



La demanda de energía

por Wolf Häfele

Introducción

Desde la reciente crisis de energía, se han propuesto diversos planes energéticos: casi todos ellos preconizan alguna forma de adaptación de la demanda de energía o de medidas de conservación de los recursos, con la esperanza de evitar así los temidos problemas de abastecimiento de energía. Sin embargo, no parece existir una explicación clara de la forma en que podríamos mitigar nuestros futuros y previsibles problemas energéticos. En realidad, una primera tentativa de definir con exactitud la demanda de energía y sus interacciones con otros objetivos, por ejemplo los económicos, muestra que se trata de un concepto sumamente complejo, que todavía entendemos mal. Convendría pues explicar en detalle por qué es tan difícil interpretar debidamente la demanda de energía.

Esquemas de flujo de la energía

La Figura 1 muestra el flujo de la energía dentro del sistema económico de la República Federal de Alemania en 1975, en millones de toneladas de carbon equivalente o en Gigavatios/año. La parte más importante de la energía primaria se somete a procesos de conversión para obtener formas energéticas más prácticas y fáciles de manejar, llamadas energía secundaria. La electricidad y la gasolina — los ejemplos más destacados —, se transportan hasta el consumidor. El mayor sector de consumo lo constituyen los usos domésticos y las actividades comerciales, que absorben el 45% de toda la energía secundaria; después vienen la industria, con el 36% y el transporte, con el 14%. El uso de energía secundaria implica igualmente pérdidas de conversión, que se elevan hasta el 56%.

Aparte de los cauces principales de flujo de la energía indicados en la Figura 1, existen otros cauces y ramificaciones menores que no cabe desconocer simplemente en un examen de la demanda de energía y de su evolución futura. La calefacción municipal, por ejemplo, se piensa que representará un importante papel en el porvenir, posiblemente como resultado de la producción combinada de electricidad y calor. La parte de energía secundaria que corresponde actualmente a este uso es de solo 4 millones de toneladas equivalentes de carbón, aunque puede aumentar significativamente en el futuro. La complejidad del problema se hace evidente al considerar todos los cauces y conexiones del esquema de la Figura 1, y resulta necesario utilizar categorías y términos bien definidos. En la Figura 2 hemos tratado de hacerlo así. Tenemos en primer lugar la energía primaria. Puede consistir en carbón, petróleo crudo, uranio y otros recursos. La conversión en otra forma de energía da origen a lo que llamamos energía secundaria y a las correspondientes pérdidas. Tras la conversión y el transporte, se obtiene la energía útil suministrada a los consumidores locales. Energía útil es la destinada a asegurar un servicio que puede consistir, por ejemplo, en la calefacción de un cuarto, en luz para la lectura o en el funcionamiento de un automóvil.

Como veremos después, estos servicios no se sitúan en el mismo nivel conceptual que la energía, por lo que en nuestra figura están inscritos en un círculo, y no en un rectángulo.

Eficiencia de la conversión

¿Cómo se puede economizar energía? Se ve en la Figura 1 que, de una manera u otra, se pierde aproximadamente el 75% de la energía primaria. ¿Es esto inevitable? Consideremos las diferentes etapas del flujo de la energía y examinemos la cuestión. Para la conversión de energía primaria en energía secundaria (Figura 3), el proceso más conocido es la generación de electricidad en centrales eléctricas. En realidad, la energía térmica se convierte primero en energía mecánica y después en energía eléctrica. La energía térmica en este caso es la suma de todas las energías cinéticas de las moléculas de un gas o de un líquido, cuyas direcciones de movimiento tienen una distribución aleatoria. Pero, a causa de la inflexibilidad de las leyes de la física, existe un límite superior para la conversión de energía térmica en formas no aleatorias. Ese límite es bien conocido bajo la denominación de "rendimiento de Carnot", que es siempre inferior a la unidad. Cuando la temperatura de salida del líquido o del gas de trabajo es de 500°C , el rendimiento de Carnot se aproxima al 63%; sin embargo, las centrales eléctricas nunca alcanzan tales rendimientos a causa de las pérdidas técnicas que se producen. Estas se pueden reducir, pero es imposible anularlas. Para mejorar el rendimiento se requiere experiencia técnica y capital. La Figura 4 muestra la evolución a largo plazo de las ganancias en rendimiento en el caso de las centrales eléctricas.

Abriendo ahora un breve paréntesis, parémonos un momento a examinar algo más a fondo esta evolución. En la Figura 4 se ha trazado la curva logística como si fuera una recta. En un gráfico normal, la curva logística tiene forma de S, con lo que describe el crecimiento diferencial en un medio ambiente limitado (véase la Figura 5). La curva en S implica una transición de un límite bajo a un límite elevado y está regida por una constante de tiempo. Como veremos, un número sorprendentemente grande de procesos presenta este comportamiento, de manera que es interesante comparar los intervalos de tiempo para pasar de un punto a otro de la curva.

La Figura 4 muestra que el rendimiento de las centrales eléctricas ha seguido siempre una tendencia ascendente. Si se considera un período de tiempo suficientemente largo, es de esperar que, en general, la tendencia ascendente continúe. Esta ganancia en rendimiento ahorra energía, porque significa un consumo menor de energía primaria para obtener una cantidad igual de energía secundaria. Pero también existen tendencias opuestas. Antes, cuando se utilizaba directamente la leña y el carbón, no había pérdidas de conversión. Pero sí había grandes pérdidas en el aprovechamiento de la energía útil. La conversión se hizo necesaria solo cuando la economía moderna exigió formas de energía más fáciles de manejar.

En el futuro, con formas de energía primaria que no se podrán emplear directamente, esa conversión será cada vez más indispensable, aunque la facilidad de manejo sea una cuestión sin importancia. La Figura 6 ilustra este concepto. La energía nuclear y la solar son casos típicos a este respecto. Su futuro empleo (después del año 2000) en gran escala hará aumentar considerablemente las pérdidas de conversión, en tanto que hoy día disfrutamos aún de una situación favorable, pues el gas natural no tiene pérdidas de conversión y las del petróleo son pequeñas. Debe tenerse presente que el futuro consumo de carbón en gran escala conducirá también a grandes pérdidas de conversión, ya que el mercado tiende a rechazar los combustibles sólidos y será necesaria la conversión del carbón en líquido o gas, como muestra la Figura 7. En el año 1950, todavía un 80% de la energía secundaria se presentaba en forma de combustibles sólidos, pero después fue aumentando la demanda de combustibles líquidos, que llegó al máximo a principios de los años 70. También ha crecido rápidamente el consumo de gas, lo mismo que el de electricidad. De toda la energía secundaria, la proporción que corresponde actualmente a la electricidad se sitúa entre el 10 y el 12%, y muchas previsiones realizadas para el año 2000 pronostican una proporción del 20 al 25%.

