reactores y actuar con determinación para resolver la cuestión del almacenamiento de los residuos nucleares— para generar una parte sustancial de la electricidad a partir de la fisión



nuclear, y limitar así las emisiones de carbono. Pero esto requeriría una evaluación no sesgada de los datos y abordar la política energética global con una estrategia que fuese realmente a largo plazo. No veo indicios ni de lo uno ni de lo otro.

### § 34. Por qué necesitamos combustibles fósiles para obtener electricidad del viento

Las turbinas eólicas son los símbolos más visibles del afán por conseguir generar electricidad de forma renovable. Pero, a pesar de que aprovechan el viento, una energía que no podría ser más ecológica ni más gratuita, las máquinas en sí son la pura encarnación de los combustibles fósiles.

Enormes camiones llevan hasta su emplazamiento acero y otras materias primas, maquinaria para mover tierra despeja el camino hasta un promontorio hasta entonces inaccesible, grandes grúas erigen las estructuras... y todas estas máquinas consumen combustible diesel. Como también lo hacen los trenes de mercancías y los buques cargueros que transportan los materiales necesarios para la producción de cemento, acero y plásticos. Solo en acero, una turbina de 5 megavatios necesita en torno a 150 toneladas para los cimientos de hormigón reforzado, 250 toneladas para los bujes del rotor y las góndolas (que albergan los engranajes y el generador) y 500 toneladas para las torres.

Si en 2030 la electricidad generada a partir de energía eólica llegase a satisfacer el 25 por ciento de la demanda global, entonces incluso con un elevado valor medio del factor de planta del 35 por ciento, el

conjunto de la potencia eólica instalada, de alrededor de 2,5 teravatios, requeriría unos 450 millones de toneladas de acero. Sin incluir el metal de las torres, el cableado y los transformadores para los nuevos enlaces de transmisión de alta tensión que se necesitarían para conectarlo todo a la red eléctrica.



*Enorme álabes de plástico de una moderna turbina eólica: difícil de fabricar, más difícil de transportar y aún más difícil de reciclar.*

En la producción de acero se invierte una enorme cantidad de energía. El mineral de hierro sinterizado o granulado se funde en altos hornos, cargados con coque obtenido a partir de carbón, y recibe infusiones de carbón en polvo y gas natural. El arrabio (el hierro que se produce en los altos hornos) se descarboniza en hornos de oxígeno básico. A continuación, el acero se somete a procesos de moldeado continuo (que hacen que el acero fundido adopte directamente la forma aproximada del producto final). El acero que se emplea en la construcción de turbinas por lo general requiere unos 35 gigajulios por tonelada.

Para producir el acero necesario para las turbinas eólicas que podrían estar en funcionamiento en 2030, se necesitaría una cantidad de combustibles fósiles equivalente a más de 600 millones de toneladas de carbón.

Una turbina de 5 megavatios tiene tres álabes de unos 60 metros de longitud, cada uno de los cuales pesa alrededor de 15 toneladas. Poseen un núcleo ligero de madera de balsa o espuma y laminaciones exteriores hechas en su mayoría de epoxi reforzado con fibra de vidrio o de resinas de poliéster. El vidrio se fabrica fundiendo dióxido de silicio y otros óxidos minerales en hornos alimentados por gas natural. Las resinas empiezan como etileno derivado de hidrocarburos ligeros (lo más habitual es que sean productos del craqueo de nafta, gas licuado del petróleo o el etano presente en el gas natural).

El compuesto final reforzado con fibra de vidrio requiere del orden de 170 gigajulios por tonelada. Además, para que en 2030 se alcancen los 2,5 teravatios de potencia eólica instalada, se necesitaría un total de 23 millones de toneladas en rotores, que requerirían el equivalente de unos 90 millones de toneladas de crudo. Y cuando todo esté instalado, toda la estructura deberá impermeabilizarse usando resinas para cuya síntesis se parte del etileno. Otro derivado del petróleo que se necesita es el lubricante para la transmisión de las turbinas, que debe reponerse periódicamente durante las dos décadas de vida útil de la máquina. Con toda seguridad, en menos de un año una turbina eólica bien emplazada y bien construida generará tanta energía como la que se

empleó en su producción. Sin embargo, toda ella será en forma de electricidad intermitente, mientras que su producción, instalación y mantenimiento siguen dependiendo de manera esencial de determinadas energías de fuentes fósiles. Además, para la mayoría de estas energías —el coque para la fundición del mineral de hierro; el carbón y el coque de petróleo para alimentar los hornos de cemento; la nafta y el gas natural como materia prima y combustible para la síntesis de plásticos y la fabricación de fibra de vidrio; el combustible diesel para barcos, camiones y maquinaria de construcción; el lubricante para la transmisión de las turbinas— no contamos con sustitutos no fósiles fácilmente disponibles a las enormes escalas comerciales necesarias.

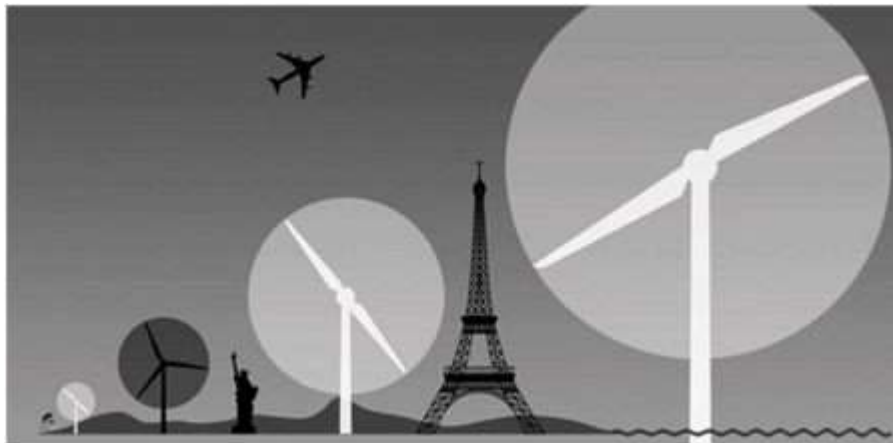
Durante mucho tiempo —hasta que todas las fuentes de energía utilizadas para producir turbinas eólicas y células fotovoltaicas sean renovables— la civilización moderna seguirá dependiendo de manera fundamental de los combustibles fósiles.

### § 35. ¿Qué tamaño puede llegar a tener una turbina?

No cabe duda de que el tamaño de las turbinas eólicas ha aumentado. Cuando la empresa danesa Vestas inició la senda hacia el gigantismo en 1981, sus máquinas de tres álabes no generaban más de 55 kilovatios. Esa cifra subió hasta los 500 kilovatios en 1995, alcanzó los 2 megavatios en 1999, y hoy asciende a 5,6 megavatios. En 2021, la V164 de MHI Vestas Offshore Wind tendrá una altura de 105 metros, hará rotar álabes de 80 metros y generará hasta 10 megavatios, lo que la convertirá en la primera

turbina comercial capaz de generar megavatios de potencia de dos dígitos. Para no quedarse atrás, GE Renewable Energy ha desarrollado una máquina de 14 megavatios con una torre de 260 metros y álabes de 107 metros, que también llegará en 2021.

Esto supone un claro avance, aunque cabe señalar que se han planteado diseños de mayor tamaño. En 2011, el proyecto UpWind publicó lo que denominó un «prediseño» de una máquina marina de 20 megavatios cuyo rotor tenía un diámetro de 252 metros (tres veces la envergadura de un Airbus A380) y cuyo buje medía 6 metros de diámetro. Hasta la fecha, el límite de los mayores diseños conceptuales se sitúa en 50 megavatios, con una altura superior a los 300 metros y álabes de 200 metros capaces de plegarse (como las hojas de palma) en situaciones muy ventosas.



*Comparación de la altura de varias turbinas eólicas y el diámetro de sus álabes.*

Dar a entender, como hizo un entusiasta promotor, que construir una estructura como esa no plantearía problemas técnicos fundamentales porque su altura no supera a la de la torre Eiffel, erigida hace más de 130 años, es optar por una comparación

inadecuada. Si la altura construible de un artefacto fuese lo que limitase el diseño de una turbina eólica, podríamos tomar como referencia el Burj Khalifa de Dubái, un rascacielos que superó los 800 metros en 2010, o la torre Jeddah, que alcanzará los 1.000 metros en 2021. Erigir una torre de esas proporciones no supone un gran problema, pero algo bastante distinto es diseñar una torre de tal altura capaz de soportar una góndola y unos álabes enormes durante muchos años de funcionamiento seguro.

Las turbinas más grandes tienen que abordar las ineludibles consecuencias del aumento de tamaño. La potencia de una turbina aumenta con el cuadrado del radio que barren sus álabes: una turbina cuyas paletas fuesen el doble de largas sería, teóricamente, cuatro veces más potente. Pero la ampliación de la superficie que barre el rotor incrementa la tensión que ha de soportar el conjunto de la estructura, y puesto que la masa de los álabes debería (en primera aproximación) aumentar de manera proporcional al cubo de la longitud de las paletas, los diseños de mayor tamaño deberían ser extraordinariamente pesados. En la práctica, los diseños que emplean materiales sintéticos ligeros y madera de balsa permiten reducir el exponente real hasta valores tan pequeños como 2,3.

Aun así, la masa total (y por lo tanto el coste) no deja de aumentar. Cada uno de los tres álabes de la máquina de 10 megavatios de Vestas pesará 35 toneladas, mientras que la góndola alcanzará casi las 400 toneladas (esta última masa equivale a elevar varios cientos de metros seis tanques Abrams de combate). El diseño de récord de GE tendrá álabes de 55 toneladas, una góndola de 600 toneladas y

una torre de 2.550 toneladas. El mero hecho de transportar unos álabes de longitud y peso tan descomunal constituye un reto extraordinario, aunque un diseño segmentado podría hacer que fuese más fácil.

Explorar los límites probables de la capacidad comercial es más útil que pronosticar máximos concretos para fechas determinadas. La potencia disponible de una turbina eólica es igual a la mitad de la densidad del aire (que es de 1,23 kilogramos por metro cúbico) multiplicada por la superficie que barren los álabes (el número pi multiplicado por el radio de los álabes al cuadrado) y por la velocidad del viento al cubo. Si suponemos una velocidad del viento de 12 metros por segundo y un coeficiente de conversión energética de 0,4, una turbina de 100 megavatios podría requerir rotores de casi 550 metros de diámetro.

Para predecir cuándo dispondremos de una máquina así, solo hay que responder a la siguiente pregunta: ¿cuándo seremos capaces de construir álabes de 275 metros hechos de compuestos plásticos y madera de balsa, resolver su transporte y su acoplamiento a góndolas suspendidas a 300 metros del suelo, asegurar su supervivencia frente a vientos ciclónicos y garantizar su funcionamiento estable durante al menos 15 o 20 años?

### § 36. La lenta irrupción de las células fotovoltaicas

En marzo de 1958 despegó un cohete de Cabo Cañaveral llevando a bordo el satélite Vanguard 1: una pequeña esfera de aluminio de 1,46 kilogramos que fue el primero en usar células fotovoltaicas en

órbita.

Como salvaguarda, uno de los dos transmisores del satélite se alimentaba con baterías de mercurio, que fallaron al cabo de solo dos meses. Gracias al efecto fotoeléctrico, las seis pequeñas celdas monocristalinas de silicio —que absorben luz (fotones) a escala atómica y emiten electrones— podían proporcionar una potencia total de apenas 1 vatio, y siguieron alimentando un transmisor de baliza hasta mayo de 1964.

Fue así porque, en el espacio, no había consideraciones de coste. A mediados de los años cincuenta, el coste de las células fotovoltaicas era de unos 300 dólares por vatio. Se redujo hasta los 80 dólares por vatio a mediados de los setenta, hasta 10 dólares por vatio a finales de los ochenta, hasta 1 dólar por vatio en 2011; a finales de 2019, las células fotovoltaicas se vendían por solo entre 8 y 12 centavos por vatio, y su coste sin duda seguirá disminuyendo en el futuro (por supuesto, el coste de instalar paneles de células fotovoltaicas y el equipamiento asociado para generar electricidad es sustancialmente más elevado, y depende de la magnitud del proyecto, que puede ir desde pequeñas instalaciones de tejado hasta enormes campos solares en el desierto).

Estas son buenas noticias, porque las células fotovoltaicas poseen una densidad de potencia más elevada que cualquier otra forma de conversión de energía renovable. Incluso ya alcanzan en promedio anual los 10 vatios por metro cuadrado en lugares soleados, una densidad más de un orden de magnitud superior a la de los biocombustibles. Y, con crecientes eficiencias de conversión y



mejoras en la orientación, debería ser posible incrementar los factores de planta anuales entre un 20 y un 40 por ciento.



*Vista aérea de la central eléctrica de Ouarzazate Noor en Marruecos.  
Con 510 MW, es la mayor central de energía solar y la mayor  
instalación fotovoltaica del mundo.*

Pero se ha tardado un tiempo en llegar hasta este punto. En 1839, Edmond Becquerel describió por primera vez el efecto fotoeléctrico en una disolución, y en 1876, William Adams y Richard Day lo descubrieron en el selenio. Las oportunidades comerciales no se abrieron hasta que la célula de silicio se inventó en los Laboratorios Bell en 1954. Incluso entonces, el coste por vatio se situaba en

torno a los 300 dólares (más de 2.300 dólares al cambio actual), y salvo su uso en unos pocos juguetes, las células fotovoltaicas simplemente no eran prácticas.

Fue Hans Ziegler, un ingeniero electrónico del ejército estadounidense, quien consiguió que la Marina de Estados Unidos cambiase su decisión inicial de usar solo baterías en el Vanguard. Durante los años sesenta, las células fotovoltaicas permitieron alimentar satélites mucho más grandes que revolucionaron las telecomunicaciones, el espionaje desde el espacio, la previsión meteorológica y la vigilancia de ecosistemas. A medida que los costes se redujeron, se multiplicaron sus aplicaciones y las células fotovoltaicas empezaron a proporcionar energía a las luces en faros, plataformas marinas de extracción de petróleo y gas e intersecciones ferroviarias.

Compré mi primera calculadora científica —la Texas Instruments TI-35 Galaxy Solar— cuando apareció en 1985. Sus cuatro células (cada una de unos 170 milímetros cuadrados) aún siguen siéndome de utilidad, más de 30 años después.

Pero la generación de electricidad en serio mediante células fotovoltaicas tuvo que esperar a que los precios de los módulos se redujesen aún más. En el año 2000, la energía generada mediante células fotovoltaicas suponía menos del 0,01 por ciento de la electricidad global; una década más tarde, ese porcentaje había aumentado un orden de magnitud hasta el 0,16 por ciento; en 2018, se situaba en el 2,2 por ciento, aún una parte pequeña en comparación con la electricidad que producen las centrales

hidroeléctricas (casi el 16 por ciento del total mundial en 2018). En algunas regiones soleadas empiezan a dejarse notar los efectos de la generación de electricidad a partir de energía solar, pero en términos globales aún tiene mucho margen que recorrer hasta ponerse a la altura de las caídas de agua.

Ni siquiera la previsión más optimista —la de la Agencia Internacional de las Energías Renovables— espera que la producción mediante células fotovoltaicas reduzca a cero esa brecha antes de 2030. Pero, para esa fecha, las células fotovoltaicas podrían estar produciendo el 10 por ciento de la electricidad mundial. Para entonces, habrán transcurrido unas siete décadas desde que las pequeñas células del Vanguard 1 empezaron a alimentar su transmisor de baliza, y unos 150 años desde que se descubrió el efecto fotovoltaico en un sólido. Las transiciones energéticas a escala global llevan su tiempo.

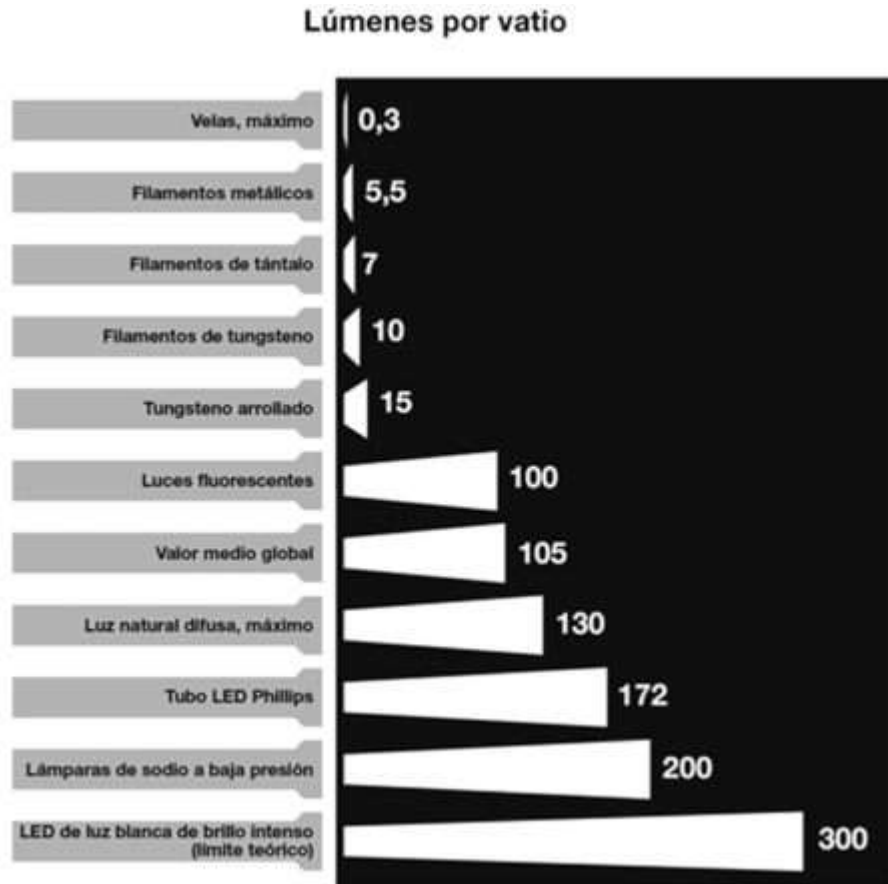
### § 37. Por qué la luz solar sigue siendo la mejor

Se puede trazar a grandes rasgos el avance de la civilización fijándose en el estado de su iluminación; en particular por su potencia, su coste y su eficacia luminosa. Esta última magnitud se refiere a la capacidad de una fuente lumínica de producir una respuesta significativa en el ojo, y es igual al flujo luminoso total (en lúmenes) dividido entre la potencia nominal (en vatios).

En condiciones fotópicas (esto es, con luz intensa, que permite la percepción de los colores), la eficacia luminosa de la luz visible alcanza un máximo de 683 lúmenes por vatio para una longitud de

onda de 555 nanómetros; esto es, en la zona verde del espectro, el color que, para un determinado nivel de potencia, se ve más intenso.

Durante milenios, nuestras fuentes de luz artificial estuvieron tres órdenes de magnitud por debajo de este pico teórico. Las velas solo tenían una eficacia luminosa de entre 0,2 y 0,3 lúmenes por vatio; la de las luces de gas (habituales en las ciudades europeas durante el siglo XIX) era cinco o seis veces superior; los filamentos de carbono de las primeras bombillas de Edison apenas mejoraban ligeramente esos valores. La eficacia mejoró considerablemente con los filamentos metálicos, primero de osmio en 1898 (5,5 lúmenes por vatio), a continuación de tántalo (7 lúmenes por vatio); en torno a una década más tarde, un filamento de tungsteno que radiaba en el vacío llegó a los 10 lúmenes por vatio. Colocar el filamento de tungsteno en una mezcla de nitrógeno y argón elevó la eficacia de las lámparas domésticas normales hasta 12 lúmenes por vatio, y a partir de 1934, arrollar los filamentos ayudó a que la eficacia incandescente superase los 15 lúmenes por vatio para una bombilla de 100 vatios, que era la fuente estándar de luz intensa durante las dos décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial.



Durante la década de 1930 se introdujeron luces basadas en distintos principios —lámparas de sodio a baja presión y de vapor de mercurio a baja presión (luces fluorescentes)—, pero su uso no se extendió hasta los años cincuenta. Hoy en día, las mejores luces fluorescentes con balastos electrónicos pueden producir en torno a 100 lúmenes por vatio; las lámparas de sodio a alta presión emiten hasta 150 lúmenes por vatio y las de sodio a baja presión pueden alcanzar los 200 lúmenes por vatio. Sin embargo, las lámparas de baja presión solo producen luz amarilla monocromática a 589 nanómetros, motivo por el cual no se utilizan en los hogares, sino en la iluminación de las calles.

Ahora tenemos depositadas nuestras máximas esperanzas en los

diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés). Los primeros se inventaron en 1962 y solo proporcionaban luz roja; una década después llegó la azul y más tarde, durante los años noventa, la azul de alta intensidad. Revistiendo esos LED azules con compuestos de fósforo fluorescentes, los ingenieros fueron capaces de convertir parte de la luz azul en colores más cálidos, y así producir luz blanca adecuada para la iluminación de interiores. El límite teórico para los LED de luz blanca de brillo intenso es de unos 300 lúmenes por vatio, pero las lámparas disponibles comercialmente aún distan mucho de alcanzar esa cifra. Phillips vende LED en Estados Unidos —donde el estándar de tensión es de 120 voltios— que ofrecen una eficacia luminosa de 89 lúmenes por vatio en bombillas de 18 vatios de luz blanca cálida y regulable (que sustituyen a las bombillas incandescentes de 100 vatios). En Europa, donde la tensión varía entre 220 y 240 voltios, la empresa vende un tubo LED de 172 lúmenes por vatio (que sustituye los tubos fluorescentes europeos de 1,5 metros de longitud).

Los LED de alta eficacia ya proporcionan un ahorro sustancial de electricidad en todo el mundo (también contribuye a ello que puedan dar luz tres horas al día durante unos 20 años, y que si olvidamos apagarlos apenas lo notaremos en la siguiente factura de la luz). Pero, como ocurre con otras fuentes de luz artificial, aún no pueden competir con el espectro de la luz natural. Las bombillas incandescentes emitían muy poca luz azul, mientras que las fluorescentes apenas daban luz roja; los LED tienen muy poca intensidad en la zona roja del espectro y demasiada en la zona azul.

No acaban de resultar agradables a la vista.

La eficacia luminosa de las fuentes artificiales ha mejorado en dos órdenes de magnitud desde 1880, pero replicar en interiores la luz solar es algo que aún no estamos en condiciones de hacer.

### § 38. Por qué necesitamos baterías más grandes

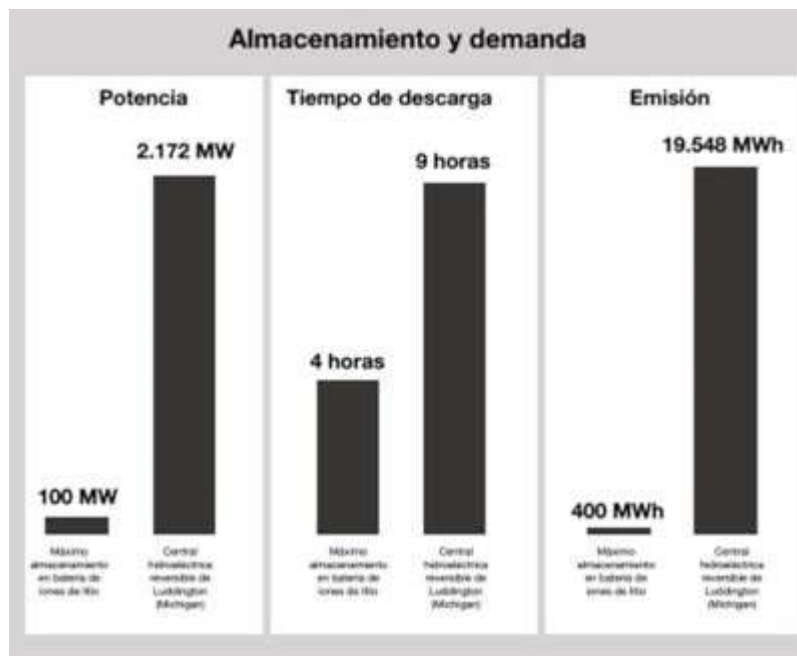
Sería mucho más fácil incrementar el uso que hacemos de la energía solar y eólica si dispusiésemos de mejores maneras de almacenar las grandes cantidades de electricidad que necesitaríamos para cubrir los tiempos muertos en el flujo de esa energía.

Incluso en la soleada Los Ángeles, una casa típica que tenga en su tejado los suficientes paneles fotovoltaicos para satisfacer sus necesidades medias aún tendría que hacer frente a insuficiencias diarias de hasta el 80 por ciento de la demanda en enero, y superávits diarios de hasta el 65 por ciento en mayo. La única manera de desconectar esa casa de la red eléctrica es instalando un voluminoso y costoso conjunto de baterías de iones de litio. E incluso una pequeña red eléctrica nacional —que soporte entre 10 y 30 gigavatios— solo podría depender por completo de fuentes intermitentes si dispusiese de almacenamiento del orden de gigavatios capaz de funcionar durante muchas horas.

Desde 2007, más de la mitad de la humanidad vive en zonas urbanas, y en 2050 más de 6.300 millones de personas, dos tercios de la población mundial, vivirán en ciudades, con un porcentaje creciente de megaciudades de más de 10 millones de habitantes

(véase «El surgimiento de las megaciudades»). La mayoría de esas personas vivirán en rascacielos, por lo que la posibilidad de generación local será limitada, pero necesitarán un suministro de electricidad constante para alimentar sus hogares, servicios, industrias y transportes.

Pensemos en una megaciudad asiática que es azotada por un tifón durante uno o dos días. Incluso si las líneas de larga distancia pudieran suministrar más de la mitad de la demanda de la ciudad, aún se necesitarían muchos gigavatios-hora procedentes del almacenamiento para ir tirando hasta que pudiese restablecerse la generación intermitente (o habría que usar combustible fósil como respaldo, precisamente aquello que se quiere evitar).



Hoy en día, las baterías de iones de litio (li-ion) son la bestia de carga tanto en aplicaciones móviles como estacionarias. Emplean un compuesto de litio en su electrodo positivo y grafito en el negativo (las habituales baterías de coche de plomo y ácido utilizan



óxido de plomo y plomo en sus electrodos). Sin embargo, a pesar de que su densidad de energía es muy superior a la de las baterías de plomo y ácido, las de iones de litio siguen sin ser adecuadas para satisfacer las necesidades de almacenamiento a gran escala y a largo plazo. El mayor sistema de almacenamiento, que engloba más de 18.000 baterías li-ion, lo está construyendo en Long Beach la empresa AES Corp por encargo de Southern California Edison. Cuando esté completado, en 2021, será capaz de funcionar a 100 megavatios durante cuatro horas. Pero esa energía total de 400 megavatios-hora no deja de ser dos órdenes de magnitud inferior a la que una gran ciudad asiática necesitaría si se quedase sin su suministro intermitente.

Hay que aumentar el volumen de almacenamiento, pero ¿cómo? Las baterías de sodio-azufre tienen mayor densidad de energía que las de iones de litio, pero un metal líquido y caliente es un electrolito muy poco práctico. Las baterías de flujo, que almacenan energía directamente en el electrolito, aún se encuentran en las primeras fases de desarrollo. Los supercondensadores no pueden proporcionar electricidad durante el tiempo suficiente. El almacenamiento de energía de aire comprimido y las baterías inerciales, los sistemas favoritos de siempre entre los periodistas, solo han llegado a aplicarse en una docena de instalaciones de tamaño mediano y pequeño. Quizá la esperanza a largo plazo sea utilizar energía solar barata para descomponer agua mediante electrólisis y usar el hidrógeno resultante como combustible multipropósito, pero una economía basada en el hidrógeno como

esta no es algo inminente.

Así pues, a gran escala aún debemos basarnos en una tecnología introducida en la última década del siglo XIX: la central hidroeléctrica reversible. Se construye un embalse en lo alto, se conecta mediante tuberías a otro situado más abajo, y se usa la electricidad nocturna, más barata, para bombear el agua hacia el embalse superior para que pueda hacer girar las turbinas durante los periodos de mayor demanda. Las centrales hidroeléctricas reversibles constituyen más del 99 por ciento de la capacidad de almacenamiento mundial, pero conllevan inevitablemente unas pérdidas de energía del orden del 25 por ciento. Muchas instalaciones cuentan con capacidad de corto plazo superiores a 1 gigavatio —la mayor es de unos 3 gigavatios—; una megaciudad que dependiera por completo de la generación solar y eólica necesitaría más de una de estas instalaciones.

Pero la mayoría de las megaciudades no están situadas en las inmediaciones de las abruptas escarpaduras o de los profundos valles montañosos que se necesitarían para tener una central reversible. Muchas —como Shanghái, Calcuta y Karachi— se encuentran en llanuras costeras. Solo podrían usar centrales hidroeléctricas reversibles si la energía se transportase hasta ellas mediante líneas de transmisión de larga distancia.

Salta a la vista la necesidad de disponer de sistemas de almacenamiento de electricidad más compactos, más flexibles, de mayor escala y menor coste. Pero el milagro se ha hecho de rogar.

## § 39. Por qué no es fácil tener buques portacontenedores eléctricos

Prácticamente todo lo que llevamos puesto o usamos en casa estuvo antes en contenedores de metal en barcos cuyos motores diesel los propulsaron desde Asia, emitiendo partículas y dióxido de carbono. Sin duda, cabría pensar que podemos hacerlo mejor.

A fin de cuentas, tenemos locomotoras eléctricas desde hace más de un siglo, trenes eléctricos de alta velocidad desde hace más de cincuenta años y recientemente hemos estado ampliando la flota global de coches eléctricos. ¿Por qué no tener buques portacontenedores eléctricos?

De hecho, está previsto que el primero de ellos se ponga en funcionamiento en 2021: el Yara Birkeland, construido por Marin Teknikk en Noruega, no es solo el primer portacontenedores movido por electricidad y de cero emisiones, sino también el primer buque autónomo comercial.

Pero no demos aún por acabados en una economía globalizada a los enormes buques portacontenedores con motores diesel. He aquí un cálculo aproximado que explica por qué.

Hay contenedores de distintos tamaños, pero la mayoría se ajustan al estándar de la unidad de medida TEU (siglas en inglés de unidad equivalente a veinte pies), un prisma rectangular de 6,1 metros (20 pies) de largo y 2,4 metros de ancho. Los primeros buques portacontenedores pequeños de los años sesenta transportaban unos pocos cientos de TEU; hoy en día, cuatro buques botados en 2019 que pertenecen a MSC Switzerland (Gülsün, Samar, Leni y

Mia) comparten el récord con 23.756 TEU cada uno. Cuando se desplazan muy lentamente (a 16 nudos, para ahorrar combustible), estos buques pueden recorrer la distancia de más de 21.000 kilómetros que separa Hong Kong de Hamburgo (a través del canal de Suez) en 30 días.



*Maqueta del Yara Birkeland.*

Fijémonos ahora en el Yara Birkeland. Transportará solo 120 TEU, su velocidad de servicio será de 6 nudos y la máxima distancia de recorrido será de 30 millas náuticas, entre Herøya y Larvik, en Noruega. Así pues, actualmente los buques diesel de tecnología punta cargan casi 200 veces más contenedores, a lo largo de distancias casi 400 veces mayores y a velocidades entre tres y cuatro veces superiores que las que el innovador barco eléctrico es capaz de alcanzar.

¿Qué haría falta para construir un buque eléctrico capaz de

transportar hasta 18.000 TEU, una carga intercontinental habitual hoy en día? En un viaje de 31 días, la mayoría de los buques diesel eficientes actuales queman 4.650 toneladas de combustible (petróleo residual de baja calidad o diesel); cada tonelada contiene 42 gigajulios. Eso supone una densidad de energía de en torno a 11.700 vatios-hora por kilogramo, frente a los 300 vatios-hora por kilogramo de las baterías de iones de litio actuales; una diferencia de casi 40 veces.

La demanda total de combustible para el viaje es de unos 195 terajulios, o 54 gigavatios-hora. Los grandes motores diesel (los instalados en los buques portacontenedores son los más grandes que tenemos) tienen una eficiencia aproximada del 50 por ciento, lo que significa que la energía que se usa realmente para la propulsión es la mitad de la demanda total de combustible, unos 27 gigavatios-hora. Para satisfacer esa demanda, unos grandes motores eléctricos que operasen con una eficiencia del 90 por ciento necesitarían en torno a 30 gigavatios-hora de electricidad.

Si dotásemos al barco de las mejores baterías comerciales de iones de litio disponibles actualmente (300 vatios-hora por kilogramo), para que pudiera hacer su viaje sin paradas desde Asia hasta Europa en un mes necesitaría 100.000 toneladas de estas baterías (en comparación, los coches eléctricos llevan unos 500 kilogramos, 0,5 toneladas, de baterías de iones de litio). Aparte de las dificultades que implicaría cargar y hacer funcionar el barco, las baterías por sí solas supondrían hasta el 40 por ciento de la máxima capacidad de carga. Incluso si la densidad de energía de las

baterías alcanzase los 500 vatios-hora por kilogramo antes de lo previsto, un buque de 18.000 TEU seguiría necesitando casi 60.000 toneladas de ellas para hacer un largo recorrido intercontinental a una velocidad relativamente baja.

