

Energía y civilización. Una historia Vaclav Smil

Cómo la energía ha definido nuestro mundo desde las sociedades de cazadores-recolectores hasta la actual civilización fósil

«Vaclav Smil
es mi autor
favorito».
Bill Gates

arpa



ENERGÍA Y CIVILIZACIÓN.
UNA HISTORIA

Título original: *Energy and civilization. A history*

© del texto: Vaclav Smil, 2018

© de la traducción: Álvaro Palau Arvizu, 2021

© de esta edición: Arpa & Alfil Editores, S. L.

Primera edición: septiembre de 2021

ISBN: 978-84-18741-17-3

Depósito legal: B 13110-2021

Diseño de colección: Enric Jardí

Diseño de cubierta: Anna Juvé

Maquetación: Àngel Daniel

Producción del ePub: booqlab

Arpa

Manila, 65

08034 Barcelona

arpaeditores.com

Reservados todos los derechos.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

Vaclav Smil

ENERGÍA Y CIVILIZACIÓN.
UNA HISTORIA

Traducción de Álvaro Palau Arvizu

arpa

SUMARIO

1. ENERGÍA Y SOCIEDAD

Flujos, reservas y controles

Conceptos y medidas

Dificultades y advertencias

2. LA ENERGÍA EN LA PREHISTORIA

Sociedades de cazadores-recolectores

Orígenes de la agricultura

3. AGRICULTURA TRADICIONAL

Puntos en común y particularidades

Trabajo de campo

El dominio de los granos

Ciclos de cultivo

El camino hacia la intensificación de la agricultura

Animales de tiro

Riego

Fertilización

Diversidad de cultivos

Constancia y progreso

Antiguo Egipto

China

Culturas mesoamericanas

Europa

América del Norte

Los límites de la agricultura tradicional

Éxitos

Nutrición

Límites

4. MOTORES PRIMARIOS Y COMBUSTIBLES PREINDUSTRIALES

Motores primarios

Fuerza humana y animal

Energía hidráulica

Energía eólica

Combustibles de biomasa

Madera y carbón vegetal

Residuos de cultivo y estiércol

Consumo doméstico

Preparación de la comida

Calor y luz

Transporte y construcción

Transporte terrestre

Barcos de remos y veleros

Edificios y estructuras

Metalurgia

Metales no ferrosos

Hierro y acero

Guerra

Energía humana y animal

Explosivos y armas

5. COMBUSTIBLES FÓSILES, ELECTRICIDAD PRIMARIA Y ENERGÍAS RENOVABLES

La gran transición

Los inicios y la expansión de la extracción de carbón

Del carbón vegetal al coque

Máquinas de vapor

Petróleo y motores de combustión interna

Electricidad

Innovaciones técnicas

Tipos de carbón

Hidrocarburos

Electricidad

Energías renovables

Motores primarios en el transporte

6. CIVILIZACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Una potencia sin precedentes

La energía en la agricultura

Industrialización

Transporte

Información y comunicación

Crecimiento económico

Consecuencias y preocupaciones

Urbanización

Calidad de vida
Implicaciones políticas
Armas y guerras
Cambios medioambientales

7. LA ENERGÍA EN LA HISTORIA DEL MUNDO

Grandes patrones de consumo energético

Eras energéticas y transiciones
Tendencias a largo plazo y costes decrecientes
¿Qué no ha cambiado?

Entre determinismo y elección

Imperativos de los requisitos y usos de la energía
La importancia de los mecanismos de control
Los límites de las explicaciones energéticas

ADENDAS

BIBLIOGRAFÍA

1

ENERGÍA Y SOCIEDAD

La energía es la única moneda de cambio universal: sin transformación de energía no hay nada —nada de nada; *niet*—. La rotación de las galaxias y las reacciones termonucleares en el seno de las estrellas son dos manifestaciones universales de transformación de energía. En la Tierra, la transformación de energía abarca desde la fuerza de la tectónica de placas, que separa los fondos oceánicos y crea cadenas montañosas, hasta el impacto erosivo acumulativo de minúsculas gotas de lluvia (como decían los romanos, *gutta cavat lapidem non vi, sed saepe cadendo*: «una gota de agua no perfora la piedra por la fuerza, sino por repetición»). La vida en la Tierra —que, a pesar de nuestros esfuerzos por captar señales extraterrestres que tengan algún tipo de sentido, sigue siendo la única vida que conocemos en el universo— sería imposible sin la conversión fotosintética de la energía solar en fitomasa (biomasa vegetal). Los humanos dependen de este tipo de transformación para su supervivencia —y de muchos otros flujos de energía para su existencia civilizada—. Como dijo Richard Adams (1982, 27):

Podemos pensar millones de cosas, pero, si no tenemos los medios para convertir esas cosas en acciones, seguirán siendo meros pensamientos. [...] La historia actúa de manera impredecible. Sin

embargo, los eventos históricos toman necesariamente una estructura acorde con sus componentes energéticos.

La evolución de las sociedades humanas ha generado un importante crecimiento poblacional, sistemas sociales cada vez más complejos y mayor calidad de vida para cada vez más personas. Desde una perspectiva biofísica básica, tanto la evolución humana prehistórica como el curso de la historia pueden pensarse como la búsqueda por controlar mayores reservas y flujos de formas de energía cada vez más concentradas y versátiles, y por convertirlas en calor, luz y movimiento de manera cada vez más asequible y eficiente y menos costosa. Esta tendencia ha sido modelizada por la ley de la máxima energía del matemático, químico y estadista estadounidense Alfred Lotka (1880-1949): «Mientras exista materia y energía disponible (sin utilizar), la selección natural operará en todo momento para aumentar la masa total del sistema orgánico, la velocidad de circulación de la materia a través del sistema y el flujo de energía total que circula a través del mismo» (Lotka, 1922: 148).