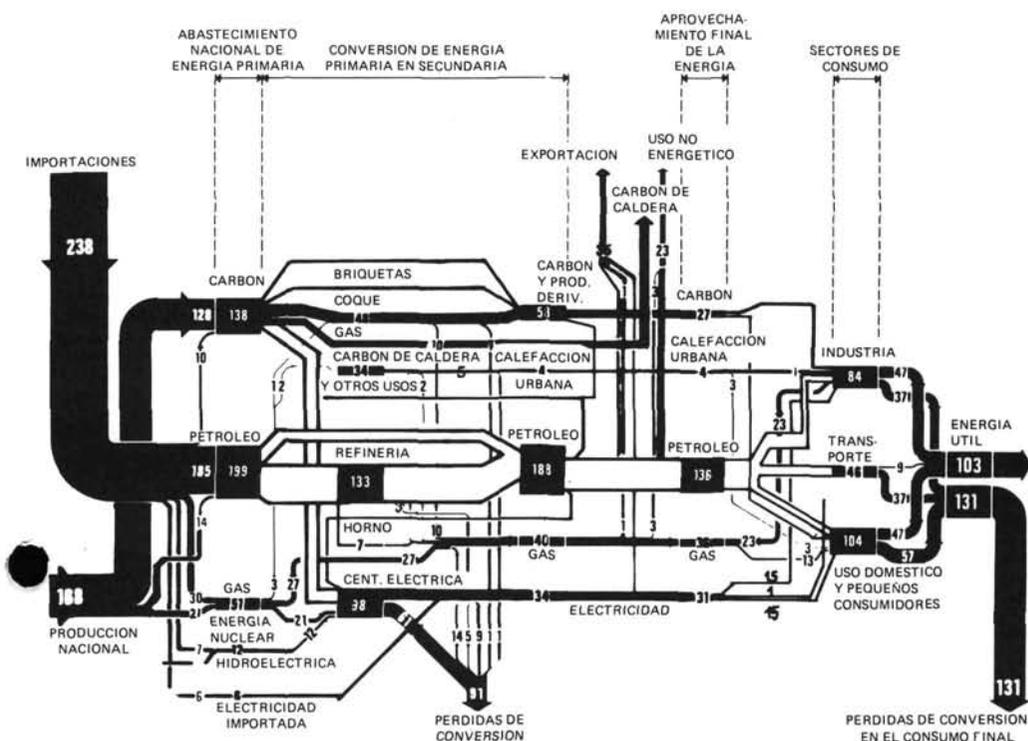


Figura 1. Flujo de la energía por el sistema económico de la República Federal de Alemania en 1975 (en millones de toneladas de carbón equivalente o Gigavatios/año). Dividiendo las respectivas cantidades por 33,5 se obtienen "quads" ($Q = 10^{15}$ Btu). La energía primaria disponible fue de 406 millones de toneladas de carbón equivalente o Gigavatios/año, o sea 12 Q, suma de 238 (importaciones) y 168 (producción nacional). Las importaciones se elevaron al 59%, consistiendo sobre todo en crudos de petróleo (45%) y cierta cantidad de gas natural (7,3%). La producción nacional de carbón representó el 31,5%. La contribución de todas las demás fuentes no alcanzó gran importancia en 1975. Con mucho, la mayor parte de la energía primaria se convirtió en formas de energía más fáciles y convenientes de manejar, llamadas de energía secundaria. Los ejemplos más conocidos son la electricidad y la gasolina, que se transportan del centro de producción al consumidor. Las pérdidas de conversión y de transporte se elevaron a 91 millones de toneladas de carbón lo que representa el 22% del consumo primario. El mayor sector de consumo correspondió a las actividades comerciales y la utilización doméstica, que absorbieron el 45% de la energía secundaria; seguía en importancia el consumo industrial con el 33% y el del transporte con el 14%. La utilización de la energía secundaria produjo también pérdidas de conversión, que llegaron al 56%. En consecuencia, de 406 millones de toneladas de carbón equivalente solo se utilizaron productivamente 103, o sea aproximadamente el 25%, que fueron transformadas en movimiento mecánico o en iluminación, o dedicadas a otros usos.

En este punto hay que hacer una observación bastante importante acerca de la energía nuclear. Hasta ahora la energía nuclear se ha desarrollado y utilizado casi exclusivamente para la producción de electricidad. Esto era lógico porque la energía nuclear tenía que convertirse necesariamente en energía secundaria, y la electricidad representaba ya una forma de conversión de energía en gran escala mucho antes de que tomase auge la energía nuclear. Pero el problema apremiante, a medio y largo plazo, no es producir más electricidad sino encontrar sustitutos baratos del petróleo y el gas naturales, materias que satisfacen por lo menos el 75% del mercado actual de energía secundaria.

Si la energía de origen nuclear ha de satisfacer más del 25% de la demanda de energía secundaria, tendrá que utilizarse para producir un combustible líquido o gaseoso, dificultad

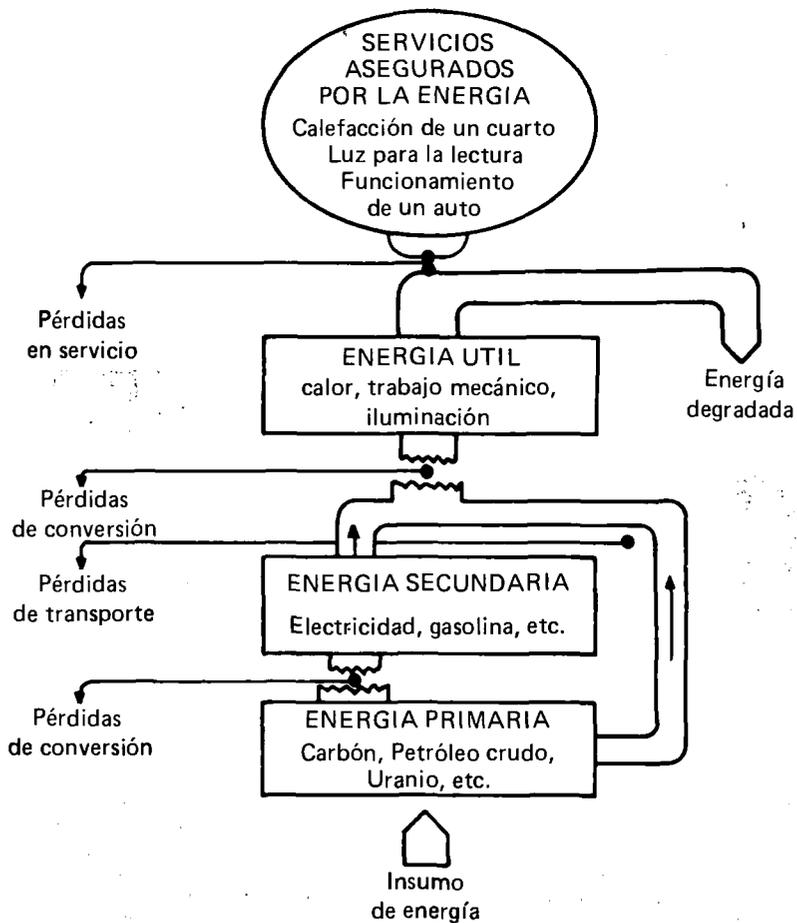
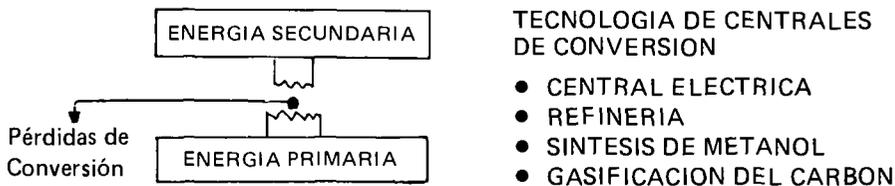


Figura 2. Esquema simplificado del flujo de la energía y de los servicios por ella prestados.



Las leyes de la termodinámica (Carnot) imponen límites principales a la eficiencia de conversión

Figura 3. La conversión de energía primaria en energía secundaria produce inevitablemente pérdidas.

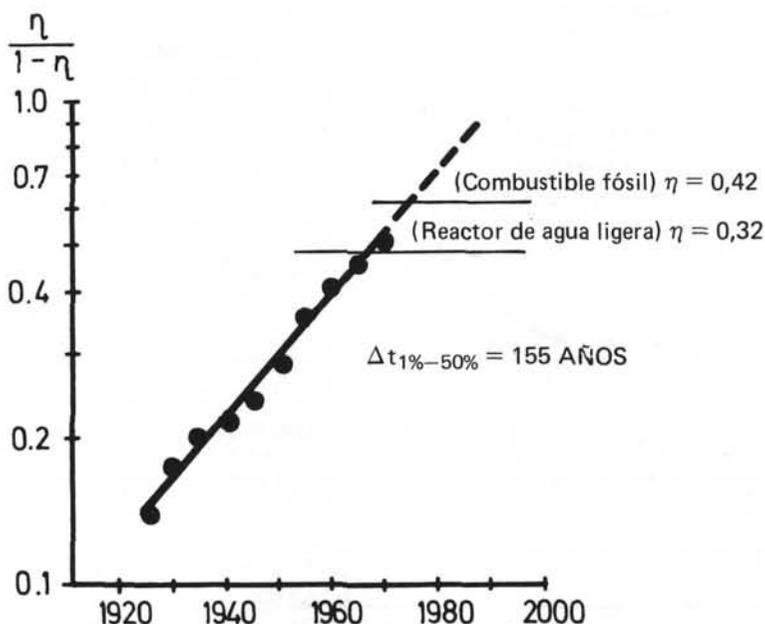


Figura 4. Tendencia a largo plazo de la ganancia de eficiencia en las centrales termoeléctricas (Fuente de información: véase la referencia 9).