La conclusión es evidente. Para tener un buque eléctrico cuyas baterías y motores no pesasen más que el combustible (alrededor de 5.000 toneladas) y el motor diesel (unas 2.000 toneladas) de los grandes portacontenedores actuales, necesitaríamos unas baterías cuya densidad de energía fuese más de diez veces superior a la de las mejores unidades de iones de litio actuales.

Pero eso es mucho pedir: en los últimos 70 años, la densidad de las mejores baterías comerciales ni siquiera se ha cuadruplicado.

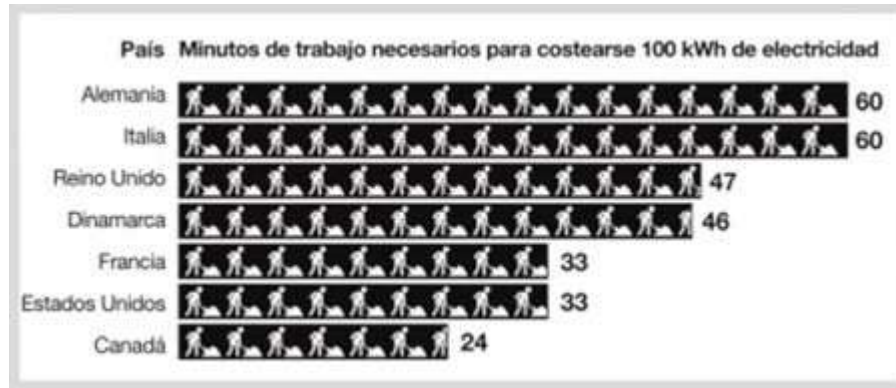
#### § 40. El verdadero coste de la electricidad

En muchos países ricos, el nuevo siglo trajo consigo una variación en la trayectoria a largo plazo del precio de la electricidad: ha aumentado no solo en precio nominal, sino incluso tras tener en cuenta la inflación. Aun así, la electricidad sigue siendo una ganga admirable, aunque, como cabría esperar, una ganga con muchas peculiaridades nacionales, resultado no solo de la contribución específica de las distintas fuentes de energía, sino también de la persistente regulación gubernamental.

La perspectiva histórica muestra la trayectoria de un valor extraordinario, lo cual explica la ubicuidad de la electricidad en el mundo moderno. Cuando se tiene en cuenta la inflación (y se expresa en dinero constante al cambio de 2019), el precio medio de

la electricidad residencial en Estados Unidos cayó de 4,81 dólares por kilovatio-hora en 1902 (el primer año para el cual está disponible la media nacional) a 30,5 centavos por kilovatio-hora en 1950, y hasta los 12,2 centavos en 2000; a principios de 2019, el precio era solo cinco décimas más alto: 12,7 centavos por kilovatio-hora. Esto supone una disminución relativa de más del 97 por ciento; o, dicho a la inversa, un dólar ahora permite comprar 38 veces más electricidad que en 1902. Pero, durante ese periodo, el salario medio industrial (de nuevo, teniendo en cuenta la inflación) casi se multiplicó por seis, lo que significa que en un hogar de clase trabajadora la electricidad es ahora más de 200 veces más asequible (su coste efectivo, ajustándolo a la renta, es menos del 0,5 por ciento del de 1902) que hace casi 120 años.

Pero compramos electricidad para convertirla en luz, energía cinética o calor, y los incrementos en la eficiencia que se han producido desde entonces han hecho que sus usos finales sean una ganga aún mayor. Son particularmente notables las ganancias en la iluminación: en 1902, una bombilla con filamento de tántalo producía 7 lúmenes por vatio; en 2019, una bombilla LED regulable proporciona 89 lúmenes por vatio. Esto significa que un lumen de luz eléctrica para un hogar de clase trabajadora es ahora aproximadamente 2.500 veces más asequible que a principios del siglo XX.



El panorama internacional muestra algunas diferencias sorprendentes. En Estados Unidos la electricidad residencial es más barata que en cualquier otro país rico, a excepción de Canadá y Noruega, los países desarrollados con el porcentaje más elevado de generación hidroeléctrica (59 y 95 por ciento, respectivamente). Usando los tipos de cambio vigentes, el precio de la electricidad residencial en Estados Unidos es alrededor del 55 por ciento de la media de la Unión Europea, en torno a la mitad del de Japón y menos del 40 por ciento del vigente en Alemania. Los precios de la electricidad en India, México, Turquía y Sudáfrica son inferiores al estadounidense cuando se convierten usando los tipos de cambio oficiales, pero considerablemente más elevados si se emplea la paridad de poder adquisitivo: más del doble en el caso de India y casi tres veces en el de Turquía.

Cuando leemos noticias sobre la espectacular caída de los costes de las células fotovoltaicas (véase «La lenta irrupción de las células fotovoltaicas») y los muy competitivos precios de las turbinas eólicas, un observador ingenuo podría pensar que el creciente porcentaje de nuevas renovables (solar y eólica) dará paso a una era de reducción en el precio de la electricidad. En realidad, ha sido lo



contrario. Antes del año 2000, cuando el país se embarcó en un amplísimo y costoso programa de expansión de la generación de electricidad renovable (*Energiewende*), los precios de la electricidad residencial en Alemania eran bajos y estaban disminuyendo, hasta alcanzar un mínimo de menos de 0,14 euros por kilovatio-hora en el año 2000.

En 2015, la suma de la capacidad solar y eólica en Alemania, de casi 84 gigavatios, había superado el total de las centrales de combustible fósil en funcionamiento, y en marzo de 2019 más del 20 por ciento de toda la electricidad provino de las nuevas renovables, pero el precio de la electricidad se ha doblado con creces en 18 años, hasta los 0,29 euros por kilovatio-hora. La mayor economía de la Unión Europea tiene así el segundo precio más caro para la electricidad: solo Dinamarca, muy dependiente de la energía eólica (en 2018, el 41 por ciento de toda su generación procedía del viento), tiene un precio más alto, 0,31 euros por kilovatio-hora. Un contraste similar puede observarse en Estados Unidos. En California, con un creciente porcentaje de nuevas renovables, el precio de la electricidad ha aumentado cinco veces más rápido que la media nacional, y ahora es un 60 por ciento más alto que el promedio de todo el país.

§ 41. El ritmo inevitablemente lento de las transiciones energéticas

En 1800, solo Reino Unido y unos pocos lugares concretos de Europa y del norte de China quemaban carbón mineral para

generar calor; el 98 por ciento de la energía primaria del mundo procedía de combustibles de biomasa, principalmente en forma de madera y carbón vegetal; en las regiones deforestadas, la energía también se obtenía a partir de la paja y los excrementos secos de animales. En 1900, mientras se extendía la minería del carbón y comenzaba la producción de petróleo y gas en Norteamérica y Rusia, la biomasa proporcionaba al mundo la mitad de su energía primaria; en 1950 aún suponía casi el 30 por ciento, y a principios del siglo XXI había disminuido hasta el 12 por ciento, aunque en muchos países del África subsahariana continúa suponiendo más del 80 por ciento. Claramente, la transición del carbono nuevo (en los tejidos vegetales) al viejo (fósil) en forma de carbón mineral, petróleo crudo y gas natural ha tardado su tiempo en completarse. Ahora nos encontramos en las fases iniciales de una transición mucho más complicada: la descarbonización del suministro global de energía, necesaria para evitar las peores consecuencias del calentamiento global. En contra de una impresión generalizada, esta transición no ha estado produciéndose a un ritmo similar al de la adopción de los teléfonos móviles. En términos absolutos, el mundo ha ido acercándose —no alejándose— al carbono (véase «Con el carbono hemos topado»), y en términos relativos el porcentaje de descarbonización ha sido hasta la fecha menor del 10 por ciento.



La primera Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se celebró en 1992. Ese año, los combustibles fósiles (usando la conversión de combustibles y electricidad a un denominador común que la petrolera BP suele utilizar en su informe estadístico anual) proporcionaron el 86,6 por ciento de la energía primaria mundial. En 2017 suministraban el 85,1 por ciento, una reducción de apenas un 1,5 por ciento en 25 años.

Este indicador clave del ritmo de la transición energética global es quizá el recordatorio más convincente de la dependencia fundamental que el mundo sigue teniendo respecto del carbono fósil. ¿Puede una disminución marginal del 1,5 por ciento en un cuarto de siglo venir seguida, en los 25 o 30 siguientes, de la sustitución de alrededor del 80 por ciento de la energía primaria mundial por alternativas libres de carbono, para así aproximarse a cero-carbono-fósil en 2050? Seguir como hasta ahora no nos permitirá llegar allí, y los únicos escenarios posibles para lograrlo son o bien el colapso de la economía mundial o bien la adopción de

nuevas fuentes de energía a un ritmo y una escala que exceden con mucho nuestras capacidades inmediatas.

Los lectores ocasionales de las noticias caen en el engaño de los supuestos avances en la generación de electricidad solar y eólica. De hecho, estas fuentes renovables han crecido de manera continuada e impresionante: en 1992 proporcionaban solamente el 0,5 por ciento de la electricidad mundial; en 2017, suministraban el 4,5 por ciento. Pero esto significa que, durante esos 25 años, un porcentaje mayor de la descarbonización de la generación de electricidad se debió al aumento de la generación de hidroelectricidad que a la suma de las instalaciones solares y eólicas. Y puesto que solo en torno al 27 por ciento del consumo final de energía en el mundo es en forma de electricidad, estos avances se traducen en un porcentaje mucho menor de la reducción total de carbono.

Pero la generación de electricidad a partir de fuentes solar y eólica son ahora industrias maduras, y se puede aumentar su capacidad con rapidez, incrementando así el ritmo de descarbonización del suministro de electricidad. Por el contrario, varios sectores económicos clave tienen una fuerte dependencia de los combustibles fósiles y no disponemos de ninguna alternativa libre de carbono que pudiese sustituirlos rápidamente y a la enorme escala necesaria. Entre estos sectores están el transporte de larga distancia (que ahora depende casi por completo del queroseno de aviación para los aviones de pasajeros, y del diesel, el fueloil pesado y el gas natural licuado para los buques portacontenedores, graneleros y petroleros); la producción de más de mil millones de

toneladas de hierro primario (que requiere coque obtenido a partir de carbón mineral para fundir el mineral de hierro en altos hornos) y más de 4.000 toneladas de cemento (que se obtiene en enormes hornos rotatorios alimentados con combustibles fósiles de baja calidad); la síntesis de casi 200 millones de toneladas de amoníaco y de unas 300 toneladas de plásticos (a partir de compuestos derivados del gas natural y el petróleo crudo); y la calefacción de locales (ahora dominada por el gas natural).

Estas realidades, más que cualquier vana ilusión, deben guiar nuestra comprensión de las transiciones energéticas primarias. Sustituir 10.000 millones de toneladas es un reto de naturaleza muy distinta que hacer que las ventas de pequeños dispositivos electrónicos aumenten hasta superar los mil millones de unidades al año; esto último se logró en cuestión de años, lo primero es una tarea que llevará muchas décadas.

## Capítulo 5

### Transporte

#### Cómo nos movemos

#### *Contenido:*

*§ 42. Acortar la travesía del Atlántico*

*§ 43. ¡Los motores son más antiguos que las bicicletas!*

*§ 44. La sorprendente historia de las ruedas inflables*

*§ 45. ¿Cuándo comenzó la era del automóvil?*

*§ 46. Los coches modernos tienen una pésima razón entre peso y carga*

*§ 47. Por qué los coches eléctricos (aún) no son tan estupendos como creemos*

*§ 48. ¿Cuándo comenzó la era de los aviones a reacción?*

*§ 49. Por qué el queroseno es el rey*

*§ 50. ¿Cuán seguro es volar?*

*§ 51. ¿Qué medio de transporte tiene mayor eficiencia energética: el avión, el tren o el automóvil?*

#### § 42. Acortar la travesía del Atlántico

Durante mucho tiempo, los barcos de vela comerciales tardaron tres —incluso cuatro— semanas en atravesar el Atlántico en dirección hacia el este; la ruta hacia el oeste, con el viento en contra, normalmente duraba seis semanas. El primer buque de vapor hizo la travesía hacia el este en 1833, cuando el SS Royal William, fabricado en Quebec, viajó hasta Inglaterra tras hacer escala en Nueva Escocia para cargar carbón. No fue hasta abril de 1838

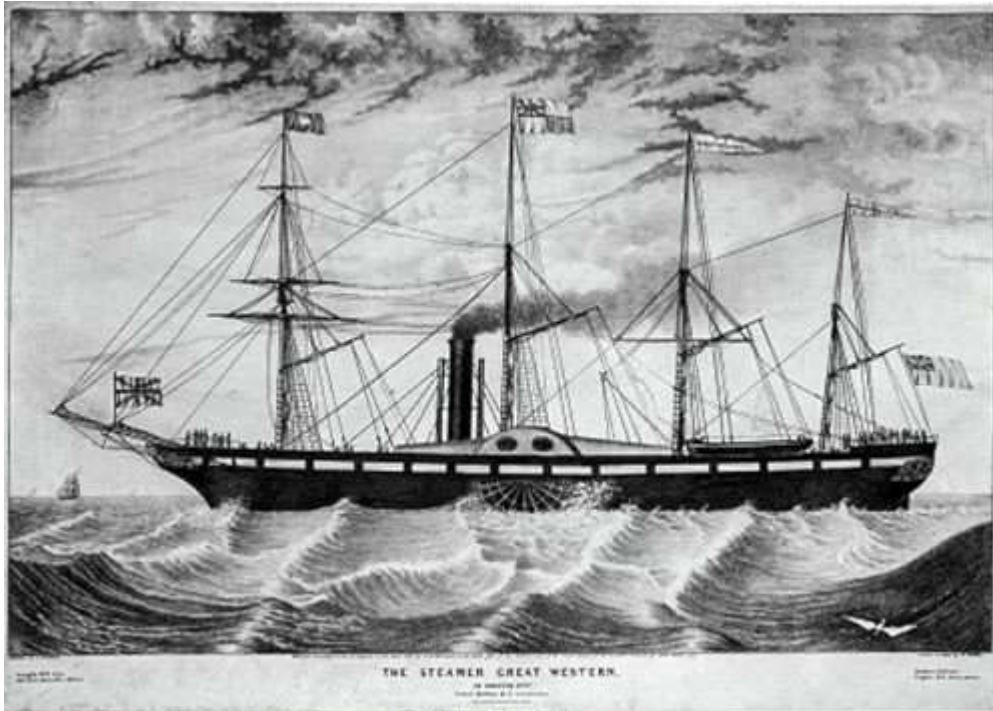
cuando un barco de vapor hizo la ruta hacia el oeste. Y ocurrió de una manera inesperadamente dramática.

Isambard Kingdom Brunel, uno de los grandes ingenieros británicos del siglo XIX, construyó el SS Great Western para la ruta Bristol-Nueva York que tenía previsto abrir la Great Western Steamship Company. El buque estaba listo para zarpar el 31 de marzo de 1838, pero un incendio a bordo retrasó su partida hasta el 8 de abril.

Entretanto, la British and American Steam Navigation Company intentó ganar por la mano fletando el SS Sirius, un pequeño barco de madera con ruedas de paletas construido para la ruta irlandesa (Londres-Cork). El Sirius zarpó de Cobh, en Irlanda, el 4 de abril de 1838, con sus calderas funcionando a una presión de 34 kilopascales para una potencia máxima del motor de 370 kilovatios (en comparación, la potencia declarada del Ford Mustang de 2019 es de 342 kilovatios). Con 460 toneladas de carbón a bordo, el barco consiguió recorrer casi 5.400 kilómetros (2.916 millas náuticas); casi —aunque no del todo— hasta llegar al puerto de Nueva York.

En contraposición, el Great Western era el buque de pasajeros más grande del mundo, con 128 camas en primera clase. Las calderas del barco también funcionaban a 34 kilopascales, pero sus motores podían proporcionar unos 560 kilovatios (la potencia de los actuales generadores diesel industriales) y en su primer viaje transatlántico hizo un promedio de 16,04 kilómetros por hora (más lento que los mejores maratonianos de hoy, que promedian una velocidad ligeramente superior a los 21 kilómetros por hora). Incluso con sus

cuatro días de ventaja, el Sirius (con una velocidad media de 14,87 kilómetros por hora) a duras penas consiguió anticiparse al buque más grande y más rápido, y llegó a Nueva York el 22 de abril de 1838, tras 18 días, 14 horas y 22 minutos de travesía.



*El Great Western de Brunel: el buque de vapor con ruedas de paletas tenía jarcias para las velas.*

Historias posteriores introdujeron dramatismo en el esprint final al afirmar que el Sirius se quedó sin carbón y tuvo que quemar mobiliario e incluso sus mástiles para alcanzar el puerto. No fue así, pero sí tuvo que quemar varios barriles de resina. Cuando el Great Western llegó al día siguiente, tras 15 días y 12 horas de viaje, le quedaban 200 toneladas de carbón, aun después de haber quemado 655.

El vapor redujo a menos de la mitad el tiempo de viaje de las rutas transatlánticas, y se sucedieron los nuevos récords. En 1848, el SS



Europa de Cunard atravesó el Atlántico en 8 días y 23 horas. En 1888, una travesía duraba poco más de 6 días; y en 1907, el RMS Lusitania, propulsado por turbinas de vapor, ganó el Blue Riband (el trofeo a la más veloz travesía del Atlántico) con un tiempo de 4 días, 19 horas y 52 minutos. El último titular del récord, el SS United States, lo hizo en 3 días, 10 diez horas y 40 minutos, en 1952.

La siguiente era, en la que los aviones comerciales de motor de pistones cruzaban el Atlántico en 14 horas o más, fue breve, porque ya en 1958 el primer avión comercial estadounidense a turbo-reacción, el Boeing 707, hacía vuelos regulares de Londres a Nueva York en menos de 8 horas (véase «¿Cuándo comenzó la era de los aviones a reacción?»). La velocidad de crucero no ha cambiado demasiado: el Boeing 787 Dreamliner vuela a 913 kilómetros por hora, y los vuelos entre Londres y Nueva York aún duran 7,5 horas. El costoso, ruidoso y desventurado avión supersónico Concorde podía hacer el trayecto en 3,5 horas, pero ese pájaro no volverá a surcar los cielos. Hoy en día varias compañías están desarrollando aviones de transporte supersónicos, y Airbus ha patentado un concepto hipersónico con una velocidad de crucero 4,5 veces superior a la velocidad del sonido. Un avión así llegaría al aeropuerto internacional JFK apenas una hora después de despegar de Heathrow.

Pero ¿necesitamos realmente tales velocidades a un coste energético muy superior? Respecto al tiempo que empleó el Sirius en 1838, hemos reducido la duración de la travesía en más del 98 por ciento.

El tiempo en el aire es el justo para leer una novela o incluso, quizá, este libro.

§ 43. ¡Los motores son más antiguos que las bicicletas!

Algunos avances técnicos se retrasan ya sea por falta de imaginación o por una concatenación de impedimentos. No se me ocurre mejor ejemplo de ambas razones que el de la bicicleta.

Hace más de dos siglos, el 12 de junio de 1817, en Mannheim (Alemania), Karl Drais, guardabosques en el gran ducado de Baden, hizo la primera demostración pública de su *Laufmaschine* («máquina para correr»), posteriormente conocida también como «draisiana», o caballito de madera. Con el asiento en el medio, la dirección en la rueda delantera y ambas ruedas del mismo diámetro, fue el arquetipo de todos los vehículos posteriores que requerían mantener el equilibrio. Sin embargo, no se impulsaba a pedales, sino empujando con los pies en el suelo, al estilo de Pedro Picapiedra.

Drais recorrió casi 16 kilómetros en poco más de una hora en su pesada bicicleta de madera, a una velocidad superior a la del típico carro tirado por caballos. Pero es evidente, al menos hoy en día, que el diseño era burdo y que aún no había suficientes caminos pavimentados adecuados para su circulación. ¿Por qué, en las décadas posteriores a 1820, tan fecundas en inventos como locomotoras, barcos de vapor y técnicas de producción industrial, se tardó tanto tiempo en encontrar una forma de propulsión susceptible de hacer de la bicicleta una máquina práctica, que cualquiera salvo los niños pequeños pudiera montar?

Varias respuestas son obvias. Las bicicletas de madera eran pesadas y toscas, y aún no se disponía de las piezas de acero baratas (cuadro, llantas, radios) necesarias para diseñar máquinas resistentes. Los caminos sin pavimentar solo permitían trayectos incómodos. Los neumáticos no se inventaron hasta finales de la década de 1880 (véase el capítulo siguiente). Y para hacer posible la adopción generalizada de lo que era en esencia una máquina de ocio, antes tenían que aumentar los ingresos de los habitantes de las ciudades.



*La bicicleta de seguridad Rover de John Kemp Starley.*

No fue hasta 1866 cuando Pierre Lallement obtuvo su patente estadounidense para una bicicleta movida a pedales con una rueda delantera ligeramente más grande. Y a partir de 1868, Pierre Michaux hizo popular en Francia su diseño del *vélocipède*. Pero la *michaudine* no se convirtió en la precursora de las bicicletas modernas; fue una novedad pasajera. Las décadas de 1870 y 1880

estuvieron dominadas por los bicis (también conocidos como bicis «ordinarias»), cuyos pedales estaban conectados directamente al eje de la rueda delantera, que tenía un diámetro de hasta 1,5 metros para conseguir una mayor distancia por cada revolución de los pedales. Estas burdas máquinas podían ser rápidas, pero también era difícil subirse a ellas y complicado dirigirlas; su uso requería destreza, resistencia y tolerancia a las caídas peligrosas.

En 1885 dos inventores británicos, John Kemp Starley y William Sutton, empezaron a ofrecer sus bicis de seguridad Rover, con ruedas del mismo tamaño, dirección directa, cadena y piñones, y un cuadro de acero tubular. Aunque aún no tenía exactamente la clásica forma de rombo, era un diseño de bicicleta del todo moderno, listo para su adopción masiva. La tendencia se aceleró en 1888, con la introducción de los neumáticos de John Dunlop.

Así pues, una sencilla máquina de equilibrio consistente en dos ruedas de igual tamaño, un mínimo cuadro de metal y una corta cadena de transmisión apareció más de un siglo después de las máquinas de vapor mejoradas de Watt (1765), más de medio siglo después de la introducción de locomotoras muchísimo más complejas desde un punto de vista mecánico (1829), años después de la primera generación comercial de electricidad (1882), pero simultáneamente con los primeros diseños de automóviles. Karl Benz, Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach montaron los primeros motores de combustión interna ligeros en carruajes de tres y cuatro ruedas.

Aunque los coches experimentaron una gran transformación entre 1886 y 1976, el diseño de las bicicletas siguió siendo notablemente conservador. Las primeras bicicletas de montaña construidas a tal efecto no aparecieron hasta 1977. La adopción generalizada de novedades como aleaciones caras, materiales compuestos, cuadros de formas extrañas, ruedas macizas y manillares invertidos no comenzó hasta los años ochenta.

#### § 44. La sorprendente historia de las ruedas inflables

Los inventos famosos son pocos, y suelen llevar el nombre de una persona o una institución. La bombilla de Edison o el transistor de los Laboratorios Bell quizá sean los ejemplos más destacados de esta selecta categoría, aunque Edison no inventó la bombilla (solo una versión más duradera) y los Laboratorios Bell se limitaron a reinventar el transistor (el dispositivo de estado sólido fue patentado en 1925 por Julius Edgar Lilienfeld).

En el extremo opuesto del espectro del reconocimiento está la categoría, mucho más amplia, de inventos que han marcado épocas y cuyos orígenes son poco conocidos. No hay mejor ejemplo de esto que la rueda inflable, inventada por un tal John Boyd Dunlop, un escocés que vivía en Irlanda. Su patente británica se remonta a hace más de 130 años, al 7 de diciembre de 1888.

Antes de Dunlop, la mejor opción era la rueda de caucho macizo, disponible desde que el proceso de vulcanización de Charles Goodyear (patentado en 1844 y consistente en calentar caucho con azufre para incrementar su elasticidad) hizo posible la producción

de caucho duradero. Aunque esas ruedas suponían una considerable mejora respecto a las de madera maciza o a las de llantas y radios de hierro, los viajes no dejaban de ser agitados.

Dunlop ideó su prototipo, en 1887, para suavizar la traqueteada experiencia de su hijo al montar en su triciclo. Era un producto primitivo: un sencillo tubo inflado que se ataba en sus extremos, envuelto en lino y sujeto mediante clavos a una rueda de triciclo de madera maciza.



*John Boyd Dunlop, en su invento.*

Una versión mejorada encontró inmediatamente usuarios entre el creciente número de ciclistas entusiastas, y se fundó una empresa para fabricar las ruedas. Sin embargo, como ocurre con tantos inventos, la patente de Dunlop fue invalidada porque resultó que

otro escocés, Robert William Thomson, ya había patentado la idea, aunque nunca llegó a fabricar un producto práctico.

A pesar de ello, el invento de Dunlop estimuló el trabajo en neumáticos más grandes para el recién inventado automóvil. En 1885, el primer Patent Motorwagen de tres ruedas de Karl Benz usaba ruedas de caucho macizo. Seis años más tarde, los hermanos Michelin, André y Édouard, presentaron su versión de los neumáticos extraíbles de caucho para bicicletas, y en 1895 su modelo de dos asientos, L'Éclair, se convirtió en el primer automóvil con neumáticos inflables de caucho en participar en la carrera París-Burdeos-París, de casi 1.200 kilómetros. Como había que cambiar sus neumáticos cada 150 kilómetros, L'Éclair acabó en novena posición.

Fue un revés temporal. Las ventas fueron buenas y, en 1898, Bibendum, el muñeco hinchable hecho de neumáticos, se convirtió en símbolo de Michelin. Un año más tarde, La Jamais Contente («La nunca satisfecha»), un coche eléctrico belga que superó los 100 kilómetros por hora, lo hizo llevando neumáticos de la compañía. En 1913, Michelin presentó la llanta de acero extraíble, y con ella la ventaja de poder llevar una rueda de repuesto en el maletero, una disposición que dura hasta hoy.

En 2005, John Dunlop ingresó por fin en el Automotive Hall of Fame, y la marca Dunlop sigue existiendo, ahora propiedad de la Goodyear Tire and Rubber Company, el tercer mayor fabricante mundial de neumáticos. El primero es el japonés Bridgestone, a poca distancia del segundo, Michelin (un raro ejemplo de una

compañía que se ha mantenido entre las más importantes de su industria durante más de un siglo).

Los neumáticos son productos emblemáticos de la era industrial — pesados, voluminosos, contaminantes, de los que aún es muy difícil deshacerse— pero incluso en nuestra era de la información siguen necesitándose en cantidades cada vez mayores. Las empresas fabricantes de neumáticos deben satisfacer la demanda mundial para los casi cien millones anuales de nuevos vehículos rodantes, y de repuestos para la flota global de casi 1.200 millones.

A Dunlop le asombraría ver lo que él comenzó. Qué lejos estamos de la tan mentada desmaterialización de nuestro mundo que se supone que la inteligencia artificial ha desencadenado.

#### § 45. ¿Cuándo comenzó la era del automóvil?

En 1908, Henry Ford llevaba más de una década trabajando en el sector del automóvil, y la Ford Motor Company, fundada cinco años antes y ya rentable, hasta entonces había seguido el ejemplo de sus rivales y atendido las necesidades de los adinerados. El precio de su Modelo K, introducido en 1906, rondaba los 2.800 dólares, y el Modelo N, más pequeño y presentado ese mismo año, se vendía por 500 dólares, que era aproximadamente el salario medio anual.

Entonces, el 12 de agosto de 1908, comenzó la era del automóvil, porque ese día se ensambló en la planta de la avenida Piquette de Detroit el primer Ford Modelo T. Salió a la venta el 1 de octubre.

Ford dejó claros sus objetivos: «Fabricaré un automóvil para la inmensa multitud. Será suficientemente grande para la familia, pero



suficientemente pequeño para que un individuo lo mantenga y lo cuide. Estará construido con los mejores materiales [...], basándose en los diseños más sencillos que la ingeniería moderna es capaz de idear. Pero su precio será tan bajo que cualquier hombre que gane un buen sueldo podrá permitirse tener uno». Ford cumplió sus objetivos gracias a su visión y al talento que supo reclutar, en particular a los diseñadores Childe Harold Wills, Joseph A. Galamb, Eugene Farkas, Henry Love, C. J. Smith, Gus Degner y Peter E. Martin.



*Ford Modelo T.*

Su motor de cuatro cilindros refrigerado por agua proporcionaba 15 kilovatios (los coches pequeños actuales suelen ser ocho veces más potentes), alcanzaba una velocidad máxima de 72 kilómetros por hora, y tenía un precio bajo. En 1909, el Runabout, el modelo más popular, costaba 825 dólares, pero las mejoras continuas tanto de

diseño como de producción permitieron que Ford rebajara su precio hasta los 260 dólares en 1925. Esta cifra representaba dos meses y medio de salario para el trabajador medio de la época. Hoy en día, el precio medio de un coche nuevo en Estados Unidos es de 34.000 dólares, lo que equivale a unos diez meses del salario medio. En Reino Unido, los modelos populares de coches pequeños rondan las 15.000 libras (unos 20.000 dólares).

La introducción en 1913 de la cadena de montaje móvil en la fábrica de Highland Park en Detroit trajo consigo sustanciales economías de escala; en 1914, la planta ya producía mil automóviles al día. Y la decisión de Ford de pagar sueldos insólitos a los trabajadores no cualificados que realizaban el montaje aseguraba que la producción fuese ininterrumpida. En 1914, el salario se dobló con creces, hasta alcanzar los cinco dólares al día, y la jornada laboral se redujo a ocho horas.

El resultado fue impresionante. En 1908, la Ford Motor Company produjo el 15 por ciento de todos los coches estadounidenses, el 48 por ciento en 1914 y el 57 por ciento en 1923. En mayo de 1927, cuando se dejó de producir, la empresa había vendido quince millones del Modelo T.

Ford marcó el comienzo de la globalización industrial, con el uso de procedimientos estandarizados y la distribución del montaje de coches por todo el mundo. El ensamblaje en el extranjero comenzó en Canadá y a continuación se extendió a Reino Unido, Alemania, Francia, España, Bélgica y Noruega, así como a México, Brasil y Japón.

Pero aunque Ford hizo una enorme apuesta por este coche en particular, no llegó a ser el vehículo más vendido de la historia. Ese galardón le corresponde al «coche del pueblo» de Alemania, el Volkswagen. Poco después de acceder al poder, Adolf Hitler decretó sus especificaciones, se empeñó en que tuviera su inconfundible aspecto de escarabajo, y ordenó a Ferdinand Porsche que lo diseñara.

Para cuando estaba en condiciones de producirse, en 1938, Hitler tenía otras preocupaciones, y el montaje del coche no comenzó hasta 1945, en la zona ocupada por los británicos. En Alemania se dejó de producir en 1977, pero el Volkswagen Escarabajo original siguió fabricándose en Brasil hasta 1996, y en México hasta 2003. El último coche, ensamblado en Puebla, fue el número 21.429.464. No obstante, en muchos sentidos, el Escarabajo no fue más que una emulación puesta al día del Modelo T. Quién produjo en masa el primer coche de pasajeros asequible es algo que estará siempre fuera de toda discusión.

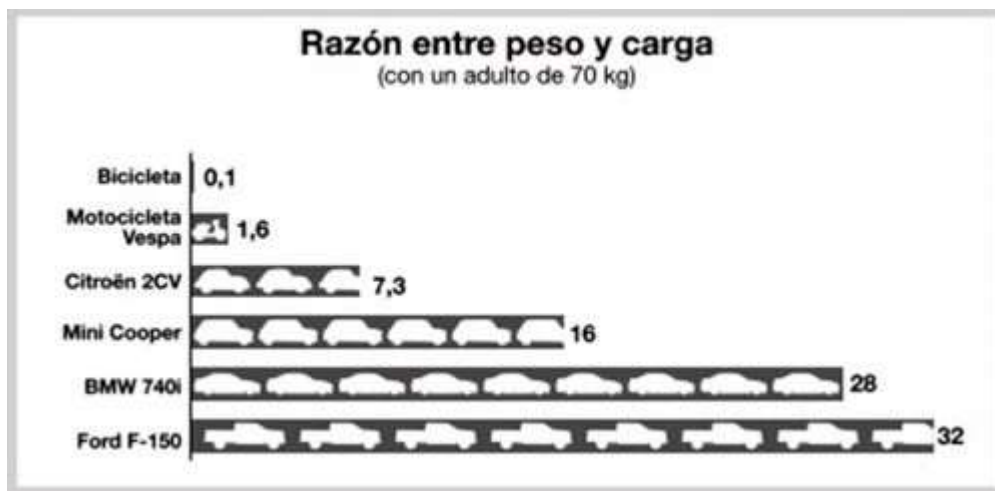
§ 46. Los coches modernos tienen una pésima razón entre peso y carga

Hace un siglo, el coche más vendido en Estados Unidos, el Modelo T de Ford, extraía un vatio por cada 12 gramos de su motor de combustión interna. Hoy en día los motores de los coches más vendidos en Estados Unidos obtienen un vatio por gramo, lo cual supone una mejora del 92 por ciento. Esa es la única buena noticia que voy a dar en este capítulo.