La historia de las civilizaciones —los organismos más grandes y complejos de la biosfera— ha seguido este curso. La dependencia humana respecto a flujos de energía cada vez más importantes puede pensarse como una continuación inevitable de la evolución orgánica. Wilhelm Ostwald (1853-1932, ganador del Premio Nobel de Química de 1909 por su trabajo sobre la catálisis) fue el primer científico que de manera explícita extendió «la segunda ley de la energía [termodinámica] a todas y cada una de las acciones del universo y, en particular, a todas las acciones humanas». Y sigue: «No todas las energías están listas para esta transformación; solo ciertas formas, conocidas como energías libres. [...] Esto significa que la energía libre es el capital consumido por todas las criaturas de todo tipo, y que su conversión explica todo lo que ocurre» (Ostwald, 1912: 83). Esta observación lo condujo a formular su imperativo energético:

«*Vergeude keine Energie, verwerte sie*». Es decir: «No desperdicies ninguna energía, utilízala» (Ostwald, 1912: 85).

Tres citas ilustran cómo los seguidores de Ostwald han reafirmado sus conclusiones y en algunos casos han hecho que el vínculo entre energía y actividad humana sea aún más explícitamente determinista. A principios de la década de 1970, Howard Odum (1924-2002) introdujo una variación sobre el tema clave de Ostwald: «La disponibilidad de fuentes de energía determina la cantidad de trabajo que puede existir y el control de los flujos de energía determina las relaciones de poder entre los seres humanos y para con la naturaleza» (Odum, 1971: 43). A finales de la década de 1980, Ronald Fox, en las conclusiones de un libro sobre el papel de la energía en la evolución, señaló que «cada mejora de la gestión de los flujos de energía ha provocado una mejora de los mecanismos culturales» (Fox, 1988: 166).

No es necesario ser un gran especialista para constatar el vínculo entre el suministro de energía y el progreso social. Esto es lo que escribió Eric Blair (George Orwell, 1903-1950) en 1937 en el segundo capítulo de *El camino a Wigan Pier*, después de una visita a una mina de carbón subterránea:

Según Chesterton, la dependencia de nuestra civilización respecto al carbón es más completa de lo que cabe imaginar espontáneamente. Todas las máquinas que nos mantienen vivos (así como las máquinas que fabrican máquinas) dependen directa o indirectamente del carbón. En el metabolismo del mundo occidental, solo el hombre que ara la tierra es más importante que el minero de carbón. Este es una suerte de cariatide sobre cuyos hombros reposa casi todo lo que no es mugriento. Por eso vale la pena observar por uno mismo el proceso de extracción de carbón si se tiene la oportunidad de hacerlo y se está dispuesto a tomarse la molestia. (Orwell 1937, 18)

Sin embargo, reafirmar este vínculo fundamental (como hizo Orwell) y afirmar que el progreso cultural siempre ha ido de la mano del progreso en el control de los flujos de energía (como hace Fox) son dos cosas distintas. La conclusión orwelliana es inatacable. En cambio, el enunciado de Fox es una clara reafirmación de la visión determinista que se desprende de la primera ley del desarrollo cultural propuesta por la antropóloga Leslie White (1900-1975) en la década de 1940: «En igualdad de circunstancias, el grado de desarrollo cultural es una función de la cantidad de energía aprovechada por persona y año» (White, 1943: 346). Mientras que la formulación de Ostwald y el efecto general de la energía sobre la estructura y la dinámica de las sociedades que describe Orwell no son verdaderamente discutibles, la existencia de un vínculo determinista entre el nivel de consumo de energía y el progreso cultural sí que lo es. En el último capítulo del libro examino esta correlación (o su ausencia).

La naturaleza fundamental del concepto «energía» no está en cuestión. Como dijo Robert Lind (1975: 2):

Si pudiéramos hallar una palabra que representara una idea que se aplicara a cada elemento de nuestra existencia de tal manera que sintiéramos que tenemos una comprensión genuina de la misma, habríamos logrado algo económico e importante. Esto es lo que ha sucedido con la idea expresada por la palabra *energía*. Ningún otro concepto ha unificado tanto nuestra comprensión de todo lo que es.

Pero ¿qué es la energía? Sorprendentemente, incluso los ganadores del Premio Nobel tienen importantes dificultades para ofrecer una respuesta satisfactoria a una pregunta aparentemente sencilla. En sus famosas *Lecciones de física*, Richard Feynman (1918-1988) reconoce que «la física actual no sabe claramente qué es la energía. No tenemos

ninguna foto que nos muestre que la energía se desplaza en pequeñas burbujas de un tamaño determinado» (Feynman, 1988: 4-2).

Lo que sí sabemos es que toda la materia es energía en reposo, que la energía se manifiesta de múltiples formas y que todas las formas de energía están unidas entre sí por numerosas conversiones, muchas de ellas universales, omnipresentes y constantes, y otras altamente localizadas, esporádicas y efímeras (figura 1.1). La comprensión de estos potenciales, reservas y transformaciones se expandió y sistematizó fundamentalmente durante el siglo XIX y se perfeccionó durante el siglo XX, cuando —hecho que refleja la complejidad de las transformaciones de energía— entendimos cómo liberar energía nuclear antes (teóricamente a finales de la década de 1930 y en la práctica en 1943, cuando el primer reactor nuclear comenzó a funcionar) de comprender cómo funciona la fotosíntesis (cuyas secuencias solo se revelaron durante la década de 1950).

