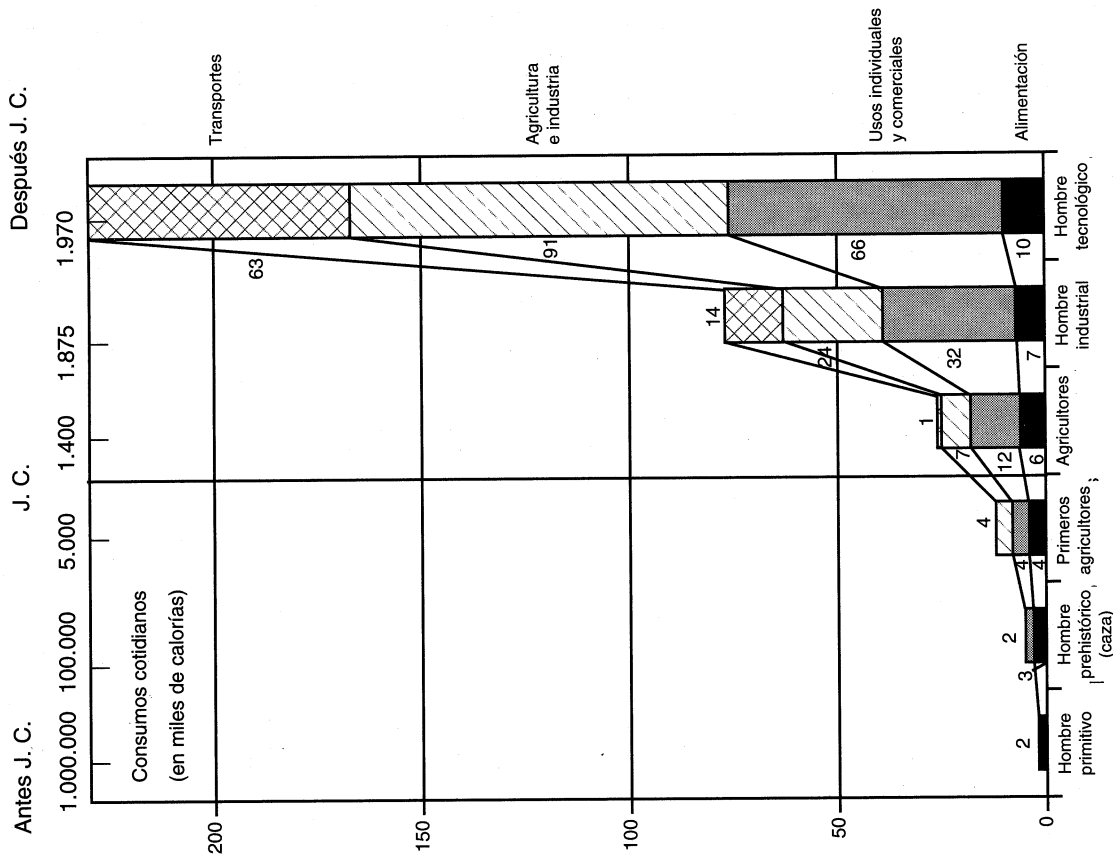


EL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL CURSO DE LA HISTORIA



N.B. En 1990, el consumo energético per cápita en los Estados Unidos (hombre tecnológico) no había variado con relación a 1970 (incluso decreció en un 0,1% entre 1973 y 1990). Según el *Atlas de las energías* (cuyos apartados no son exactamente los mismos que los que se manejan en este gráfico), su distribución sería la siguiente: transportes 27%, hábitat-agricultura 35%, industria 38%.

2. Las grandes etapas del desarrollo eco-energético

Cook nos propone una secuenciación por fases—Edad de Piedra, sociedades nómadas dedicadas a la caza, sociedades agrícolas primitivas, sociedades agrícolas modernas, revolución industrial, sociedad industrial avanzada— que coincide con la cronología del etnólogo o del historiador.