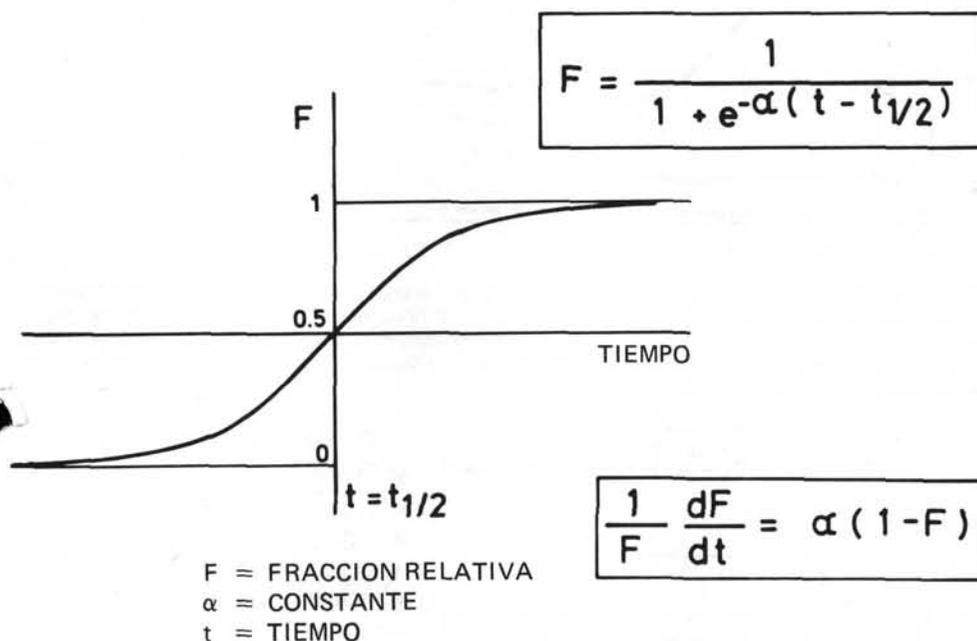


Figura 5. La curva logística en forma de S describe la diferencia de crecimiento en un ambiente limitado. La forma de S implica una transición entre un límite inferior (F=0) a un límite superior (F=1) y obedece a una constante de tiempo. Un gran número de procesos sigue esta pauta, y con frecuencia es útil comparar los intervalos de tiempo requeridos para elevar, por ejemplo, la variable F del valor 0,01 a 0,5, que es el punto central de la curva.

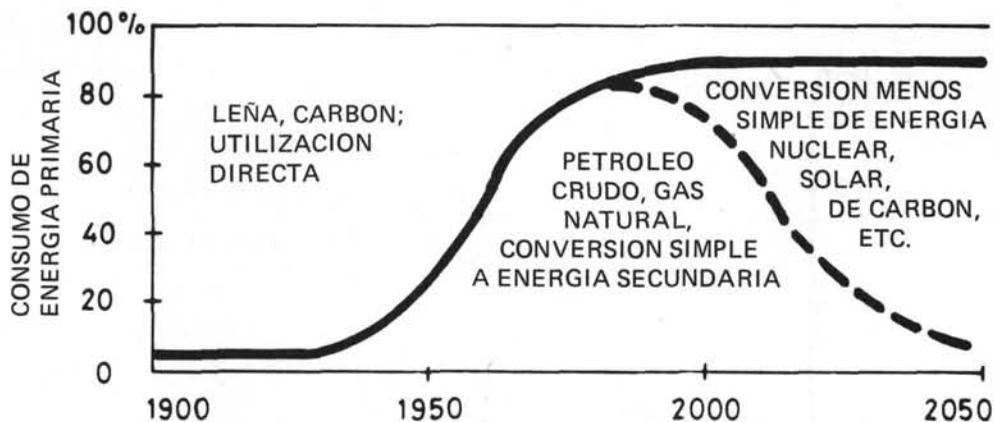


Figura 6. La proyección del consumo de energía en la República Federal de Alemania muestra una creciente divergencia entre la energía primaria y la energía secundaria. La futura utilización en gran escala después del año 2000 de la energía nuclear y de la energía solar habrá de aumentar notablemente las pérdidas de conversión.

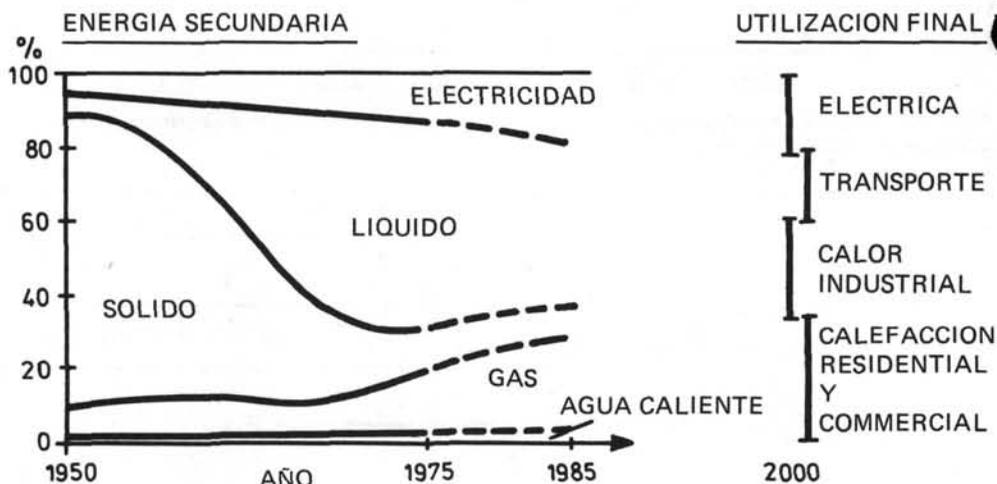
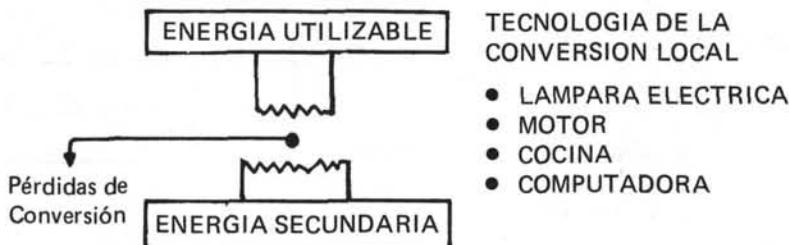


Figura 7. Distribución y utilización final de la energía secundaria en la República Federal de Alemania. Como la tendencia es contraria al uso de los combustibles sólidos, será necesaria la conversión de carbón en combustible líquido o gaseoso. En 1950, alrededor del 80% de la energía secundaria se presentaba en forma sólida. Y en 1975 predominaban los combustibles líquidos. En años recientes, ha aumentado el empleo del gas y la electricidad.



Las leyes de la termodinámica pueden o no imponer límites principales a la eficiencia de conversión

Figura 8. La conversión de energía secundaria en energía utilizable va acompañada de pérdidas.