	Electro- magnética	Química	Nuclear	Térmica	Cinética	Eléctrica
Electro- magnética		Quimiolumi- niscencia	Bombas nucleares	Radiación térmica	Aceleración de las cargas	Electro- magnética
Química	Fotosíntesis	Procesamiento químico		Ebullición	Disociación por radiólisis	Electrólisis
Nuclear	Reacción gamma- neutrónica					
Térmica	Absorción solar	Combustión	Fisión Fusión	Intercambio de calor	Fricción	Calenta- miento por resistencia
Cinética	Radiómetro	Metabolismo	Radio- actividad Bombas nucleares	Expansión térmica Combustión interna	Engranajes	Motores eléctricos
Eléctrica	Paneles solares	Pila de combustible Batería	Batería nuclear	Termoelec- tricidad	Generadores de electri- cidad	

Figura 1.1 Matriz de conversiones de energía. Cuando existen diversas posibilidades, solo se identifican dos transformaciones especialmente importantes.

FLUJOS, RESERVAS Y CONTROLES

Todas las formas conocidas de energía son críticas para la existencia humana. Esta realidad excluye cualquier tipo de clasificación por importancia. En buena medida, el curso de la historia se ha visto determinado y circunscrito tanto por flujos de energía universales y planetarios como por sus manifestaciones locales o regionales. Las características fundamentales del universo dependen de la energía gravitacional, que ordena incontables galaxias y sistemas estelares. La gravedad también mantiene nuestro planeta a la distancia adecuada

del Sol y genera una atmósfera suficientemente masiva para que la Tierra sea habitable (recuadro 1.1).

Como en cualquier estrella activa, la fusión alimenta al Sol y el producto de dicha reacción termonuclear llega a la Tierra en forma de energía electromagnética. Su flujo se extiende en un amplio espectro de longitudes de onda, incluida la luz visible. Cerca del 30% de este enorme flujo es reflejado por las nubes y la superficie, cerca del 20% es absorbido por la atmósfera y las nubes, y el resto —aproximadamente la mitad del total— es absorbido por los océanos y los continentes, se convierte en energía térmica y vuelve después al espacio (Smil, 2008a). La energía geotérmica de la Tierra genera un flujo de calor mucho más pequeño: resulta de la acumulación gravitatoria original de la masa planetaria y la descomposición de la materia radiactiva e impulsa grandes procesos tectónicos que siguen reordenando océanos y continentes y causan erupciones volcánicas y terremotos.

RECUADRO 1.1

Gravedad y habitabilidad de la Tierra

La tolerancia límite de los metabolismos basados en el carbono viene determinada por el punto de congelación del agua, cuya forma líquida es necesaria para la formación de moléculas orgánicas y sus reacciones (límite inferior), y por las temperaturas y presiones que desestabilizan los aminoácidos y descomponen las proteínas (límite superior). La zona habitable de la Tierra —región orbital que garantiza condiciones óptimas para que un planeta albergue vida— es muy estrecha (Perkins, 2013). Un cálculo reciente concluye que estamos todavía más cerca del límite de lo que pensábamos antes: Koppurapu *et al.* (2014) explican que, dada su composición y presión atmosférica, la Tierra orbita en el borde interior de la zona habitable, justo fuera del radio donde un efecto invernadero desbocado generaría temperaturas intolerablemente altas.

Hace aproximadamente dos mil millones de años, el océano, las arqueas y las algas secuestraron suficiente dióxido de carbono como para evitar este efecto en la Tierra. Si el planeta hubiera estado un 1% más alejado del Sol, casi toda su agua estaría encerrada en glaciares. Incluso con temperaturas incluidas dentro de una franja óptima, el planeta no hubiera podido soportar una vida altamente diversificada sin su singular atmósfera, mayoritariamente formada por nitrógeno, enriquecida por el oxígeno

proveniente de la fotosíntesis y con una serie de importantes gases traza que regulan la temperatura de la superficie. Por último, este delgado envoltorio gaseoso no podría haber persistido si el planeta no hubiera sido lo suficientemente grande como para ejercer la gravedad adecuada para mantener la atmósfera en su lugar.

Solo una pequeña parte de la energía radiante entrante (menos del 0,05%) se transforma mediante fotosíntesis en nuevas reservas de energía química en forma de plantas, que proporcionan la base de cualquier forma de vida superior. El metabolismo reorganiza los nutrientes en tejidos en crecimiento y mantiene las funciones corporales y la temperatura constante en todas las especies superiores. La digestión también genera la energía mecánica (cinética) de los músculos. La transformación de energía en los animales está inherentemente limitada por el tamaño de los cuerpos y la disponibilidad de alimento. Una característica distintiva fundamental de nuestra especie ha sido la extensión de estos límites físicos mediante el uso más eficiente de los músculos y el aprovechamiento de energía exterior a nuestro propio cuerpo.

Esta energía extracorporal ha sido progresivamente desbloqueada por el intelecto humano y utilizada para un número creciente de tareas en forma de motores primarios más potentes y combustibles (cuya combustión libera calor). Los detonantes del suministro de energía dependen del flujo de información y de una enorme variedad de artefactos. Estos dispositivos han abarcado desde herramientas tan sencillas como piedras y palancas hasta complejos motores de combustión y reactores de fisión nuclear. La secuencia evolutiva e histórica básica de estos avances es fácil de describir en términos cualitativos amplios. Como ocurre con cualquier organismo no fotosintetizante, el principal requisito energético del ser humano es la alimentación. La caza y recolección de los homínidos se parecieron mucho a las prácticas de adquisición de alimentos de sus antepasados primates. Aunque algunos primates —así como otros mamíferos (como las nutrias y los elefantes), algunas aves (cuervos y loros) e

incluso algunos invertebrados (cefalópodos)— han desarrollado un pequeño repertorio de herramientas rudimentarias (Hansell, 2005; Sanz, Call y Boesch, 2014; figura 1.2), solo los homínidos han hecho de la fabricación de herramientas una marca distintiva de su comportamiento.