La mala noticia es esta: los datos de Estados Unidos muestran que durante los últimos cien años la potencia media de los motores se ha multiplicado por más de once, hasta rondar los 170 vatios. Esto significa que, a pesar de la enorme reducción de la densidad de masa/potencia, un motor típico de coche actual apenas es más ligero que hace un siglo, mientras que el vehículo en sí es ahora mucho más pesado: su masa se ha triplicado, hasta alcanzar más de 1.800 kilogramos (el promedio de todos los vehículos ligeros, casi la mitad de los cuales son camionetas, vehículos deportivos utilitarios y monovolúmenes).

Y dado que casi tres cuartas partes de los trabajadores que se desplazan hasta su lugar de trabajo viajan solos en su coche, la razón entre peso del vehículo y de los pasajeros es pésima.

Esa razón es lo importante. Porque, por mucho que la industria del automóvil se empeñe en hablar de «reducción de peso» —usando para ello aluminio, magnesio e incluso polímeros reforzados con fibra de carbono—, esta razón es la que en última instancia determina la eficiencia energética.



He aquí, en orden ascendente, algunas de las razones entre pesos que puede lograr un pasajero de 70 kilogramos:

- 0,1 para una bicicleta de 7 kilogramos.
- 1,6 para la motocicleta italiana Vespa, de 11 kilogramos.
- 5 o menos para un autobús moderno, y si solo se cuentan los pasajeros sentados.
- 7,3 para el Citroën 2 CV francés («dos caballos»), de 510 kilogramos, en los años cincuenta.
- 7,7 para el Ford Modelo T, introducido en 1908, y también para el tren rápido *shinkansen* japonés, que entró en funcionamiento en octubre de 1964 (la reducida razón de este tren se debe tanto a su diseño como a su elevada ocupación).
- 12 para un coche Smart, 16 para un Mini Cooper, 18 para mi Honda Civic LX y algo más de 20 para el Toyota Camry.
- 26 para un vehículo ligero medio en Estados Unidos en 2013.
- 28 para el BMX 740i.
- 32 para el Ford F-150, el vehículo más vendido en Estados Unidos.
- 39 para el Cadillac Escalade EXT.

Por descontado, se pueden obtener ratios espectaculares si se empareja el coche apropiado con el conductor adecuado. Suelo ver a una mujer que conduce un Hummer H1 que pesa fácilmente cincuenta veces más que ella. Es como matar moscas con una excavadora.

Para ponerlo todo en perspectiva, pensemos en que el modelo más reciente de Boeing, el 787-10, obtiene mejor calificación que un

pequeño Citroën. Su peso máximo de despegue es de 254 toneladas; con 330 pasajeros que pesen otras 23 toneladas, más 25 toneladas de carga, la razón total entre peso y carga es de solo 5,3.

El peso de los coches aumentó porque parte del mundo se enriqueció y los conductores se dejaron mimar. Los vehículos ligeros son cada vez más grandes, y vienen equipados con más accesorios, como transmisión automática, aire acondicionado, sistemas de entretenimiento y comunicaciones, además de una cantidad creciente de servomotores en las ventanas, los espejos y los asientos ajustables. Y los nuevos vehículos híbridos y eléctricos, con sus pesadas baterías, no serán más ligeros: el pequeño Ford Focus completamente eléctrico pesa 1,7 toneladas, el Volt de General Motors más de 1,7 toneladas y el Tesla algo más de 2,1 toneladas.

Diseños más ligeros ayudarían, pero es evidente que nada podría reducir a la mitad (o a una cuarta parte) la razón entre peso y carga con tanta facilidad como que en el coche viajasen dos o cuatro personas. Pero eso es lo más difícil de poner en práctica en Estados Unidos. En el informe *State of the American Commute* de 2019 se lee que casi tres cuartas partes de quienes van en coche al trabajo lo hacen solos. Los desplazamientos al trabajo en coche son mucho menos habituales en Europa (el 36 por ciento en Reino Unido), y aún menos en Japón (apenas el 14 por ciento), pero el tamaño medio de los coches ha ido creciendo tanto en la Unión Europea como en Japón.

Así pues, lo que puede pronosticarse es que vehículos pesados usarán motores de explosión o eléctricos cada vez mejores de tal

manera que resultará en las peores razones entre peso y carga de la historia para cualquier medio de transporte personal mecanizado.

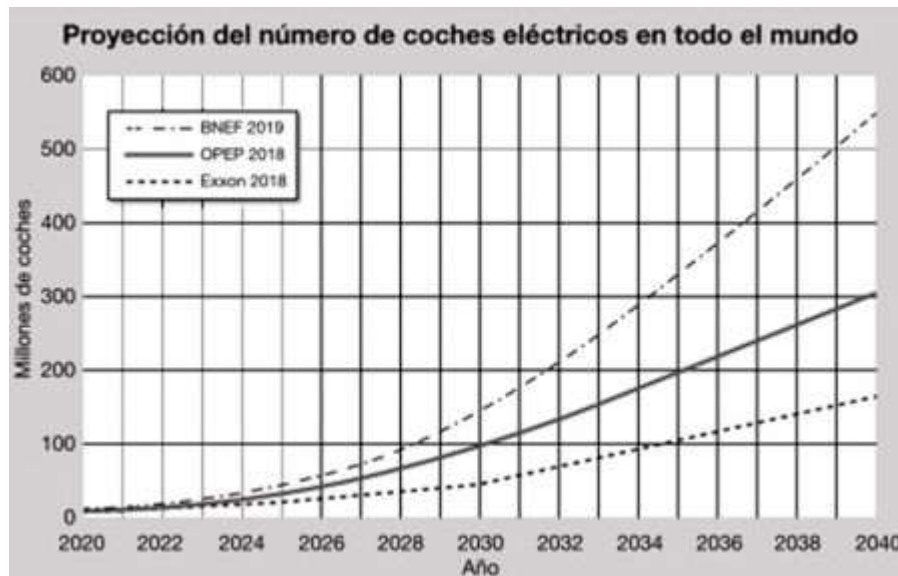
Puede que, según alguna definición, esos coches sean inteligentes, pero desde luego no son sabios.

§ 47. Por qué los coches eléctricos (aún) no son tan estupendos como creemos

Permítaseme que empiece con una nota aclaratoria: no promuevo ni dejo de promover los vehículos eléctricos (VE). Simplemente señalo que el argumento racional para aceptarlos se ha visto socavado por previsiones de mercado nada realistas y un menosprecio de las consecuencias medioambientales de la producción y el funcionamiento de dichos vehículos.

Las previsiones poco realistas han sido la norma, y lo siguen siendo. En 2010, Deutsche Bank predijo que los VE supondrían el 11 por ciento del mercado global en 2020; en realidad, serán menos del 4 por ciento. Y este triunfo de la ilusión sobre la experiencia continúa. Algunas previsiones recientes para el año 2030 pronostican que los VE constituirán hasta el 20 por ciento de la flota global de vehículos, mientras que otras reducen esa cifra hasta el 2 por ciento. Bloomberg New Energy Finance prevé que en 2040 habrá 548 millones de VE en las carreteras; Exxon, tan solo 162 millones. Sus entusiastas también han olvidado señalar las consecuencias medioambientales que tendrá la conversión en masa a los vehículos eléctricos. Para que los VE reduzcan las emisiones de carbono (y reduzcan por lo tanto la magnitud del cambio climático), sus

baterías no deberían cargarse con electricidad generada a partir de combustibles fósiles. Pero, en 2020, algo más del 60 por ciento de la electricidad mundial provendrá de combustibles fósiles; en torno al 12 por ciento de fuentes eólicas y solares; el resto, de la energía hidroeléctrica y de la fisión nuclear.



En promedio en todo el mundo, más de tres quintas partes de la electricidad para un VE aún procede de carbón fósil, pero este porcentaje varía ampliamente entre distintos países y dentro de ellos. En Manitoba, mi provincia de Canadá (donde más del 99 de la electricidad proviene de grandes centrales hidroeléctricas), los VE son coches hidroeléctricos y limpios. Quebec, en Canadá (en torno a un 97 por ciento de hidroelectricidad) y Noruega (alrededor del 95 por ciento de hidroelectricidad) presentan cifras similares. Los VE franceses son mayormente coches de fisión nuclear (el país obtiene de la fisión alrededor del 75 por ciento de su electricidad). Pero en la mayor parte de India (en particular, en Uttar Pradesh), China (en especial en la provincia de Shaanxi) y Polonia, los VE son



prácticamente coches de carbón. Lo último que necesitamos es impulsar la rápida introducción de una fuente de demanda que propiciaría un incremento de la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles.

Incluso aunque los VE se alimentasen de fuentes de electricidad renovables, no dejarían de emitirse gases de efecto invernadero durante la producción del cemento y el acero usados en la construcción de las presas hidroeléctricas, las turbinas eólicas y los paneles fotovoltaicos, y, por supuesto, también durante la fabricación de los propios coches (véase «¿Qué es peor para el medioambiente, nuestro automóvil o nuestro teléfono?»).

Además, la producción de VE tendrá otras consecuencias medioambientales. La firma de consultoría de gestión Arthur D. Little estima que la fabricación de un VE —suponiendo que el vehículo tiene una vida útil de veinte años— genera tres veces más toxicidad que la de uno convencional. Esto se debe en gran medida al mayor uso de metales pesados. En un sentido similar, un detenido análisis del ciclo de vida comparado publicado en el *Journal of Industrial Ecology*, concluyó que la producción de VE conlleva una toxicidad sustancialmente más elevada, tanto para los seres humanos como para los ecosistemas de agua dulce.

No pretendo dar a entender que estos sean argumentos contra la adopción de los VE. Me limito a señalar que, antes de aceptar cualquier afirmación radical a su favor, deben evaluarse y entenderse las implicaciones de la nueva tecnología. No podemos contentarnos con creer que basta con imaginar máquinas ideales y

no contaminantes para que estas existan.

#### § 48. ¿Cuándo comenzó la era de los aviones a reacción?

No es fácil poner fecha al inicio de la era de los aviones a reacción porque hay muchas «primeras veces» distintas. El primer despegue experimental de un avión con motor a reacción fue el de uno de guerra alemán, el Heinkel He 178, en agosto de 1939 (por fortuna, entró en servicio demasiado tarde para afectar al desenlace de la Segunda Guerra Mundial). El primer vuelo del primer diseño comercial, el británico Havilland DH 106 Comet, tuvo lugar en julio de 1949, y su primer vuelo comercial, con la British Overseas Airways Corporation, se produjo en 1952. Pero cuatro desastres (en octubre de 1952 cerca de Roma; en mayo de 1953 en Calcuta; en enero de 1954, de nuevo en las proximidades de Roma; y en abril de 1954 cerca de Nápoles) acabaron con los vuelos de los Comet, y un avión rediseñado completó el primer vuelo transatlántico el 4 de octubre de 1958. Por su parte, el Tupolev Tu104 soviético entró en servicio doméstico en septiembre de 1956.

Pero también hay argumentos de peso para defender que la era de los aviones a reacción comenzó el 26 de octubre de 1958, cuando un Boeing 707 de Pan Am despegó del aeropuerto de Idlewild (que hoy es el Aeropuerto Internacional JFK) con destino a París, en el primero de sus vuelos regulares diarios.

Hay varias razones que justifican esta elección. El Comet rediseñado era demasiado pequeño y poco rentable para dar lugar a una dinastía de diseños, por lo que no tuvo sucesores. Por su parte, los

aviones Tupolev solo se usaron en los países del bloque soviético. Sin embargo, el Boeing 707 inauguró la dinastía de diseños más exitosa de la industria, que progresó tenazmente hasta sumar otros diez modelos a su variada formación.



*Vuelo inaugural de un Boeing 707.*

Su primer sucesor fue el Boeing 727 trimotor en 1963; el cuatrimotor 747, que se presentó en 1969, fue quizá el diseño más revolucionario en la historia de la aviación moderna; la última incorporación, la serie 787 Dreamliner, introducida en 2011, está hecha en su mayor parte de compuestos de fibra de carbono, y actualmente es capaz de completar vuelos de más de diecisiete horas.

El 707 tenía pedigrí militar: empezó siendo un prototipo de avión cisterna para el repostaje en vuelo; desarrollos posteriores dieron lugar al KC-135A Stratotanker y, en última instancia, a un avión cuatrimotor de pasajeros dotado de turborreactores Pratt & Whitney

de pequeño diámetro, cada uno de los cuales proporcionaba un empuje de 50 kilonewtons. En comparación, cada uno de los dos motores turbofán de alta derivación General Electric GEnx-1B que llevan los 787 actuales proporciona más de 300 kilonewtons durante el despegue.

El primer vuelo regular del 707 Clipper America, el 26 de octubre de 1958, estuvo precedido de una ceremonia de bienvenida, un discurso de Juan Trippe (a la sazón, presidente de Pan Am) y la actuación de la banda de música del ejército estadounidense. Los 111 pasajeros y 12 miembros de la tripulación tuvieron que hacer una parada no prevista en el Aeropuerto Internacional de Gander, en Newfoundland, Canadá, pero a pesar de ello lograron aterrizar en el Aeropuerto París-Le Bourget 8 horas y 41 minutos después de haber despegado de Nueva York. En diciembre de ese año, el avión hacía la ruta Nueva York-Miami, y en enero de 1959 empezó a cubrir los primeros vuelos transcontinentales, de Nueva York a Los Ángeles.

Antes de la introducción de los aviones de fuselaje ancho —primero el Boeing 747 y más tarde el McDonnell Douglas DC-10 y el Lockheed L-1011 en 1970— el Boeing 707 era el modelo dominante entre los aviones comerciales de larga distancia. Uno de ellos nos trajo a mi mujer y a mí desde Europa hasta Estados Unidos en 1969.

Las mejoras graduales que se fueron introduciendo en la familia Boeing acabaron resultando en un avión enormemente superior. En una configuración estándar de dos clases (primera y turista), el

primer Dreamliner tenía cien asientos más que el 707-120, así como un peso máximo de despegue y una autonomía máxima que eran casi el doble. Aun así, el Dreamliner gasta casi un 70 por ciento menos de combustible por pasajero y por kilómetro. Y como está construido con materiales compuestos de carbono, el 787 se puede presurizar de manera que simule una menor altitud que la que sería posible con un fuselaje de aluminio, lo que redundaría en un mayor confort de los pasajeros.

En total, Boeing llegó a fabricar poco más de mil 707. Cuando Pam Am recuperó el avión para un vuelo conmemorativo por su vigésimo quinto aniversario en 1983, llevó a la mayoría de miembros de la tripulación original como pasajeros a París. Pero ese no fue el final del servicio del 707. Varias aerolíneas no estadounidenses siguieron usando diversos modelos hasta los años noventa, y la iraní Saha Airlines lo hizo hasta fecha tan reciente como 2013.

Aunque hoy en día el 707 puede encontrarse en los desguaces de aviones, no cabe duda del lugar que ocupa en la historia. Representa el primer paso efectivo y rentable en la evolución de los aviones a reacción comerciales.

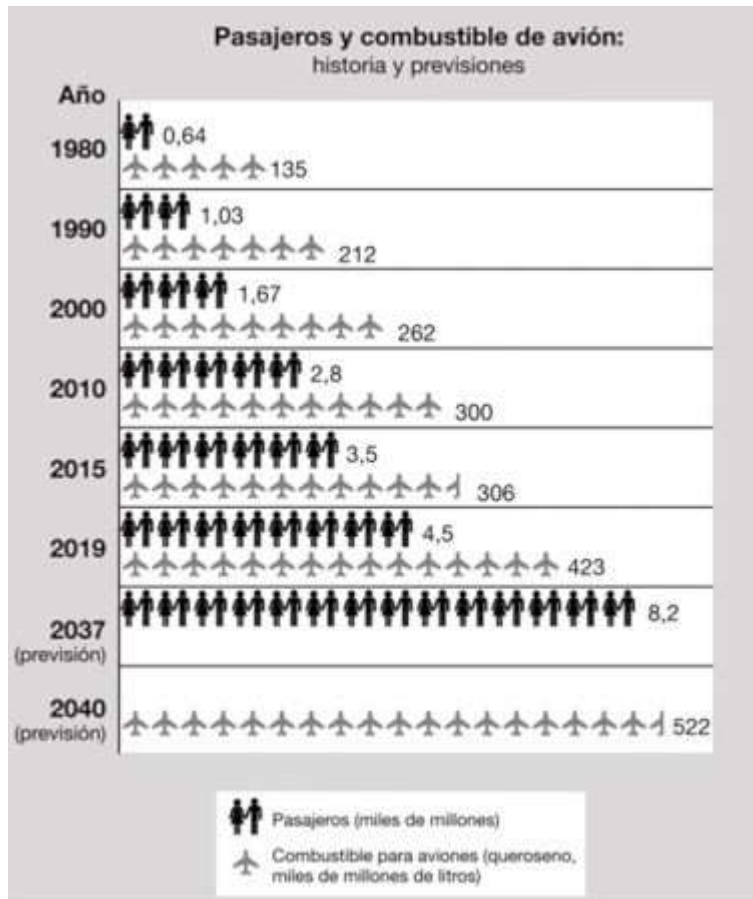
#### § 49. Por qué el queroseno es el rey

Eliminar el combustible para aviones basado en el queroseno será uno de los mayores retos a la hora de crear un mundo sin emisiones de carbono. La aviación supone solo alrededor del 2 por ciento del volumen global de tales emisiones, y en torno al 12 por ciento del total de las generadas por el sector del transporte, pero el paso a la

propulsión eléctrica es mucho más difícil para los aviones que para los automóviles o los trenes.

El combustible actual para aviones —cuya formulación más común se conoce como Jet A-1— tiene una serie de ventajas. Posee una elevadísima densidad de energía, ya que cada kilogramo proporciona 42,8 megajulios (una cifra ligeramente inferior a la de la gasolina, pero este combustible puede permanecer en estado líquido hasta temperaturas de -47 grados Celsius), y tiene mejores características que la gasolina en cuanto a coste, pérdidas por evaporación a elevada altitud y riesgo de incendio durante su manipulación. Aún no tiene verdadero rival. Las baterías con capacidad suficiente para vuelos intercontinentales con cientos de pasajeros todavía son cosa de ciencia ficción, y no veremos aviones de fuselaje ancho propulsados por hidrógeno líquido en el futuro próximo.

Lo que necesitamos es un combustible equivalente al queroseno que se obtenga a partir de materia vegetal o de residuos orgánicos. Ese biocombustible para aviones (biojet) no emitiría más CO<sub>2</sub> durante su combustión que el que las plantas habían atrapado durante su crecimiento. El concepto ya se ha comprobado: desde 2007, vuelos de pruebas usando mezclas de Jet A-1 y biojet han demostrado ser alternativas viables para las aeronaves modernas sin necesidad de modificarlas.



En el tiempo transcurrido desde entonces alrededor de 150.000 vuelos han utilizado esa mezcla de combustible, pero solo cinco grandes aeropuertos disponen de distribución regular de biocombustible (Oslo, Stavanger, Estocolmo, Brisbane y Los Ángeles), y algunos otros ofrecen un suministro ocasional. El uso de biocombustible por la principal aerolínea estadounidense, United, es un excelente ejemplo de la imponente magnitud de la sustitución que sería necesaria: el contrato de la compañía con un proveedor de biocombustible solo le va a proporcionar el 2 por ciento del consumo anual de combustible de la aerolínea. Es cierto que los aviones actuales son cada vez más frugales: hoy consumen en torno a un 50 por ciento menos de combustible por pasajero y kilómetro que en

1960. Pero ese ahorro se ve neutralizado por la continua expansión de la aviación, que ha elevado el consumo anual de combustible para aviones hasta más de 250 millones de toneladas en todo el mundo.

Satisfacer con biocombustible para aviones la mayor parte de esta demanda requeriría ir más allá de los residuos orgánicos y recurrir a cultivos oleaginosos de temporada (maíz, soja, colza) o perennes (palma), a cuya producción habría que destinar grandes extensiones y que generarían problemas medioambientales. Los cultivos oleaginosos en climas templados tienen un rendimiento relativamente bajo: con una producción media de 0,4 toneladas de biocombustible por hectárea de soja, Estados Unidos necesitaría dedicar 125 millones de hectáreas —una superficie mayor que la suma de Texas, California y Pensilvania, o ligeramente superior a la de Sudáfrica— a cubrir sus propias necesidades de biocombustible para aviones. Cuatro veces más que los 31 millones de hectáreas que el país dedicó en 2019 al cultivo de soja. Incluso la opción de mayor rendimiento —el aceite de palma, que produce por hectárea 4 toneladas de biocombustible para aviones— necesitaría más de 60 millones de hectáreas de selva tropical para satisfacer la demanda mundial de combustible de aviación. Lo cual implicaría cuadruplicar la superficie dedicada a la producción de aceite de palma, y conduciría a la emisión del carbono acumulado en el crecimiento natural de las plantas.

Pero ¿por qué ocupar enormes extensiones de terreno con estas plantas cuando se pueden extraer biocombustibles de algas



oleaginosas? El cultivo de algas intensivo y a gran escala requeriría relativamente poco espacio y ofrecería una productividad muy elevada. Sin embargo, la experiencia de Exxon Mobil demuestra lo difícil que sería aumentar la producción hasta las decenas de millones de toneladas de biocombustible cada año. Exxon, en colaboración con la empresa Synthetic Genomics de Craig Venter, empezó a explorar esta opción en 2009, pero en 2013, tras haber gastado más de cien millones de dólares, llegó a la conclusión de que las dificultades eran demasiado grandes y decidió reorientar su atención hacia la investigación básica a largo plazo.

Como siempre, facilitaríamos la tarea de la sustitución energética si desperdiciásemos menos, por ejemplo volando menos. Pero las previsiones apuntan al crecimiento sustancial del tráfico aéreo, en particular en Asia. Acostumbrémonos al inconfundible olor del queroseno de aviación, porque nos acompañará durante mucho tiempo y porque además se usa en máquinas en las que (como veremos en el capítulo siguiente) volar es extraordinariamente seguro.

## § 50. ¿Cuán seguro es volar?

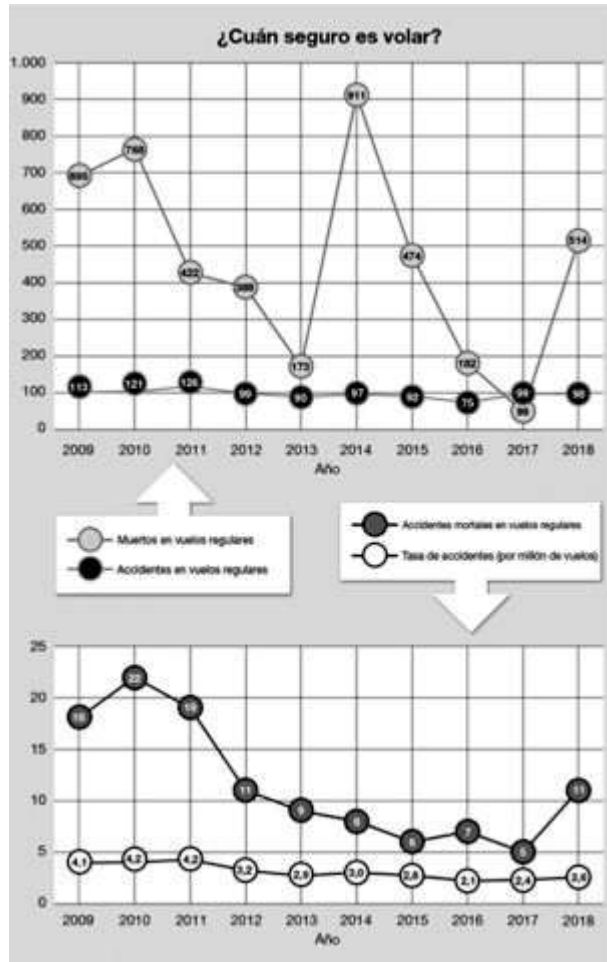
Quizá haya quien piense que 2014 fue un mal año para la aviación. Hubo cuatro accidentes con gran repercusión mediática: la aún misteriosa desaparición del vuelo 370 de Malaysia Airlines en marzo; el derribo del vuelo 17 de Malaysia Airlines en Ucrania en julio; el accidente del vuelo 5017 de Air Algérie en Mali, también en julio, con un total de 815 muertos; por último, el vuelo QZ8501 de

AirAsia que se precipitó en el mar de Java en diciembre.

Pero, según Ascend, la rama de consultoría de FlightGlobal que hace seguimiento de los accidentes de aviación, 2014 tuvo en realidad la mejor tasa de accidentes de la historia: una víctima mortal por cada 2,38 millones de vuelos. Es verdad que Ascend no incluyó el derribo del vuelo 17 de Malaysia Airlines, que fue un acto de guerra y no un accidente. Si se cuenta ese incidente, como hace la Organización de Aviación Civil Internacional en sus estadísticas, la tasa se eleva hasta 3,0, que sigue siendo mucho más baja que entre 2009 y 2011.

Y los años posteriores fueron todavía más seguros: 474 víctimas mortales en 2015, 182 en 2016 y apenas 99 en 2017. Hubo un repunte en 2018, con once accidentes fatales y 514 muertos (una cifra aún inferior a la de 2014), incluido el del Boeing 737 Max de Lion Air que se cayó frente a las costas de Yakarta en octubre. Y en 2019, a pesar de otro accidente de un Boeing 737 Max —esta vez en Etiopía— el número total de víctimas mortales fue la mitad que en 2018.

En cualquier caso, es mejor personalizar el problema al plantearlo en términos del riesgo por pasajero por hora de vuelo. Los datos necesarios para hacerlo los encontramos en el informe anual sobre seguridad de la Organización de Aviación Civil Internacional, que tiene en cuenta tanto los grandes aviones de pasajeros como otros más pequeños para trayectos más cortos.



En 2017, hasta la fecha el año más seguro en la historia de la aviación comercial, los vuelos domésticos e internacionales transportaron a 4.100 millones de pasajeros y sumaron 7,69 billones de pasajeros-kilómetro con solo 50 víctimas mortales. Puesto que el tiempo medio de vuelo es de unas 2,2 horas, esto supone aproximadamente 9.000 millones de pasajeros-hora, y 5,610-9 muertos por persona por hora en el aire. Pero ¿cuán bajo es este riesgo?

La medida de referencia evidente es la mortalidad general, la tasa anual de muertes por cada mil personas. En los países ricos, dicha tasa oscila actualmente entre 7 y 11; usaré 9 como promedio. Como

el año tiene 8.760 horas, esta mortalidad media prorratea a 0,000001, o 110-6, muertes por persona por hora de vida. Esto significa que la probabilidad media de morir al volar es de apenas 5 milésimas adicionales al mero riesgo de estar vivos. El riesgo que conlleva fumar es cien veces más alto, y lo mismo ocurre con viajar en coche. En resumen, volar nunca ha sido más seguro.

Como es obvio, la mortalidad asociada a la edad para las personas mayores es mucho más elevada. Para individuos de mi grupo de edad (mayores de 75), se sitúa en torno al 35 por 1.000, o 410-6 por hora (lo que significa que, de un millón de nosotros, cuatro morirán cada hora). En 2017 recorrí más de 100.000 kilómetros en avión y pasé en el aire más de cien horas, en grandes aviones de pasajeros propiedad de cuatro grandes aerolíneas cuyos últimos accidentes mortales ocurrieron, respectivamente, en 1983, 1993, 1997 y 2000. En cada hora de vuelo, la probabilidad de morir no era ni un 1 por ciento más alta de lo que habría sido si hubiese permanecido en tierra.

Por supuesto, he vivido momentos de tensión. El más reciente ocurrió en octubre de 2014, cuando el Boeing 767 de Air Canada en el que viajaba atravesó las franjas de turbulencias de un megatifón que estaba pasando sobre Japón.

Pero nunca olvido que lo que de verdad hay que evitar son las apacibles habitaciones de hospital. Aunque la más reciente evaluación de los errores médicos evitables ha reducido sustancialmente la magnitud que se atribuía a este riesgo, que con anterioridad se había exagerado, las hospitalizaciones siguen

estando asociadas a una mayor exposición a bacterias y virus, lo cual eleva el riesgo de contraer una infección en el hospital, en particular entre los ancianos. Así que ¡sigamos volando y evitemos los hospitales!

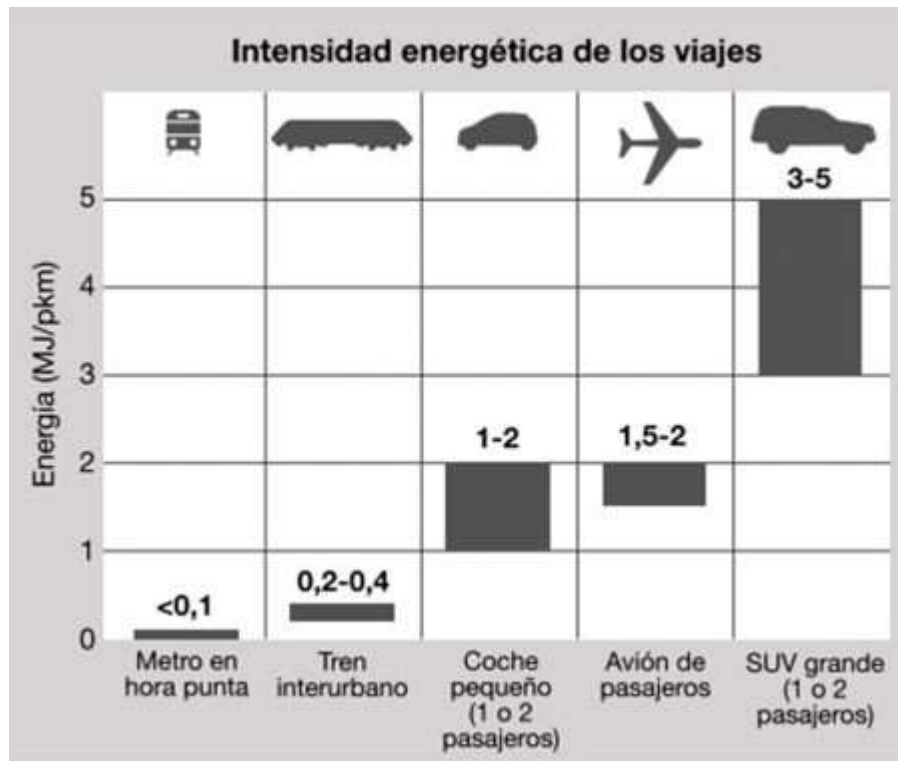
§ 51. ¿Qué medio de transporte tiene mayor eficiencia energética: el avión, el tren o el automóvil?

No tengo ninguna animosidad contra los coches y los aviones. Durante décadas, hice mis viajes locales a bordo de una sucesión de Honda Civics, y durante años he recorrido al menos 100.000 kilómetros en vuelos intercontinentales cada año. En estos dos extremos —conducir hasta una tienda de comida italiana; volar de Winnipeg a Tokio— los coches y los aviones son los amos.

La intensidad energética es la clave. Cuando soy el único pasajero, mi Honda Civic necesita en torno a 2 megajulios por pasajero-kilómetro para circular por la ciudad. Si se añade otro pasajero, esa cifra se reduce a 1 megajulio por pasajero-kilómetro, comparable a la de un autobús medio vacío. Los aviones de pasajeros son sorprendentemente eficientes: por lo general requieren en torno a 2 megajulios por pasajero-kilómetro. Cuando un avión con diseño de última generación viaja completo, puede bajar de 1,5 megajulios por pasajero-kilómetro. Por supuesto, los trenes de transporte público son muy superiores: con alta ocupación, los mejores metros necesitan menos de 0,1 megajulios por pasajero-kilómetro. Pero incluso en Tokio, que tiene una densa red de líneas de metro, la estación más cercana puede estar a más de un kilómetro de

distancia, demasiado lejos para muchas personas de movilidad reducida.

Pero ninguno de estos modos de transporte puede igualar la intensidad energética de los trenes interurbanos de alta velocidad. Típicamente, estos hacen recorridos de entre 150 y 600 kilómetros. Los modelos antiguos del innovador tren bala japonés, el *shinkansen* (que significa «nueva línea troncal»), tenían una intensidad energética de alrededor de 0,35 megajulios por pasajero-kilómetro; otros diseños más recientes de trenes de alta velocidad — el TGV francés y el ICE alemán— solo necesitan 0,2 megajulios por pasajero-kilómetro. Un orden de magnitud menos que los aviones.



No menos importante es que los trenes de alta velocidad son, en efecto, veloces. El TGV Lyon-Marsella cubre 280 kilómetros en 100 minutos, del centro de una ciudad al de la otra. En comparación, la

duración de un vuelo regular que recorre una distancia similar — 300 kilómetros entre el Aeropuerto LaGuardia de Nueva York y el Aeropuerto Logan de Boston— es de 70 minutos. A lo cual hay que sumar otros 45 minutos para la facturación, 45 minutos para el trayecto desde Manhattan hasta LaGuardia y 15 minutos más para ir desde Logan hasta el centro de Boston. La cifra total asciende a 175 minutos.

En un mundo racional —que valorase la comodidad, el tiempo, la baja intensidad energética y las bajas emisiones de carbono— el tren eléctrico de alta velocidad sería la primera opción para tales distancias. Europa es un territorio propicio para los trenes, y ya ha tomado esa decisión. Pero, aunque Estados Unidos y Canadá no tienen la densidad de población que justifique densas redes de esas conexiones, sí tienen muchas duplas de ciudades apropiadas para los trenes rápidos. Sin embargo, ninguno de estos pares cuenta con tren de alta velocidad. La línea Acela de Amtrak entre Boston y Washington no se acerca ni remotamente a la definición de tren rápido, ya que su velocidad media apenas alcanza unos míseros 110 kilómetros por hora.