En la misma línea, otros autores nos proponen sus clasificaciones cronológicas, que se diferencian por su nivel de síntesis pero que se articulan perfectamente entre sí, según hemos intentado que se refleje al reagruparlas en un mismo cuadro.

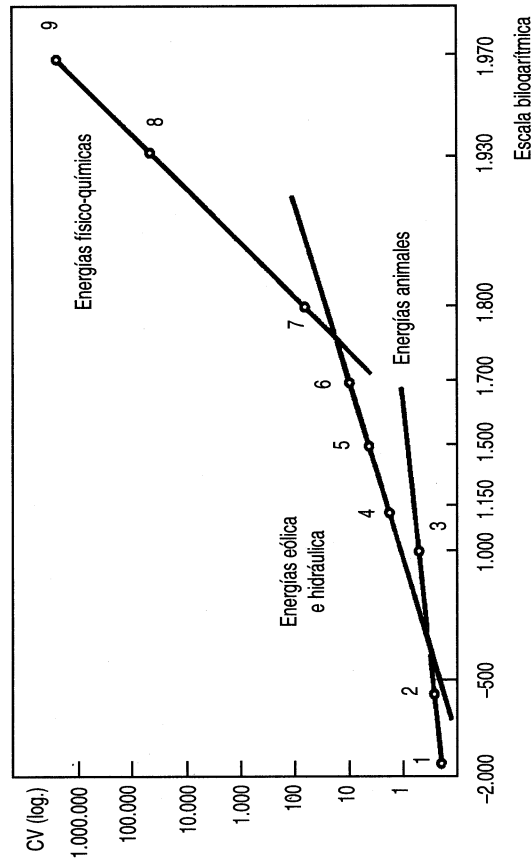
Energías solicitadas	Cippola	Meyer	Varagnac	J. de Roenay	Cook	Naturaleza de los excedentes
Humana	Mera utilización de los transformadores resbiológicos.	Sociedades de recolección y caza.	Fuego al aire libre (sociedades no formadas).	Sociedades no formadas (caza, pesca, recolección).	Edad de Piedra. Sociedad nómadas (caza, pesca, recolección).	Sin excedentes.
Agentes naturales	Producción de los transformadores biológicos.	Energías animales. Dominio de las fuerzas naturales.	Ganadería, agricultura. Fuego industrial, cónica, tracción animal e hidráulica. Explosivos, pólvora.	Agua sedentaria (Neolítico). Aparición artesania. Soc. preindustrial (energías naturales).	Soc. agri-primitivas. Sociedades agrícolas modernas.	Excedente agrícola
Fósiles y físico-químicas	Producción de los transformadores inanimados.	Utilización de las energías físico-químicas.	Hulla, vapor. Electricidad, petróleo. Átomo.	Soc. industriales modernas (energías, fósil y físico-químicas).	Revolución industrial. Sociedades industriales desarrolladas.	Excedente económico

Así Cippola³⁴ distingue:

- una fase dominada por la utilización somera de los transformadores biológicos naturales, cuya producción aún no sabe controlar el hombre: sociedades nómadas dedicadas a la caza y a la recolección, que demandan básicamente energía humana y que no generan excedentes;
- una fase caracterizada por el hecho de que el hombre sabe ya controlar la producción de los transformadores biológicos. Se inicia en el Neolítico (agricultura y domesticación de animales con los asentamientos), desembocando en la formación de excedentes agrícolas;

— una última fase, caracterizada por el dominio de las energías fósiles no renovables, gracias a las cuales puede efectuarse la expansión de las sociedades industriales.

F. Meyer³⁵, que se detiene más en los períodos posteriores a las sociedades recolectoras y cazadoras, distingue tres fases asociadas con la naturaleza de las energías utilizadas (animales, hidráulica y eólica, físico-químicas) y pone de manifiesto la aceleración de las fuerzas dominadas en el transcurso de dicha evolución (cf. gráfico subsiguiente).