Figura 1.2 Un chimpancé (*Pan troglodytes*) en Gabón abre nueces con una herramienta (Corbis).

Las herramientas nos han otorgado una ventaja mecánica a la hora de adquirir alimento, cobijo y ropa. El dominio del fuego amplió muchísimo nuestro rango de asentamiento y nos distanció aún más de los animales. Nuevas herramientas condujeron al uso de animales domesticados, la construcción de máquinas más complejas alimentadas por músculos humanos y animales, y la conversión de una pequeña fracción de la energía cinética del viento y el agua en energía útil. Estos nuevos motores primarios multiplicaron la energía que éramos capaces de controlar, aunque durante mucho tiempo su uso

estuvo circunscrito por la naturaleza y magnitud de los flujos capturados. El caso más evidente es el de las velas, antiguas y eficaces herramientas cuya capacidad estuvo restringida durante milenios por los flujos de viento y las corrientes oceánicas. Estos grandes flujos dirigieron los viajes transatlánticos europeos de finales del siglo XV hacia el Caribe. También impidieron que los españoles descubrieran Hawái, a pesar de que los barcos mercantes españoles —conocidos como galeones de Manila— cruzaron el Pacífico una o dos veces al año desde México (Acapulco) hasta Filipinas durante 250 años, entre 1565 y 1815 (Schurz, 1939).

La combustión controlada en chimeneas, estufas y hornos convirtió la energía química de las plantas en energía térmica. Este calor se utilizó directamente en los hogares y también para fundir metales, cocer ladrillos y procesar y perfeccionar innumerables productos. El uso de combustibles fósiles hizo más habituales y eficientes todos estos usos directos tradicionales del calor. Gracias a una serie de inventos cruciales, pudimos convertir la energía térmica de la quema de combustibles fósiles en energía mecánica (primero en motores de vapor y de combustión interna y más adelante en turbinas de gas y cohetes). Desde 1882 hemos generado electricidad mediante la quema de combustibles fósiles y el aprovechamiento de la energía cinética del agua y desde 1956 mediante la fisión de un isótopo de uranio.

La quema de combustibles fósiles y la generación de electricidad crearon un nuevo tipo de civilización energívora que hoy abarca todo el planeta y cuyas fuentes de energía primaria incluyen una pequeña pero rápidamente creciente proporción de nuevas fuentes renovables, especialmente la energía solar (aprovechada mediante dispositivos fotovoltaicos o en centrales de energía termosolar de concentración) y la eólica (obtenida mediante grandes turbinas eólicas). A su vez, estos avances se han basado en una concatenación de acontecimientos anteriores. Por utilizar una analogía con los modelos de flujos: para liberar el flujo de la creatividad humana tuvieron que configurarse y

activarse primero un conjunto de compuertas o válvulas en el orden adecuado.

Las principales compuertas que deben configurarse y activarse para liberar grandes potenciales energéticos son el acceso a la educación, un sistema jurídico estable y predecible, un sistema económico transparente, la disponibilidad de capital suficiente y condiciones adecuadas para la investigación fundamental. Por consiguiente, no es sorprendente que el crecimiento cuantitativo y la mejora cualitativa de los flujos de energía existentes —así como la difusión de fuentes de energía completamente nuevas— a menudo requiera varias generaciones. La cronología, la capacidad global y la composición de los flujos de energía que resultan de todos estos cambios son extremadamente difíciles de predecir. E incluso cuando dichas transiciones se ponen en marcha, es imposible evaluar el impacto que un cambio de motor primario o combustible tendrá en la agricultura, la industria, el transporte, las urbes, la guerra o el medio ambiente. El análisis cuantitativo es esencial para comprender nuestros límites y éxitos y requiere conocer conceptos y medidas científicos básicos.

CONCEPTOS Y MEDIDAS

Toda conversión de energía viene determinada por unos pocos principios esenciales. Cualquier energía puede convertirse en calor (energía térmica). La energía nunca se pierde. La conservación de la energía, la primera ley de la termodinámica, es una realidad universal fundamental. A lo largo de las cadenas de conversión, el potencial de trabajo útil disminuye constantemente (recuadro 1.2). Esta realidad inexorable constituye la segunda ley de la termodinámica, que define la entropía como la medida asociada con esta pérdida de energía útil. En otras palabras, aunque el contenido energético del universo es constante, las conversiones de energía aumentan su entropía y, por tanto, disminuyen su utilidad. Una cesta de cereales o un barril de crudo son depósitos de energía de baja entropía capaces de generar

mucho trabajo útil una vez metabolizados o quemados, pero terminarán por convertirse en movimiento aleatorio de moléculas de aire ligeramente calentadas, estado altamente entrópico e irreversible que representa una pérdida irrecuperable de utilidad.