Esto hace de Estados Unidos, junto con Canadá y Australia, los destacados rezagados en transporte por tren rápido. Pero hubo una época en que Estados Unidos tenía los mejores trenes del mundo. En 1934, 11 años después de que General Electric fabricara su primera locomotora diesel, la compañía ferroviaria Chicago, Burlington and Quincy puso en funcionamiento su Pioneer Zephyr, estilizado y rematado en acero inoxidable, una unidad híbrida

diesel-eléctrica de ocho cilindros y dos tiempos que proporcionaba 600 caballos de vapor (447 kilovatios). Esta potencia permitía a la Zephyr superar las velocidades de la Acela actual, y alcanzar los 124 kilómetros por hora de media en el trayecto de más de 1.600 kilómetros entre Denver y Chicago. Pero hoy en día no es realista esperar que Estados Unidos dé alcance a China: con 29.000 kilómetros de vías para trenes de alta velocidad, este país tiene ahora la más extensa red de trenes rápidos, que conecta todas las principales ciudades de su poblada mitad oriental.



## Capítulo 6

### Alimentos

#### Energía para nosotros mismos

##### *Contenido:*

*§ 52. El mundo sin amoníaco sintético*

*§ 53. Multiplicar el rendimiento de las cosechas de trigo*

*§ 54. La inexcusable magnitud del desperdicio alimentario mundial*

*§ 55. El lento addio a la dieta mediterránea*

*§ 56. Atún rojo: camino de la extinción*

*§ 57. Por qué se impone el pollo*

*§ 58. (No) beber vino*

*§ 59. Un consumo racional de carne*

*§ 60. La dieta japonesa*

*§ 61. Productos lácteos: contratendencias*

##### § 52. El mundo sin amoníaco sintético

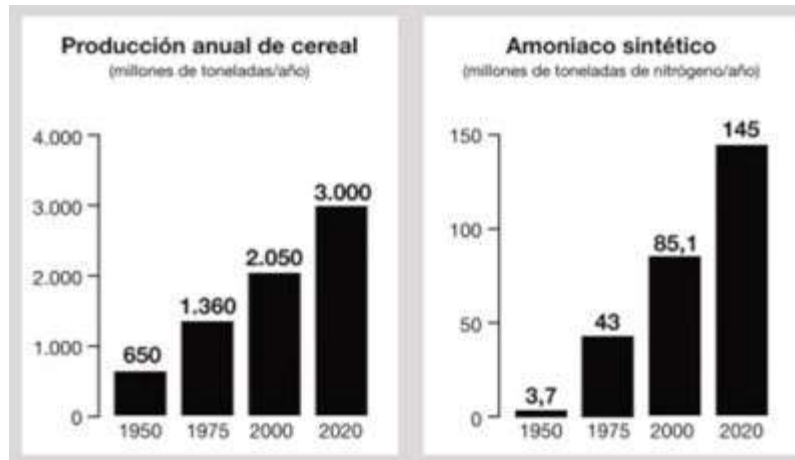
A finales del siglo XIX, los avances en química y en fisiología vegetal pusieron de manifiesto que el nitrógeno es el macronutriente (elemento necesario en cantidades relativamente grandes) más importante para la producción de cultivos. Las plantas también requieren fósforo y potasio (los otros dos macronutrientes) y varios micronutrientes (elementos que van desde el zinc hasta el hierro, todos ellos necesarios en cantidades pequeñas). Una buena cosecha de trigo holandés (9 toneladas por hectárea) contendrá alrededor de un 10 por ciento de proteína o 140 kilogramos de nitrógeno, pero

solo unos 35 kilogramos de fósforo y otro tanto de potasio.

Los agricultores tradicionales obtenían el nitrógeno necesario de dos maneras: reciclando cualesquiera materiales orgánicos a su disposición (paja, tallos, hojas, excrementos humanos y de animales) y alternando el cultivo de cereales u oleaginosas con el de plantas leguminosas (cultivos de cobertura como alfalfa, trébol y algarroba; y cultivos para la alimentación como soja, alubias, guisantes y lentejas). Estas plantas son capaces de conseguir su propio nitrógeno porque las bacterias adheridas a sus raíces pueden «fijar» nitrógeno (hacer que pase de la molécula inerte en el aire a amoníaco, que favorece el crecimiento de las plantas) y también dejan parte de ese nitrógeno en el suelo para el siguiente cultivo de cereal u oleaginosa.

La primera opción era laboriosa, en particular la recolección de los excrementos humanos o animales, y su fermentación y aplicación a los campos, pero el estiércol de origen animal o humano tenía un contenido relativamente alto de nitrógeno (por lo general, de entre el 1 y el 2 por ciento), comparado con el menos del 0,5 por ciento de nitrógeno presente en la paja o el tallo de plantas. La segunda opción requería la alternancia de cosechas, lo que impedía el cultivo continuo de cereales básicos, como el arroz o el trigo. A medida que la demanda de estos cereales fue creciendo debido al aumento de la población (y a su acumulación en núcleos urbanos), se hizo evidente que los agricultores no podrían satisfacer las futuras necesidades de alimentos sin nuevas fuentes sintéticas de nitrógeno «fijado»; esto es, nitrógeno disponible en formas que los cultivos pudiesen

aprovechar para su crecimiento.



La búsqueda de tales fuentes dio sus frutos en 1909, cuando Fritz Haber, profesor de Química en la Universidad de Karlsruhe, demostró que se podía producir amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) en condiciones de elevada presión y temperatura en presencia de un catalizador metálico. La Primera Guerra Mundial y la crisis económica de los años treinta ralentizaron la adopción mundial del proceso de Haber-Bosch, pero las necesidades alimenticias de la creciente población mundial (de 2.500 millones en 1950 a 7.750 en 2020) aseguraron su expansión masiva, desde menos de 5 millones de toneladas en 1950 a unos 150 millones en años recientes. Sin este aporte esencial habría sido imposible multiplicar la producción de cereales básicos (véase «Multiplicar el rendimiento de las cosechas de trigo») y alimentar a la población mundial actual.

Hoy en día, los fertilizantes nitrogenados sintéticos derivados del amoníaco de Haber-Bosch (la urea sólida es el producto más común) proporcionan en torno a la mitad del nitrógeno que necesitan los cultivos de todo el mundo; el resto se obtiene mediante la alternancia con cultivos de leguminosas, el reciclaje orgánico

(estiércol y residuos de otros cultivos) y el depósito atmosférico. Puesto que los cultivos proporcionan ahora el 85 por ciento de todas las proteínas alimenticias (el resto procede de pastos y de alimentos acuáticos), esto significa que sin fertilizantes nitrogenados sintéticos no podríamos garantizar la producción de alimentos suficientes para las dietas predominantes de más 3.000 millones de personas, una cifra superior a la suma de la población de China (donde el nitrógeno sintético ya proporciona más del 60 por ciento de todos los aportes) e India. Con el crecimiento de la población en zonas de Asia y en toda África, el porcentaje de la humanidad dependiente del nitrógeno sintético pronto alcanzará el 50 por ciento.

China sigue produciendo amoníaco usando carbón como materia prima, pero en otras partes del mundo el proceso de Haber-Bosch se basa en tomar el nitrógeno del aire y el hidrógeno del gas natural (principalmente, en forma de  $\text{CH}_4$ ), y usar también el gas para satisfacer los altos requisitos energéticos de la síntesis. Como consecuencia de ello, la síntesis de amoníaco en todo el mundo y la subsiguiente producción, distribución y aplicación de fertilizantes nitrogenados sólidos y líquidos son ahora responsables de alrededor del 1 por ciento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, y no disponemos de ninguna alternativa comercial libre de carbono que pueda desplegarse a corto plazo a la enorme escala necesaria para producir casi 150 millones de toneladas de  $\text{NH}_4$  al año.

Más preocupantes en un horizonte inmediato son las grandes pérdidas de nitrógeno (volatilización, filtración y desnitrificación)

como consecuencia del uso de fertilizantes. Los nitratos contaminan el agua dulce y las costas marinas (provocando la ampliación de las zonas muertas); el depósito atmosférico de nitratos acidifica los ecosistemas naturales; y el óxido nitroso ( $N_2O$ ) es ya el tercer gas de efecto invernadero más importante, por detrás del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el metano ( $CH_4$ ). Un estudio global reciente concluyó que la eficiencia en la utilización de nitrógeno de hecho se ha reducido desde principios de los años sesenta hasta situarse en torno al 47 por ciento: más de la mitad del fertilizante aplicado se pierde, en lugar de incorporarse a los cultivos cosechados.

En los países ricos, la demanda de nitrógeno sintético está llegando a la saturación, pero aún serán necesarios grandes aumentos para alimentar a los dos mil millones de personas que nacerán durante los próximos 50 años en África. Para reducir las futuras pérdidas de nitrógeno, deberíamos hacer todo lo posible por mejorar la eficiencia de la fertilización, reducir el desperdicio alimentario (véase «La inexcusable magnitud del desperdicio alimentario mundial»), y adoptar un consumo moderado de carne (véase «Un consumo racional de carne»). Ni siquiera eso permitirá acabar con todas las pérdidas de nitrógeno, pero es el precio que pagamos por haber pasado de 1.600 millones de personas en 1900 a los 10.000 millones que se prevén en 2100.

### § 53. Multiplicar el rendimiento de las cosechas de trigo

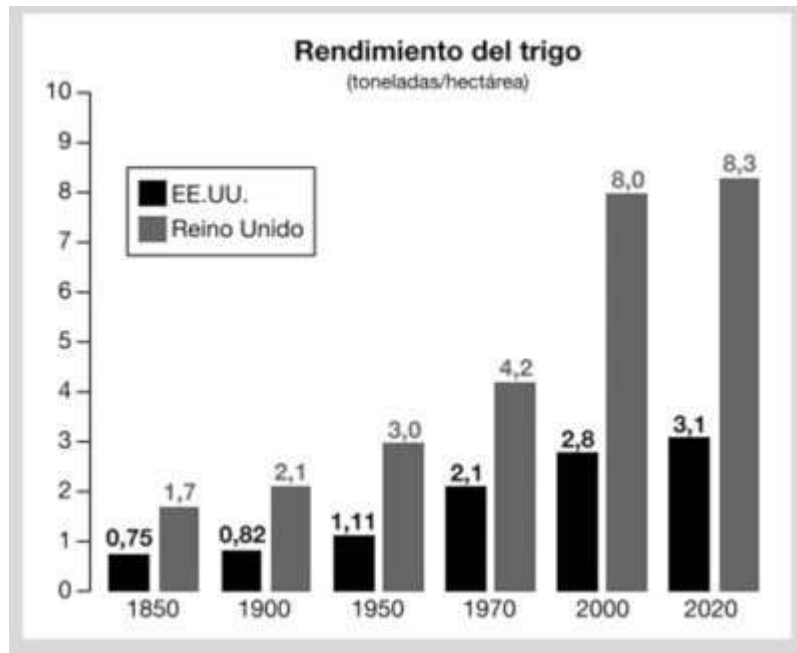
¿Cuál es el rendimiento medio del trigo en la Francia central, en el este de Kansas o en el sur de la provincia de Hebei? Aparte de los

agricultores, quienes les venden la maquinaria y compuestos químicos, los agrónomos que los aconsejan y los científicos que desarrollan nuevas variedades de cultivos, pocas personas sabrían responder a esta pregunta. Esto es así porque, en las sociedades modernas, toda la población salvo una minúscula porción vive casi completamente desconectada de todo lo que tenga que ver con la agricultura. Salvo, claro está, de lo relativo a comer los productos: cada crujiente *baguette* y cada cruasán, cada bollo de hamburguesa y cada pizza, cada panecillo al vapor (*mantou*) y cada variedad de fideos *lamian* retorcidos y estirados tienen su origen en el trigo.

Pero incluso las personas que se consideran bien formadas y ampliamente informadas, y que podrían señalar las mejoras en el rendimiento de los coches o las crecientes capacidades de ordenadores o teléfonos móviles, no tendrían ni idea de si, en promedio, el rendimiento de las cosechas de cereales básicos se había triplicado, quintuplicado o había aumentado en un orden de magnitud a lo largo del siglo XX. Sin embargo, son estos incrementos —y no los de la capacidad de los teléfonos móviles o del almacenamiento en la nube— los que han hecho posible que la población mundial casi se haya quintuplicado entre 1900 y 2020. ¿Qué ha pasado entonces con el rendimiento del trigo, el cultivo básico dominante en el mundo?

El rendimiento tradicional era bajo y altamente variable, pero la reconstrucción de la tendencia a largo plazo sigue siendo objeto de debate. Aunque está relativamente bien documentada (durante casi un milenio), esto es lo que ocurre incluso con la historia del

rendimiento del trigo en Inglaterra, que se solía expresar como retorno sobre las semillas plantadas. Tras una mala cosecha, hasta el 30 por ciento de la producción de trigo debía guardarse para usarla como semillas al año siguiente, aunque ese porcentaje por lo general nunca bajaba del 25 por ciento. A principios de la Edad Media, el rendimiento podía ser de tan solo 500 o 600 kilos por hectárea (esto es, de 0,5 toneladas). Solo en el siglo XVI empezó a ser habitual que el rendimiento alcanzase 1 tonelada, mientras que en 1850 el promedio era de 1,7 toneladas por hectárea, aproximadamente el triple que en 1300. Entonces llegó una combinación de medidas (la alternancia de cultivos con leguminosas capaces de fijar el nitrógeno, el drenaje de los campos, un uso más intensivo del estiércol y nuevas variedades de cultivos) que provocaron que el rendimiento superase las 2 toneladas por hectárea en una época en que en Francia seguía siendo de tan solo 1,3 toneladas por hectárea, mientras que los inmensos campos de las grandes llanuras estadounidenses producían únicamente en torno a 1 tonelada por hectárea (¡esta cifra seguía siendo el promedio de todo el país en fecha tan reciente como 1950!).



Tras siglos de lentos avances incrementales, la introducción de las variedades de trigo de tallo corto supuso una mejora decisiva. Las plantas tradicionales eran altas (casi tan altas como los campesinos de Brueghel que las segaban con guadañas), y producían entre tres y cinco veces más paja que grano. El primer trigo de tallo corto moderno (basado en plantas del este de Asia) se empezó a usar en Japón en 1935. Después de la Segunda Guerra Mundial, llegó a Estados Unidos y a manos de Norman Borlaug en el CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, en México), cuyo equipo creó en 1962 dos variedades semienanas de alto rendimiento (que producían una cantidad similar de grano y de paja). Borlaug obtuvo el Premio Nobel; el mundo obtuvo cosechas inusitadas.

Entre 1965 y 2017, el rendimiento medio del trigo en todo el mundo casi se triplicó, pasando de 1,2 a 3,5 toneladas por hectárea; la media en Asia se triplicó con creces (de 1 a 3,3 toneladas por



hectárea), la de China se quintuplicó con holgura (pasó de 1 a 5,5 toneladas por hectárea), y el promedio holandés, que ya era extraordinariamente alto dos generaciones antes, pasó a ser más del doble (de 4,4 a 9,1 toneladas por hectárea). En ese periodo, la cosecha mundial de trigo casi se triplicó, hasta los 775 millones de toneladas, mientras que la población se multiplicó por un factor de 2,3, lo que hizo que el suministro medio per cápita aumentase en un 25 por ciento y permitió que el mundo siguiese teniendo harina suficiente para el crujiente *Bauernbrot* alemán (que se hace con harina de trigo y de centeno), los fideos *udon* japoneses (harina de trigo, una pizca de sal y agua) y el clásico *mille-feuille* francés (el hojaldre de las capas solo lleva harina, mantequilla y un poco de agua).

Pero hay motivos de preocupación. El rendimiento medio del trigo ha ido estancándose no solo en los países de la Unión Europea con la mayor productividad, sino también en China, India, Pakistán y Egipto, que aún están muy alejados del promedio europeo. Las razones de esta tendencia van desde restricciones por motivos medioambientales sobre el uso de fertilizantes nitrogenados hasta escasez de agua en determinadas regiones. Al mismo tiempo, la producción de trigo debería beneficiarse de una mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, y las mejoras en agronomía deberían contribuir a cerrar la brecha de rendimiento (la diferencia entre el rendimiento potencial de una región y su productividad real). En cualquier caso, necesitaríamos bastante menos trigo si fuésemos capaces de reducir —de una vez— nuestro desperdicio

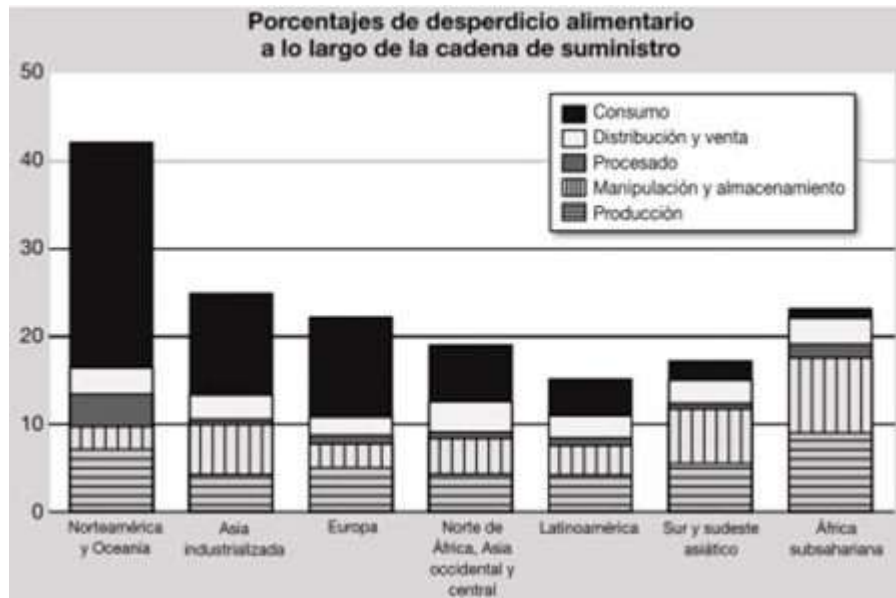
alimentario, que es indefendiblemente alto.

#### § 54. La inexcusable magnitud del desperdicio alimentario mundial

El mundo desperdicia alimentos a una escala que debe calificarse de excesiva, inexcusable y, habida cuenta de nuestra gran preocupación por el estado global del medioambiente y por la calidad de vida humana, francamente incomprensible. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura sitúa las pérdidas anuales globales entre el 40 y el 50 por ciento para tubérculos, frutas y verduras, en el 35 por ciento para el pescado, el 30 por ciento para los cereales y el 20 por ciento para las oleaginosas, la carne y los productos lácteos. Esto significa que, globalmente, se desperdicia al menos una tercera parte de todos los alimentos.

Los motivos de este desperdicio alimentario son diversos. En los países más pobres, con mucha frecuencia se debe al deficiente almacenamiento (roedores, insectos y hongos se ceban con las semillas, verduras y frutas que se guardan de manera inadecuada) y falta de refrigeración (que causa el rápido deterioro de la carne, el pescado y los productos lácteos). Por estas razones, en el África subsahariana la mayor parte del desperdicio ocurre antes incluso de que los alimentos lleguen a los consumidores. Sin embargo, en los países ricos, la causa principal es simplemente la brecha existente entre el exceso de producción y el consumo real: a pesar de la elevada frecuencia con la que comen en exceso, la mayoría de los

países ricos dota a sus ciudadanos de un suministro alimentario que sería, en promedio, adecuado para quienes se dedican a labores físicamente exigentes, como leñadores o mineros, no para poblaciones en gran medida sedentarias y envejecidas.



No sorprende saber que Estados Unidos es uno de los peores casos, y disponemos de mucha información que cuantifica el exceso. El suministro medio de alimentos en Estados Unidos asciende a unas 3.600 kilocalorías por persona. Este es el suministro, no el consumo, lo cual es positivo.

Tengamos en cuenta que, si excluimos a los bebés y a los octogenarios que no salen de casa, cuya necesidad diaria es de menos de 1.500 kilocalorías, eso dejaría más de 4.000 kilocalorías de media para los adultos: puede que los estadounidenses coman demasiado, pero todos no podrían comer tanto todos los días. El Servicio Nacional de Estadísticas Agropecuarias (USDA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos ajusta estas cifras al considerar «el deterioro y otros tipos de

desperdicio», y sitúa la cifra real de alimentos disponibles para el consumo en torno a las 2.600 kilocalorías diarias por persona. Pero ni siquiera eso es del todo correcto. Tanto las encuestas en las que los participantes declaran su consumo de alimentos (parte de la Encuesta Nacional para el Examen de la Salud y de la Nutrición) como los cálculos basados en estimaciones de las necesidades metabólicas indican que el consumo diario medio real en Estados Unidos es de unas 2.100 kilocalorías por persona. Si restamos esta cifra a las 3.600 kilocalorías per cápita del suministro de alimentos, obtenemos una pérdida de 1.500 kilocalorías per cápita, lo que significa que en Estados Unidos se desperdicia el 40 por ciento de los alimentos.

No siempre fue así. A principios de los años setenta, la USDA calculaba que la disponibilidad media de alimentos per cápita (teniendo en cuenta el desperdicio ocurrido antes de que los alimentos llegasen a las tiendas) era de menos de 2.100 kilocalorías por día, casi un 25 por ciento menos que ahora. El Instituto Nacional para la Diabetes y las Enfermedades Digestivas y Renales estima que el desperdicio alimentario per cápita en Estados Unidos aumentó en un 50 por ciento entre 1974 y 2005, y el problema ha empeorado desde entonces.

Pero incluso si la pérdida diaria en Estados Unidos se hubiese mantenido en 1.500 kilocalorías per cápita, un sencillo cálculo muestra que en 2020 (con unos 333 millones de habitantes) este desperdicio alimentario podría haber proporcionado una nutrición adecuada (2.200 kilocalorías per cápita) a unos 230 millones de

personas, una cifra ligeramente superior a la población de Brasil, el país más grande de Latinoamérica y el sexto más poblado del mundo.

Sin embargo, los estadounidenses, al mismo tiempo que desperdician comida, comen mucho más de los que les conviene. La prevalencia de la obesidad —definida por un índice de masa corporal superior a 30— se ha duplicado con creces entre 1962 y 2010, y ha pasado del 13,4 por ciento al 35,7 por ciento entre los adultos mayores de 20 años. Si sumamos a esta cifra la de personas con sobrepeso (un IMC de entre 25 y 30), vemos que, entre los adultos, el 74 por ciento de los varones y el 64 por ciento de las mujeres tiene un peso excesivamente alto. Más preocupante aún, habida cuenta de que la obesidad es normalmente un estado crónico, es que ese porcentaje ahora se sitúa por encima del 50 por ciento entre los niños de más de seis años.

El Programa de Acción sobre Desperdicio y Recursos de Reino Unido (WRAP, por sus siglas en inglés) ofrece distintas perspectivas al rastrear el fenómeno con un inusual grado de detalle. En Gran Bretaña, el desperdicio alimentario total asciende a alrededor de 10 millones de toneladas al año, con un valor de en torno a 15.000 millones de libras (casi 20.000 millones de dólares), pero las partes no comestibles (pieles, mondas, huesos) suponen solo el 30 por ciento de ese total, por lo que el 70 por ciento del desperdicio podría haberse comido. WRAP también documentó los porqués del proceso: casi el 30 por ciento del desperdicio se debe a que «no se consumió a tiempo»; una tercera parte a que había pasado la fecha de

«consumo recomendado»; en torno a un 15 por ciento a que se había cocinado o servido demasiada cantidad; y el resto a otros motivos, incluidas las preferencias personales, las manías al comer y los accidentes.

Pero la pérdida de alimentos trasciende el desperdicio nutricional: conlleva inevitablemente un sustancial desperdicio de mano de obra y energía empleadas directamente en el manejo de la maquinaria agrícola y las bombas de irrigación, y de manera indirecta en la producción del acero, el aluminio y los plásticos necesarios para fabricar esos instrumentos mecánicos y para sintetizar fertilizantes y pesticidas. El esfuerzo agrícola adicional también acaba dañando el medioambiente al provocar erosión de los suelos, filtración de nitratos, pérdida de biodiversidad y el crecimiento de bacterias resistentes a los antibióticos; además, la producción de alimentos que se acaban desperdiciando podría ser responsable de hasta el 10 por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los países ricos tienen que producir una cantidad considerablemente inferior de alimentos, y consumirlos con un desperdicio considerablemente inferior. Sin embargo, el mantra de una mayor producción de alimentos resuena más que nunca. Su modalidad más reciente consiste en producir más, inundando finalmente los mercados con pseudocarne hecha a base de proteínas de legumbres modificadas. En lugar de esto, ¿por qué no intentar encontrar formas inteligentes de reducir el desperdicio alimentario hasta niveles más aceptables? Disminuir los residuos de alimentos a la mitad despejaría el camino a un uso más racional de

los alimentos en todo el mundo, algo que podría reportar enormes beneficios: el WRAP estima que por cada dólar que se invierte en la prevención del desperdicio alimentario se obtiene una cantidad catorce veces mayor en beneficios asociados con dicha reducción. ¿No es esto lo suficientemente convincente?

### § 55. El lento *addio* a la dieta mediterránea

Los beneficios de la dieta mediterránea se difundieron ampliamente cuando Ancel Keys publicó, en 1970, la primera entrega de su largo estudio sobre la nutrición y la salud en Italia, Grecia y otros cinco países, en el que concluyó que dicha dieta estaba relacionada con una baja incidencia de las dolencias cardíacas.

Los rasgos clave son una alta ingesta de carbohidratos (sobre todo en forma de pan, pasta y arroz), complementados por legumbres (alubias, guisantes, garbanzos) y frutos secos, productos lácteos (en particular, queso y yogur), frutas y verduras, marisco y alimentos de temporada poco procesados, por lo general cocinados con aceite de oliva. También incluye cantidades mucho más modestas de azúcar y carne. Y lo mejor de todo: se consume vino en abundancia con la comida. Esta última costumbre ya no la recomiendan los dietistas, pero es evidente que la dieta mediterránea reduce el riesgo de problemas cardiovasculares, rebaja el riesgo de determinados cánceres en torno a un 10 por ciento y ofrece cierta protección contra la diabetes de tipo 2. Caben pocas dudas de que, si los países occidentales la hubiesen seguido de forma generalizada, no habrían alcanzado los niveles de obesidad prevalentes hoy en día.

En 2013, la UNESCO inscribió la dieta en la Lista Representativa del Patrimonio Cultural Intangible de la Humanidad, mencionando a Croacia, Chipre, Grecia, Italia, Marruecos, Portugal y España.

Pero incluso en esos paraísos de la salud hay un problema creciente: hoy en día, la verdadera dieta mediterránea solo se come en ciertos puntos aislados de la costa o de la montaña. La transición alimenticia ha sido rápida y de amplio alcance, en particular en los dos países más poblados de la región, Italia y España.



Durante los últimos cincuenta años, la dieta italiana se ha vuelto *más* mediterránea solo en lo relativo a la fruta, cuyo consumo ha aumentado casi en un 50 por ciento. Entretanto, el consumo de



grasas y carne de origen animal se ha triplicado. El aceite de oliva ahora proporciona menos de la mitad de todas las grasas alimenticias y —*incredible!*— ha disminuido el consumo de pasta y más aún el de vino, que se ha reducido en un 75 por ciento. Los italianos compran ahora tanta cerveza como *rosso* y *bianco*.

España ha abandonado la dieta mediterránea aún más rápidamente y de manera más completa. Los españoles todavía disfrutan del marisco, cuyo consumo ha aumentado, pero han dejado los cereales, las verduras y las legumbres. El aceite de oliva ahora proporciona menos de la mitad de todas las grasas del país. Y, sorprendentemente, los españoles solo beben de media alrededor de 20 litros de vino al año, menos de la mitad de la cerveza que consumen. ¡Esto es comparable a lo que se ve en Alemania y en los Países Bajos!

¿Podría haber un símbolo más potente de la desaparición de la dieta que ver cómo la cerveza supera al tinto? La mayoría de los europeos (que guardan en la memoria los antiguos patrones alimentarios) no son conscientes de que la ingesta per cápita de carne en España, que era de tan solo 20 kilogramos al año cuando murió Franco en 1975, ahora alcanza casi los 100 kilogramos, muy por delante de países tradicionalmente carnívoros como Alemania, Francia y Dinamarca.

Y las perspectivas no pintan bien. Un nuevo patrón alimenticio se ha instalado como norma entre los jóvenes, que también compran menos alimentos frescos que sus padres. En España, por ejemplo, no escasean los McDonald's, KFC, Taco Bells y Dunkin'Donuts (o

Dunkin' Coffee, como se llama allí). La difusión global de la comida rápida carnívora, grasa, salada y azucarada está acabando no solo con una antigua herencia culinaria, sino también con una de las pocas ventajas que el mundo antiguo tenía sobre el moderno.

Las razones de este cambio han sido universales. Los mayores ingresos hacen posible un mayor consumo de carne, grasa y azúcar. Las familias tradicionales han sido sustituidas por hogares con dos sueldos o unipersonales, que cocinan menos en casa y compran más comidas precocinadas. Además, un estilo de vida más ajetreado hace que se tienda a los bocadillos y a la comida rápida. No es de extrañar que la tasa de obesidad haya aumentado en España e Italia, y también en Francia.

#### § 56. Atún rojo: camino de la extinción

Pensemos en el atún. Su cuasiperfecta hidrodinámica y su eficiente propulsión, accionada por sus poderosos músculos de sangre caliente, hacen de él un formidable nadador. Los más grandes superan los 70 kilómetros por hora (unos 40 nudos), una velocidad considerable para una lancha motora, y muy superior a la de cualquier submarino conocido.

Pero su tamaño y lo sabrosa que es su carne han puesto a los más majestuosos de estos peces camino de la extinción. La carne blanca que compramos en lata viene del atún blanco, un pez pequeño, normalmente de menos de 40 kilogramos, y relativamente abundante (la carne roja enlatada proviene del atún listado, otro atún pequeño y abundante). Por el contrario, el atún rojo (en

japonés, *maguro* o *hon-maguro*, «atún verdadero») siempre ha sido el menos común de los atunes. Los adultos pueden superar los tres metros y pesar más de 600 kilogramos.

El atún rojo es el pescado preferido en Japón para hacer sashimi y sushi. Cuando estos platos se hicieron populares en Edo (Tokio) durante el siglo XIX, los cortes más apreciados en un principio provenían de los músculos rojos internos (*akami*), menos grasos; posteriormente, las preferencias se orientaron hacia cortes de los costados, por debajo de la línea media del cuerpo (el adiposo *chutoro*) y del vientre del pez (el extragrasso *otoro*). Atunes rojos excepcionales se han vendido a precios excepcionales en las subastas de Año Nuevo en Tokio.

El récord más reciente se estableció en 2019: 3,1 millones de dólares por un atún rojo de 278 kilogramos capturado en la costa norte de Japón. ¡Más de 11.100 dólares por kilogramo!



*Otro precio de récord para un atún rojo.*

Japón consume alrededor del 80 por ciento de la pesca mundial de atún rojo, muy por encima de la cuota que tiene asignada; para cubrir la diferencia, importa atunes rojos tanto frescos, transportados en avión, como eviscerados y congelados en bloque. Para satisfacer la creciente demanda se recurre cada vez más a peces capturados en el medio salvaje y luego engordados en jaulas, donde son alimentados con sardinas, caballas y arenques. Esa demanda está alcanzando cotas nunca vistas, ya que la locura del sushi ha convertido una delicia japonesa en un alimento símbolo de estatus en todo el mundo.

La pesca mundial declarada de tres especies de atún rojo es de 75.000 toneladas anuales. Y aunque es inferior a la de hace 20 o 40 años, la captura ilegal o infradeclarada, muy generalizada y constante durante décadas, sigue siendo considerable. Una novedosa comparación entre los cuadernos de bitácora de la flota japonesa de pesca de atún (que se consideran muy precisos) y el atún vendido en las grandes lonjas de Japón reveló que una cantidad era al menos el doble de la otra.

Los principales países pesqueros se han resistido a aceptar cualquier recorte importante en sus cuotas de capturas. Por lo tanto, la única manera de garantizar la supervivencia a largo plazo de las especies en mayor peligro pasa por atajar su comercio. En 2010, el Fondo Mundial para la Naturaleza, expertos en pesca de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Principado de Mónaco pidieron que se prohibiese el comercio de atún rojo del Atlántico, pero su propuesta fue

rechazada. De hecho, es posible que ya sea demasiado tarde para que incluso una prohibición total en el Mediterráneo y el Atlántico nororiental impida el colapso de estos caladeros de atún rojo.

Además, por desgracia, es muy difícil criar atunes rojos a partir de huevas en una granja marina, como si dijésemos, porque la mayoría de las diminutas y frágiles larvas no sobreviven a sus primeras tres o cuatro semanas de vida. La explotación japonesa de mayor éxito, el Laboratorio Pesquero de la Universidad Kindai, lleva alrededor de treinta años trabajando para perfeccionar este proceso, pero a pesar de ello apenas el 1 por ciento de los peces sobrevive hasta la edad adulta.

La disminución de las capturas y las dificultades de la cría han dado lugar a que en todo el mundo, y en particular en Estados Unidos, se generalice la práctica de denominar las especies de manera incorrecta. Si pides atún en un restaurante, es muy probable que lo que comas sea una especie distinta que la que figura en la carta: en Estados Unidos, ¡más de la mitad de todo el atún que se sirve en los restaurantes y en las tiendas de sushi está mal denominado!