1. Asno. 2. Buey. 3. Caballo. 4. Molino de agua. 5. Molino de viento. 6. Molino viento giratorio. 7. Máquina de Watt. 8. Central eléctrica. 9. Propulsión de cohetes.

A. Varagnac³⁶ subraya el papel que desempeña la energía en el desarrollo económico y distingue siete grandes revoluciones energéticas que han propiciado cambios sociales importantes. Se expresan mediante la sucesión de las fases siguientes: fuego al aire libre; ganadería, agricultura (Neolítico, 4.500-3.500 a.C.); fuego industrial, fuerza eólica, tracción animal, fuerza hidráulica (2.800 a.C.- siglo I a.C.); explosivos, pólvora (mediados s. XIV-s. XVI); hulla, vapor (1560-1825); electricidad, petróleo (1880-1920); energía atómica.

J. de Rosnay³⁷ relaciona también sin paliativos la evolución socioeconómica con la formación de excedente energético. Describe cinco grandes organizaciones sociales —sociedades de recolección, caza y pesca; agricultura sedentaria; aparición de los artesanos; sociedades pre-industriales basadas en la utilización de las energías hidráulica y eólica; sociedades industriales

modernas determinadas por la utilización de las energías fósiles y físico-químicas—, que van enlazándose en el curso de la historia y por las que han ido pasando las economías actualmente desarrolladas.

3. El análisis energético del subdesarrollo

El hecho de que el subdesarrollo aqueje a unas economías que frecuentemente disfrutan de unos abundantes recursos naturales y fósiles demuestra que la energía nada crea por sí misma. El desarrollo —lo afirmamos haciéndonos eco de muchos autores— lo genera la actividad humana y lo condicionan las posibilidades que ofrece el escenario internacional. Aquí nos topamos con los poderes, las desigualdades, la organización socioeconómica, los enfrentamientos entre grupos o naciones, los bloqueos institucionales, etc..., fenómenos muy estudiados, por otra parte.

Nos limitaremos a constatar que en economía, como en la naturaleza, los sistemas diversificados más maduros propenden a capturar los flujos energéticos de los sistemas simples e inmaduros, de tal modo que éstos no consiguen despegar de su estado de subdesarrollo³⁸. Da Silva, reagrupando determinados datos³⁹, demuestra que la producción energética de los sistemas rurales africanos puede ser de 17 a 41 veces superior al número de kilocalorías gastadas bajo la forma de trabajo humano y 4 veces superior respecto al conjunto de las energías humanas, animales y mecánicas destinadas a obtener este resultado. No se duda entonces de la existencia de un excedente; ahora bien, en la medida en que un país exporta, sin transformarlas, sus materias primas o sus cosechas con el fin de importar productos manufacturados, su situación equivale a la de un sistema recorrido por unos flujos energéticos que no utiliza para estructurarse. Permite a otros beneficiarse de los mismos para construir sus actividades de transformación; esto es, para diversificarse y crecer a expensas de las propias posibilidades de los exportadores.

En lugar de ser focos de desarrollo, las ciudades y el sector llamado moderno, volcados al exterior, actúan de intermediarios en la captación de tales recursos y energías sirviendo los intereses de las naciones poderosas. Las burguesías locales que se dedican al comercio proporcionan los relevos sociológicos necesarios.

La morfología y el futuro de la nación en cuestión se deciden en el exterior. Renunciando a definir sus propias metas, deja de constituir un sistema en el verdadero sentido del término y desempeña el papel de un mero subsistema en un conjunto territorial más amplio. De acuerdo con nuestra definición de sistema como «un conjunto de elementos interdependientes orientados a una meta», consideramos que un conjunto cuyas finalidades se determinan fuera de sus límites es un falso sistema, un subsistema de un

marco de referencia más amplio, dentro del cual otros polos (países o empresas multinacionales) toman decisiones sobre su destino. En ello radica, en nuestra opinión, la auténtica diferencia entre las Naciones de hecho y las Naciones de nombre.