La disipación entrópica unidireccional conduce a una menor complejidad y un mayor desorden y homogeneidad en cualquier sistema cerrado. Sin embargo, todo organismo vivo —desde una diminuta bacteria hasta una civilización global— desafía temporalmente esta tendencia importando y metabolizando energía exterior. Esto significa que un organismo vivo es un sistema abierto capaz de mantener un flujo continuo de entrada y salida de energía y materia con el entorno. Mientras estén vivos, estos sistemas no pueden estar en un estado de equilibrio químico y termodinámico (Prigogine, 1947, 1961; Von Bertalanffy, 1968; Haynie, 2001). Su neguentropía —su crecimiento, renovación y evolución— genera como resultado una mayor heterogeneidad y una creciente complejidad estructural y sistémica. Igual que ocurre con muchos otros avances científicos, no obtuvimos una comprensión clara y coherente de este fenómeno hasta el siglo XIX, cuando la física, la química y la biología se preocuparon por estudiar las transformaciones de energía al mismo tiempo (Atwater y Langworthy, 1897; Cardwell, 1971; Lindsay, 1975; Müller, 2007; Oliveira, 2014; Varvoglis, 2014).

RECUADRO 1.2

Utilidad decreciente de la energía convertida

Cualquier forma de conversión de energía sirve para ilustrar este principio. Supongamos que un lector usa luz eléctrica para iluminar esta página. La energía electromagnética de la luz representa una pequeña parte de la energía química contenida en la masa de carbón utilizada para generarla (en 2015 se utilizaba carbón para producir el 33% de la electricidad generada en Estados Unidos). Al menos el 60% de la energía del carbón se transforma en calor en la propia planta de energía termoeléctrica donde es quemado. Si el lector utiliza una bombilla incandescente, más del 95% de la electricidad entregada se transforma en calor porque el metal del filamento de la bombilla ofrece resistencia a la corriente eléctrica. La luz que llega a la

página es absorbida o reflejada y absorbida por su entorno para finalmente irradiarse como calor. Al final del proceso, la energía química del carbón —que se hallaba en estado de baja entropía— se ha transformado en calor difuso, altamente entrópico y apenas perceptible, repartido entre la planta de energía termoeléctrica, los cables eléctricos, la bombilla, la página del libro y el entorno. No se ha perdido ninguna energía, pero una forma de energía muy útil ha sido degradada hasta el punto de no tener ninguna utilidad práctica.

En aquel momento surgió la necesidad de disponer de medidas estándar. Dos unidades de medición de *energía* se volvieron comunes: la caloría (una unidad métrica) y la unidad térmica británica (BTU, por sus siglas en inglés). Actualmente la unidad energética básica es el joule o julio. Debe su nombre al físico inglés James Prescott Joule (1818-1889), que publicó el primer cálculo preciso de equivalencia entre trabajo y calor (recuadro 1.3). La *potencia* es la tasa de un flujo de energía. Su primera unidad estándar, el caballo de fuerza, fue establecida por James Watt (1736-1819). Quería que el valor de sus máquinas de vapor resultara fácil de entender, por lo que eligió compararlas con el motor primario que tenían que reemplazar, esto es, un caballo de tiro que generalmente hacía funcionar un molino o una bomba de agua (figura 1.3, recuadro 1.3).

Otro concepto importante es el de *densidad de energía*, la cantidad de energía por unidad de masa de un recurso dado (recuadro 1.4). Esta medida es una característica fundamental de los alimentos: incluso cuando abundan, los alimentos con una baja densidad de energía no pueden convertirse en alimentos básicos. Los habitantes prehispánicos del golfo de México, por ejemplo, comían muchos higos chumbos porque crecían en todas las especies de cactus del género *Opuntia* y, por tanto, resultaban fáciles de recolectar (Sanders, Parsons y Santley, 1979). Sin embargo, como ocurre con muchas frutas, la pulpa del higo chumbo está compuesta sobre todo de agua (cerca del 88%), contiene menos del 10% de carbohidratos, un 2% de proteínas y un 0,5% de lípidos, y tiene una densidad de energía de solo 1,7 MJ/kg (Feugang *et al.*, 2006). Esto significa que incluso una

mujer pequeña que quisiera sobrevivir a base de carbohidratos de higo chumbo (suponiendo, de manera poco realista, que no necesitara obtener los otros dos macronutrientes) tendría que comer 5 kg de esta fruta todos los días, mientras que podría obtener la misma cantidad de energía con solo 650 g de maíz molido consumido en forma de tortillas o tamales.

RECUADRO 1.3

Medir energía y potencia

Oficialmente, un julio se define como la cantidad de trabajo realizado por una fuerza constante de 1 newton aplicada a lo largo de 1 m de longitud. Una unidad básica de energía también puede definirse como un requisito de calor. La definición oficial de una caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 cm³ de agua en 1 °C. Es una cantidad de energía pequeña. Hacer lo mismo con 1 kg de agua requiere mil veces más energía, es decir, una kilocaloría (el anexo «Medidas básicas» contiene una lista completa de prefijos multiplicadores). Dada la equivalencia entre calor y trabajo, todo lo que se requiere para convertir calorías en julios es recordar que una caloría equivale aproximadamente a 4,2 J. La conversión a BTU también es muy sencilla. 1 BTU contiene cerca de 1.000 J (exactamente 1.055). Un buen baremo comparativo es la ingesta diaria media de alimentos. Para un adulto moderadamente activo es de 2-2,7 Mcal o 8-11 MJ (y 1 kg de pan integral suministra 10 MJ).