### § 57. Por qué se impone el pollo

Durante generaciones, la carne de vaca fue la más consumida en Estados Unidos, seguida de la de cerdo. Cuando el consumo anual de vacuno alcanzó su máximo en 1976, en torno a los 40 kilogramos (de peso deshuesado) per cápita, suponía casi la mitad de toda la carne; el porcentaje de carne de pollo apenas superaba el 20 por

ciento. Pero en 2010 el pollo se puso a la altura de la carne de vaca, y en 2018 su porcentaje alcanzó el 36 por ciento, casi veinte puntos porcentuales por encima del vacuno. Hoy en día, el estadounidense medio come al año casi 30 kilogramos de pollo deshuesado, en su inmensa mayoría comprado troceado o en forma de trozos procesados (desde pechugas sin hueso hasta McNuggets de pollo).

La constante obsesión de los estadounidenses con la dieta —en este caso, el temor al colesterol alimentario y a las grasas saturadas en la carne roja— ha influido en este cambio. Sin embargo, las diferencias no son tan grandes: 100 gramos de carne magra de vaca contienen 1,5 gramos de grasas saturadas, en comparación con 1 gramo para la pechuga de pollo sin piel (que, de hecho, tiene más colesterol). Pero el principal motivo para el ascenso del pollo ha sido su menor precio, que refleja su ventaja metabólica: ningún otro animal terrestre domesticado puede convertir el pienso en carne con tanta eficiencia como los pollos de engorde, criados específicamente para la producción de carne. Los avances modernos en la cría de pollos tienen mucho que ver con esta eficiencia.

Durante la década de 1930, la eficiencia media de la alimentación de los pollos de engorde (de unas 5 unidades de pienso por cada unidad de peso vivo) no era mejor que la de los cerdos. Esa tasa de alimentación se redujo a la mitad a mediados de los años ochenta, y las ratios más recientes entre pienso y carne del Departamento de Agricultura estadounidense muestran que solo se necesitan alrededor de 1,7 unidades de pienso (que toman como referencia el maíz) para producir una unidad de peso vivo de pollo de engorde

(antes de su sacrificio), comparadas con las cerca de 5 unidades para los cerdos y las casi 12 unidades para las reses.



Puesto que el peso comestible como porcentaje del peso vivo varía de forma sustancial entre las principales especies criadas para carne (ronda el 60 por ciento para el pollo, el 53 por ciento para el cerdo y tan solo el 40 por ciento para el vacuno), resulta aún más revelador calcular la eficiencia de alimentación por unidad de carne comestible. Recientemente, estas relaciones son de 3-4 unidades de pienso por unidad de carne comestible para los pollos de engorde, de 9-10 unidades para el cerdo y de 20-30 para el vacuno. Estas cifras corresponden a promedios en la eficiencia de la conversión

entre pienso y carne del 15, el 10 y el 4 por ciento, respectivamente. Además, los pollos de engorde se han seleccionado para que maduren más deprisa y acumulen una cantidad extraordinaria de carne. Las aves de corral tradicionales se sacrificaban a la edad de un año, cuando pesaban alrededor de un kilogramo. El peso medio de los pollos de engorde estadounidenses aumentó desde 1,1 kilogramos en 1925 hasta casi 2,7 en 2018, mientras que el periodo de alimentación típico se redujo de 112 días en 1925 a tan solo 47 en 2018.

Los consumidores se benefician mientras las aves sufren. Ganan peso tan rápidamente porque pueden comer todo lo que quieran mientras permanecen a oscuras y en estricto confinamiento. Como los consumidores prefieren la carne magra de pechuga, la selección de pechugas de tamaño desproporcionadamente grande desplaza el centro de gravedad hacia delante, impide el movimiento natural y somete las patas y el corazón del ave a mucho estrés. Además, no puede moverse: según el Consejo Nacional para el Pollo, un pollo de engorde dispone tan solo entre de 560 y 650 centímetros cuadrados, una superficie solo ligeramente superior a la de un folio estándar DIN A4. Como los largos periodos de oscuridad favorecen el crecimiento, los pollos de engorde maduran en un ambiente cuya luz se asemeja a la del ocaso. Esta situación altera sus ritmos circadianos y conductuales normales.

Por una parte, tenemos la vida de los pollos acortada (menos de siete semanas para un ave cuyo tiempo de vida normal es de hasta ocho años) y cuerpos malformados confinados en la oscuridad; por



otra, a finales de 2019 el precio de venta rondaba los 2,94 dólares por libra (6,47 dólares por kilogramo) para la pechuga deshuesada, comparados con los 4,98 dólares por libra para el redondo de ternera y 8,22 dólares por libra para el solomillo de primera.

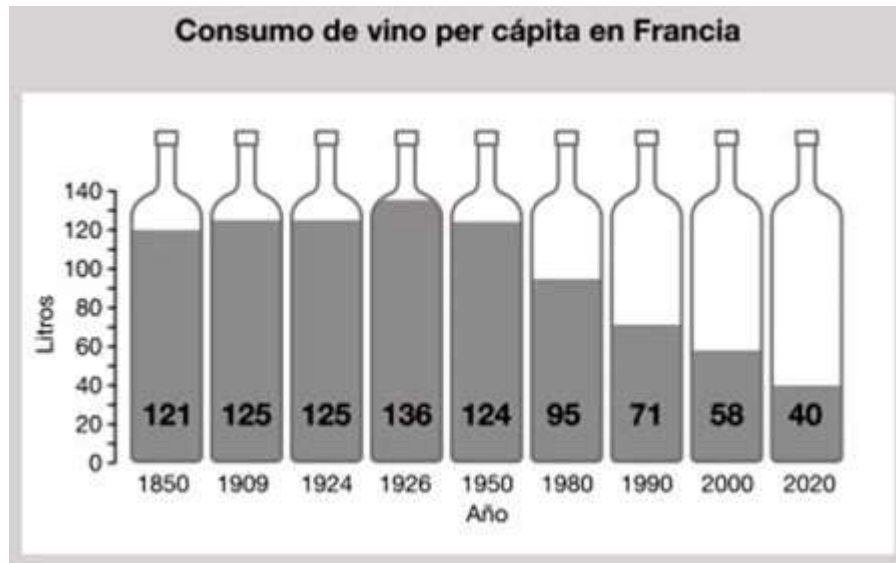
Pero el dominio del pollo aún no es global; el cerdo, gracias a su predominio en China y en Europa, continúa en cabeza por un margen de alrededor del 10 por ciento, mientras que la de vacuno sigue siendo la carne líder en la mayoría de los países sudamericanos. Aun así, en el plazo de una o dos décadas, es casi seguro que los pollos de engorde, producidos en masa en confinamiento, alcanzarán el primer puesto mundial. A la vista de esta realidad, los consumidores deberían estar dispuestos a pagar un poco más para que los productores hagan que la corta vida de estas aves sea menos estresada.

## § 58. (No) beber vino

Francia y el vino, ¡qué relación tan icónica y, durante siglos, tan inmutable! La viticultura, que introdujeron allí los griegos mucho antes de que los romanos conquistasen la Galia, experimentó una gran expansión durante la Edad Media y acabó convirtiéndose en un símbolo de calidad (Burdeos, Borgoña, Champaña) tanto dentro como fuera del país, es desde hace tiempo, junto al hábito de beber vino y a la exportación de sus caldos, uno de los referentes clave de la identidad nacional francesa. Francia siempre produjo y bebió en abundancia; en las regiones vinícolas, los campesinos y los aldeanos consumían sus propias cosechas, mientras que los

pueblos y las ciudades disfrutaban de una amplia selección de sabores y precios.

Las estadísticas periódicas sobre el consumo per cápita de vino en Francia comienzan en 1850, con un elevado promedio de 121 litros al año, casi dos vasos medianos (de 175 mililitros) al día. En 1890, una plaga de filoxera (que había comenzado en 1863) había reducido la cosecha de uvas en el país en casi un 70 por ciento respecto al máximo alcanzado en 1875, y hubo que reconstruir los viñedos franceses mediante injertos de cepas (en su mayoría americanas) resistentes a la enfermedad. Como consecuencia de ello, el consumo anual de vino fluctuó, pero el aumento de las importaciones (cuyo volumen en 1887 era la mitad del de la producción nacional) evitó cualquier disminución acusada del suministro total, y la recuperación final de los viñedos trajo consigo un pico previo a la Primera Guerra Mundial de 125 litros en 1909. Esa cifra se igualó en 1924 y se superó durante los dos años siguientes, hasta que en 1926 se alcanzó un récord histórico de 136 litros per cápita al año; en 1950, era apenas ligeramente inferior, de unos 124 litros.



En la posguerra, el nivel de vida en Francia siguió siendo sorprendentemente bajo: según el censo de 1954, solo el 25 por ciento de los hogares tenía un aseo interior, y apenas el 10 por ciento disponía de bañera, ducha o calefacción central. Pero todo eso cambió rápidamente durante los años sesenta, y la creciente riqueza también trajo consigo notables cambios alimenticios, junto con la reducción en la ingesta de vino. En 1980, el promedio anual per cápita había bajado a 95 litros, en 1990 cayó hasta los 71 litros y en el año 2000 había disminuido hasta tan solo 58 litros: una reducción a la mitad en el transcurso del siglo XX. En el siglo XXI ha continuado el descenso, y los datos más recientes disponibles sitúan el promedio en tan solo 40 litros, una cifra que es un 70 por ciento inferior al récord de 1926. La encuesta sobre consumo de vino de 2015 (que se ha repetido en 2020) detalla profundas divisiones generacionales y de género que explican la tendencia a la baja.

Hace cuarenta años, más de la mitad de los adultos franceses

bebían vino casi a diario, mientras que hoy el porcentaje de adultos que beben vino con frecuencia apenas asciende al 16 por ciento. De manera más específica, ese porcentaje es del 23 por ciento entre los hombres y del 11 por ciento entre las mujeres; de tan solo el 1 por ciento para las personas con edades comprendidas entre 15 y 24 años y del 5 por ciento para la franja entre los 25 y los 24 años, en comparación con el 38 por ciento para personas mayores de 65 años. Obviamente, esta división generacional y entre sexos no apunta a la perspectiva de que el consumo vaya a aumentar en el futuro, y afecta a todas las bebidas alcohólicas: cerveza, licores y sidra también han experimentado reducciones graduales en su consumo, mientras que entre las bebidas con un mayor aumento de consumo per cápita están el agua mineral y con gas (cuya ingesta es aproximadamente el doble que en 1990), los zumos de frutas y los refrescos carbonatados.

A medida que beber vino pasó de ser una práctica habitual a un capricho ocasional, Francia perdió también su primacía histórica en el consumo de vino en favor de Eslovenia y Croacia (casi 45 litros per cápita al año en ambos países). Pero si bien ningún país de tradición vinícola ha experimentado una reducción mayor que Francia—tanto en términos absolutos como relativos—, Italia no anda lejos, y el consumo de vino también se ha reducido en España y en Grecia.

Sin embargo, una tendencia positiva ha sido que las exportaciones francesas de vino siguen siendo potentes, y de hecho establecieron un nuevo récord en 2018 (de unos 11.000 millones de dólares). Los

precios exclusivos que alcanzan los productos franceses se reflejan en el hecho de que suponen el 15 por ciento del comercio mundial de vinos y bebidas espirituosas, pero el 30 por ciento del valor total. Los estadounidenses (cuyo consumo medio per cápita de vino ha aumentado más del 50 por ciento en los últimos veinte años) son los mayores importadores de vinos franceses, y la demanda por parte de los nuevos ricos chinos constituye una parte cada vez mayor de las ventas.

Pero en el país que dio al mundo innumerables *vins ordinaires* así como *Grands Crus Classés* de precios exorbitantes, el sonido del tintineo de las copas y los brindis a la voz de *santé* se han convertido en una costumbre en peligro de extinción.

### § 59. Un consumo racional de carne

Comer carne en general (y carne de vacuno en particular) se ha incorporado a la lista de los hábitos muy indeseables, al sumarse a las antiguas inquietudes sobre los inconvenientes de la carne —que van desde sus supuestos efectos perjudiciales para salud al extraordinariamente elevado uso de tierra y consumo de agua necesarios para cultivar pienso— las advertencias casi apocalípticas sobre el metano procedente del ganado como factor clave del cambio climático. La realidad es mucho menos incendiaria. Somos —como los chimpancés, nuestros parientes primates más cercanos, cuyos machos son entusiastas cazadores de animales más pequeños, entre otros monos y crías de cerdos salvajes— una especie omnívora, y la carne siempre ha sido una parte importante de

nuestra dieta habitual. La carne (junto con la leche y los huevos) es una excelente fuente de las proteínas dietéticas completas necesarias para el crecimiento; contiene importantes vitaminas (sobre todo, las del complejo B) y minerales (hierro, zinc, magnesio); es además una fuente satisfactoria de los lípidos dietéticos (grasas que provocan la sensación de saciedad, y que por ello eran muy apreciados por las sociedades tradicionales).

Resulta inevitable que los animales, en particular el ganado vacuno, sean conversores ineficientes de pienso en carne (véase «Por qué se impone el pollo»), y los países ricos han incrementado su producción de carne en tal medida que el cometido principal de la agricultura ha dejado de ser el cultivo de alimentos destinados a las personas para pasar a ser la obtención de pienso para los animales. En Norteamérica y Europa, en torno al 60 por ciento de la producción agrícola total se destina a pienso, no directamente a alimentos. Esto, como es obvio, tienen importantes consecuencias medioambientales, en particular debido a las necesidades de agua y de fertilizantes nitrogenados. Al mismo tiempo, citar el enorme volumen de agua necesario para producir el pienso para el ganado es bastante engañoso. La cantidad mínima de agua necesaria por kilogramo de carne de res sin hueso es, de hecho, alta, del orden de 15.000 litros, pero apenas en torno a medio litro acaba incorporada a la carne, mientras que más del 99 por ciento de esa agua necesaria para obtener los cultivos forrajeros acaba volviendo a la atmósfera a través de la evaporación y la transpiración de las plantas, y vuelve a caer en forma de lluvia.



*La cocina grasa: Pieter van der Heyden, inspirado en Pieter Brueghel.*

En cuanto a los efectos de la ingesta de carne sobre la salud, estudios a gran escala muestran que un consumo moderado no está asociado con ningún resultado adverso. Si uno desconfía de sus metodologías, basta con comparar la esperanza de vida (véase el capítulo siguiente) con el consumo medio de carne per cápita. En lo más alto de la clasificación de longevidad se sitúan los japoneses (consumidores moderados de carne: en 2018, casi exactamente 40 kilogramos en peso en canal per cápita), seguidos de los suizos (consumidores considerables, con más de 70 kilogramos), los españoles (los mayores consumidores de carne en Europa, con más

de 90 kilogramos), los italianos (a poca distancia, con más de 80 kilogramos) y los australianos (con más de 90 kilogramos, de los cuales alrededor de 20 kilogramos provienen de carne de vacuno). Adiós a la relación entre la carne y la falta de longevidad.

Al mismo tiempo, la dieta japonesa (de hecho, la dieta de Asia oriental en general) muestra que no hay ningún beneficio adicional, ni de salud ni de longevidad, en un elevado consumo de carne, y por este motivo abogo firmemente por un consumo racional basado en una ingesta moderada de carne producida con un reducido impacto medioambiental. La clave para que este hábito se adoptase de forma global pasaría por ajustar los porcentajes de los tres tipos dominantes de carne. En 2018, para el cerdo, el pollo y el vacuno, respectivamente, fueron del 40, el 37 y el 23 por ciento de la producción mundial de unos 300 millones de toneladas; si el reparto pasase a ser de 40, 50 y 10 por ciento, podríamos (gracias al pienso que se ahorraría al reducir la ineficiente producción de carne de vacuno) generar fácilmente un 30 por ciento más de carne de pollo y un 20 por ciento más de cerdo, al mismo tiempo que reduciríamos a menos de la mitad la carga medioambiental del vacuno, y todo ello mientras se obtendría al menos un 10 por ciento más de carne.

La nueva cifra de producción total anual de carne se aproximaría a los 350 millones de toneladas, lo cual supondría unos 45 kilogramos de peso en canal, o entre 25 y 30 kilogramos de carne comestible (sin huesos) para cada una de los 7.750 millones de personas que pueblan el planeta a principios de 2020.



Dicha cifra es similar a lo que el japonés típico ha venido consumiendo en años recientes, pero también lo que un porcentaje significativo de la población en Francia —país carnívoro por excelencia— ahora prefiere comer: un reciente estudio francés concluyó que casi el 30 por ciento de los adultos franceses se han vuelto *petits consommateurs*, cuya ingesta (de carne comestible) apenas asciende a 80 gramos diarios de media, unos 29 kilogramos al año.

En términos nutricionales, una ingesta anual de entre 25 y 30 kilogramos de carne proporcionaría (suponiendo un 25 por ciento de contenido de proteína) cerca de 20 gramos diarios de proteína completa: un 20 por ciento más que el promedio reciente, pero producido con un impacto medioambiental mucho menor, y con todos los beneficios de salud y longevidad del consumo moderado de carne.

¿Por qué no seguir el ejemplo tanto de la población más longeva como de un grupo inteligente de franceses y adoptar sus costumbres? Como en tantas otras cuestiones, la moderación podría tener muchas ventajas...

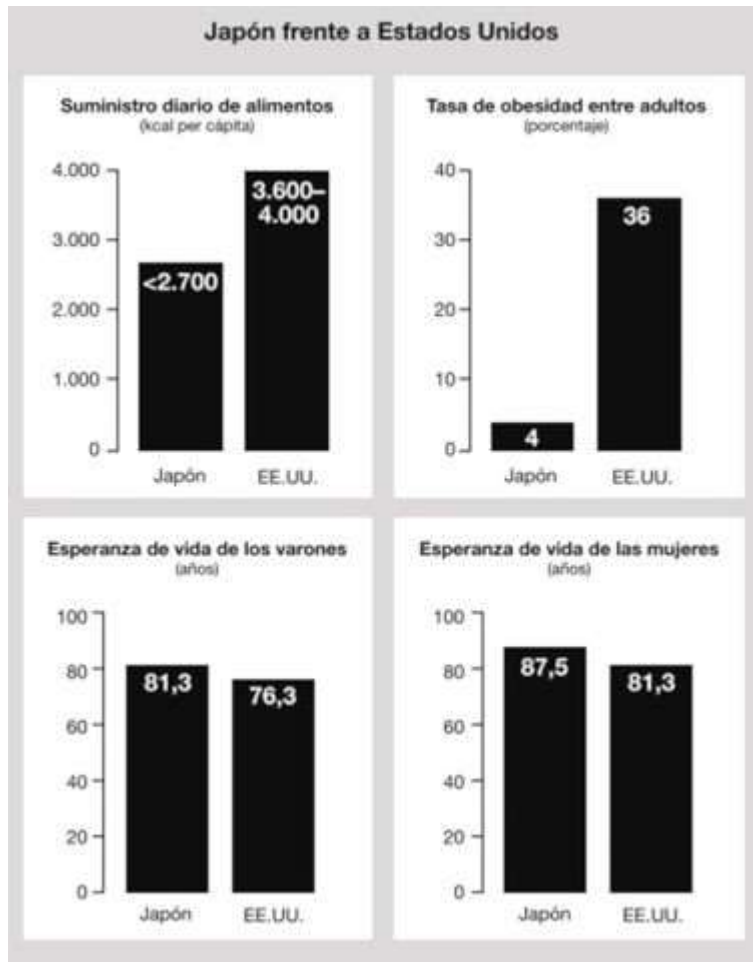
## § 60. La dieta japonesa

El Japón moderno: un país rico sobre el papel, pero donde las viviendas son pequeñas, los trayectos al trabajo largos y abarrotados, las jornadas laborales se prolongan hasta la noche, las vacaciones son cortas, aún hay demasiadas personas que fuman y existe una enorme presión para amoldarse a una sociedad

tradicionalmente jerárquica. Sumado el riesgo constante de grandes terremotos y (en buena parte del país) de erupciones volcánicas, además de la amenaza estacional de formidables tifones y olas de calor (por no hablar del hecho de vivir tan cerca de Corea del Norte). A pesar de todo ello, la esperanza de vida al nacer es más alta en Japón que en cualquier otro país. Las cifras más recientes (mujeres/hombres, para el periodo 2015-2020, expresadas en años): son 87,5/81,3 para Japón, 86,1/80,6 para España, 85,4/79,4 para Francia, 82,9/79,4 para Reino Unido y 81,3/76,3 para Estados Unidos. Algo aún más notable es que, a la edad de 80 años, una mujer japonesa puede hoy esperar vivir otros 12 años, en comparación con 10 años en Estados Unidos y 9,6 en Reino Unido.

¿Podría una genética excepcional explicar esta situación? Es improbable, porque las islas debieron de ser colonizadas por inmigrantes procedentes del continente vecino, y un estudio reciente de la estructura genética detallada y de la evolución de la población japonesa confirma que los componentes esperados del perfil de ascendencia proceden sobre todo de los coreanos y también de los grupos chino han y del sudeste asiático.

¿Quizá sea una cuestión de convicciones religiosas extendidas e intensas, un triunfo de la mente sobre la materia? Más que la religiosidad, lo que mejor describe la mentalidad japonesa sería la espiritualidad, y no hay indicios de que estas creencias tradicionales sean más profundas allí que en otros países muy poblados y con antiguos legados culturales.



En ese caso, la dieta debería ser la mejor explicación; pero ¿qué parte de ella? Concentrar la atención en los célebres platos favoritos del país no es de mucha utilidad. Japón comparte la salsa de soja (*shoyu*) con gran parte del Asia continental, de Myanmar a Filipinas, algo que también sucede con el *tofu* y, en menor medida, incluso con el *natto* (otro alimento que se obtiene de la soja, en este caso fermentada). Los tonos del color pueden variar, pero el té verde japonés —*ryokucha*, o simplemente *ocha*, las hojas menos procesadas de la *Camellia sinensis*— llegó de China, que aún produce y bebe la mayor parte de dicho té (aunque menos que Japón en cifras per cápita). Pero los balances de situación

alimentaria (los recuentos de la oferta disponible para el consumidor final, excluyendo el desperdicio de alimentos) ponen de manifiesto las importantes diferencias en la composición de macronutrientes entre la dieta media japonesa, francesa y estadounidense: los alimentos de origen animal proporcionan el 35 por ciento de toda la energía dietética en Francia y el 27 por ciento en Estados Unidos, pero solo el 20 por ciento en Japón.

Pero esta tendencia hacia una dieta más vegetariana es menos importante que el porcentaje de energía alimenticia que procede de grasas (lípidos, ya sean de origen vegetal o animal) y de azúcares y otros edulcorantes. Tanto en Estados Unidos como en Francia, la grasa en la dieta proporciona casi el doble de energía alimenticia (1,8 veces más, para ser exactos) que en Japón, mientras que los estadounidenses tienen a diario a su disposición casi 2,5 veces más azúcar y edulcorantes (lo que en Estados Unidos significa principalmente sirope de maíz, de alto contenido en fructosa) que los japoneses, una cifra que en Francia es de 1,5 veces. Sin perder nunca de vista que se trata de relaciones estadísticas generales, que no implican necesariamente un vínculo causal, podríamos concluir que, tras la eliminación de factores nutricionales probables, vemos una menor ingesta de grasas y de azúcares como posibles codeterminantes de la longevidad.

Pero el consumo relativamente bajo de estos dos elementos forma parte de lo que considero, con diferencia, el factor explicativo más importante, el verdadero excepcionalismo japonés: el promedio extraordinariamente moderado de la oferta de alimentos per cápita

del país. Mientras que los balances de situación alimenticia de prácticamente todos los países ricos occidentales (ya sean Estados Unidos o España, Francia o Alemania) muestran una disponibilidad diaria de entre 3.400 y 4.000 kilocalorías per cápita, la cifra correspondiente para Japón se sitúa por debajo de las 2.700 kilocalorías, aproximadamente un 25 por ciento menos. Por supuesto, el consumo medio real no puede ser de unas 3.500 kilocalorías al día (solo los hombres de gran estatura y que ejercen trabajos físicos pueden necesitar tanta energía), pero incluso tras un desperdicio alimentario de una magnitud intolerable, esta elevada oferta de alimentos se traduce en un consumo excesivo (y en obesidad).

Por su parte, los estudios sobre la ingesta real de alimentos muestran que la media diaria japonesa está por debajo de las 1.900 kilocalorías, en consonancia con la distribución por edades y la actividad física de una envejecida población japonesa. Lo cual significa que quizá la explicación de la gran longevidad japonesa sea bastante sencilla: el consumo moderado de alimentos en general, un hábito que se expresa en tan solo cuatro caracteres kanji, 腹八分目 (*hara hachi bun me*, «barriga ocho partes [de diez] llena»), que es un antiguo precepto del confucianismo, y por lo tanto otra importación más procedente de China. Pero los japoneses, a diferencia de los chinos con sus banquetes y su desperdicio de alimentos, sí que lo ponen en práctica.

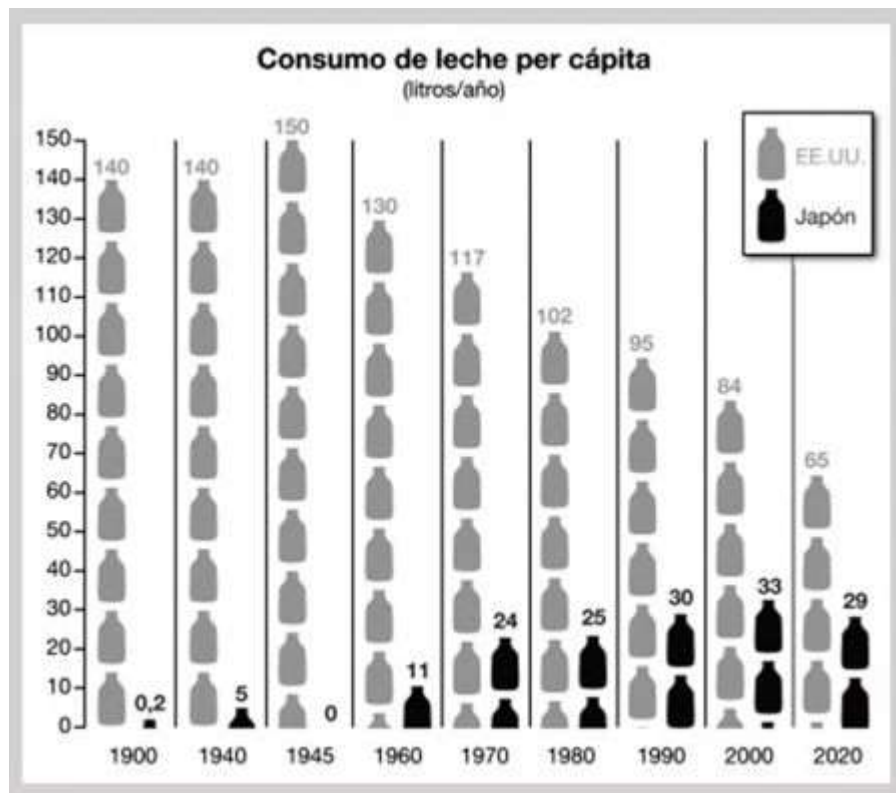
## § 61. Productos lácteos: contratendencias

Casi todos los recién nacidos producen suficiente lactasa, la enzima necesaria para digerir la lactosa, el azúcar (un disacárido compuesto de glucosa y galactosa) presente en la leche materna. Solamente un pequeño porcentaje de bebés tiene deficiencia congénita de dicha enzima (es decir, intolerancia a la lactosa). Pero pasada la infancia diverge la capacidad de digerir leche. En sociedades que fueron en origen pastoriles o tuvieron animales productores de leche domesticados persiste la capacidad de digerir lactosa; mientras que en las sociedades que nunca tuvieron esos animales esa capacidad se debilita o desaparece. Típicamente, esta pérdida se traduce solo en malestar abdominal después de beber una pequeña cantidad de leche, pero puede causar náuseas e incluso vómitos.

La evolución ha producido patrones complejos de estos rasgos: hay poblaciones deficientes en lactasa rodeadas por bebedores de leche (como los mongoles, que beben leche de caballo, y los tibetanos, que beben leche de yak, situados al norte y al oeste de los chinos, que no beben leche), o incluso con las dos sociedades entremezcladas (pastores y granjeros de roza y quema de barbecho del África subsahariana).

Dadas estas realidades, es notable que la modernización económica haya producido dos resultados contraintuitivos: los bastiones lácteos han visto reducciones prolongadas del consumo de leche per cápita, mientras que en varias sociedades que tradicionalmente no bebían leche la demanda de esta y sus derivados ha aumentado desde un consumo nulo hasta cantidades apreciables. A principios

del siglo XX, el consumo anual de leche fresca (incluida nata) en Estados Unidos era de aproximadamente 140 litros per cápita (80 por ciento de leche entera); en 1945, alcanzó un máximo de en torno a 150 litros, pero el declive subsiguiente lo redujo en más de un 55 por ciento, hasta unos 66 litros en 2018. El paralelo descenso de demanda de todos los productos lácteos ha sido más lento, en buena medida debido a que aún crece lentamente el consumo de mozzarella como ingrediente de la pizza estadounidense.



Entre los factores clave que explican la disminución están un mayor consumo de carne y pescado (que suministran proteína y grasa que antes se obtenía de la leche) y décadas de advertencias sobre los efectos perjudiciales del consumo de grasa láctea saturada. Esta conclusión se ha demostrado falsa, y los últimos hallazgos afirman que la grasa de la leche puede en realidad disminuir la frecuencia

de enfermedades cardiovasculares y de la mortalidad por infarto; pero estos descubrimientos llegan demasiado tarde para una industria en declive. Un retraimiento similar se produjo entre los principales consumidores europeos de lácteos, que tradicionalmente acompañaban altos niveles de consumo de leche con la ingesta diaria de quesos. Muy en particular, el consumo anual per cápita de leche en Francia, que era de unos 100 litros en los años cincuenta, en 2018 había descendido a 45 litros.

Japón ofrece el mejor ejemplo del aumento del consumo de lácteos en una sociedad que no bebía leche. El suministro anual per cápita era de una media de 1 litro en 1906, y de 5,4 litros en 1954. El promedio diario de este último dato equivalía a 15 mililitros diarios (una cucharada sopera): en la práctica, esto significa que cuando las fuerzas estadounidenses ocuparon el país en 1945 nadie bebía leche o comía yogur, salvo unos pocos habitantes de las grandes ciudades. La leche se introdujo mediante el Programa Nacional de Almuerzo en la Escuela con el objetivo de eliminar las diferencias en el crecimiento entre los niños de las regiones rurales y los de las zonas urbanas, y las tasas per cápita subieron a 25 litros anuales en 1980 y a 33 litros anuales en el año 2000, cuando el consumo total de lácteos (incluyendo quesos y yogur) era equivalente a ¡más de 80 litros anuales!

Dado el tamaño del país, la adopción de los lácteos en China fue necesariamente más lenta, pero la tasa media subió desde unos mínimos insignificantes durante los años cincuenta hasta 3 litros anuales per cápita durante los setenta (antes del arranque de la



rápida modernización de China), y son ahora más de 30 litros, una cantidad mayor que la de Corea del Sur, otra cultura que tradicionalmente no bebía leche y que hoy en día consume leche, quesos y yogur. La diversificación de dietas, la comodidad de los alimentos lácteos en las sociedades urbanas modernas, el menor tamaño de las familias y el mayor porcentaje de mujeres trabajadoras en las ciudades han sido los primeros factores tras esta transición china, que el Gobierno impulsó al elevar la leche al estatus de alimento sano y prestigioso, aunque se ha visto perjudicada por su baja calidad e incluso su descarada adulteración: en 2008, unos 300.000 bebés y niños se vieron afectados al beber leche adulterada con melamina, un producto químico industrial añadido para aumentar la cantidad de nitrógeno en la leche, y por lo tanto su supuesto contenido de proteínas.

Pero ¿cómo han sido capaces de soportar este cambio unas sociedades con deficiencia de lactasa? Gracias a que la intolerancia a la lactosa no es universal, y a que es relativa y no absoluta. Cuatro quintas partes de los japoneses no tienen problema en beber un vaso de leche diario, lo cual se traduciría en un consumo anual de más de 70 litros (¡más que la media estadounidense en años recientes!).

Además, la fermentación elimina progresivamente más lactosa: los quesos frescos (como la ricota) conservan menos de un tercio de la lactosa presente en la leche, mientras que en las variedades más fuertes (como el cheddar o el parmesano) apenas quedan vestigios. Por su parte, aunque el yogur conserva casi toda la lactosa original,

sus enzimas bacterianas facilitan la digestión. Así que la leche, un alimento ideal para bebés, es también —con moderación— un excelente alimento para cualquiera... excepto para quienes son abiertamente intolerantes a la lactosa.