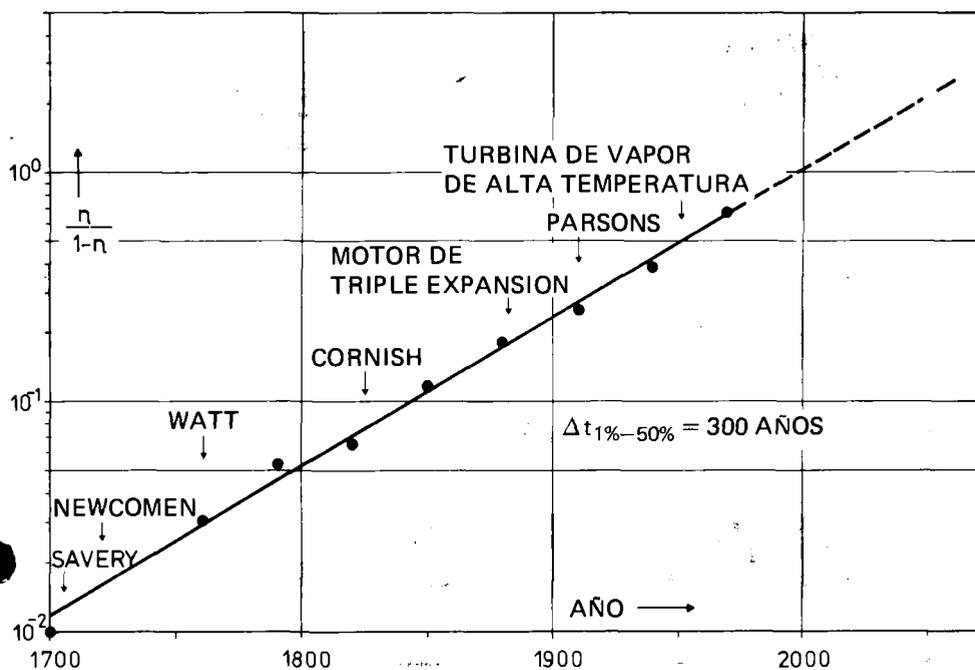


Figura 9. La eficiencia de los motores primarios muestra una tendencia ascendente constante.

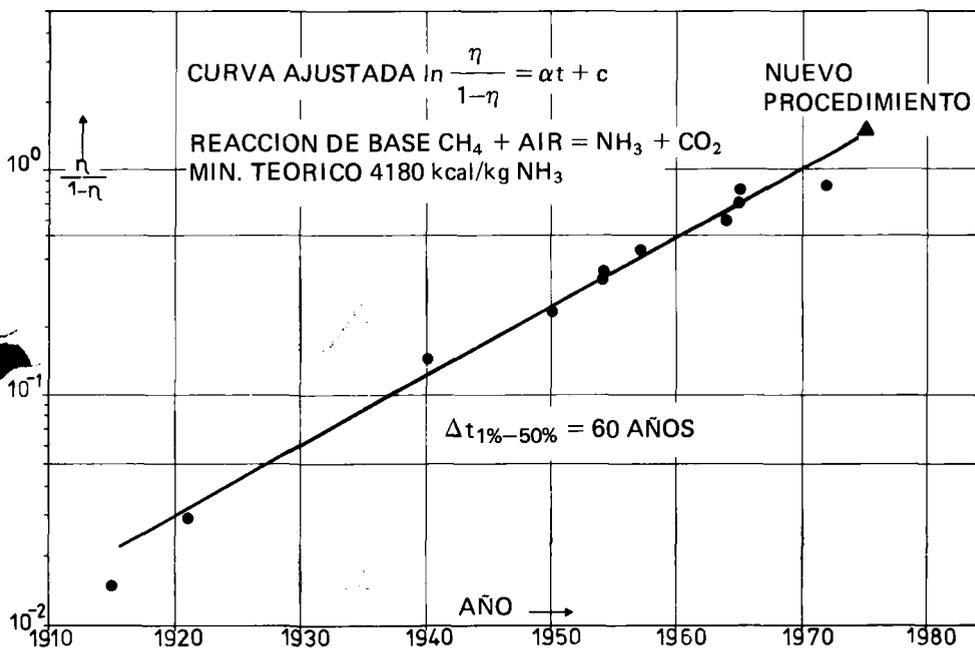


Figura 10. La eficiencia de la producción de amoníaco ha aumentado también constantemente (Fuente: referencia 13).

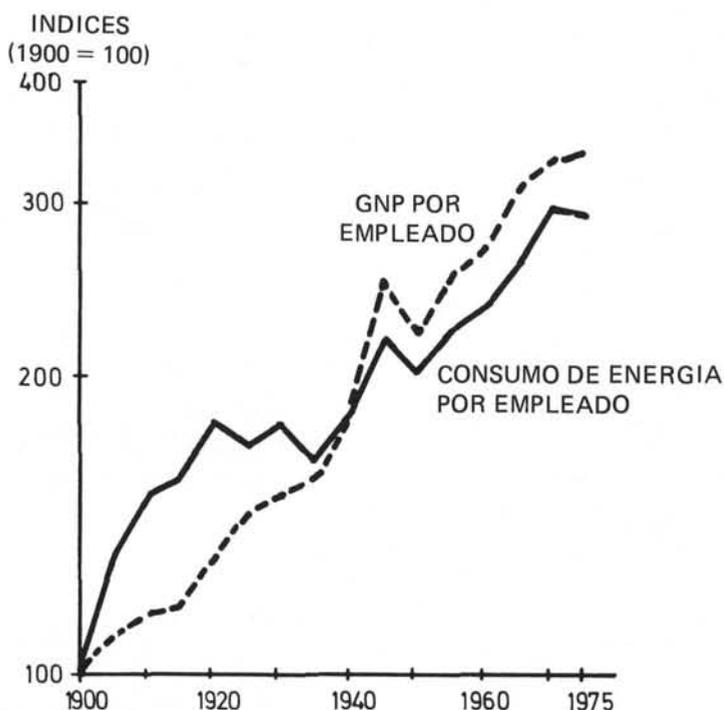


Figura 11. El producto nacional bruto (PNB) por empleado y consumo de energía por empleado en los Estados Unidos de América (Fuente: Referencia 12).

UNIDADES
RELATIVAS

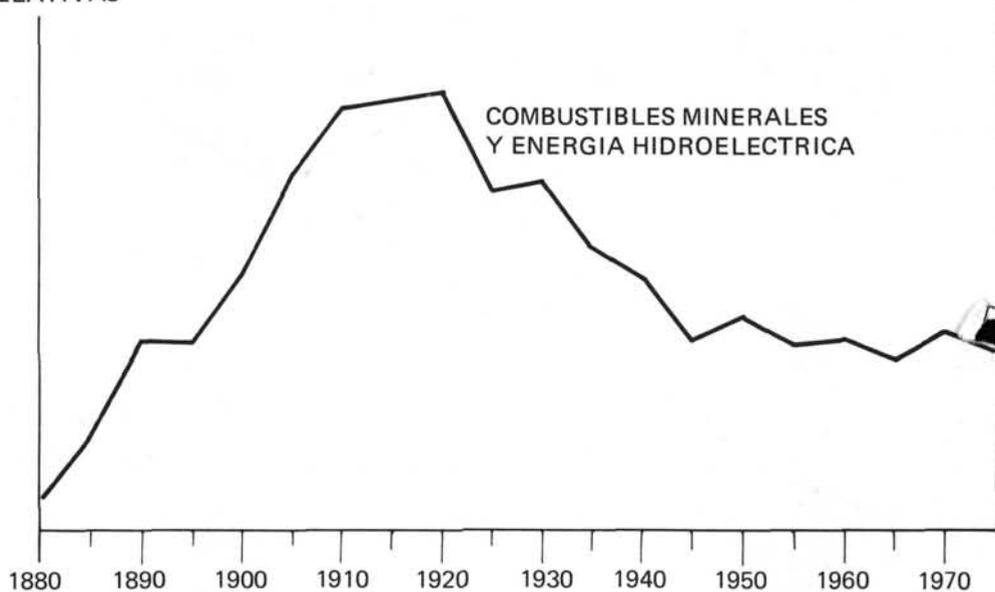


Figura 12. El consumo de energía por unidad del PNB en los Estados Unidos aumentó hasta 1920 y ha ido descendiendo desde esa fecha. (1880-1950 Fuente: S.H. Schurr and B.C. Netschert, *Energy in the American Economy*, 1960; 1955-1975 Fuente: J. Alterman, Bureau of Economic Analysis, to be published).

que la industria nuclear habrá de encarar y superar. Ello parece factible para un precio del barril de petróleo equivalente superior a 20 o 25 dólares. El aliado natural de la energía nucleoelectrónica es el carbón, lo cual también es lógico.