Por tanto, el desarrollo de un país no es sólo una cuestión de crecer hacia la complejidad, sino también de progresar hacia el control de las propias finalidades.

B) La dimensión de la información

1. El desarrollo de la técnica como prolongación de la evolución general

El hecho de asumir que la sociedad industrial representa «dos centésimas y media de segundo» () nos lleva a interpretar su evolución dentro del marco de la prolongación normal de la corriente que arrastra al Universo. Así queda entonces patente una notable continuidad entre las grandes mutaciones biológicas que jalonan esta evolución y el desarrollo de las técnicas humanas. «Todo sucede, escribe F. Meyer, como si la evolución se fuera paulatinamente liberando de la necesidad de modelar, en la misma masa orgánica, para concentrar sus impactos en unas variables con menos inercia, capaces de evolucionar más rápidamente y de mantener además su ritmo característico de aceleración»⁴⁰.*

Este fenómeno se manifiesta al emerger las primeras formas de vida. En las primeras fases de la evolución —de las esponjas a las medusas y de los gusanos a los cefalópodos—, todo el plano de organización de los individuos, el conjunto de la masa orgánica se transforma y se remodela, replanteándose.

Posteriormente, la base material que sufre esta mutación se reduce ininterrumpidamente. A partir de los vertebrados, el movimiento se polariza en un área localizada del organismo, cada vez más específicamente: primero en todo el encéfalo, luego en los centros superiores, en los hemisferios cerebrales y, por último, el movimiento incide sólo en el córtex. La última mutación importante —la diferenciación funcional entre cerebro derecho e izquierdo—, peculiar del hombre y esbozada apenas en los primates superiores, apunta claramente a una redistribución de funciones, no tanto a unos cambios orgánicos.

Las mismas constantes se manifiestan a escala humana. Del *Australopithecus* al *Pithecanthropus* y al hombre de Neandertal, se detectan cambios morfológicos notorios, mientras que las técnicas evolucionan mínimamente.

Del hombre de Neandertal al *homo sapiens fossilis*^h se atenúa la variación morfológica, mientras que se acelera el progreso técnico, cuantificado

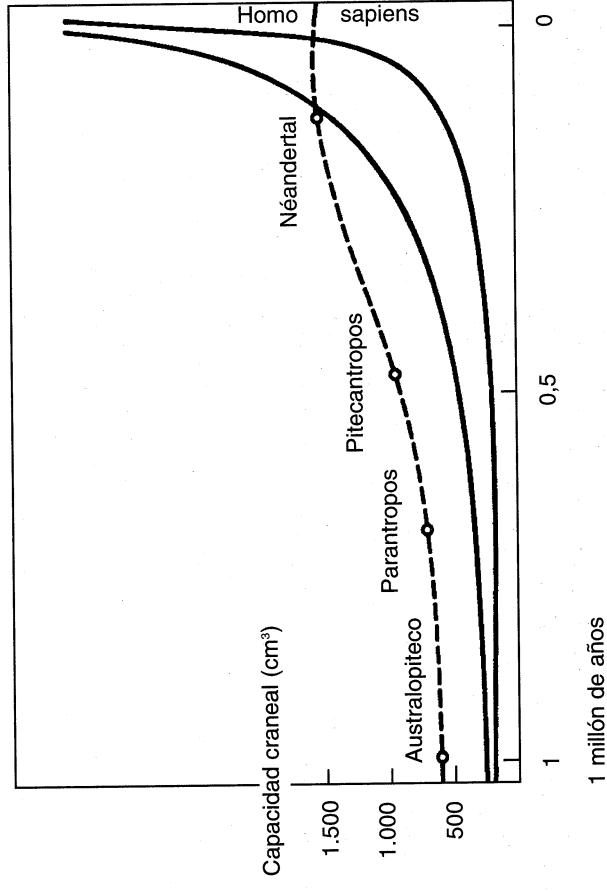
mediante el número de útiles o —como lo midió Leroi-Gourhan— la longitud de filo cortante obtenido de un kg de sílex⁴¹.