## Capítulo 7

### Medioambiente

#### Dañar y proteger nuestro mundo

##### *Contenido:*

*§ 62. Animales o artefactos: ¿cuáles son más diversos?*

*§ 63. El planeta de las vacas*

*§ 64. La muerte de elefantes*

*§ 65. Por qué pueden ser prematuros los manifiestos a favor del Antropoceno*

*§ 66. Hechos de hormigón*

*§ 67. ¿Qué es peor para el medioambiente: nuestro automóvil o nuestro teléfono?*

*§ 68. ¿Quién tiene mejor aislamiento?*

*§ 69. Ventanas de triple cristal: una solución energética transparente*

*§ 70. Aumentar la eficiencia de la calefacción doméstica*

*§ 71. Con el carbono hemos topado*

**§ 62. Animales o artefactos: ¿cuáles son más diversos?**

Nuestro recuento de especies vivas sigue siendo incompleto. En los más de 250 años transcurridos desde que Carl Linnaeus estableció el moderno sistema taxonómico, hemos clasificado en torno a 1,25 millones de especies, alrededor de tres cuartas partes de ellas animales. Otro 17 por ciento son plantas, y el resto son hongos y microbios. Esta es la cuenta oficial: el número de especies aún no reconocidas podría ser varias veces mayor.

La diversidad de objetos artificiales es igualmente rica, si no más. Aunque en mis comparaciones no solo aparecen las proverbiales manzanas y naranjas, sino manzanas y automóviles, no dejan de ser reveladoras de lo que hemos creado.

Voy a construir mi taxonomía de todos los objetos artificiales creando una clasificación análoga a la de los organismos vivos. El dominio de todos los diseños humanos es equivalente al eucariota (todos los organismos vivos cuyas células tienen núcleo), que contiene los tres grandes reinos de hongos, plantas y animales. Postulo que el dominio de todos los objetos artificiales contiene un reino de diseños complejos, multicomponentes, equivalente al reino de los animales. Dentro de este reino tenemos el filo de los diseños alimentados por electricidad, equivalente a los cordados, criaturas con una cuerda nerviosa dorsal. Dentro de este filo hay una clase principal de diseños portátiles, equivalente a los mamíferos. Dentro de esta clase está el orden de los artefactos de comunicaciones, equivalente a los cetáceos —la clase de las ballenas, delfines y marsopas—, que contiene la familia de los teléfonos, equivalente a los delfínidos, los delfines oceánicos.

Las familias contienen géneros, tal como el *Delphinus* (delfín común), *Orcinus* (orcas) y *Tursiops* (delfín mular). Y, según el GSM Arena, el organismo que supervisa la industria de los teléfonos móviles, en 2019 había más de 110 géneros (marcas) de teléfonos móviles.



Cabezas de destornillador: un ejemplo cotidiano de diversidad en el diseño.

Algunos géneros contienen una sola especie específica; por ejemplo, *Orcinus* contiene solo *Orcinus orca*, la ballena asesina. Otros géneros son ricos en especies. En el ámbito de los teléfonos móviles, ninguno es más rico que Samsung, que actualmente incluye cerca de 1.200 modelos; seguido por LG, con más de 600, y Motorola y Nokia, cada uno con casi 500 diseños. En conjunto, a comienzos de 2019 había unas 9.500 diferentes «especies» de móviles, un total considerablemente superior al de la diversidad conocida de mamíferos (menos de 5.500 especies).

Incluso si aceptáramos que los teléfonos móviles son solo variedades de una sola especie (como los tigres de Bengala, siberiano y de Sumatra), hay muchas otras cifras que ilustran lo ricos en especies que son nuestros diseños. La Asociación Mundial del Acero da una lista de en torno a 3.500 grados de acero, más que todas las especies de roedores. Los tornillos son otra supercategoría: si sumamos las combinaciones basadas en el material (de aluminio a titanio), el tipo (de tapa roscada a pladur, de máquina a rosca chapa), la cabeza (cilíndrica o avellanada), el apriete (de ranura a

hexagonal, de Phillips a Robertson), el vástago y la punta (de plana a cónica) y las dimensiones (en unidas métricas u otras), acabamos con muchos millones de posibles «especies» de tornillos.

Siguiendo otra táctica, también hemos sobrepasado a la naturaleza en el abanico de masas. El mamífero terrestre más pequeño, la musaraña etrusca, pesa solo 1,3 gramos, mientras que el más grande, el elefante africano, pesa alrededor de 5 toneladas. Este es un abanico de seis órdenes de magnitud. El peso de los motores vibradores del teléfono móvil producidos en masa son del orden del de la musaraña, mientras que los mayores compresores centrífugos movidos por motores eléctricos pesan alrededor de 50 toneladas, dando un abanico de siete órdenes de magnitud.

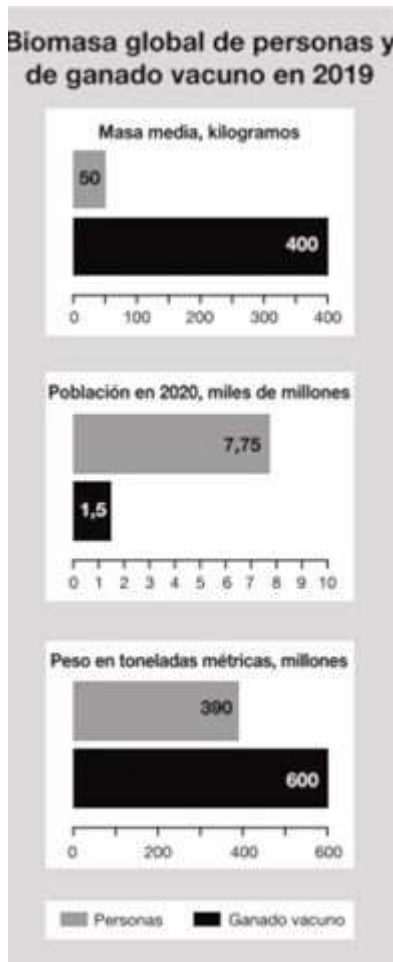
El pájaro más pequeño, el colibrí, pesa unos 2 gramos, mientras que el mayor pájaro volador, el cóndor andino, puede alcanzar los 15 kilogramos, dando un rango de casi cuatro órdenes de magnitud. Los actuales drones en miniatura pesan apenas 5 gramos, frente a un Airbus 380 a plena carga que pesa 570 toneladas, una diferencia de ocho órdenes de magnitud.

Y nuestros diseños tienen una ventaja funcional clave: pueden funcionar y sobrevivir en gran medida por sí mismos, a diferencia de nuestro cuerpo (y el de los animales), que depende de una microbiota en buen funcionamiento (hay al menos tantas células bacterianas en nuestras vísceras como células tienen nuestros órganos). Así es la vida.

## § 63. El planeta de las vacas

Durante años he tratado de imaginar cómo se le presentaría la Tierra a una sonda minuciosa y perspicaz enviada por extraterrestres asombrosamente sabios. Desde luego, la sonda concluiría de inmediato, tras contar todos los organismos, que la mayor parte de los individuos son microscópicos (bacterias, arqueas, protistas, hongos, algas) o muy pequeños (insectos), pero también que su peso agregado predomina en la biomasa del planeta. Eso no sería sorprendente. Lo que falta a estas criaturas en tamaño, lo compensan sobradamente en número. Los microbios ocupan cualquier nicho concebible de la biosfera, incluyendo muchos ambientes extremos. Las bacterias representan alrededor del 90 por ciento de las células vivas del cuerpo humano, y hasta el 3 por ciento de su peso. Lo que sería sorprendente, sin embargo, es el cuadro que pintaría la sonda de las formas macroscópicas de vida animal, que está dominada por solo dos vertebrados: vacunos (*Bos Taurus*) y humanos (*Homo sapiens*), en este orden.

A diferencia de los científicos extraterrestres, nosotros no hacemos una lectura instantánea. Aun así, podemos cuantificar con un razonable grado de precisión la biomasa vacuna y la biomasa humana (antropomasa). Se conoce el número de rumiantes grandes y domesticados en todos los países de alta renta y se puede estimar razonablemente para todos los de baja renta e incluso para sociedades pastoriles. En 2020, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura calcula que el número de cabezas de ganado vacuno ronda los 1.500 millones.



Para convertir estas cifras en biomasa de rumiantes vivos, hay que tener en cuenta la edad y su distribución por sexos. Los grandes toros pesan más de 1.000 kilogramos; las vacas estadounidenses son sacrificadas cuando alcanzan cerca de 600 kilogramos, pero el ganado brasileño va al mercado con menos de 230 kilogramos; y la famosa raza lechera Gir de India pesa menos de 350 kilogramos en su madurez. Una buena aproximación es suponer una masa media de 400 kilogramos, promediando por sexo y edad. Eso significa una biomasa total del ganado vacuno vivo de unos 600 millones de toneladas.

Del mismo modo, al calcular la masa total de la humanidad es



necesario tener en cuenta la edad y el peso corporal de la población. Los países de renta baja tienen una parte mucho mayor de niños que las naciones ricas (en 2020, en torno al 40 por ciento en África frente al aproximadamente 15 por ciento en Europa). Al mismo tiempo, las tasas de gente con sobrepeso y obesa varía desde ínfima (en África) hasta un 70 por ciento de la población adulta (Estados Unidos). Por eso es por lo que uso medias diferentes para diferentes continentes, derivadas de las estructuras disponibles de edad y sexo de la población, así como de estudios antropométricos y curvas de crecimiento para países representativos. Este ajuste complejo arroja una media ponderada de 50 kilogramos per cápita; lo que, dado un total de 7.750 millones de personas, implica una antropomasa global de cerca de 390 millones de toneladas en 2020.

Esto significa que la biomasa vacuna es actualmente más del 50 por ciento mayor que la humana, y que el peso vivo de las dos especies está muy cercano a los 1.000 millones de toneladas. Incluso los mayores mamíferos salvajes suman solo una pequeña fracción de estas masas: los 350.000 elefantes africanos, con un peso medio de 2.800 kilogramos, tienen una biomasa agregada de menos de un millón de toneladas, que es menos del 0,2 por ciento de la biomasa vacuna. En 2050 habrá 9.000 millones de personas y, muy probablemente, 2.000 millones de vacas, que en conjunto incrementarán su ya aplastante dominio de la Tierra.

#### § 64. La muerte de elefantes

Los elefantes africanos son los mayores mamíferos terrestres: los

machos adultos pueden pesar más de 6.000 kilogramos; las hembras, en promedio, alrededor de la mitad; y los recién nacidos, unos 100 kilogramos. Son sociables, inteligentes, proverbialmente memoriosos y misteriosamente conscientes de la muerte, como muestran en su notable comportamiento cuando, al toparse con los huesos de sus antepasados, se detienen ante ellos y tocan los restos. Aunque sus huesos han permanecido en África, sus colmillos con frecuencia han acabado en teclas de piano o en los cachivaches que aún vemos a veces en repisas.

Los antiguos egipcios cazaban elefantes, y los cartagineses los utilizaron en guerras con Roma hasta que se extinguieron en el norte de África, y pasaron a ser abundantes solamente al sur del Sáhara. La mejor estimación del máximo número que pudo albergar el continente al principio del siglo XIX (incluidos los elefantes de bosque, más pequeños) es de unos veintisiete millones de ejemplares; su número real puede haber sido cercano a los veinte millones. Hoy en día, sin embargo, están bastante por debajo de un millón.

Ciertas reconstrucciones del tráfico de marfil en el pasado indican un flujo bastante constante de en torno a 100 toneladas por año hasta alrededor de 1860, y entonces una multiplicación por cinco justo después de 1900. El tráfico se hundió durante la Primera Guerra Mundial, después aumentó brevemente antes de otro hundimiento debido a la guerra, tras la cual reanudó su subida, llegando al pico de más de 900 toneladas al año a finales de la década de 1980. He integrado estas cifras fluctuantes y obtengo una

extracción de 55.000 toneladas de marfil durante el siglo XIX y de al menos 40.000 toneladas durante el siglo XX.



*Dónde viven aún los elefantes africanos.*

La última cifra se traduce en la matanza de al menos 12 millones de elefantes. Antes de 1970, no se dispone de buenas estimaciones sistemáticas de elefantes sobrevivientes, y las estimaciones de ámbito continental indican una disminución constante durante las últimas décadas del siglo XX. El Gran Censo de Elefantes, un proyecto financiado por el desaparecido cofundador de Microsoft Paul G. Allen, se basaba en reconocimientos aéreos de alrededor del 80 por ciento de la extensión del hábitat del elefante de sabana. Cuando se completó en 2016, su conteo final de 352.271 elefantes

resultó un 30 por ciento inferior a la mejor estimación para la mitad de la década de 1980.

Hay otra noticia desalentadora: el número de elefantes de Mozambique se redujo a la mitad entre 2009 y 2014, hasta 10.000, y durante los mismos cinco años se mataron más de 85.000 elefantes tanzanos, cayendo su total de cerca de 110.000 a solo 43.000 (la diferencia se debe a una tasa de nacimientos anual del 5 por ciento). Nuevos análisis de ADN de grandes incautaciones de marfil realizadas entre 1996 y 2014 han permitido localizar en África oriental el origen de alrededor del 85 por ciento de los animales abatidos ilegalmente, sobre todo en la reserva de caza de Selous, situada en el sudeste de Tanzania, la Reserva de Niassa, en el norte de Mozambique, y más recientemente también en Tanzania central.

La mayor parte de la culpa puede achacarse a la persistente demanda china de marfil, mucho del cual acaba convertido en tallas elaboradas y cursis, como estatuillas de Mao Zedong, el hombre responsable de la mayor hambruna en la historia de la humanidad. En fechas recientes, por fin ha hecho efecto la presión internacional, y el Consejo de Estado chino ha prohibido, desde finales de 2017, el tráfico y las actividades de procesado de marfil. Esto ha tenido algunos efectos positivos, pero los turistas chinos continúan comprando objetos de marfil cuando viajan a países vecinos.

Si se detuviera la matanza, algunas regiones africanas podrían enfrentar un nuevo problema, evidente durante años en partes de Sudáfrica: un exceso de elefantes. No es fácil gestionar la presencia

de una cantidad creciente de animales grandes y potencialmente destructivos, en particular si viven cerca de granjeros y pastores.

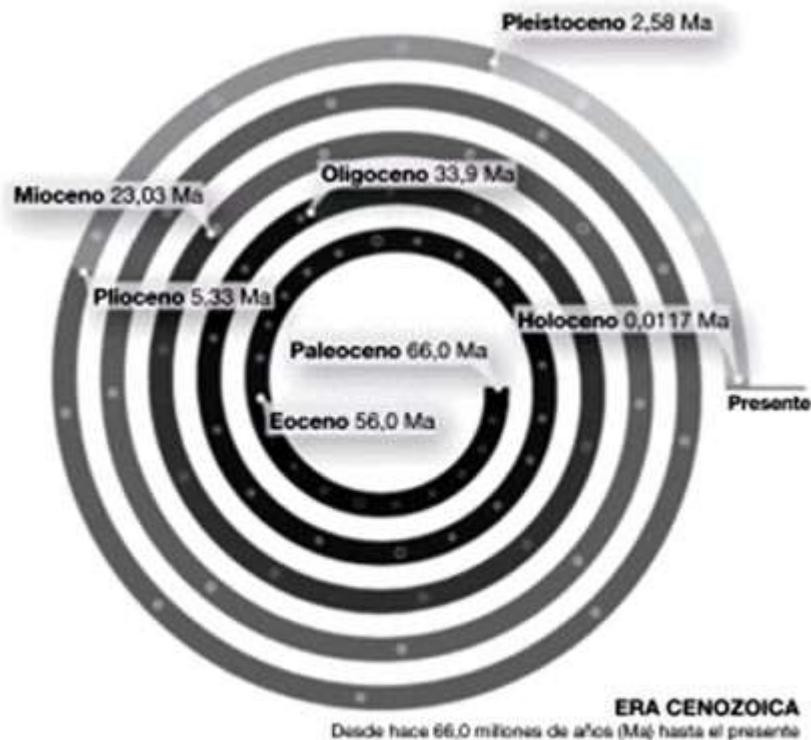
## § 65. Por qué pueden ser prematuros los manifiestos a favor del Antropoceno

Muchos historiadores y científicos argumentan que estamos viviendo en el Antropoceno, una nueva era caracterizada por el control humano de la biosfera. En mayo de 2019, el Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno decidió formalmente en votación reconocer esta nueva época geológica, y su propuesta va a ser estudiada por la Comisión Internacional de Estratigrafía, que se encarga de dar nombre a las épocas.

Mi reacción, haciéndome eco de los romanos: *Festina lente*. Apresúrate despacio.

Que quede muy claro: no cabe duda sobre lo generalizado de nuestra interferencia en los ciclos bioquímicos globales y sobre la pérdida de diversidad atribuible a acciones humanas, desde el vertido masivo de nuestros desechos hasta la deforestación a gran escala y la erosión acelerada de los suelos, pasando por la extensión global de la contaminación generada por la agricultura, las ciudades, las industrias y el transporte. En conjunto, estos impactos de la acción del hombre no tienen precedente y son de una escala que bien puede poner en peligro el futuro de nuestra especie. Pero ¿es realmente tan completo nuestro control del destino del planeta? Hay muchas evidencias en contra. Variables fundamentales que hacen posible la vida en la Tierra —como las

reacciones termonucleares que suministran energía al Sol y cubren de radiación el planeta; la forma de la Tierra, su rotación, su inclinación, la excentricidad de su órbita (el «marcapasos» de las glaciaciones) y la circulación de su atmósfera— están todas fuera de cualquier interferencia humana. Como tampoco podemos esperar controlar nunca los enormes procesos de terraformación: la tectónica de placas terrestres, dirigida por el calor interno y que resulta en la creación lenta pero constante de nuevo suelo oceánico; la formación, reconfiguración y elevación de masas de tierra cuya distribución y altitud son determinantes clave de la variabilidad y habitabilidad climáticas.



### Eras geológicas y el Antropoceno.

De manera semejante, somos meros espectadores de erupciones

volcánicas, terremotos y tsunamis, las tres consecuencias más violentas de la tectónica de placas. Podemos sobrellevar sus manifestaciones frecuentes y moderadas, pero la misma supervivencia de algunas de las mayores ciudades del mundo —en particular, Tokio, Los Ángeles y Pekín— depende de la ausencia de megaterremotos, y la propia existencia de la civilización moderna podría acabar abruptamente debido a megaerupciones volcánicas. Incluso cuando medimos el tiempo no en términos geológicos, sino civilizatorios, nos topamos con amenazas nada despreciables de asteroides capaces de reventar la Tierra, cuya trayectoria quizá podríamos predecir, aunque no alterar.

En cualquier año dado, estos eventos son sumamente improbables, pero debido a su enorme destructividad sus efectos son ajenos a la experiencia humana. No tenemos buena manera de lidiar con ellos, pero no podemos fingir que, a largo plazo, son menos relevantes que la pérdida de especies forestales o la quema de combustibles fósiles. Además, ¿por qué nos apresuramos a erigirnos en creadores de una nueva época geológica en lugar de esperar un poco a ver cuánto puede durar el experimento dirigido por *Homo sapiens*? Cada una de las épocas transcurridas de la era Cenozoica —desde el principio del Paleoceno hace 66 millones de años hasta el principio del Holoceno hace 11.700 años— duraron al menos 2,5 millones de años, incluidas las dos anteriores (el Plioceno y el Pleistoceno), y ahora han transcurrido menos de 12.000 años del Holoceno. Si efectivamente hay un Antropoceno, no puede datarse antes de hace 8.000 años (desde el principio de la agricultura sedentaria) o 150

años (desde el despegue de la quema de combustibles fósiles).

Si conseguimos seguir por aquí otros 10.000 años —un periodo trivial para lectores de ciencia ficción; una eternidad para la civilización moderna de alta energía—, deberíamos celebrarlo dándole nombre a la época marcada por nuestras acciones. Entretanto, esperemos un poco antes de determinar que nuestra huella en el planeta es algo más que un modesto microestrato en el registro geológico.

### § 66. Hechos de hormigón

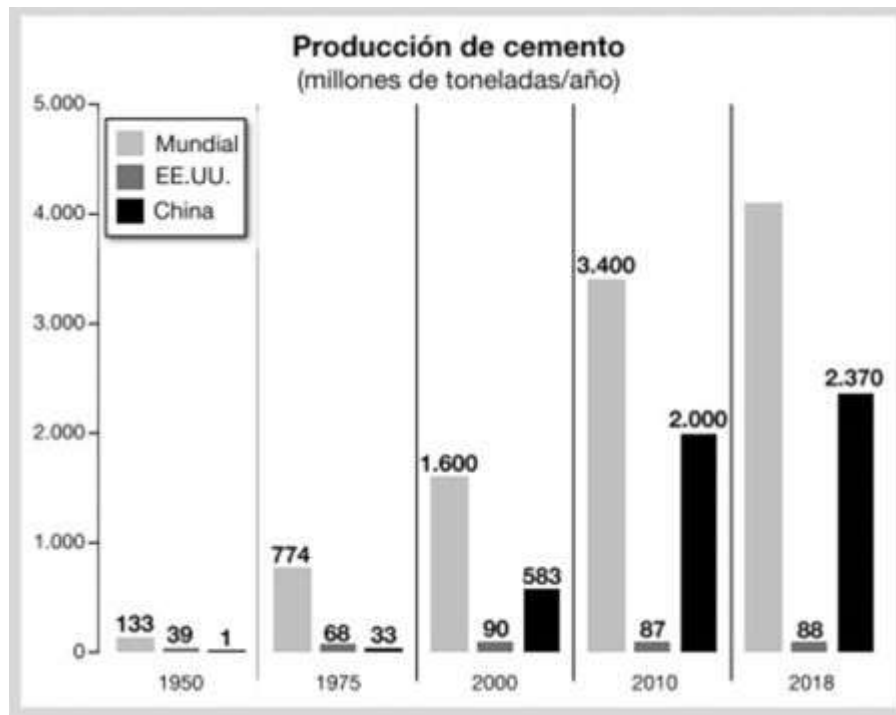
Los antiguos romanos inventaron el hormigón, una mezcla de un árido (arena, piedra machacada), agua y un agente cohesivo. Lo denominaron *opus cementitium*, aunque este material de construcción, muy utilizado, no contenía cemento moderno (hecho de cal, arcilla y óxidos metálicos, quemado todo ello en hornos giratorios a alta temperatura y después molido en fino polvo), sino una mezcla de yeso y cal viva; y su mejor variedad se hacía con arena volcánica de Puteoli, un lugar cercano al monte Vesubio. Además, producía un extraordinario material apropiado para bóvedas enormes (el Panteón de Roma, construido entre el 118 y el 126 d. C., es aún hoy la cúpula más grande del mundo de hormigón sin armar) y para construcción subacuática en muchos puertos alrededor del Mediterráneo, incluida la antigua Cesarea (situada en el actual Israel).

La producción del cemento moderno comenzó en 1824, cuando Joseph Aspdin patentó su cocción de piedra caliza y arcilla a altas



temperaturas. La transformación de materiales aluminosos y silíceos en un sólido amorfo no cristalino (vitrificación, el mismo proceso usado para hacer vidrio) produce nódulos o grumos de una escoria vítrea que constituye la base para hacer cemento. Después se mezcla el cemento con agua (del 10 al 15 por ciento de la masa final) y áridos (arena y gravilla, que constituyen hasta el 60-75 por ciento de la masa total) para producir hormigón, un material moldeable que aguanta mucho a compresión, pero poco a tracción. La debilidad a tracción se puede reducir reforzándolo con acero. Los primeros intentos de hacerlo tuvieron lugar en Francia en los primeros años de la década de 1860, pero la técnica solo despegó a lo largo de la década de 1880. El siglo XX fue la era del hormigón armado. En 1903, el edificio Ingalls en Cincinnati fue el primer rascacielos del mundo construido con hormigón armado; durante los años treinta los ingenieros empezaron a usar hormigón pretensado en las estructuras (con alambres o barras de acero tensado); y desde 1950 se ha usado el material para edificios de todas las alturas y funciones: la torre Burj Khalifa de Dubái es la más alta del mundo, mientras que la Ópera de Sídney de Jørn Utzon con forma de velero es quizá la aplicación del material visualmente más impresionante. El hormigón armado permitió construir enormes presas hidroeléctricas: la más grande, la presa china de las Tres Gargantas, contiene el triple de agua que la Grand Coulee, la más grande de Estados Unidos. También son habituales los puentes de hormigón: el puente sobre el río Beipan es actualmente el puente de arcos de hormigón más largo del mundo,

cubriendo una garganta de 455 metros entre dos provincias chinas. Pero sobre todo se utiliza hormigón de un modo visualmente anodino en forma de miles de millones de traviesas de ferrocarril, carreteras pavimentadas, autopistas, aparcamientos, puertos, pistas de aterrizaje y calzadas.



Entre 1900 y 1928 se multiplicó por diez el consumo de cemento en Estados Unidos, hasta alcanzar los 30 millones de toneladas, y la expansión económica de posguerra (incluyendo el Sistema de Autopistas Interestatales, que requiere en torno a 10.000 toneladas de hormigón por kilómetro) lo elevó hasta el pico de 128 millones de toneladas en 2005, con valores recientes de menos de 100 millones de toneladas por año.

China se convirtió en el mayor productor del mundo en 1986 y su producción de cemento —más de 2.300 millones de toneladas en 2018— representa actualmente cerca del 60 por ciento del total

mundial. La muestra más impresionante del esfuerzo de construcción sin precedentes de China es que ¡solo en los dos últimos años el país colocó más cemento (alrededor de 4.700 toneladas) que el total del que colocó Estados Unidos a lo largo del siglo XX (en torno a 4.600 millones de toneladas)!

Pero el hormigón no es un material sempiterno, y la extraordinaria longevidad del Panteón es una rara excepción. El hormigón se deteriora en todos los climas, y el proceso se acelera debido a factores que van desde el depósito de ácidos debido a la vibración hasta la sobrecarga de las estructuras causada por la corrosión debida a la sal; además, en entornos cálidos y húmedos, el crecimiento de algas ennegrece las superficies expuestas. Así pues, la cementación planetaria a partir de 1950 ha producido decenas de miles de millones de toneladas de material que tendrá que ser reemplazado o destruido (o sencillamente abandonado) en las próximas décadas.

El impacto ambiental del material es otra preocupación. La polución del aire (polvo fino) debida a la producción de cemento puede ser retenida por filtros de tela, pero la industria (que quema combustibles tan malos como carbón de baja calidad o coque de petróleo) continúa siendo una fuente significativa de CO<sub>2</sub>, pues emite aproximadamente una tonelada de gas por cada tonelada de cemento. En comparación, la producción de una tonelada de acero se asocia con emisiones de alrededor de 1,8 toneladas de CO<sub>2</sub>.

La producción de cemento representa actualmente en torno al 5 por ciento del total de emisiones de CO<sub>2</sub> debidas a combustibles fósiles,

pero su huella de carbono se puede rebajar con una variedad de medidas. Se puede reciclar hormigón, también se puede utilizar en construcción material machacado. Parte del cemento utilizado para hacer hormigón puede sustituirse por escoria de altos hornos o cenizas volantes captadas en centrales eléctricas de carbón. Hay también varios procesos de fabricación de cemento que utilizan poco o nada de carbono, pero estas alternativas tendrán apenas un pequeño impacto anual en una producción global que actualmente sobrepasa los 4.000 millones de toneladas.

§ 67. ¿Qué es peor para el medioambiente: nuestro automóvil o nuestro teléfono?

Las estadísticas sobre la producción de energía son bastante fiables; más difícil es encontrar estadísticas precisas sobre el consumo de energía por los sectores más importantes; y aún son menos precisos los datos sobre la energía consumida en la producción de bienes específicos. Esta energía incorporada en productos es parte del precio ambiental que pagamos por todo lo que nos pertenece y usamos.

La estimación de la energía incorporada en productos acabados se basa no solo en hechos indiscutibles —cuánto acero hay en un coche, cuántos microchips en un ordenador—, sino también en las inevitables simplificaciones y suposiciones que hay que hacer para llegar a valores totales. ¿Qué modelo de coche? ¿Qué ordenador o qué teléfono? El reto es seleccionar valores razonables, representativos; la recompensa es conseguir una perspectiva nueva

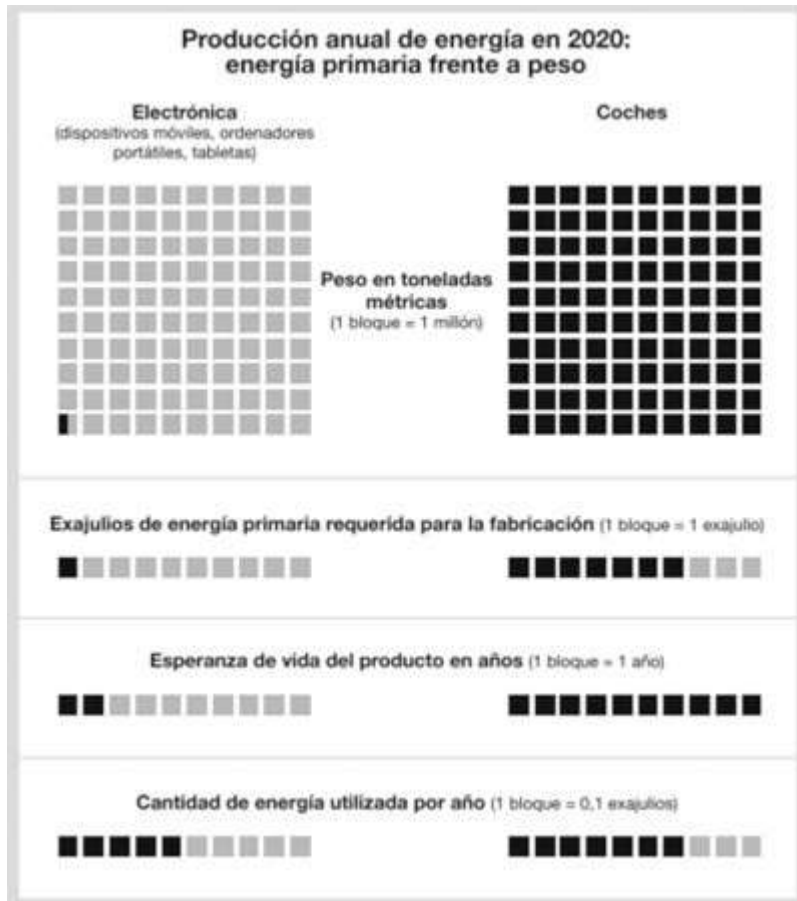
sobre el mundo creado por el ser humano.

Centrémonos en los teléfonos móviles y en los coches. Los móviles, porque son los habilitadores primarios de comunicación instantánea; los coches, porque la gente sigue queriendo moverse en el mundo real.

Obviamente, un coche que pesa 1,4 toneladas (lo que pesa aproximadamente un Honda Accord LX) incorpora más energía que los 140 gramos de un teléfono inteligente (un Samsung Galaxy, digamos). Pero la disparidad de energía no es ni de lejos tan grande como la diferencia de 10.000 veces en masa.

En 2020, el número de teléfonos móviles vendidos en todo el mundo debería rondar los 1.750 millones, y el de dispositivos de computación portátiles (ordenadores de distintos tamaños, tabletas) debería ser del orden de 250 millones. El peso agregado de estos dispositivos alcanza alrededor de 550.000 toneladas. Si introducimos la estimación conservadora de que cada teléfono incorpora de media 0,25 gigajulios de energía, cada ordenador 4,5 gigajulios y cada tableta 1 gigajulio, la producción anual de estos aparatos requiere alrededor de 1 exajulio ( $10^{18}$  julios) de energía primaria; es decir, aproximadamente igual al consumo anual de energía en Nueva Zelanda o Hungría. Con poco menos de 100 gigajulios por vehículo, los 75 millones de vehículos vendidos en 2020 incorporan alrededor de 7 exajulios de energía (ligeramente más que la energía consumida en un año por Italia) y pesan en torno a 100 millones de toneladas. Así que los nuevos coches pesan más de 180 veces lo que pesa toda la electrónica portátil, pero

requieren para su fabricación una energía solo siete veces mayor.



Y por sorprendente que esto pueda resultar, podemos hacer una comparación aún más asombrosa. La electrónica portátil no dura mucho —de media, solo dos años—, así que la producción anual mundial de estos aparatos incorpora 0,5 exajulios por año de utilización. Dado que los coches de pasajeros duran típicamente al menos una década, su producción anual mundial incorpora en torno a 0,7 exajulios por año de utilización (¡solo un 40 por ciento más que los aparatos electrónicos portátiles!). Me apresuro a añadir que estos son, necesariamente, cálculos bastante aproximados. Pero incluso si estos agregados toscos erraran en direcciones opuestas (es decir, si la fabricación de coches demanda más energía de la

calculada y la producción de electrónica necesita menos), los totales globales aún serían sorprendentemente parecidos, lo más probable con una diferencia no mayor que el doble. Mirando al futuro, los dos agregados incluso podrían aproximarse: las ventas anuales tanto de coches como de dispositivos móviles se han venido frenando, y el futuro de los motores de combustión interna parece menos prometedor.

Por supuesto, los costes de energía para el funcionamiento de estas dos clases de aparatos altamente intensivos en energía son muy diferentes. Un coche estadounidense de pasajeros consume alrededor de 500 gigajulios de gasolina a lo largo de una década en servicio, cinco veces el coste energético que incorpora. Un teléfono inteligente consume al año solo 4 kilovatios-hora de electricidad y menos de 30 megajulios durante sus dos años en servicio, o solo el 3 por ciento de la energía que incorpora si la electricidad proviene de una turbina de viento o de una célula fotovoltaica. Este porcentaje se eleva a aproximadamente el 8 por ciento si la energía proviene de la combustión de carbón, un proceso menos eficiente.