En el caso de la energía nucleoelectrónica, las pérdidas de conversión no plantearán ningún problema a largo plazo. Cuando entren en servicio los reactores reproductores, el abastecimiento de uranio dejará de presentar dificultades. En tal caso, carece de importancia el que las pérdidas de conversión hagan aumentar el consumo de energía primaria para satisfacer una determinada demanda de energía secundaria. En cambio, pasa a primer lugar el problema de las inversiones.

Volvamos ahora a nuestro razonamiento. La conversión de energía secundaria en energía útil va igualmente acompañada de pérdidas (véase la Figura 8). También cabe incluir aquí las pérdidas de transporte. En algunas aplicaciones, el rendimiento de Carnot supone la limitación principal, en otras no, pero en todas ellas hay posibilidades de mejorar el rendimiento. Por ejemplo, en el caso de los motores primarios se ha registrado una constante tendencia ascendente (véase la Figura 9), y lo mismo ocurre en la producción de amoníaco (véase la Figura 10). Es notable el grado en que las transiciones a rendimientos superiores se adaptan a la curva logística, así como la larga duración de los intervalos de tiempo correspondientes.

A la inversa de lo que ocurre en la conversión de energía primaria en energía secundaria, que por lo general se hace en grandes y eficientes centrales eléctricas, la conversión de la energía secundaria en energía útil es de carácter descentralizado y se hace en millones de automóviles, cocinas, lámparas eléctricas y otros dispositivos de utilización final. Este uso descentralizado y local de energía tiende frecuentemente a ser poco eficiente; citeamos como ejemplo las cocinas de viejo modelo en apartamentos antiguos o los hogares todavía corrientes en muchas aldeas. Estos millones de dispositivos de utilización final forman parte de la infraestructura económica y cultural, y modificarlos para obtener una conservación de la energía o, mejor aún, para un aprovechamiento racional de la misma, es difícil y exige tiempo.

Energía y economía

En el punto de utilización final, la energía se comporta como un insumo de la economía, y cuando se trata de millones de dispositivos de utilización final, se expresa mejor en términos económicos. Frecuentemente estos datos se utilizan de manera muy totalizada, es decir en forma de evaluaciones macroeconómicas. Es bien conocida la relación entre el producto nacional bruto (PNB) y el consumo de energía; la Figura 11 presenta los índices del PNB producido por empleado y el consumo teórico de energía por empleado en los Estados Unidos durante los últimos 75 años.

Simponen dos observaciones:

1. Resulta evidente que las dos curvas son bastante paralelas y que el aumento de PNB por empleado requiere aproximadamente el mismo aumento relativo de energía por empleado.
2. Un examen más a fondo de las curvas revela que el aumento relativo de energía por empleado es ligeramente inferior al PNB por empleado; esto indica que se utiliza mejor la energía o que se la reemplaza con otra cosa.

Podría ciertamente esto interpretarse como indicación de una economía potencial de energía. La Figura 12 muestra la relación entre el consumo de energía en los Estados Unidos (combustibles minerales y corriente hidroeléctrica) y el PNB. Cuando se sintieron los efectos de la primera revolución industrial en los Estados Unidos, esa relación aumentó. Después alcanzó un valor máximo, y desde entonces se encuentra en descenso porque se han incorporado de manera creciente al PNB, productos más complejos tales como la electrónica y los servicios en general (el tercer sector de la economía), así como la maquinaria pesada.

Una importante característica de la economía es el valor de su capital, es decir la suma de bienes invertidos necesarios para la producción del PNB. La mano de obra y la energía son los agentes efectivos de este capital para la producción del PNB. En consecuencia, es interesante considerar el consumo energético en función del capital, tal como se indica en la Figura 13. La relación se aproxima a un vatio por dólar. En los países de economía de planificación central, la relación es superior a la media mundial, lo cual se debe probablemente a la importancia que se acuerda al sector de la maquinaria pesada en esos países.

Además, es notable que esta relación sea bastante parecida entre los países industrializados (0,71) y los países en desarrollo (0,77), en tanto que las respectivas cifras relativas al capital per cápita son muy diferentes. Esto indicaría que la clase de economía que produce el PNB es similar en ambos tipos de países, en tanto que la participación relativa de la población en la economía presenta una gran diferencia. El punto que se desea señalar es la urbanización. La evolución de los países en desarrollo parece pasar por la etapa de urbanización, lo cual conduce a los mismos esquemas de consumo de energía primaria, secundaria y utilizable que los de los países industrializados.

La Figura 14, que compara el consumo de energía y densidad de población urbana de la República Federal de Alemania y de la India, parece apoyar esta tesis. La densidad de consumo de energía media presenta una gran diferencia (aproximadamente por un factor de 12), en tanto que la densidad del consumo de energía en zonas urbanas se diferencia por un factor de solo 1,5. Si bien la infraestructura técnica urbana de los dos países es similar, la densidad de población de algunas ciudades de la India es del orden de 6 000 personas por km², en la República Federal de Alemania es de solo 1 500. En otros términos, las características de la infraestructura parecen obedecer acusadamente a la cantidad de servicios prestados y su amplia variación solo es función del número de usuarios. El consumo de energía relativamente alto por metro cuadrado de las ciudades de la India se debe en gran parte a la elevada densidad de población urbana.

La diferencia de los valores medios de la República Federal de Alemania y de la India se deriva, pues, de las zonas rurales. En las zonas rurales de la República Federal de Alemania se consume aproximadamente veinte veces más energía por metro cuadrado que en la India, mientras que la densidad de población de los dos países es muy parecida. Es importante no pasar por alto la relación de la infraestructura energética con la infraestructura económica general. Se ha recomendado con frecuencia a los países en desarrollo que procuren diversificar las fuentes energéticas necesarias para su evolución. Así, se ha mencionado la aplicación de tecnologías sencillas, tales como el aprovechamiento de la fuerza del viento y el empleo local de la energía solar, especialmente de manera descentralizada, es decir, en las zonas rurales. Cabe observar sin embargo que no es en estas zonas donde se plantea el problema.

La relación de la infraestructura energética con la infraestructura económica en general — esto es: el complejo esquema de la utilización de la energía — requiere un detenido análisis cuantitativo. Un enfoque inicial consiste en estudiar la interdependencia entre el consumo energético y los costes de la energía, mediante la aplicación de métodos econométricos establecidos y utilizados en los Estados Unidos. En este dominio se destacan los nombres Jorgenson, Houthakker, Nordhaus y Manne. Sus datos iniciales fundamentales son las diversas elasticidades, entendiéndose por ese término el cambio de porcentaje de consumo de energía por cambio de porcentaje de otra variable, por ejemplo, el PNB. Se establecen las elasticidades de numerosos datos estadísticos relativos a una serie de años, lo que significa una referencia implícita a una infraestructura económico-energética existente. Dentro de ese marco se considera entonces posible estudiar el consumo energético probable durante un período medio de 10 años, por ejemplo. La Figura 15 reproduce las características de este enfoque econométrico. Por ejemplo, se interpretan las funciones de la demanda mediante elasticidades que relacionan el consumo energético neto per cápita, el precio neto relativo de la energía y el PIB real per cápita.