Del *homo sapiens fossilis* al hombre histórico no se aprecian prácticamente variaciones morfológicas; no obstante, el poder de actuación sobre el medio se intensifica. A partir de entonces no hay nada que reseñar a propósito de los cambios morfológicos resaltando, sin embargo, la potencia de las técnicas dominadas por los hombres: en apenas 4.000 años de historia pasamos de 0,2 CV, simbolizado por el asno en las civilizaciones de los Grandes Imperios, a los millones de CV que demandan para despegar los cohetes espaciales.

El desarrollo de las técnicas responde pues a la extensión lógica —por una proyección fuera del organismo— de un movimiento que precisamente no ha cesado nunca en la reducción de su base orgánica.

Desde esta perspectiva, la comparación llevada a cabo por Leroi-Gourhan entre la capacidad craneal y la producción tecnológica es sin duda significativa. Del *Australopithecus* al hombre de Neandertal, el proceso de maduración del cerebro resulta asombroso, mientras que el progreso técnico se ajusta a una evolución lenta, casi estacionaria. A partir de Neandertal se interrumpe el aumento de la capacidad craneal⁴² (la del hombre actual más bien habría menguado); y coincidiendo precisamente con este atisbo de compresión del cerebro, el ritmo de las técnicas se intensifica hasta alcanzar su cénit.

La evolución, liberada de las trabas orgánicas, prosigue ya por la vía de la técnica que ha tomado el relevo.



^h *La teoría de las catástrofes* de R. Thom depara el instrumento matemático gracias al cual se comprende cómo una variación continua de las variables de control puede entrañar la discontinuidad al nivel de las variables de estado. R. Thom, *Stabilité structurelle et morphogénèse*, 1972; *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, U.G.E. 10/18, 1974; R. Thom, C. Lejeune y J.-P. Dupont, *Morphogénèse et Imaginaire*, Circe, 1978.

Como lo hace constar Meyer, dicha liberación de la materia presenta tres ventajas:

- en primer lugar, al proyectar fuera del organismo los mecanismos que reemplazaron una función biológica, lo viviente se aligera en la misma proporción y recupera, en beneficio propio, las energías que han quedado disponibles para otros menesteres;
- en segundo lugar, la producción de dispositivos técnicos; esto es: de herramientas, de máquinas y de estrategias de acción, permite que se multipliquen indefinidamente unos órganos artificiales cuyo peso y cuyo volumen no estaría en condiciones de asumir un organismo;
- por último, la creación técnica permite una velocidad de evolución inalcanzable para cualquier transformación anatómico-fisiológica⁴³. En última instancia, podemos afirmar que cada realización técnica —la escafandra, el avión— representa, a escala biológica, el equivalente de la aparición de una nueva especie (adaptada a la vida acuática, adaptada al vuelo...) sin mediar modificación alguna en la anatomía humana. Una de las explicaciones de esta aceleración se relaciona con el hecho de que si la naturaleza progresa por ensayo y error, mediante unas selecciones donde se derrocha una gran cantidad de energía, la mente humana procede por el análisis lógico y la elección de soluciones «ajustadas», difundándose luego ampliamente las que resulten óptimas.

2. De la técnica a lo cultural y lo social

Quien dice «técnica» dice también «cultura», esto es: acumulación y transmisión de un saber adquirido, al margen del cual no cabría asegurar la reproducción de los equipos. Quien alude a la «cultura» alude necesariamente a la existencia de un medio social apto para conservarla, enriquecerla y comunicarla. *El paso a la técnica implica, al unísono, un paso a lo social.*

Muy probablemente la evolución está ya abocada a progresar por esta vía. La flexibilidad adaptativa y la rapidez de respuesta de la mente humana son tales que la presión selectiva, de hecho, sufre una transformación. En cambio, una alteración del medio difícilmente provocará una evolución «ad hoc» del organismo humano dado que la respuesta del cerebro habrá precedido a los mecanismos tradicionales de la selección natural.