Pero un teléfono no es nada sin una red, y el coste de electrificar la red es alto y creciente. Las previsiones sobre el futuro ritmo de aumento (o sobre su posible estabilización mediante el uso de diseños innovadores) varían; en todo caso, estos minúsculos teléfonos dejan toda una huella agregada en el presupuesto energético. Y en el medioambiente.

§ 68. ¿Quién tiene mejor aislamiento?

Las primeras impresiones a menudo conducen a conclusiones erróneas. Recuerdo bien recibir una amistosa bienvenida en la residencia de un embajador europeo en Ottawa, y oír justo en la siguiente frase que la casa era perfecta para afrontar los inviernos canadienses porque estaba hecha de ladrillo y piedra de verdad, no como esas endeables cosas norteamericanas de madera y paredes huecas. Mis anfitriones pasaron rápidamente a otros asuntos y, en cualquier caso, no tuve valor para menospreciar las cualidades del aislamiento de su hermosa casa.

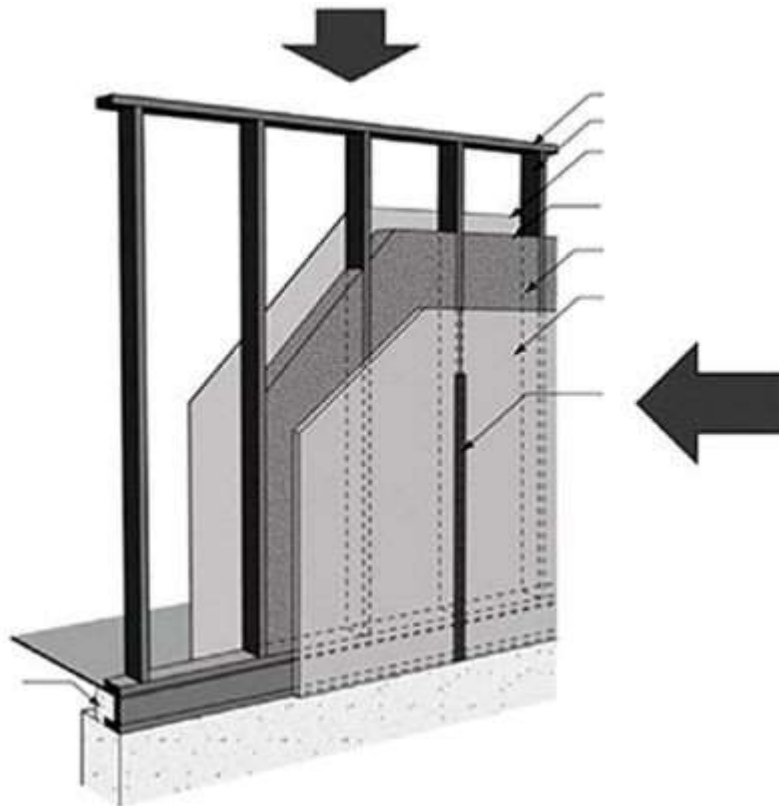
El error es fácil de entender, pero la masa y la densidad son mejores indicadores de robustez que de capacidad de aislamiento. Una pared de ladrillo parece obviamente más sólida y protectora que una pared cuya estructura consiste en finos tablones de madera, cubierta en el exterior con una fina plancha de contrachapado, un revestimiento de aluminio y en el interior con frágil pladur. Ningún europeo furioso hace agujeros en paredes de ladrillo.

Hace décadas, cuando la gasolina estaba a 2 dólares el barril, la mayoría de las casas norteamericanas construidas antes de 1960 no tenían para mantener fuera el frío nada más que la cámara de aire entre el contrachapado y el pladur. A veces la cámara se llenaba con serrín o papel triturado. Con todo, sorprendentemente, esta endeble combinación proporcionaba un poco más de aislamiento que el ladrillo macizo.

El valor del aislamiento, o resistencia térmica, se mide en términos del valor R. Depende no solo de la composición, grosor y densidad del aislamiento, sino también de la temperatura y la humedad



exterior. Una pared de estructura de madera de 1960 tenía más o menos los siguientes valores R: recubrimiento de aluminio (0,6), contrachapado fino (0,5), cámara de aire (0,9) y pladur (0,5). Todo ello suma 2,5. Pero el ladrillo estándar (0,8) enlucido por ambas caras no proporcionaba más que 1,0. Así que una endeble pared norteamericana producida en serie aislaba al menos el doble de bien que el ladrillo enlucido europeo.



*Aislamiento de una pared.*

Una vez que empezaron a subir los precios de la energía y entraron en vigor en Norteamérica normas de construcción más racionales, resultó obligatorio incorporar barreras de plástico o acolchados de fibra de vidrio (rollos en forma de almohada que pueden empaquetarse entre los marcos o tablones de madera). Se conseguían fácilmente mayores valores R totales usando tablones

más anchos (dos por seis) o, aún mejor, mediante doble tablado, lo que significa construir un emparedado de dos marcos, cada uno de ellos relleno de aislamiento. (En Norteamérica, una tabla de madera blanda «dos por seis» es en realidad de 1,5 por 5,5 pulgadas, o 38 por 140 milímetros). Para una pared norteamericana bien construida esto significa sumar los valores de aislamiento del pladur (0,5), la barrera de polietileno contra el vapor (0,8), el acolchado de fibra de vidrio (20), el revestimiento de aglomerado (1,3), la envoltura de plástico (Tyvek Therma-Wrap de 5), y el recubrimiento de madera biselada (0,8). Si sumamos el valor aislante de la capa interior de aire, el valor R total alcanza aproximadamente 29.

Las paredes de ladrillo también mejoraron. Para mantener el deseado aspecto exterior de ladrillo, se puede modernizar una pared antigua desde el interior colocando tablas (planchas finas que mantienen el aislamiento) sobre el enlucido interior y adosando placas de yeso con una membrana de vapor integrada para mantener fuera la humedad. Con pladur aislante de 2 pulgadas, se triplicará el valor R total, pero incluso así la pared de antiguo ladrillo con aislamiento mantendrá un retraso de un orden de magnitud dos por seis respecto a la pared norteamericana de estructura. Incluso alguien normalmente al tanto de valores R no espera una diferencia tan grande.

Sin embargo, solo se aprovecha todo el aislamiento de la pared si el calor no se escapa por las ventanas (véase el capítulo siguiente).

## § 69. Ventanas de triple cristal: una solución energética transparente

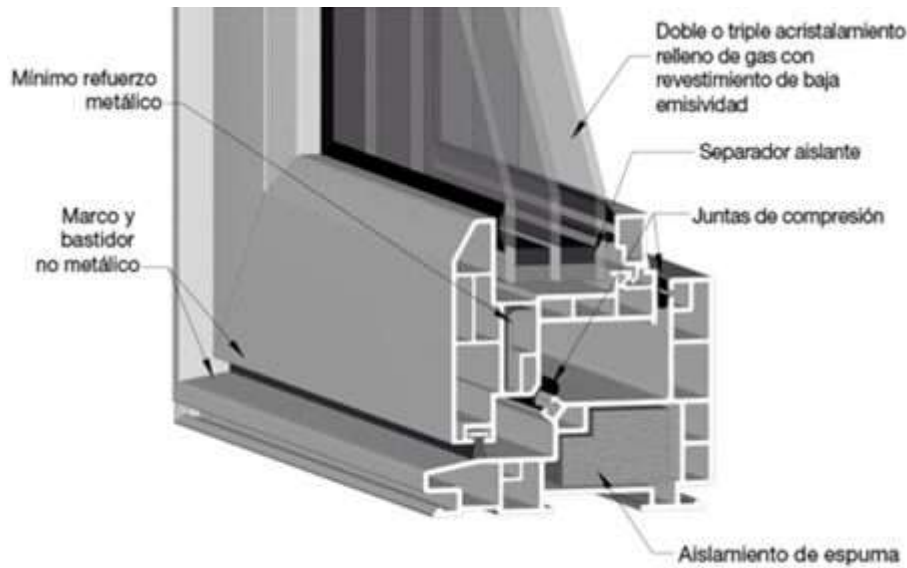
La condena de la política energética es la búsqueda de soluciones técnicas no comprobadas. Tenemos donde elegir: coches autónomos alimentados por potencia solar, minirreactores nucleares intrínsecamente seguros o fotosíntesis genéticamente mejorada.

Pero ¿por qué no empezar con algo ya comprobado? ¿Por qué no reducir simplemente la demanda de energía, empezando por los edificios residenciales y comerciales?

Tanto en Estados Unidos como en la Unión Europea los edificios son responsables de alrededor del 40 por ciento del consumo energético (los sigue el transporte con un 28 por ciento en Estados Unidos y alrededor del 22 por ciento en la Unión Europea). La calefacción y el aire acondicionado representan la mitad del consumo residencial, por lo que lo mejor que podríamos hacer para reducir el presupuesto energético es mantener el calor dentro (o fuera) con mejor aislamiento.

El lugar más rentable para hacerlo es en las ventanas, donde la pérdida de energía es máxima. Es decir, donde es máxima la transmisibilidad térmica, medida en vatios que pasan a través de un metro cuadrado de material dividido por la diferencia de temperatura en grados Kelvin entre ambos lados. Un cristal simple tiene un coeficiente de transferencia térmica de entre 5,7 y 6 vatios por metro cuadrado por kelvin; un cristal doble con una separación de 6 milímetros (el aire es un mal conductor del calor) tiene un coeficiente de 3,3. La aplicación de revestimientos para minimizar el

paso de radiación ultravioleta e infrarroja lo reduce a un valor de entre 1,8 y 2,2, y rellenar el espacio entre los cristales con argón (para frenar la transferencia de calor) lo rebaja hasta 1,1. Si se hace esto con ventanas de triple acristalamiento, baja a un valor entre 0,6 y 0,7. Poniendo kriptón en lugar de argón puede reducirse a 0,5.



Aislamiento de una ventana.

Se trata de una reducción de pérdidas de hasta un 90 por ciento respecto a un único cristal. En el mundo del ahorro energético no hay otra oportunidad de esta magnitud que pueda llevarse a la práctica a una escala de miles de millones de unidades. Un argumento adicional: funciona de verdad.

Además, hay un factor de confort. Con una temperatura exterior de  $-18$  grados Celsius (mínimas nocturnas habituales en Edmonton, Alberta, o máximas diarias en la rusa Novosibirsk) y una temperatura interior de 21 grados Celsius, la temperatura de la superficie interior de una ventana de un solo cristal es de alrededor de 1 grados Celsius, una ventana antigua de doble cristal registrará 11 grados Celsius, y la mejor ventana de triple cristal 18 grados

Celsius. A esta temperatura uno puede permanecer justo a su lado. Las ventanas de triple cristal tienen la ventaja adicional de reducir la condensación en el cristal interior al elevar la temperatura por encima del punto de rocío. Estas ventanas ya son habituales en Suecia y Noruega, pero en Canadá (con su barato gas natural) no serán obligatorias hasta 2030 y, como en otros ámbitos de clima frío, el estándar exigido aún es meramente equivalente a una ventana de doble cristal con un revestimiento de baja emisividad.

Los países de clima frío han tenido mucho tiempo para aprender sobre aislamiento. No así los lugares más cálidos, que necesitan hacerlo ahora que el aire acondicionado se está generalizando. En particular, un solo cristal es aún la norma en las zonas rurales de China e India. Por supuesto, las diferencias de temperatura en el caso de refrigeración en clima cálido son menores que en el caso de calefacción en latitudes más altas. Por ejemplo, en mi casa en Manitoba, Canadá, las mínimas nocturnas en enero son en promedio de -25 grados Celsius, lo suficiente para producir una diferencia de 40 grados incluso cuando se apaga el termostato por la noche. Por otra parte, el aire acondicionado funciona en muchas regiones cálidas y húmedas durante periodos mucho más largos que la calefacción en Canadá o en Suecia.

La física es indiscutible, pero la economía manda. Aunque las ventanas de triple cristal pueden costar solo un 15 por ciento más que las de doble cristal, sus periodos de retorno son obviamente más largos, y se suele argumentar que el paso del diseño de doble cristal al de triple no está justificado. Puede que sea así si no se

tiene en cuenta el mayor confort y la menor condensación en la ventana. Y sobre todo el hecho de que el triple cristal continuará reduciendo el uso de energía durante décadas.

Entonces ¿por qué quieren algunos visionarios invertir en misteriosas tecnologías de conversión energética que bien pueden no funcionar y que, incluso si lo hicieran, probablemente tendrían efectos secundarios perjudiciales para el medioambiente? ¿Qué hay de malo en el simple aislamiento?

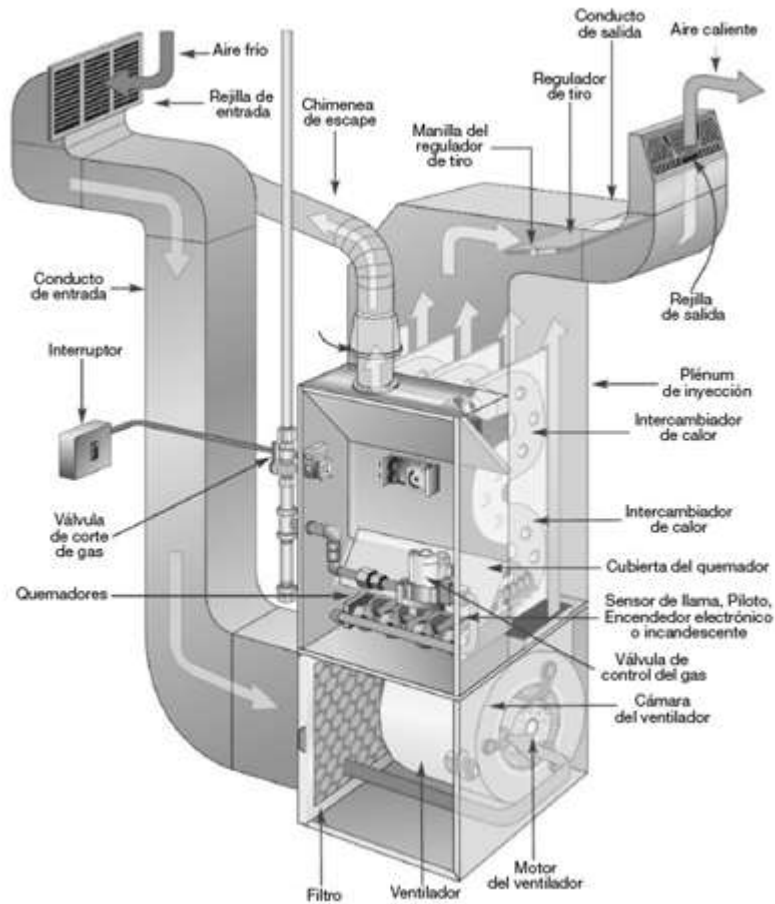
### § 70. Aumentar la eficiencia de la calefacción doméstica

Si nuestros modelos climáticos son correctos, y si efectivamente debemos limitar el aumento del calentamiento global a 2 grados Celsius (y preferiblemente a 1,5 grados) para evitar las serias consecuencias asociadas con una subida de la temperatura planetaria, tendremos que dar muchos pasos sin precedentes para reducir las emisiones de carbono. La atención suele centrarse en nuevas técnicas que permiten una mayor eficiencia —como los diodos luminosos (LED)— o que introducen formas enteramente nuevas de conversión energética, como los coches eléctricos. El ahorro es en principio una solución más práctica, pero por desgracia (aparte, como hemos visto, de las ventanas con triple cristal) hay pocas maneras de extenderlo a lo que ha sido durante mucho tiempo el mayor sumidero individual de energía en los lugares más fríos del mundo: la calefacción doméstica.

Unos 1.200 millones de personas necesitan calentar su casa: alrededor de 400 millones de habitantes de la Unión Europea,

Ucrania y Rusia, otros 400 millones que viven en Norteamérica fuera del sur y el suroeste de Estados Unidos y 400 millones de chinos en las regiones del nordeste, el norte y el oeste del país. Y casi dondequiera que miremos, las mejores técnicas disponibles son casi tan eficientes como es prácticamente posible.

Es simplemente impresionante lo rápida que ha sido la difusión de sistemas eficientes. En los años cincuenta, mi familia calentaba nuestra casa cerca de la frontera checoalemana con madera quemada en pesadas estufas de fundición. La eficiencia de este proceso no supera el 35 por ciento; el resto del calor escapa por una chimenea. Durante mis estudios en Praga en los inicios de los años sesenta, el suministro de energía a la ciudad se basaba en lignito de baja calidad y la estufa que yo atizaba tenía una eficiencia de entre el 45 y el 50 por ciento. Al final de esa década vivíamos en Pensilvania en el piso más alto de una pequeña casa suburbana cuya vieja caldera quemaba petróleo con una eficiencia de aproximadamente entre el 55 y el 60 por ciento. En 1973, nuestra primera casa canadiense tenía una caldera de gas natural con una eficiencia nominal del 65 por ciento, y 17 años más tarde, en una casa nueva y supereficiente, instalé una caldera con una eficiencia del 94 por ciento. Más tarde, la sustituí por otro modelo cuya eficiencia nominal es del 97 por ciento.



Interior de una caldera doméstica de gas natural.

Mi progreso a través de una sucesión de combustibles y eficiencias ha sido similar al de decenas de millones de personas en el hemisferio norte. Gracias al barato gas natural de Norteamérica y a la combinación del (más caro pero fácilmente accesible) gas neerlandés, del mar del Norte y ruso en Europa, es este —el más limpio de todos los combustibles fósiles— el que ha acabado usando la mayoría de la gente en los climas nortños, en lugar de la madera, el carbón y el fuel. En Canadá, las calderas de eficiencia media (del 78 al 84 por ciento) dejaron de fabricarse en 2009, y todas las casas nuevas están ahora obligadas a tener calderas de



alta eficiencia (al menos del 90 por ciento). Lo mismo ocurrirá pronto en todas partes en Occidente, mientras que las crecientes importaciones de gas ya están haciendo que China cambie su calefacción de carbón a gas.

Las futuras ganancias de eficiencia tendrán que obtenerse de otra parte. Un mejor aislamiento de las superficies exteriores de la casa (en particular, mejores ventanas) es el primer paso obvio (aunque a menudo costoso). En muchos lugares se han hecho populares las bombas de energía aerotérmica, que transfieren calor mediante un intercambiador de calor, y son efectivas mientras las temperaturas no bajen del punto de congelación; en regiones frías aún necesitarán algún respaldo en invierno. También es posible la calefacción solar, pero no funciona muy bien donde y cuando más se la necesita: en climas muy fríos, durante prolongados periodos de frío con cielos cubiertos, durante las ventiscas y cuando las placas solares están cubiertas por una pesada capa de nieve.

¿Acabará la necesidad a largo plazo de limitar el calentamiento global por conducirnos a algo inimaginable? Me refiero a la opción más sensata desde un punto de vista económico y que redundaría en la contribución mayor y más duradera a rebajar la carga carbónica de la calefacción: reducir el tamaño de las casas. En Norteamérica podríamos prescindir de las McMansions —casas producidas en masa de enormes dimensiones—; prescindir de semejantes casas en los trópicos permitiría ahorrarse el gasto opuesto de energía, que ahora se derrocha en aire acondicionado. ¿Quién está dispuesto a ello?

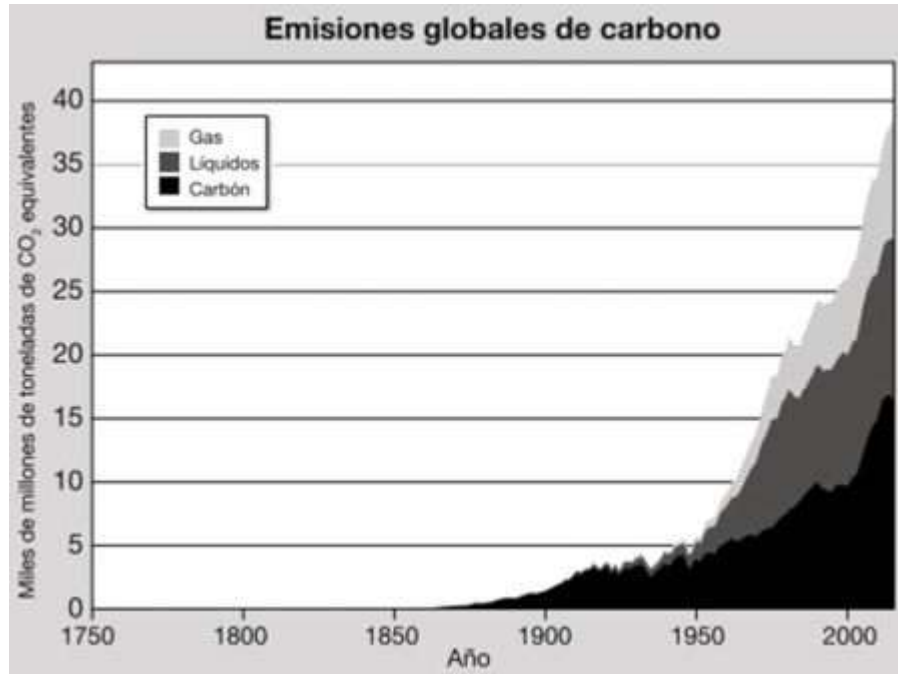
## § 71. Con el carbono hemos topado

En 1896, el sueco Svante Arrhenius fue el primer científico en cuantificar los efectos sobre la temperatura global del dióxido de carbón producido por el hombre. Calculó que si se duplicaba la concentración que tenía en su tiempo el nivel del gas en la atmósfera la temperatura media en las zonas de latitud moderada aumentaría de 5 a 6 grados Celsius. No está demasiado lejos de los últimos resultados, obtenidos por modelos informáticos de más de 200.000 líneas de código.

Las Naciones Unidas adoptaron su primera Convención Marco sobre el Cambio Climático en 1992, a la que siguieron una serie de reuniones y tratados climáticos. Con todo, las emisiones globales de dióxido de carbono han seguido aumentando constantemente.

Al principio del siglo XIX, cuando Reino Unido era el único productor importante de carbón, las emisiones de carbono debidas a la combustión de carburante fósil eran minúsculas, de menos de 10 millones de toneladas al año (para expresarlo en términos de dióxido de carbono simplemente, basta con multiplicar por 3,66). A finales del siglo, las emisiones alcanzaban los quinientos millones de toneladas de carbono. Para 1950, habían llegado al tope de 1.500 millones de toneladas. La expansión económica de Europa, Norteamérica, la Unión Soviética y Japón en la posguerra —junto con el ascenso económico de China a partir de 1980— hicieron que las emisiones se cuadruplicaran a partir de entonces hasta aproximadamente 7.000 millones de toneladas de carbono para el

año 2000. En los dos siglos transcurridos entre 1800 y 2000, la transferencia de carbono de carburantes fósiles a la atmósfera se multiplicó por 650, mientras que la población solo lo hizo por 6.



En el nuevo siglo se ha producido una divergencia significativa. A la altura de 2017, las emisiones habían descendido aproximadamente un 15 por ciento en la Unión Europea, con su crecimiento económico más lento y el envejecimiento de su población, y también en Estados Unidos, gracias en buena medida al creciente uso de gas natural en lugar de carbón. Sin embargo, todas estas ganancias se vieron sobradamente contrapesadas por las emisiones de carbono de China, que aumentaron desde alrededor de 1.000 hasta unos 3.000 millones de toneladas, lo suficiente para incrementar el total mundial en cerca de un 45 por ciento, hasta 10.100 millones de toneladas.

Al quemar enormes reservas de carbono fosilizadas hace eras, los humanos han empujado la concentración de dióxido de carbono a

niveles inéditos desde hace algo así como 3 millones de años. Haciendo profundas perforaciones en glaciares que cubren la Antártida y Groenlandia, podemos extraer finos cilindros de hielo que contienen minúsculas burbujas y, a medida que perforamos a más profundidad, hielo cada vez más antiguo. Tomando muestras del aire encerrado en estas diminutas burbujas, hemos sido capaces de reconstruir la historia de las concentraciones de dióxido de carbono hasta unos 800.000 años. Entonces los niveles de gas en la atmósfera fluctuaban entre 180 y 200 partes por millón (esto es, de 0,018 a 0,028 por ciento). Durante el pasado milenio, las concentraciones permanecieron bastante estables, variando desde 275 partes por millón al principio del siglo XVII hasta en torno a 285 partes por millón antes del final del siglo XIX. En 1958 se comenzaron a hacer mediciones continuas del gas cerca de la cumbre de Mauna Loa, en Hawái: la media en 1959 fue de 316 partes por millón, la media de 2015 alcanzó las 400 partes por millón y en mayo de 2019 se registraron por primera vez 415 partes por millón.

Las emisiones continuarán descendiendo en los países ricos, y el ritmo de crecimiento en China ha comenzado a frenarse. Sin embargo, se está acelerando en India y en África, por lo que es improbable que veamos ningún descenso global sustancial a corto plazo.

El Acuerdo de París de 2015 ha sido elogiado como el primer pacto que incluye compromisos nacionales específicos para reducir futuras emisiones. Pero en realidad solo un pequeño número de

países hicieron promesas concretas, no hay mecanismo vinculante de cumplimiento, e incluso si se alcanzan en 2030 todos los objetivos, las emisiones de carbono superarían en cerca del 50 por ciento el nivel de 2017. Según el estudio hecho en 2018 por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, la única senda para mantener la subida de la temperatura media mundial por debajo de 1,5 grados pasaría por situar casi de inmediato las emisiones en una trayectoria descendente lo suficientemente pronunciada como para reducirlas a cero en 2050. Esto no es imposible, pero sí muy improbable. Alcanzar ese objetivo requeriría nada menos que una transformación fundamental de la economía global en una escala y a una velocidad sin precedente en la historia humana, tarea que sería imposible sin importantes perturbaciones económicas y sociales. El mayor reto sería sacar a miles de millones de la pobreza sin depender del carbono fósil. El mundo rico ha usado cientos de miles de millones de toneladas de carbono para crear su alta calidad de vida, pero justo ahora no tenemos ninguna alternativa asequible que pudiera desplegarse rápidamente a escala masiva para dinamizar la producción de enormes cantidades de lo que he llamado los cuatro pilares de la civilización moderna —amoníaco, acero, cemento y plástico— que se necesitarán en África y Asia en las próximas décadas. El contraste entre las preocupaciones expresadas sobre el calentamiento global, la emisión continua de volúmenes de récord de carbono y nuestras posibilidades de cambiar esto en el futuro próximo no podría ser más marcado.



## Epílogo

Puede que los números no mientan, pero ¿qué verdad encierran? En este libro he tratado de mostrar que con frecuencia tenemos que examinar las cosas con más profundidad y amplitud. Incluso unas cifras razonablemente fiables —aun, por supuesto, *impecablemente precisas*— deben entenderse en contextos más amplios. La valoración bien fundada de valores absolutos requiere algunas perspectivas relativas, comparadas.

Una clasificación rígida basada en diferencias minúsculas desorienta más que informa. Es mejor el redondeo y la aproximación que una precisión sin garantías e innecesaria. Está bien la duda, la precaución y el cuestionamiento incesante, pero también lo está insistir en cuantificar las realidades complejas del mundo moderno. Si hemos de entender muchas realidades ingobernables, si tenemos que basar nuestras decisiones en la mejor información disponible, entonces nada puede sustituir esta indagación.

## Lecturas adicionales

§ 1.	BULATAO, R. A., y J. B. Casterline, eds., <i>Global Fertility Transition</i> , Nueva York, Population Council, 2001. Naciones Unidas, <i>World Population Prospects</i> , Nueva York, Naciones Unidas, 2019, < <a href="https://population.un.org/wpp/">https://population.un.org/wpp/</a> >.
§ 2.	BIDEAU, A., B. Desjardins y H. P. Brignoli, eds., <i>Infant and Child Mortality in the Past</i> , Oxford, Clarendon Press, 1992 GALLEY, C., et al., eds., <i>Infant Mortality: A Continuing Social Problem</i> . Londres, Routledge, 2017.
§ 3.	GATES, Bill, y Melinda Gates, «Warren Buffett's Best Investment», <i>Gates Notes</i> (blog), 14 de febrero de 2017, < <a href="https://www.gatesnotes.com/2017Annual-Letter">https://www.gatesnotes.com/2017Annual-Letter</a> > OZAWA, S., et al., «Modeling the economic burden of adult vaccine-preventable diseases in the United States», <i>Meath Affairs</i> 35, n.º 11 (2016), pp. 2124-2132.
§ 4.	NHCPRC (Comisión sobre Salud Nacional de la República Popular de China), «March 29: Daily briefing on novel coronavirus cases in China», 29 de marzo de 2020, < <a href="http://en.nhc.gov.cn/2020-03/29/c_78447.htm">en.nhc.gov.cn/2020-03/29/c_78447.htm</a> > WONG, J. Y., et al., «Case fatality risk of influenza A (H1N1pdm09): A systematic review», <i>Epidemiology</i> 24, n.º 6 (2013), < <a href="https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3182a67448">https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3182a67448</a> >.
§ 5.	FLOUD, R., et al., <i>The Changing Body</i> , Cambridge, Cambridge University Press, 2011 KOLETZKO, B., et al., eds., <i>Nutrition and Growth: Yearbook 2018</i> , Basilea, Karger, 2018.
§ 6.	RILEY, J. C., <i>Rising Life Expectancy: A Global History</i> , Cambridge, Cambridge University Press, 2001 ROBERT, L., et al., «Rapid increase in human life expectancy: Will it soon be limited by the aging of elastin?», <i>Biogerontology</i> 9, n.º 2 (abril de 2008), pp. 119-133.
§ 7.	JABLONSKI, N. G., «The naked truth», <i>Scientific American Special Editions</i> 22, IS (diciembre de 2012), < <a href="https://doi.org/10.1038/scientificamericanhuman1112-22">https://doi.org/10.1038/scientificamericanhuman1112-22</a> > TAYLOR, N. A. S., y C. A. Machado-Moreira, «Regional variations in transepidermal water loss, eccrine sweat gland density, sweat secretion rates and electrolyte composition in resting and exercising humans», <i>Extreme Physiology and Medicine</i> 2, n.º 4 (2013), < <a href="https://doi.org/10.1186/2046-7648-2-4">https://doi.org/10.1186/2046-7648-2-4</a> >.
§ 8.	LEHNER, M., <i>The Complete Pyramids: Solving the Ancient Mysteries</i> , Londres, Thames and Hudson, 1997 MENDELSSOHN, K., <i>The Riddle of the Pyramids</i> , Londres, Thames and Hudson, 1974.
§ 9.	KNIGHT, K. G., <i>Unemployment: An Economic Analysis</i> , Londres, Routledge,



	2018
	SUMMERS, L. H., ed., <i>Understanding Unemployment</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 1990.
§ 10.	HELIWELL, J. F., R. Layard y J. D. Sachs, eds., <i>World Happiness Report 2019</i> , Nueva York, Sustainable Development Solutions Network, 2019, < <a href="https://s3.amazonaws.com/happiness-report/2019/WHR19.pdf">https://s3.amazonaws.com/happiness-report/2019/WHR19.pdf</a> >
	LAYARD, R., <i>Happiness: Lessons from a New Science</i> , Londres, Penguin Books, 2005.
§ 11.	CANTON, J., «The extreme future of megacities», <i>Significance</i> 8, n.º 2 (junio de 2011), pp. 53-56, < <a href="https://doi.org/10.1111/j.1740-9713.2011.00485.x">https://doi.org/10.1111/j.1740-9713.2011.00485.x</a> >. Munich Re, <i>Megacities-Megarisks: Trends and Challenges for Insurance and Risk Management</i> , Múnich, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2004, < <a href="http://www.preventionweb.net/files/646_10363.pdf">http://www.preventionweb.net/files/646_10363.pdf</a> >.
§ 12.	BISHOP, C., ed., <i>The Illustrated Encyclopedia of Weapons of World War I</i> , Nueva York, Sterling Publishing, 2014
	STOLTZENBERG, D., <i>Fritz Haber: Chemist, Nobel Laureate, German, Jew</i> , Filadelfia, PA, Chemical Heritage Foundation, 2004.
§ 13.	GILLIGAN, T. W., ed., <i>American Exceptionalism in a New Era: Rebuilding the Foundation of Freedom and Prosperity</i> , Stanford, CA, Hoover Institution Press, 2018
	HODGSON, G., <i>The Myth of American Exceptionalism</i> , New Haven, CT, Yale University Press, 2009.
§ 14.	BOOTLE, R., <i>The Trouble with Europe: Why the EU Isn't Working, How It Can Be Reformed, What Could Take Its Place</i> , Boston, MA, Nicholas Brealey, 2016
	LEONARD, D., y M. Leonard, eds., <i>The Pro-European Reader</i> , Londres, Palgrave/Foreign Policy Centre, 2002.
§ 15.	CLARKE, H. D., M. Goodwin y P. Whiteley, <i>Brexit: Why Britain Voted to Leave the European Union</i> , Cambridge, Cambridge University Press, 2017
	MERRITT, G., <i>Slippery Slope: Brexit and Europe's Troubled Future</i> , Oxford, Oxford University Press, 2017.
§ 16.	CANNON, M. E., M. Kudlyak y M. Reed, «Aging and the economy: The Japanese experience», <i>Regional Economist</i> (octubre de 2015), < <a href="https://www.stlouisfed.org/publications/regional-economist/october-2015/aging-and-the-economy-the-japanese-experience">https://www.stlouisfed.org/publications/regional-economist/october-2015/aging-and-the-economy-the-japanese-experience</a> >
	GLOSSERMAN, B., <i>Peak Japan: The End of Great Ambitions</i> , Washington, Georgetown University Press, 2019.
§ 17.	DOTSEY, M., W. Li y F. Yang, «Demographic aging, industrial policy, and Chinese economic growth», Federal Reserve Bank of Philadelphia, <i>Working Papers</i> (2019), pp. 19-21, < <a href="https://doi.org/10.21799/frbp.wp.2019.21">https://doi.org/10.21799/frbp.wp.2019.21</a> >
	PAULSON JR., H. M., <i>Dealing with China: An Insider Unmasks the New Economic Superpower</i> , Nueva York, Twelve, 2016.
§ 18.	DRÈZE, J., y A. Sen, <i>An Uncertain Glory: India and Its Contradictions</i> , Princeton, NJ, Princeton University Press, 2015. NITI Aayog, <i>Strategy for</i>

	<i>New India @ 75</i> , noviembre de 2018, < <a href="https://niti.gov.in/writereaddata/files/Strategy_for_New_India.pdf">https://niti.gov.in/writereaddata/files/Strategy_for_New_India.pdf</a> >.
§ 19.	HARAGUCHI, N., C. F. C. Cheng y E. Smeets, «The importance of manufacturing in economic development: Has this changed?», Inclusive and Sustainable Development Working Paper Series WP1, 2016, < <a href="https://www.unido.org/sites/default/files/2017-02/the_importance_of_manufacturing_in_economic_development_0.pdf">https://www.unido.org/sites/default/files/2017-02/the_importance_of_manufacturing_in_economic_development_0.pdf</a> > SMIL, V., <i>Made in the USA: The Rise and Retreat of American Manufacturing</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2013.
§ 20.	DIVINE, R. A., <i>The Sputnik Challenge: Eisenhower's Response to the Soviet Satellite</i> , Oxford, Oxford University Press, 2003 ZARYA, «Sputniks into Orbit», < <a href="http://www.zarya.info/Diaries/Sputnik/Sputnik1.php">http://www.zarya.info/Diaries/Sputnik/Sputnik1.php</a> >.
§ 21.	ARBESMAN, S., «The life-spans of empires», <i>Historical Methods</i> 44, n.º 3 (2011), pp. 127-129, < <a href="https://doi.org/10.1080/01615440.2011.577733">https://doi.org/10.1080/01615440.2011.577733</a> > SMIL, V., <i>Growth: From Microorganisms to Megacities</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2019.
§ 22.	SMIL, V., <i>Creating the Twentieth Century: Technical Innovations of 1867-19<sup>14</sup> and Their Lasting Impact</i> , Oxford, Oxford University Press, 2005 TIMMONS, T., <i>Science and Technology in Nineteenth-Century America</i> , Westport, CT, Greenwood Press, 2005.
§ 23.	CHENEY, M., <i>Tesla: Man Out of Time</i> , Nueva York, Dorset Press, 1981. HUGHES, A., <i>Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications</i> , Oxford, Elsevier, 2005.
§ 24.	COLTMAN, J. W., «The transformer», <i>Scientific American</i> 258, n.º 1 (enero de 1988), pp. 86-95 HARLOW, J. H., ed., <i>Electric Power Transformer Engineering</i> , Boca Raton, FL, CRC Press, 2012.
§ 25.	MOLLENHAUER, K., y H. Tschöke, eds., <i>Handbook of Diesel Engines</i> , Berlín, Springer, 2010 SMIL, V., <i>Prime Movers of Globalization: The History and Impact of Diesel Engines and Gas Turbines</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2010.
§ 26.	Eadweard Muybridge Online Archive, «Galleries», < <a href="http://www.muybridge.org/">http://www.muybridge.org/</a> > MUYBRIDGE, E., <i>Descriptive Zoopraxography, or the Science of Animal Locomotion Made Popular</i> , Filadelfia, PA, Universidad de Pensilvania, 1893, < <a href="https://archives.upenn.edu/digitized-resources/docs-pubs/muybridge/descriptive-zoopraxography">https://archives.upenn.edu/digitized-resources/docs-pubs/muybridge/descriptive-zoopraxography</a> >.
§ 27.	MARCO, G. A., ed., <i>Encyclopedia of Recorded Sound in the United States</i> , Nueva York, Garland Publishing, 1993 MORRIS, E., <i>Edison</i> , Nueva York, Random House, 2019.
§ 28.	BERLIN, L., <i>The Man Behind the Microchip: Robert Noyce and the Invention of Silicon Valley</i> , Oxford, Oxford University Press, 2006 LÉCUYER, C., y D. C. Brook, <i>Makers of the Microchip: A Documentary History of Fairchild Semiconductor</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2010.