En 1782, James Watt calculó que un caballo de molino trabajaba a una velocidad de 32.400 pie-libras/minuto —al año siguiente redondeó el cálculo a 33.000— (Dickinson, 1939). Supuso una velocidad promedio de unos 3 pies/segundo, pero no sabemos por qué fijó la capacidad media de tiro en cerca de 180 libras. Algunos animales especialmente fuertes podían alcanzar tal capacidad, pero en la Europa del siglo XVIII la mayoría de caballos no podían sostener un ritmo de trabajo de un caballo de fuerza. La unidad de potencia estándar actual, el vatio, es igual a un flujo de un julio por segundo. Un caballo de potencia equivale a cerca de 750 W (exactamente 745,699). El consumo diario de 8 MJ de alimento corresponde a una potencia de 90 W (8 MJ / 24 h × 33 3.600 s), menos que una bombilla estándar (100 W). Una tostadora doble necesita 1.000 W (1 kW); los coches pequeños entregan alrededor de 50 kW; una central grande de carbón o energía nuclear produce electricidad a un ritmo de 2 GW.

La *densidad de potencia* es la tasa a la que se produce o consume energía por unidad de área y, por consiguiente, es un determinante estructural crítico de cualquier sistema de energía (Smil, 2015b). El

tamaño de las ciudades en las sociedades tradicionales, por ejemplo, dependía de la leña, y el carbón vegetal estaba claramente limitado por la densidad de potencia inherentemente baja de la producción de fitomasa (recuadro 1.5, figura 1.4). La densidad de potencia del crecimiento anual sostenible de los árboles en climas templados es igual (como máximo) al 2% de la densidad de potencia del consumo de energía urbano tradicional de calefacción, cocina y manufactura. Por consiguiente, las ciudades tuvieron que utilizar áreas cercanas de al menos 50 veces su tamaño para el suministro de combustible. Esta situación limitó su crecimiento incluso cuando otros recursos, como la comida y el agua, eran suficientes.

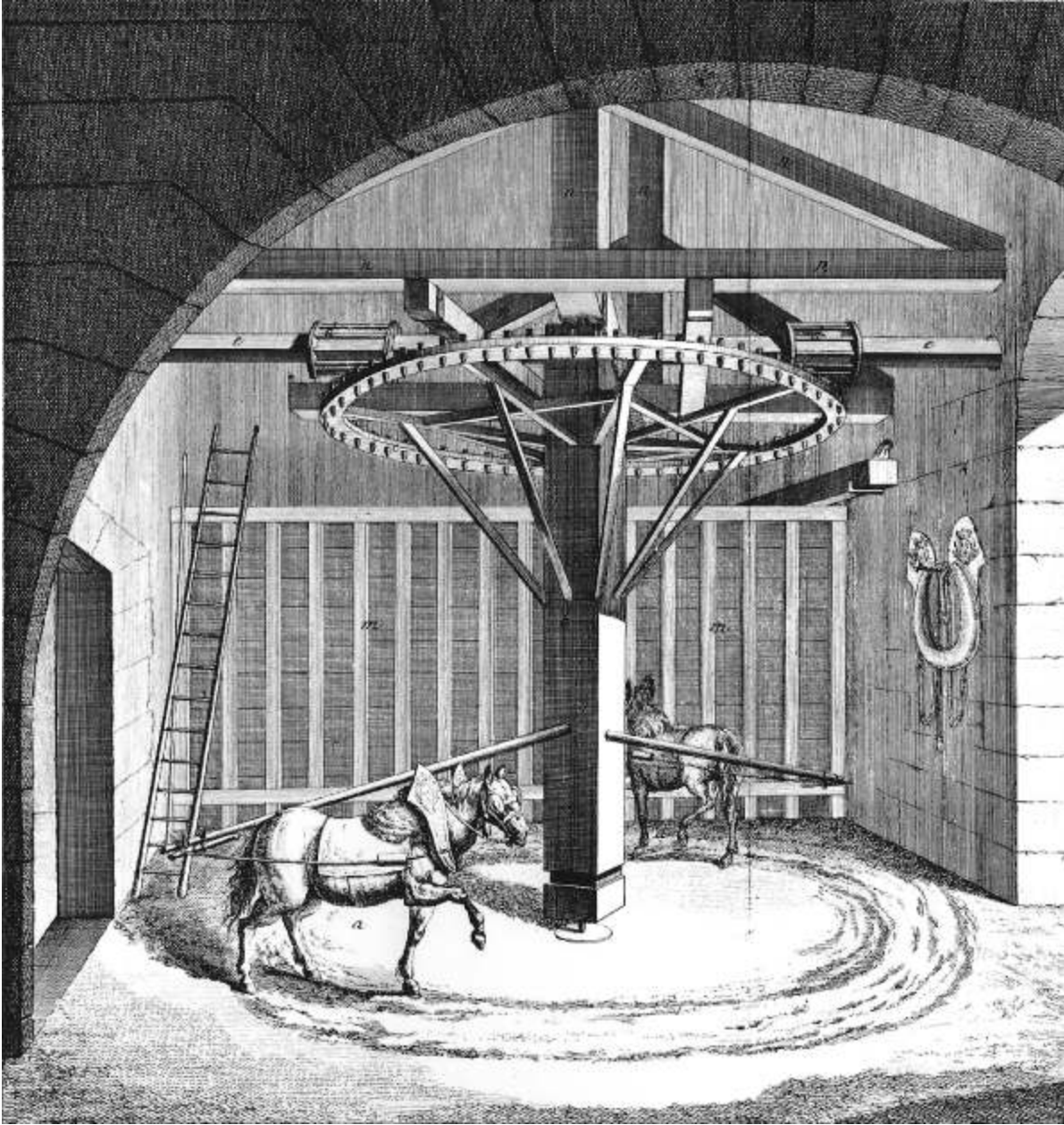


Figura 1.3 Dos caballos hacen girar el cabrestante de una bomba de agua de pozo en una fábrica francesa de alfombras de mediados del siglo XVIII (fuente: *Enciclopedia* [Diderot y D'Alembert 1769-1772]). Un caballo medio de la época no podía mantener una tasa de trabajo estable de un caballo de potencia. James Watt exageró la cantidad de caballos de potencia de sus máquinas de vapor para garantizar la satisfacción de los clientes que reemplazaban a los animales uncidos.