Por la vía de la cultura —la información— la evolución sigue pues su curso.

Efectivamente, en el código de la especie humana no está inscrita la máquina, ni a efectos de su existencia ni de su modo de funcionar. La tradición escrita, oral o gestual toma entonces el relevo de este código. Asume las funciones del mismo y con toda propiedad ha podido hablarse al respecto de un auténtico código cultural. Más flexible que el genético, sin re-

producir invariablemente los mismos esquemas, susceptible de enriquecerse y de evolucionar en lapsos de tiempo muy cortos si se compara con la duración de la evolución orgánica, este código está aquejado, sin embargo, de una fragilidad más acusada. Las conquistas biológicas, registradas en el genoma, se transmiten de una generación a otra por la repetición del ADN, pero la cultura de la que se ha hecho portador cada sujeto muere con él⁴⁴. Por lo tanto, el desarrollo de las sociedades se apoya en un esfuerzo constante de conservación, de enriquecimiento y de transmisión de la información contenida en el código cultural.

Las estructuras sociales que cumplen esta función se presentan como redes de relaciones y de comunicaciones, gracias a las cuales el grupo social se mantiene como tal y sobrevive. Como todos los sistemas organizados, se esforzarán primero por asegurar su propia reproducción; a tales efectos, dictan normas, patrocinan valores y jerarquías, que equivalen a sistemas de información reguladores —«regulan, en toda la acepción del término, el metabolismo del grupo»⁴⁵.

En este sentido principalmente Lévi-Strauss equipara a la sociedad con un sistema de símbolos.

El enriquecimiento del código va unido a la producción de excedentes energéticos que, al liberar a las mentes de la obsesión por subsistir, favorece la diversificación de las investigaciones y de los conocimientos. Esta producción provocó, como ya destacamos, la aparición de la ciudad, foro privilegiado para la movilización masiva de las comunicaciones y de los intercambios. También favoreció la división del trabajo y la proliferación de las necesidades; es decir, la diversificación de los nichos ecológicos humanos de donde deriva el enriquecimiento de las experiencias y de los conocimientos. Cuanto más importante sea la cantidad de energía captada, más fácil resultará asignar calorías y hombres a unas actividades sin conexión directa con la supervivencia fisiológica de las poblaciones. Cuanto más compleja se vuelve una sociedad, más considerable se torna también la cantidad de información necesaria para administrarla. Y por una especie de efecto «boomerang», la información acumulada determina, a su vez, el avance tecnológico y la producción de energía. Por lo tanto no nos sorprenderá que Leslie White haya establecido una correspondencia, como ya reseñamos en su momento, entre el desarrollo de las culturas y la cantidad de energía que las naciones consiguen capturar per cápita anualmente.

3. Hacia una sociedad de la información

El tema que se plantea entonces radica en saber si, después de una fase de crecimiento cuantitativo ligado al control de las fuerzas termodinámicas, el sector de la humanidad que más descuella en estas lides no habrá entrado ya en una fase de crecimiento de signo informático.

La energía y la información sin duda coexistían en los primeros útiles fabricados: la energía, en la materia que les servía de soporte y en las fuerzas motrices que los alimentaba; la información-estructura, en la organización que se les confería; la información-mensaje, en el gesto o en el programa que los guiaba.

Si el dominio de las energías constituyó el objetivo inicial, cabe plantearse hoy si el crecimiento de éstas tiene visos de proseguir indefinidamente a tenor de unos ritmos cuyas curvas rayan en la verticalidad. Parece que se multiplican las formas que prolongan el movimiento de liberación de la materia que hemos visto acentuarse al hilo de la evolución. La informática, omnipresente y en continuo auge, es el símbolo de dicho movimiento. La materia y la energía se han convertido en los soportes necesarios, aunque de segundo orden, de una producción inmaterial: la información. El cohete espacial –viva imagen de la energía domada– desarrolla varios millones de CV en el momento de despegar; una vez que deja de estar sometido a la atracción terrestre, en cambio, el ordenador toma el relevo: todo depende ya de cuan precisos sean los cálculos y la comunicación de la información. A escala social igual que con los artefactos, cuando se perfilan –como veremos más adelante– los rendimientos decrecientes de la energía, cuando entre los trabajadores, o entre los consumidores, la aspiración por la calidad sustituye a la demanda cuantitativa, entonces los nuevos progresos vislumbraos se desplazan de la acumulación a la organización. En consecuencia, pasa a ser prioritario el aspecto relacional del sistema⁴⁶.