§ 29.	MODY, C. C. M, <i>The Long Arm of Moore's Law: Microelectronics and American Science</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2016
	SMIL, V., <i>Growth: From Microorganisms to Megacities</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2019.
§ 30.	HILBERT, M., y P. López, «The world's technological capacity to store, communicate, and compute information», <i>Science</i> 332, n.º 6025 (abril de 2011), pp. 60-65, < <a href="https://doi.org/0.116/science.1200976">https://doi.org/0.116/science.1200976</a> >
	REINSEL, D., J. Gantz, y J. Rydning, <i>Data Age 2025: The Digitization of the World: From Edge to Core</i> . Seagate, 2017, < <a href="https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/Seagate-WP-DataAge2025-March-2017.pdf">https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/Seagate-WP-DataAge2025-March-2017.pdf</a> >.
§ 31.	SCHIFFER, M. B., <i>Spectacular Failures: Game-Changing Technologies that Failed</i> , Clinton Corners, NY, Eliot Werner Publications, 2019
	SMIL, V., <i>Transforming the Twentieth Century</i> , Oxford, Oxford University Press, 2006.
§ 32.	American Society of Mechanical Engineers, <i>The World's First Industrial Gas Turbine Set. GT Neuchâtel: A Historical Mechanical Engineering Landmark</i> , Alstom, 1988, < <a href="https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/who%20we%20are/engineering%20history/landmarks/135-neuchatel-gas-turbine.pdf">https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/who%20we%20are/engineering%20history/landmarks/135-neuchatel-gas-turbine.pdf</a> >
	SMIL, V., <i>Natural Gas: Fuel for the Twenty-First Century</i> , Chichester, West Sussex, John Wiley, 2015.
§ 33.	International Atomic Energy Agency, <i>Nuclear Power Reactors in the World</i> , Reference Data Series n.o 2, Viena, IAEA, 2019, < <a href="https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39_web.pdf">https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39_web.pdf</a> >
	SMIL, V., <i>Energy and Civilization: A History</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2017.
§ 34.	GINLEY, D. S., y D. Cahen, eds., <i>Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability</i> , Cambridge, Cambridge University Press, 2012
	MISHNAEVSKY JR., L., et al., «Materials for wind turbine blades: An overview», <i>Materials</i> 10 (2017), < <a href="https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5706232/pdf/materials-10-01285.pdf">https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5706232/pdf/materials-10-01285.pdf</a> >.
§ 35.	BEURSKENS, J., «Achieving the 20 MW Wind Turbine», <i>Renewable Energy World</i> 1, n.º 3 (2019), < <a href="https://www.renewableenergyworld.com/articles/print/special-supplement-wind-technology/volume-1/issue-3/wind-power/achieving-the-20-mw-wind-turbine.html">https://www.renewableenergyworld.com/articles/print/special-supplement-wind-technology/volume-1/issue-3/wind-power/achieving-the-20-mw-wind-turbine.html</a> >. General Electric, «Haliade-X 12 MW offshore wind turbine platform», consultado en diciembre de 2019, < <a href="https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine">https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine</a> >.
§ 36.	NASA, «Vanguard 1», consultado en diciembre de 2019, < <a href="https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1958-002B">https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1958-002B</a> >. Departamento de Energía de Estados Unidos, «The History of

	Solar», consultado en diciembre de 2019, < <a href="https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf">https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf</a> >
§ 37.	ARECCHI, A. V., T. Messadi y R. J. Koshel. <i>Field Guide to Illumination</i> , SPIE, 2007, < <a href="https://doi.org/10.1117/3.764682">https://doi.org/10.1117/3.764682</a> >
	PATTISON, P. M., M. Hansen y J. Y. Tsao, «LED lighting efficacy: Status and directions», <i>Comptes Rendus</i> 19, n.º 3 (2017), < <a href="https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1421610">https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1421610</a> >.
§ 38.	KORTHAUER, R., ed., <i>Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications</i> , Berlín, Springer, 2018
	WU, F., B. Yang y J. Ye, eds., <i>Grid-Scale Energy Storage Systems and Applications</i> , Londres, Academic Press, 2019.
§ 39.	Kongsberg Maritime, «Autonomous Ship Project, Key Facts about Yara Birkeland», consultado en diciembre de 2019, < <a href="https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-keyfacts-about-yara-birkeland/">https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-keyfacts-about-yara-birkeland/</a> >
	SMIL, V., <i>Prime Movers of Globalization: The History and Impact of Diesel Engines and Gas Turbines</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2010.
§ 40.	Eurostat, «Electricity price statistics», datos extraídos en noviembre de 2019, < <a href="https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/45239.pdf">https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/45239.pdf</a> >
	VOGT, L. J., <i>Electricity Pricing: Engineering Principles and Methodologies</i> , Boca Raton, FL, CRC Press, 2009
§ 41.	Agencia Internacional de la Energía (AIE), <i>World Energy Outlook 2019</i> , París, AIE, 2019, < <a href="https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019">https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019</a> >
	SMIL, V., <i>Energy Transitions: Global and National Perspectives</i> , Santa Barbara, CA, Praeger, 2017.
§ 42.	GRIFFITHS, D., <i>Brunel's Great Western</i> , Nueva York, Harper-Collins, 1996.
	NEWALL, P., <i>Ocean Liners: An Illustrated History</i> , Barnsley, South Yorkshire, Seaforth Publishing, 2018.
§ 43.	BIJKER, W. E., <i>Of Bicycles, Bakelites and Bulbs: Toward a Theory of Sociotechnical Change</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 1995
	WILSON, D. G., <i>Bicycling Science</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2004.
§ 44.	Automotive Hall of Fame, «John Dunlop», consultado en diciembre de 2019, < <a href="https://www.automotivehalloffame.org/honoree/john-dunlop/">https://www.automotivehalloffame.org/honoree/john-dunlop/</a> >
	DUNLOP, J. B., <i>The History of the Pneumatic Tyre</i> , Dublín, A. Thom & Co., 1925.
§ 45.	CASEY, R. H., <i>The Model T: A Centennial History</i> , Baltimore, MD, Johns Hopkins University Press, 2008. Ford Motor Company, «Our History. Company Timeline», consultado en diciembre de 2019, < <a href="https://corporate.ford.com/history.html">https://corporate.ford.com/history.html</a> >.
§ 46.	Lotus Engineering, <i>Vehicle Mass Reduction Opportunities</i> , octubre de 2010, < <a href="https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-01/documents/10052010mstrs_peterson.pdf">https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-01/documents/10052010mstrs_peterson.pdf</a> >. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, <i>The 2018 EPA Automotive Trends Report:</i>

	<i>Greenhouse Gas Emissions, Fuel Economy, and Technology since 1975</i> , resumen ejecutivo, 2019, < <a href="https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100W3WO.pdf">https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100W3WO.pdf</a> >.
§ 47.	Deloitte, <i>New Market. New Entrants. New Challenges: Battery Electric Vehicles</i> , 2019, < <a href="https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/manufacturing/deloitte-uk-battery-electric-vehicles.pdf">https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/manufacturing/deloitte-uk-battery-electric-vehicles.pdf</a> > QIAO, Q., <i>et al.</i> , «Comparative study on life cycle CO <sub>2</sub> emissions from the production of electric and conventional cars in China», <i>Energy Procedia</i> 105 (2017), pp. 3584-3595.
§ 48.	SMIL, V., <i>Prime Movers of Globalization: The History and Impact of Diesel Engines and Gas Turbines</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2009 YENNE, B., <i>The Story of the Boeing Company</i> , Londres, Zenith Press, 2010.
§ 49.	CSA B836, <i>Storage, Handling, and Dispensing of Aviation Fuels at Aerodromes</i> , Toronto, CSA Group, 2014 VERTZ, L., y S. Sayal. «Jet fuel demand flies high, but some clouds on the horizon», <i>Insight</i> 57 (enero de 2018), < <a href="https://cdn.ihs.com/www/pdf/Long-Term-Jet-Fuel-Outlook-2018.pdf">https://cdn.ihs.com/www/pdf/Long-Term-Jet-Fuel-Outlook-2018.pdf</a> >.
§ 50.	Boeing, <i>Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents: Worldwide Operations 1959-2017</i> , Seattle, WA, Boeing Commercial Airplanes, 2017, < <a href="https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf">https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf</a> >. Organización de Aviación Civil Internacional, <i>State of Global Aviation Safety</i> , Montreal, OACI, 2019, < <a href="https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO_SR_2019_29082019.pdf">https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO_SR_2019_29082019.pdf</a> >.
§ 51.	DAVIS, S. C., S. W. Diegel y R. G. Boundy, <i>Transportation Energy Data Book</i> , Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory, 2019, < <a href="https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub31202.pdf">https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub31202.pdf</a> > SPERLING, D., y N. Lutsey, «Energy efficiency in passenger transportation», <i>Bridge</i> 39, n.º 2 (verano de 2009), pp. 22-30.
§ 52.	SMIL, V., <i>Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2000 STOLTZENBERG, D., <i>Fritz Haber: Chemist, Nobel Laureate, German, Jew</i> , Philadelphia, PA, Chemical Heritage Foundation, 2004.
§ 53.	CALDERINI, D. F., y G. A. Slafer, «Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century», <i>Field Crops Research</i> 57, n.º 3 (1998), pp. 335-347. SMIL, V., <i>Growth: From Microorganisms to Megacities</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2019.
§ 54.	GUSTAVSSON, J., <i>et al.</i> , <i>Global Food Losses and Food Waste</i> , Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2011. WRAP, <i>The Food Waste Reduction Roadmap. Progress Report 2019</i> , septiembre de 2019, < <a href="http://wrap.org.uk/sites/files/wrap/Food-Waste-Reduction_Roadmap_Progress-Report-2019.pdf">http://wrap.org.uk/sites/files/wrap/Food-Waste-Reduction_Roadmap_Progress-Report-2019.pdf</a> >.

§ 55.	TANAKA, T., <i>et al.</i> , «Adherence to a Mediterranean diet protects from cognitive decline in the Invecchiare in Chianti study of aging», <i>Nutrients</i> 10, n.º 12 (2007), < <a href="https://doi.org/10.3390/nu10122007">https://doi.org/10.3390/nu10122007</a> >
	WRIGHT, C. A., <i>A Mediterranean Feast: The Story of the Birth of the Celebrated Cuisines of the Mediterranean, from the Merchants of Venice to the Barbary Corsairs</i> , Nueva York, William Morrow, 1999.
§ 56.	MACKENZIE, B. R., H. Mosegaard y A. A. Rosenberg, «Impending collapse of bluefin tuna in the northeast Atlantic and Mediterranean», <i>Conservation Letters</i> 2 (2009), pp. 25-34
	POLACHEK, T., y C. Davies, <i>Considerations of Implications of Large Unreported Catches of Southern Bluefin Tuna for Assessments of Tropical Tunas, and the Need for Independent Verification of Catch and Effort Statistics</i> , CSIRO Marine and Atmospheric Research Paper n.o 23, marzo de 2008, < <a href="http://www.iotc.org/files/proceedings/2008/wptt/IOTC-2008WPTT-INF01.pdf">http://www.iotc.org/files/proceedings/2008/wptt/IOTC-2008WPTT-INF01.pdf</a> >.
§ 57.	National Chicken Council, «U. S. Broiler Performance», actualizado en marzo de 2019, < <a href="https://www.nationalchickencouncil.org/aboutthe-industry/statistics/u-s-broiler-performance/">https://www.nationalchickencouncil.org/aboutthe-industry/statistics/u-s-broiler-performance/</a> >
	SMIL, V., <i>Should We Eat Meat?: Evolution and Consequences of Modern Carnivory</i> , Chichester, West Sussex, Wiley-Blackwell, 2013.
§ 58.	AURAND, J.-M., <i>State of the Vitiviniculture World Market</i> , International Organization of Vine and Wine, 2018, < <a href="http://www.oiv.int/public/medias/6370/state-of-the-world-vitiviniculture-oiv-2018-ppt.pdf">http://www.oiv.int/public/medias/6370/state-of-the-world-vitiviniculture-oiv-2018-ppt.pdf</a> >
	LEJEUNE, D., <i>Boire et Manger en France, de 1870 au Début des Années 1990</i> , París, Lycée Louis le Grand, 2013.
§ 59.	PEREIRA, P., <i>et al.</i> , «Meat nutritional composition and nutritive role in the human diet», <i>Meat Science</i> 93, n.º 3 (marzo de 2013), pp. 589-592, < <a href="https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.09.018">https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.09.018</a> >
	SMIL, V., <i>Should We Eat Meat?: Evolution and Consequences of Modern Carnivory</i> , Chichester, West Sussex, Wiley-Blackwell, 2013.
§ 60.	CWIERTKA, K. J., <i>Modern Japanese Cuisine: Food, Power and National Identity</i> , Londres, Reaktion Books, 2006
	SMIL, V., y K. Kobayshi, <i>Japan's Dietary Transition and Its Impacts</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2012.
§ 61.	American Farm Bureau Federation, «Trends in beverage milk consumption», <i>Market Intel</i> , 19 de diciembre de 2017, < <a href="https://www.fb.org/market-intel/trends-in-beverage-milk-consumption">https://www.fb.org/market-intel/trends-in-beverage-milk-consumption</a> >
	WATSON, R. R., R. J. Collier y V. R. Preedy, eds., <i>Nutrients in Dairy and Their Implications for Health and Disease</i> , Londres, Academic Press, 2017.
§ 62.	GSM Arena, «All mobile phone brands», consultado en diciembre de 2019, < <a href="https://www.gsmarena.com/makers.php3">https://www.gsmarena.com/makers.php3</a> >
	MORA, C., <i>et al.</i> , «How many species are there on Earth and in the ocean?», <i>PLoS Biology</i> 9, n.º 8 (2011), e1001127, < <a href="https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127">https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127</a> >.

§ 63.	Beef Cattle Research Council, «Environmental Footprint of Beef Production», actualizado el 23 de octubre de 2019, < <a href="https://www.beefresearch.ca/research-topic.cfm/environmental-6">https://www.beefresearch.ca/research-topic.cfm/environmental-6</a> >
	SMIL, V., <i>Harvesting the Biosphere: What We Have Taken from Nature</i> , Cambridge, MA, MIT Press, 2013.
§ 64.	Paul G. Allen Project, <i>The Great Elephant Census Report 2016</i> , Vulcan Inc., 2016, < <a href="http://www.greatelephantcensus.com/final-report">http://www.greatelephantcensus.com/final-report</a> >
	PINNOCK, D., y C. Bell, <i>The Last Elephants</i> , Londres, Penguin Random House, 2019.
§ 65.	DAVIES, J., <i>The Birth of the Anthropocene</i> , Berkeley, CA, University of California Press, 2016. Subcommission on Quaternary Stratigraphy, «Working Group on the “An>thropocene”», 21 de mayo de 2019, < <a href="http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene/">http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene/</a> >.
§ 66.	COURLAND, R., <i>Concrete Planet: The Strange and Fascinating Story of the World's Most Common Man-Made Material</i> , Amherst, NY, Prometheus Books, 2011
	SMIL, V., <i>Making the Modern World: Materials and Dematerialization</i> , Chichester, West Sussex, John Wiley and Sons, 2014.
§ 67.	ANDERS, S. G., y O. Andersen, «Life cycle assessments of consumer electronics. Are they consistent?», <i>International Journal of Life Cycle Assessment</i> 15 (julio de 2010), pp. 827-836
	QIAO, Q. <i>et al.</i> , «Comparative study on life cycle CO <sub>2</sub> emissions from the production of electric and conventional cars in China», <i>Energy Procedia</i> 105 (2017), pp. 3584-3595.
§ 68.	Natural Resources Canada, <i>Keeping the Heat In</i> , Ottawa, Energy Publications, 2012, < <a href="https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/energyefficiency-homes/how-can-i-make-my-home-more-ener/keepingheat/15768">https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/energyefficiency-homes/how-can-i-make-my-home-more-ener/keepingheat/15768</a> >. Departamento de Energía de Estados Unidos, «Insulation materials», consultado en diciembre de 2019, < <a href="https://www.energy.gov/energysaver/weatherize/insulation/insulation-materials">https://www.energy.gov/energysaver/weatherize/insulation/insulation-materials</a> >.
§ 69.	CARMODY, J., <i>et al.</i> , <i>Residential Windows: A Guide to New Technology and Energy Performance</i> , Nueva York, W. W. Norton and Co., 2007. Departamento de Energía de Estados Unidos, <i>Selecting Windows for Energy Efficiency</i> , Merrifield, VA, Office of Energy Efficiency, 2018, < <a href="https://nascsp.org/wp-content/uploads/2018/02/us-doe_selecting-windows-for-energy-efficiency.pdf">https://nascsp.org/wp-content/uploads/2018/02/us-doe_selecting-windows-for-energy-efficiency.pdf</a> >.
§ 70.	Energy Solutions Center, «Natural gas furnaces», diciembre de 2008, < <a href="https://naturalgasefficiency.org/for-residentialcustomers/heat-gas_furnace/">https://naturalgasefficiency.org/for-residentialcustomers/heat-gas_furnace/</a> >
	LECHNER, N., <i>Heating, Cooling, Lighting</i> , Hoboken, NJ, John Wiley and Sons, 2014.
§ 71.	JACKSON, R. B. <i>et al.</i> , <i>Global Energy Growth Is Outpacing Decarbonization. A special report for the United Nations Climate Action Summit</i> , September 2019, Canberra, Global Carbon Project, 2019,

	< <a href="https://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/GCP_2019_Global%20energy%20growth%20outpace%20decarbonization_UN%20Climate%20Summit_HR.pdf">https://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/GCP_2019_Global%20energy%20growth%20outpace%20decarbonization_UN%20Climate%20Summit_HR.pdf</a> >
	SMIL, V., <i>Energy Transitions: Global and National Perspectives</i> , Santa Barbara, CA, Praeger, 2017.



## Agradecimientos

Durante muchos años, a medida que iba publicando libros interdisciplinarios, pensé que un reto interesante sería el de disponer de una oportunidad periódica de comentar asuntos que considerase dignos de atención, aclarar determinados equívocos y explicar algunas realidades fascinantes del mundo moderno. También pensé que la probabilidad de que eso ocurriera era bastante reducida, porque para que mereciese la pena hacerlo la propuesta de alguna editorial tendría que cumplir varios criterios exigentes.

El intervalo entre las colaboraciones no debería ser ni demasiado breve (algo semanal sería una lata) ni demasiado esporádico. La extensión, no demasiado larga, pero sí lo suficiente como para permitirme escribir algo más que unos pocos párrafos banales. El enfoque, ni demasiado especializado ni demasiado superficial, para hacer posible un análisis informado. La selección de temas, no ilimitada (no tenía intención de escribir sobre asuntos poco conocidos o sobre cuestiones excesivamente especializadas) pero sin duda suficientemente amplia. Y tendría que haber tolerancia para con los números: no demasiados, pero los suficientes para armar argumentos convincentes. Este último punto era de particular importancia para mí, porque a lo largo de las décadas me había percatado de cómo la discusión sobre asuntos importantes que requieren un cierto grado de comprensión cuantitativa se estaba tornando cada vez más cualitativa, y por ende cada vez menos

ligada a realidades complejas.

Cosas verdes. En 2014 me pidieron que escribiera un artículo mensual para *IEEE Spectrum*, la revista del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, que tiene su sede en Nueva York. Philip Ross, editor principal de *Spectrum*, propuso mi nombre, y Susan Hassler, la editora jefa, lo aceptó de buena gana. *Spectrum* es la revista (y sitio web) buque insignia de la mayor organización profesional del mundo centrada en la ingeniería y las ciencias aplicadas, y sus miembros han estado en la vanguardia de la transformación de un mundo moderno dependiente del suministro constante, asequible y fiable de electricidad y de la adopción de un conjunto cada vez más amplio de nuevos dispositivos electrónicos y soluciones informatizadas.

En un correo electrónico que le envié a Phil en octubre de 2014 expuse los temas que tenía previsto abordar durante el primer año, que iban desde los coches demasiado pesados hasta las ventanas triples, pasando por la maldición de Moore y el Antropoceno. Acabé escribiendo casi sobre todos ellos, y se fueron publicando a partir de 2015, con una primera columna mensual dedicada a los coches cada vez más pesados. *Spectrum* ha sido el hogar perfecto para mis artículos. Con sus más de 400.000 miembros, el IEEE proporciona un gran número de lectores críticos y muy formados, he gozado de absoluta libertad a la hora de elegir los temas, y Phil ha sido un editor ejemplar, particularmente implacable a la hora de comprobar la veracidad de lo escrito.

Cuando los artículos se fueron acumulando, pensé que podrían

formar una colección interesante, pero, de nuevo, no vi muchas posibilidades de que acabasen en forma de libro. Entonces, a finales de octubre de 2019, casi exactamente cinco años después de que le expusiera a Phil la lista de artículos del primer año, llegó otro correo electrónico inesperado de Daniel Crewe, editor de Viking (Penguin Random House) en Londres, que se preguntaba si me había planteado convertir mis columnas en un libro. A partir de ahí, todo ocurrió muy rápidamente: Daniel obtuvo el permiso de Susan, elegimos unos sesenta artículos publicados para la colección (solo excluimos unas pocas columnas muy técnicas), y escribí otra docena más para completar los siete capítulos temáticos (en particular, los que tratan sobre los alimentos y sobre las personas). Connor Brown se encargó del primer proceso importante de edición, y seleccionamos los gráficos y fotografías apropiados.

Quiero dar las gracias a Phil, a Susan y a los lectores de *Spectrum* por el apoyo y por la oportunidad de escribir sobre cualquier cosa que capte mi curiosidad, y a Daniel y Connor por dar una segunda vida a estas reflexiones cuantitativas.

La mayoría de las ilustraciones provienen de colecciones privadas. Otras proceden de:

La milagrosa década de 1880 © Erik Vrielink; El mayor transformador del mundo, de Siemens para China © Siemens; Comparación de las alturas de varias turbinas eólicas y los diámetros de sus álabes © Chao (Chris) Qin; Vista aérea de la central eléctrica de Ouarzazate Noor en Marruecos. Con 510 MW, es la mayor central de energía solar y la mayor instalación fotovoltaica

del mundo © Fadel Senna a través de Getty; Maqueta del *Yara Birkeland* © Kongsberg; Otro precio de récord para un atún rojo © Reuters, Kim Kyung-Hoon; Dónde viven aún los elefantes africanos © Vulcan Inc.; Las eras geológicas y el Antropoceno © Erik Vrieling. Se han hecho todos los esfuerzos razonables para localizar a los titulares de los derechos de autor, pero el editor agradece cualquier información que aclare la titularidad de los derechos de autor de cualquier material que se muestre sin citarlo y procurará incluir las debidas correcciones en las reimpresiones.

#### PUBLICADOS ORIGINALMENTE COMO...

- El mejor retorno de la inversión: la vacunación: «Vaccination: The Best Return on Investment» (2017)
- ¿Está la esperanza de vida por fin alcanzando un tope?: «Is Life Expectancy Finally Topping Out?» (2019)
- Cómo sudar mejoró nuestra capacidad de cazar: «The Energy Balance of Running» (2016)
- ¿Cuántas personas se necesitaron para construir la gran pirámide?: «Building the Great Pyramid» (2020)
- ¿Por qué las cifras de desempleo no cuentan toda la historia?: «Unemployment: Pick a Number» (2017)
- Las prolongadas tragedias de la Primera Guerra Mundial: «November 1918: The First World War Ends» (2018)
- ¿Es Estados Unidos realmente excepcional?: «American Exceptionalism» (2015)
- Por qué Europa debería estar más satisfecha consigo misma: «January 1958: European Economic Community» (2018)

- Inquietud sobre el futuro de Japón: «'New Japan' at 70» (2015)
- ¿Hasta dónde puede llegar China?: «China as the New No. 1? Not Quite» (2016)
- India frente a China 83: «India as No. 1» (2017)
- Por qué la producción industrial sigue siendo importante: «Manufacturing Powers» (2016)
- Rusia y Estados Unidos: las cosas nunca cambian: «Sputnik at 60» (2017)
- Cómo la década de 1880 creó el mundo moderno: «The Miraculous 1880s» (2015)
- Cómo los motores eléctricos mueven la civilización moderna: «May 1888: Tesla Files His Patents for the Electric Motor» (2018)
- Transformadores: esos dispositivos silenciosos y pasivos (2108): «Transformers, the Unsung Technology» (2017)
- Por qué aún no deberíamos dar al diésel por acabado: «The Diesel Engine at 120» (2017)
- Capturar el movimiento: de los caballos a los electrones: «June 1878: Muybridge's Galloping Horse» (2019)
- Del fonógrafo al *streaming*: «February 1878: The First Phonograph» (2018)
- La invención de los circuitos integrados: «July 1958: Kilby Conceive the Integrated Circuit» (2018)
- La maldición de Moore: por qué el progreso técnico lleva más tiempo del que pensamos: «Moore's Curse» (2015)
- La irrupción de los datos: demasiados y demasiado rápido: «Data World: Racing Toward Yotta» (2019)

- Ser realistas sobre la innovación: «When Innovation Fails» (2015)
- Por qué las turbinas de gas son la mejor opción: «Superefficient Gas Turbines» (2019)
- Electricidad nuclear: una promesa incumplida: «Nuclear Electricity:A Successful Failure» (2016)
- Por qué necesitamos combustibles fósiles para obtener electricidad del viento: «What I See When I See a Wind Turbine» (2016)
- ¿Qué tamaño puede llegar a tener una turbina?; «Wind Turbines: How Big?» (2019)
- La lenta irrupción de las células fotovoltaicas: «March 1958:The First PVs in Orbit» (2018)
- Por qué la luz solar sigue siendo la mejor: «Luminous Efficacy» (2019)
- Por qué necesitamos baterías más grandes: «Grid Electricity Storage: Size Matters» (2016)
- Por qué no es fácil tener buques portacontenedores eléctricos: «Electric Container Ships Are a Hard Sail» (2019)
- El verdadero coste de la electricidad: «Electricity Prices:A Changing Bargain» (2020)
- Acortar la travesía del Atlántico: «April 1838: Crossing the Atlantic» (2018)
- ¡Los motores son más antiguos que las bicicletas!: «Slow Cycling» (2017)
- La sorprendente historia de las ruedas inflables: «December

1888: Dunlop Patents Inflatable Tire» (2018)

- ¿Cuándo comenzó la era del automóvil?: «August 1908:The First Ford Model T Completed in Detroit» (2018)
- Los coches modernos tienen una pésima razón entre peso y carga: «Cars Weigh Too Much» (2014)
- Por qué los coches eléctricos» (aún) no son tan estupendos como creemos: «Electric Vehicles: Not So Fast» (2017)
- ¿Cuándo comenzó la era de los aviones a reacción?: «October 1958: First Boeing 707 to Paris» (2018)
- Por qué el queroseno es el rey: «Flying Without Kerosene» (2016)
- ¿Qué medio de transporte tiene mayor eficiencia energética: el avión, el tren o el automóvil?: «Energy Intensity of Passenger Travel» (2019)
- La inexcusable magnitud del desperdicio alimentario mundial: «Food Waste» (2016)
- El lento *addio* a la dieta mediterránea: «Addio to the Mediterranean Diet» (2016)
- Atún rojo: camino de la extinción: «Bluefin Tuna: Fast, but Maybe Not Fast Enough» (2017)
- Por qué se impone el pollo: «Why Chicken Rules» (2020)
- (No) beber vino: «(Not) Drinking Wine» (2020)
- Animales o artefactos: ¿cuáles son más diversos?: «Animals vs. Artifacts:Which are more diverse?» (2019)
- El planeta de las vacas: «Planet of the Cows» (2017)
- La muerte de elefantes: «The Deaths of Elephants» (2015)
- Por qué pueden ser prematuros los manifiestos a favor del

Antropoceno: «It's Too Soon to Call This the Anthropocene Era» (2015)

- Hechos de hormigón: «Concrete Facts» (2020)
- ¿Qué es peor para el medio ambiente: nuestro automóvil o nuestro teléfono?: «Embodied Energy: Mobile Devices and Cars» (2016)
- ¿Quién tiene mejor aislamiento?: «Bricks and Batts» (2019)
- Ventanas de triple cristal: una solución energética transparente: «The Visionary Energy Solution: Triple Windows» (2015)
- Aumentar la eficiencia de la calefacción doméstica: «Heating Houses: Running Out of Combustion Efficiency» (2016)
- Con el carbono hemos topado: «The Carbon Century» (2019)



## El autor

Vaclav Smil es profesor emérito de la Universidad de Manitoba, en Winnipeg, Canadá. Es autor de una cuarentena de libros que abordan desde la renovación energética hasta la producción de alimentos, pasando por las innovaciones tecnológicas, los cambios medioambientales y de población, las políticas públicas y las evaluaciones de riesgo. Es miembro de la Royal Society de Canadá y de la Orden de Canadá.