	RELACION DE PRODUCCION ENERGIA-CAPITAL W/US \$ (1973)	CAPITAL SOCIAL PER CAPITA US \$ (1973)
MUNDIAL	0,87	2000
ECONOMIAS DE MERCADO DESARROLLADO	0,71	8500
PAISES EN DESARROLLO	0,77	380
ECONOMIAS DE DIRECCION CENTRAL (EXCLUIDA CHINA)	1,43	2700

Figura 13. La relación entre el consumo de energía y el capital (en Vatios por dólar de los Estados Unidos) es casi la misma en las economías de los países industrializados y de los países en desarrollo, aunque el cociente del capital social por habitante es bastante diferente. (Datos relativos al capital: W. Ströbele, 1975).

	DENSIDAD DE CONSUMO ENERGETICO W/m ²			DENSIDAD DE POBLACION habit./km ²		
	Promedio	Urbano*	Rural†	Promedio	Urbano*	Rural†
República Federal de Alemania	1,2	7,5	0,75	245	1500 [•]	150
India	0,10	12	0,04	168	6000 [▪]	135

* Conjuntos Urbanos
• 45% de la población total

† Granjas y Aldeas
▪ 9% de la población total

Figura 14. Comparación del consumo de energía y densidad de población de la República Federal de Alemania y de la India. En las zonas rurales de la República Federal de Alemania se consume unas 20 veces más energía por metro cuadrado que en la India.

Chapman, Slesser y otros autores han propuesto otro enfoque, denominado análisis energético. Es un método más tecnológico que engloba el estudio del contenido energético de mercancías y servicios. La Figura 16 ilustra algunos resultados obtenidos con este procedimiento. Presenta valores expresados en kilovatios/hora térmicos por dólar del producto económico final de diversos sectores de la economía francesa en el año 1971. Las cifras correspondientes a los renglones del acero y de metales no ferrosos son altas, así como las de la energía consumida indirectamente para el trabajo en metales, que son igualmente bastante altas en los renglones de la construcción y de la industria del vidrio. Es evidente la excelencia con que este método refleja la infraestructura y la tecnología actuales.

$$\text{ELASTICIDAD } (\beta, \gamma) = \frac{\text{PORCENTAJE DE CAMBIO DE DEMANDA}}{\text{PORCENTAJE DE CAMBIO DE PRECIO O DE INGRESOS}}$$

$$Q_t = \text{const.} \cdot \prod_{\theta=0}^n P_t^{\frac{\beta}{n}} \cdot \prod_{\theta=0}^m Y_t^{\frac{\gamma}{m}}$$

Q_t = Consumo neto de energía per capita

P_t = Precio neto relativo de energía

Y_t = Producto bruto local real per capita

β = Elasticidad de precio

γ = Elasticidad de ingreso

Figura 15. El enfoque econométrico para determinar la interdependencia entre el consumo de energía y los precios de la energía implica el uso del concepto de "elasticidad": el porcentaje de cambio de la demanda de energía en función del porcentaje de cambio de otra magnitud, tal como el precio, el ingreso, etc.

SECTOR INDUSTRIAL	TOTAL DE ENERGIA CONSUMIDA EN FUNCION DEL PRODUCTO	CONSUMO DIRECTO DE ENERGIA	CONSUMO INDIRECTO DE ENERGIA
Alimentación	2,20	1,72	0,48
Construcción	16,07	13,98	2,09
Vidrio	16,03	14,54	1,49
Acero	34,85	28,28	6,57
Metales no ferrosos	33,16	31,33	1,83
Metales fabricados	11,44	1,32	10,12
Electromecánica	6,01	1,59	4,42
Química	11,41	9,40	2,01
Vestimenta	2,92	2,09	0,83
Papel	5,62	4,44	1,18
Otros	4,93	3,00	1,93

Figura 16. En este cuadro se indica el total de la energía consumida en kilovatios horas KWH (térmicos) por dólar de producto económico final con respecto a diversos sectores de la economía de Francia en 1971. La elevada suma de los sectores del acero, de metales no ferrosos, del vidrio y de la construcción reflejan la infraestructura y tecnología existentes (Fuente: referencia 2).

Los suministros de energía y la información

La utilización de la energía no constituye una finalidad en sí misma. Hemos observado que la mano de obra y la energía mueven el capital existente para la producción del PNB, que se mide en dólares y no en kilovatios/hora. ¿Qué sucede cuando los kilovatios/hora contribuyen a producir dólares? La utilización de energía presta un servicio, que no es el único (véase la Figura 17). Podría aclararse este concepto con el siguiente ejemplo. En el caso de un taller de alfarería, se necesita energía para hacer girar la rueda de alfarero, pero es indispensable también la habilidad de éste para la fabricación de sus productos sin desperdicio de material ni de tiempo. El alfarero necesita también contar con capital. Cuanto mayor sea su habilidad y más adecuadas las inversiones, menor será la demanda de energía necesaria para producir una cantidad determinada de productos. Si le falta habilidad, los errores de fabricación le obligarán a empezar de nuevo muchas veces antes de terminar el trabajo y la cantidad de energía consumida por pieza será alta. Igualmente, cuanto más claro y preciso sea el concepto de su trabajo, tanto mayor será el PNB producido. Examinemos otro ejemplo referente a lo que se necesita para caldear una vivienda. La cantidad de energía requerida puede variar mucho de acuerdo con las características de la aislación térmica y de la efectividad del sistema, o del hecho que las puertas y ventanas están cerradas o no, y en todo caso interesa para el cálculo saber que se dispone de energía oportunamente cuando sea necesario.

Otra cuestión de capital importancia es que los suministros energéticos sean limpios desde el punto de vista ecológico. Muchos tipos de industrias requieren alimentación eléctrica en vez de otra forma de energía ya que aquélla se puede controlar y manejar con facilidad y limpieza, cualidad que S.H. Schurr llama "la gran eficiencia económica de la electricidad". Todos estos factores sirven para indicar que conviene estudiar comparativamente los suministros energéticos junto con otros servicios que, considerados globalmente, se integran en la suma de la pauta deseada, tal como en el ejemplo de la alfarería o de la calefacción de una habitación. Existe una importante diferencia entre una habitación caldeada y la acción de calentarla. El primer concepto es una pauta y el segundo implica el empleo de instrumentos, por ejemplo la utilización de energía. En el primer caso, el nivel relativo a la formación de las pautas es más abstracto que el nivel de los instrumentos.

Por consiguiente, suministro de energía significa transponer la utilización de la energía en ese nivel más abstracto, que llamamos nivel de "información". Haciendo una vaga referencia a la teoría oficial de la información de Shannon y al concepto de la entropía y de la entropía negativa, cabe admitir que la ciencia contemporánea no permite todavía considerar en una sola teoría unificada la habilidad, el capital y los suministros de energía. Esta es ciertamente la razón definitiva que explica por qué es tan difícil de comprender realmente la demanda de energía, y ése es el problema tantas veces aludido cuando se habla de la necesidad de tener en cuenta la calidad de la utilización de energía.