RECUADRO 1.4

Densidad de energía de alimentos y combustibles

Clasificación	Ejemplos	Densidad de energía (MJ/kg)
<i>Alimentos</i>		
Muy baja	Verduras, frutas	0,8-2,5
Baja	Tubérculos, leche	2,5-5,0
Media	Carne	5,0-12,0
Alta	Cereales y leguminosas	12,0-15,0
Muy alta	Aceites, grasas animales	25,0-35,0
<i>Combustibles</i>		
Muy baja	Turba, madera verde, hierba	5,0-10,0
Baja	Residuos de cultivo, madera secada al aire libre	12,0-15,0
Media	Madera seca	17,0-21,0
	Carbón bituminoso	18,0-25,0
Alta	Carbón vegetal, antracita	28,0-32,0
Muy alta	Petróleo crudo	40,0-44,0

Fuentes: Watt (1973), Jenkins (1993) y USDA (2011).

Una tasa que ha adquirido mayor importancia con el avance de la industrialización es la *eficiencia de las conversiones de energía*. Se trata de una relación de salida/entrada (*output/input*) que describe el rendimiento de los convertidores de energía (estufas, motores y luces). Aunque no podemos evitar la disipación entrópica, podemos reducir la cantidad de energía necesaria para realizar ciertas tareas y de este modo mejorar la eficiencia de las conversiones (recuadro 1.6). A pesar de que estas mejoras siempre estarán limitadas por factores mecánicos y termodinámicos fundamentales, en los últimos años hemos llevado algunos procesos muy cerca de los límites prácticos de eficiencia, aunque en muchos otros casos —incluidos convertidores de energía

tan comunes como el motor de combustión interna o la luz— queda mucho por hacer.

RECUADRO 1.5

Densidad de potencia de los combustibles de fitomasa

La fotosíntesis transforma menos del 0,5% de la radiación solar en nueva fitomasa. Las productividades anuales más altas de leña de especies tradicionales de crecimiento rápido (álamo, eucalipto, pino) nunca han superado las 10 t/ha y en regiones más secas siempre se han situado entre 5 y 10 t/ha (Smil, 2015b). La densidad de energía media de la madera seca es de 18 GJ/t, de forma que una cosecha de 10 t/ha equivaldría a una densidad de potencia de 0,6 W/m²: $(10 \text{ t/ha} \times 18 \text{ GJ}) / 3,15 \times 10^7$ (segundos en un año) = $\sim 5.708 \text{ W}$; $5.708 \text{ W} / 10.000 \text{ m}^2$ (ha) = $\sim 0,6 \text{ W/m}^2$. Una ciudad grande del siglo XVIII requería al menos 20-30 W/m² de área construida para calefacción, cocina y manufactura artesanal, y su leña tenía que provenir de un área 30-50 veces mayor que su superficie.

Las ciudades requerían mucho carbón vegetal —era el único combustible preindustrial no fumígeno y, por tanto, era muy codiciado para la calefacción de interiores en todas las sociedades tradicionales—, que implicaba una pérdida sustancial de energía adicional. A mediados del siglo XVIII la proporción típica entre carbón vegetal y madera era de 1:5, de tal manera que la eficiencia de esta conversión (con madera seca a 18 GJ/t y carbón [carbono prácticamente puro] a 29 GJ/t) era del 30% ($5 \times 18 / 29 = 0,32$), mientras que la densidad de potencia de las cosechas de madera destinadas a la producción de carbón vegetal era de solo 0,2 W/m². Esto significa que las grandes ciudades preindustriales ubicadas en un clima templado septentrional y muy dependientes del carbón vegetal (como Xi'an o Pekín, en China) habrían requerido un área boscosa al menos 100 veces mayor que su tamaño para garantizar un suministro continuo de combustible.



Figura 1.4 Proceso de carboneo en la Inglaterra de principios del siglo XVII representado en *Silva*, de John Evelyn (1607).

RECUADRO 1.6

Mejoras de eficiencia y paradoja de Jevons

El progreso técnico ha traído consigo numerosas e impresionantes mejoras de eficiencia y la historia de la iluminación es un magnífico ejemplo de ello (Nordhaus, 1998; Fouquet y Pearson, 2006). Las velas solo convierten el 0,01% de la energía química del sebo o la cera en luz. En la década de 1880, las bombillas de Edison eran diez veces más eficientes. En 1900, las centrales eléctricas de carbón tenían una eficiencia del 10% y las bombillas convertían no más del 1% de la electricidad en luz y, por tanto, el 0,1% de la energía química del carbón se transformaba en luz (Smil, 2005). Las mejores centrales de ciclo combinado actuales —que usan gas caliente proveniente de una turbina de gas para producir vapor que alimenta una turbina de vapor— tienen una eficiencia cercana al 60%, mientras que las luces fluorescentes y los diodos emisores de luz —más conocidos como LED, por sus siglas en inglés— tienen eficiencias de hasta el 15% (USDOE, 2013). Esto significa que cerca del 9% de la energía del gas natural se convierte en luz, lo cual supone una mejora de eficiencia del 9.000% desde la década de 1880. Este tipo de mejora ahorra capital y gastos de funcionamiento y reduce el impacto ambiental del sistema.