La relación entre la utilización de energía y la información es de carácter no restringido. Teóricamente y en condiciones ideales, se puede suministrar servicios de energía sin consumo de energía. Se podría demostrar esta teoría muy efectivamente mediante el experimento conceptual Gedanken-experiment (véase la Figura 18). Consideremos una región oceánica determinada; el calentamiento solar produce un gradiente de temperatura en las capas superiores del agua. Este gradiente puede aprovecharse de manera clásica mediante el motor de Carnot. El motor toma calor de la capa superior del océano a la temperatura T_2 y transforma el aporte calórico en trabajo mecánico y cede el resto del calor a las capas inferiores oceánicas a la temperatura T_1 . Si se utiliza el trabajo mecánico para comprimir aire, éste se calienta en condiciones isotérmicas y la energía del trabajo mecánico se restituye a la capa superior oceánica de la cual se había obtenido. Se da por supuesto que no hay consumo de energía en el transporte del aire comprimido a la ciudad. La energía interna de un gas (ideal) depende únicamente de la temperatura y no de la presión, y en este caso se supone que la temperatura es invariablemente T_2 . El contenido energético del

I "INFORMACION" SIGNIFICA LOS INSUMOS NECESARIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE UNA PAUTA DESEADA

EL ALFARERO NECESITA UN SUMINISTRO DE ENERGIA E INVERSIONES Y HABILIDAD PARA PRODUCIR ALFARERIA

LA CALEFACCION DE UNA CASA REQUIERE UN SUMINISTRO DE ENERGIA GRANDE O PEQUEÑO, DE ACUERDO CON LA CALIDAD DE LA AISLACION Y LA EFICIENCIA DE SU EMPLEO

LA DISPONIBILIDAD, FIABILIDAD, VERSATILIDAD Y LIMPIEZA DE LOS SUMINISTROS DE ENERGIA SON TAMBIEN INSUMOS DE "INFORMACION"

II SUMINISTRO DE ENERGIA SIGNIFICA TRASPONER LA UTILIZACION DE ENERGIA AL NIVEL DE "INFORMACION"



Figura 17. Los suministros de energía y la "información".

océano permanece sin cambio, pero aumenta la entropía de esa determinada región oceánica, fenómeno conocido con el nombre de entropía de mezcla. La misma cantidad de entropía, con signo negativo, es decir la denominada "negentropía", ha sido transportada a la ciudad en forma de aire comprimido. Si se invierte el proceso, la negentropía creada será igual a la entropía producida localmente. En la infraestructura urbana, la expansión ofrece la energía necesaria que puede servir para hacer funcionar un automóvil, por ejemplo. Se debe recordar que en nuestra terminología, un automóvil en marcha representa un suministro de energía, e implica un esquema de información. El aire se enfría al dilatarse y la atmósfera ambiente aporta la cantidad necesaria de calor en tanto que un insumo de energía del motor de expansión. Cuando el automóvil está en movimiento, la fricción resultante disipa parte de la energía mecánica en forma de calor de fricción, con lo cual se restituye a la atmósfera el calor que había cedido y el contenido energético urbano continúa también sin cambio.

Con la perturbación creada en la pauta natural de la fuente oceánica habremos creado una pauta de "información" que se utiliza en una economía; en otros términos, la economía funciona sin consumir energía. El Gedanken-experiment termina con la restauración gradual del gradiente oceánico y repitiendo el ejercicio sería posible hacer funcionar la economía de esta manera. Este experimento revela que el consumo de energía es una expresión cuando menos ambigua, puesto que se ha demostrado que se puede hacer funcionar una economía sin consumo de energía. Lo que se ha consumido es "información".

Este experimento pone de relieve la diferencia fundamental que existe entre la utilización de energía y el suministro de energía o de "información". Existe, cierto es, una ley de la conservación de energía como también hay una ley aplicable a la masa o al momento, pero que no hay ninguna referente a la entropía y a la información. La entropía permanece constante o en aumento. En consecuencia, se pueden liberar cantidades indefinidas de negentropía o de información. Expresada en otros términos, la relación de la utilización de energía y de la información depende de las pautas de esa utilización y, en ese sentido, es una relación no limitada.

Esta es precisamente la razón por la cual es tan difícil comprender la demanda de energía. Se ha podido observar que es la infraestructura de la economía la que establece la relación

entre la utilización de energía y el PNB. El PNB es uno de los indicadores más eficaces para medir la información en el sentido empleado en el presente estudio. Pero esto conduce a observar que el desarrollo posible de una economía es básicamente un proceso lineal no limitado, es decir que no existen leyes naturales que impongan límites al crecimiento. Esta es una afirmación de carácter bastante general y antes de aceptarla conviene tener presente el nivel de complejidad al que conduce el análisis de un proceso no limitado de este tipo. La orientación de una evolución económica solo puede conducir a actividades de un género cada vez más abstracto. Y cuando se destaca la creciente importancia del sector de servicios en una economía, no se hace otra cosa sino señalar ese fenómeno. Ello puede conducir a disminuir los servicios de energía por un valor determinado del PNB.

Será útil ilustrar lo que antecede con un ejemplo práctico que, aunque representa un caso extremo, es real. Las primeras computadoras digitales que aparecieron en los años 50, tales como el modelo IBM 650, consumían varios kilovatios de energía eléctrica y un período apreciable de tiempo para el tratamiento de datos. Hoy en día, en cambio, bastan unos pocos milivatios de energía y mucho menos tiempo para prestar el mismo servicio. La diferencia del consumo de energía se sitúa en cuatro a cinco órdenes de magnitud. Para lograr este adelanto se necesitaba una mejor comprensión de la física del estado sólido y la creación de una industria especializada. Fue preciso desarrollar un nuevo cuerpo de conocimientos y realizar progresos científicos. La economía de energía así lograda es solo una de las numerosas consecuencias de importancia. Para modificar la infraestructura que relaciona la utilización de energía y los servicios de la misma, será probablemente necesario utilizar una vasta y variada masa de riquezas en materia científica, tecnológica y administrativa, que a su vez podrán modificar también la demanda de energía.

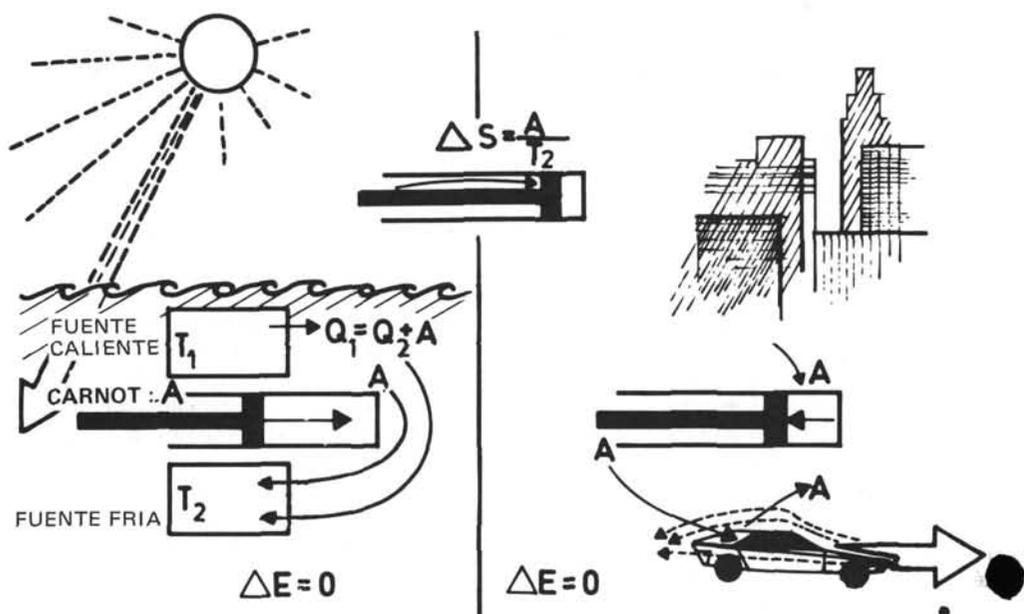
Dar tiempo a la evolución

Una evolución de esa índole exige tiempo. El tiempo es la clave de las estrategias modernas. Parece pues conveniente concluir considerando las características cronológicas de la evolución de la demanda de energía. Existen tres componentes (véase la Figura 19). Uno de ellos es el crecimiento demográfico, aunque es verdad que este factor no aumenta la demanda de energía de manera inmediata. Si no va acompañado de capital o de infraestructura, el crecimiento demográfico no implica una mayor demanda de energía; este era el caso cuando comparábamos la India con la República Federal de Alemania. No obstante, el crecimiento demográfico afectará a la larga la demanda de energía. En los países industrializados el crecimiento demográfico produce una correlación inmediata con la demanda de energía, por lo que dentro de los 40 a 60 años venideros, la posible duplicación de la población mundial ha de influenciar ciertamente en la demanda global de energía.