Sin embargo, la mejora de la eficiencia de conversión no necesariamente desemboca en un ahorro real de energía. En 1865, el economista inglés Stanley Jevons (1835-1882)

señaló que la adopción de máquinas de vapor más eficientes había generado un gran incremento en el consumo de carbón y concluyó: «Sería una equivocación suponer que el uso más eficiente de un combustible suscita una reducción del consumo. En realidad, ocurre lo contrario. Los nuevos modelos económicos suelen generar un aumento del consumo. Tenemos muchos ejemplos de ello» (Jevons, 1865: 140). Este principio ha sido confirmado por muchos estudios posteriores (Herring, 2004, 2006; Polimeni *et al.*, 2008), aunque en los países ricos —cuyo consumo de energía per cápita está cerca del nivel de saturación— el efecto ha ido debilitándose.

Cuando se calcula la eficiencia de la producción de alimentos (energía de los alimentos/energía de los recursos para conseguirlos), combustibles o electricidad suele emplearse la expresión *retorno de energía*. El retorno de la agricultura tradicional —que utilizaba solo mano de obra humana o animal— tenía que ser claramente superior a uno: la cosecha (comestible) tenía que contener más energía que el alimento y pienso consumidos por las personas y los animales que producían los cultivos (y todos los que dependían de ellos).

Comparar el retorno de energía de la agricultura tradicional y moderna es un ejercicio complicado. La agricultura tradicional únicamente utilizaba energía humana y animal (e implicaba tan solo radiación solar transformada recientemente), mientras que la agricultura moderna está «dopada» por combustibles, fertilizantes, pesticidas y maquinaria agrícola. Por eso su retorno energético siempre será inferior al de un cultivo tradicional (recuadro 1.7).

Finalmente, la *intensidad energética* mide el coste de un producto, un servicio o una economía entera en unidades de energía estándar. Entre los materiales de uso común, el aluminio y los plásticos son muy intensivos en energía, el vidrio y el papel lo son relativamente poco y, si excluimos su coste fotosintético, la madera es el material menos intensivo en energía (recuadro 1.8). El progreso técnico de los últimos dos siglos ha mejorado mucho la intensidad energética de muchos procesos. El caso más destacado es el de la fundición de arrabio a base de coque en grandes altos hornos, que hoy requiere menos del 10% de

energía por unidad de masa de metal caliente que la producción preindustrial de arrabio a base de carbón (Smil, 2016).

RECUADRO 1.7

Comparación de retornos de energía en la producción de alimentos

Desde la década de 1970 se utiliza el argumento del retorno de energía para defender que la agricultura tradicional es mejor que la moderna. Pero se trata de una comparación engañosa —o que, como mínimo, silencia una diferencia fundamental entre sendos retornos—. El retorno de la agricultura tradicional es un simple cociente entre la energía de los alimentos cosechados y la energía necesaria para producir la cosecha (esencialmente trabajo humano y animal). En la agricultura moderna, el denominador de la ecuación se compone sobre todo de combustibles fósiles no renovables utilizados para fabricar máquinas y productos químicos agrícolas e impulsar la maquinaria, mientras que el componente trabajo es prácticamente insignificante.

Si medimos el cociente entre energía comestible producida y trabajo, la agricultura moderna es muy superior a cualquier práctica tradicional porque no utiliza animales y emplea muy poca mano de obra humana. Si incluimos los combustibles fósiles y la electricidad en el coste de producción del cultivo moderno, entonces su retorno es muy inferior al de los sistemas tradicionales.

Este cálculo es posible porque existe una equivalencia física entre energías: tanto los alimentos como los combustibles pueden expresarse en unidades idénticas. Sin embargo, persiste un problema obvio de inconmensurabilidad o «peras y olmos»: no existe una forma del todo satisfactoria de comparar el retorno de sistemas que dependen de tipos de energía tan diferentes.

RECUADRO 1.8

Intensidad energética de materiales comunes

Material	Coste energético (MJ/kg)	Proceso
Aluminio	175-200	Metal de bauxita
Ladrillo	1-2	Cocido a partir de arcilla
Cemento	2-5	A partir de materias primas
Cobre	90-100	A partir del mineral

Explosivos	10-70	A partir de materias primas
Vidrio	4-10	A partir de materias primas
Gravilla	<1	Excavado
Hierro	12-20	A partir de mineral de hierro
Madera	1-3	A partir de árboles
Papel	23-35	A partir de árboles
Plásticos	60-120	A partir de hidrocarburos
Contrachapado	3-7	A partir de árboles
Arena	<1	Excavado
Acero	20-25	A partir de arrabio
Acero	10-12	A partir de chatarra
Piedra	<1	Cantera

Fuente: Smil, 2014b.

El coste energético de la energía (a menudo llamado EROI por sus siglas en inglés [*Energy Return On Investment*], aunque realmente convendría llamarlo EROEI [*Energy Return on Energy Investment*]), solo es una medida reveladora si se comparan valores calculados con métodos idénticos que utilizan hipótesis estándar y límites analíticos claros. Las sociedades modernas han favorecido el desarrollo de combustibles fósiles, cuyo retorno energético neto es el más elevado de todos. Este es uno de los motivos por los que hemos favorecido el crudo en general y los campos petrolíferos de Oriente Medio en particular; otras ventajas obvias son la alta densidad energética del petróleo y, por consiguiente, su fácil transportabilidad (recuadro 1.9).

RECUADRO 1.9
Retorno energético de la inversión energética (EROEI)