El segundo elemento que influye en la evolución de la demanda de energía es el crecimiento económico. Una tasa de crecimiento económico del orden del 5% anual equivale a una duplicación del PNB en 15 años, lo cual también puede duplicar la demanda de energía sino produce un cambio significativo en la infraestructura. Solo la intervención de un tercer elemento representa un cambio de la infraestructura; es el cambio de las pautas de la utilización de servicios y, en particular, de los servicios de energía. Ya se ha visto que los cambios de este tipo siguen de manera bastante determinista una curva logística, y los datos correspondientes nos hacen observar que habrán de transcurrir probablemente de 50 a 100 años para que se produzca un cambio significativo que permita reducir en la mitad la demanda de energía.

Observaciones finales

Era el propósito de este estudio mostrar la gran complejidad de la demanda de energía. En contraste las características del aprovisionamiento de energía, como en el pasado, son mucho más sencillas. La producción de energía se hace en grandes instalaciones técnicas centralizadas, y han progresado mucho las ciencias y las técnicas de su ingeniería. En ella



(A: TRABAJO, E: ENERGIA, Q: CALOR, S: ENTROPIA, T: TEMPERATURA)

Figura 18. Gedanken-experiment de negentropía urbana que presenta el ejemplo de una economía que funciona sin consumo de energía. A la izquierda de la figura, el calor del Sol produce un gradiente de temperatura en las capas superiores del agua oceánica. Se toma la cantidad de calor Q_2 de la capa superior del océano a la temperatura T_2 y se aplica al motor de Carnot, que transforma el aporte de calor en trabajo mecánico al mismo tiempo que se cede el aporte calórico Q_1 a las capas inferiores oceánicas a la temperatura T_1 . Si se utiliza el trabajo mecánico para comprimir aire, éste se calienta an condiciones isotérmicas y la energía del trabajo mecánico se restituye a la capa superior oceánica de la cual se había obtenido. Se da por supuesto que no hay consumo de energía en el transporte del aire comprimido a la ciudad. La energía interna de un gas (ideal) depende únicamente de la temperatura y no de la presión, y en este caso se supone que la temperatura es invariablemente T_2 . En efecto, si bien en el océano solo se ha transferido la cantidad de calor Q_1 de la temperatura T_2 a la temperatura T_1 , el contenido energético de la zona oceánica permanece invariable. En cambio ha aumentado la entropía de esa determinada zona oceánica, fenómeno conocido con el nombre de entropía de mezcla. La misma cantidad de entropía, pero con signo negativo, es decir la denominada "negentropía", ha sido transportada a la ciudad en forma de aire comprimido. Si se invierte el proceso, la negentropía creada será igual a la entropía producida localmente. En la infraestructura urbana, la expansión aporta la energía necesaria para hacer funcionar un automóvil, por ejemplo. El aire se enfría al dilatarse y la atmósfera ambiente suministra la cantidad necesaria de calor en tanto que un insumo de energía del motor de expansión. Cuando el automóvil está en movimiento, la fricción resultante disipa parte de la energía mecánica en forma de calor de fricción A . Este proceso de degradación de la calidad de energía restituye a la atmósfera el calor que había cedido con lo cual el contenido energético urbano continúa también sin cambio. (Referencia 10).

- | | |
|--|----------------|
| ● DUPLICACION DE LA POBLACION | ≈ 40 — 60 AÑOS |
| ● DUPLICACION DEL CRECIMIENTO ECONOMICO DEL 5% | 15 AÑOS |
| ● CAMBIO DE LA PAUTA EN USO DE "INFORMACION" | MAS DE 50 AÑOS |

Figura 19. Características cronológicas de la evolución de la demanda de energía.

se aplican, leyes naturales muy bien conocidas, como por ejemplo, las de la energía, del momento y de la conservación de masa. En consecuencia, no es extraño que, en el pasado, los análisis se centran casi exclusivamente en los aspectos del aprovisionamiento.

Los problemas de la demanda de energía tienen también en parte, índole tecnológica, pero la diversidad y variedad de las utilidades de la energía y, en especial, la diferencia básica entre la utilización de energía y los servicios de energía, nos llevan a consideraciones de carácter no restringido, a las que no es práctico aplicar las leyes científicas de la conservación. Aún en el plano de la investigación fundamental queda todavía mucho por hacer antes de que se pueda comprender claramente la demanda de energía.

Hemos visto también que solo de manera muy gradual se pueden introducir perfeccionamientos en la eficiencia de la utilización de la energía, mediante la modificación de la infraestructura. Si bien cabe esperar mucho en ese aspecto a largo plazo, es necesario ser prudentes en cuanto al calendario de las mejoras concomitantes, que probablemente han de exigir el esfuerzo de varias generaciones.

La conclusión general es que se debe observar cautela en materia de afirmaciones relativas a la demanda de energía. No se resolverán los problemas energéticos de la sociedad privándose del uso de energía. Solamente pueden aportar una solución a estos problemas, los cambios de pautas que comprendan la evolución de los aspectos sociales, económicos, técnicos y científicos en este dominio abstracto, y ello exige tiempo, mucho tiempo.

AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su reconocimiento a los Sres. C. Marchetti y W. Sassin por sus numerosas y muy útiles observaciones.

Referencias y obras afines

- [1] Chapman, P., A Review of Methods and Applications, *OMEGA, The International Journal of Management Science*, 4, 1, 1976.
- [2] Charpentier, J.-P., y Beaujean, J.-M., Toward a Better Understanding of Energy Consumption — III, *Energy*, 2, pág. 213—282, 1977.
- [3] Fisher, J.C., y Pry, R.H., *A Simple Substitution Model of Technological Change*, Report 70-C-215, General Electric Company, Research and Development Center, Schenectady N.Y., Technical Information Series, Junio, 1970; véase igualmente *Technological Forecasting and Social Change*, 3, 1971.
- [4] Georgescu, N.R., *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press, 1971.
- [5] Häfele, W., y Sassin, W., *Applications of Nuclear Power other than for Electricity Generation*, RP-75-40, Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas, Laxenburg, Austria, 1975.
- [6] Häfele, W., Energy Systems, Global Options and Strategies, en la *Conferencia de IIASA 1976*, Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas, Laxenburg, Austria, 10—13 Mayo, Vol.1, 1976.
- [7] Häfele, W., y colaboradores, *Second Status Report of the IIASA Project on Energy Systems 1975*, RR-76-1, Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas, Laxenburg, Austria, 1976.
- [8] Häfele, W., Die Bedeutung der Energie für den Lebensstandard, die wirtschaftliche Entwicklung und die Umwelt, publicado en *Vorträge des Internationalen Kongresses Energie und Umwelt de 8.2. a 10.2.1977, Düsseldorf*, Vulkan-Verlag Essen, República Federal de Alemania, 1977.
- [9] Hildebrandt, R., Schilling, H.-D., y Peters, W., Der Verbrauch an Primärenergieträgern in der Welt, den USA und der Bundesrepublik Deutschland, *Reihe Rohstoffwirtschaft International*, Verlag Glückauf, Essen, (Se publicará).
- [10] Marchetti, C., Primary Substitution Models, Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas, Laxenburg, Austria, 1975.
- [11] Nordhaus, W.D., *The Demand for Energy: An International Perspective*, CP-76-1, Actas de cursillos sobre demanda de energía, Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas, Laxenburg, Austria, 1976.
- [12] Schurr, S.H., y Darmstadter, J., Some Observations on Energy and Economic Growth, *Symposium on Future Strategies for Energy Development*, Oak Ridge, Tennessee, 1977.
- [13] Slesser, M., *Energy Analysis in Technology Assessment*, University of Strathclyde, Reino Unido, 1973.
- [14] Thoma, J., *Energy, Entropy, and Information*, RM-77-32, Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas, Laxenburg, Austria, 1977.