Si el reloj de péndulo y la máquina de vapor han simbolizado las revoluciones económicas de otras épocas, el *ordenador* –es decir, la información, la organización, lo inmaterial– caracteriza la mutación actual.

El apartado de los bienes materiales en el PIB de un país como Francia, cifrado en el 43% en 1976, disminuía al 36% en 1990. Conforme a este ritmo, será de un 30% en el año 2020 y de un 21% en el año 2060.

La inversión en bienes inmateriales (investigación, desarrollo, formación, software, funciones comerciales) crecía desde el 21% –respecto de la inversión material en 1974– al 40% en 1990.

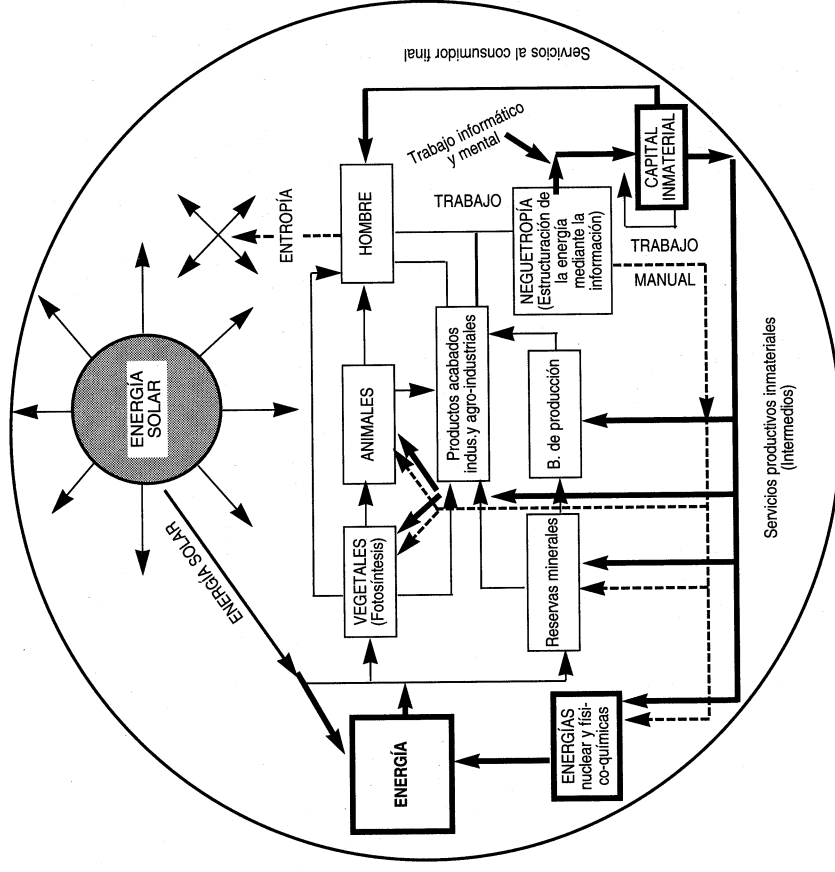
En la estructura del aparato productivo, la parte de la industria medida por los consumos energéticos se elevaba al 40% en 1970, retrocediendo hasta el 30% en 1990 a favor del hábitat, de los transportes y del sector servicios. El escenario NOE, en sus previsiones sobre cómo proseguirán estas tendencias, augura para el año 2060: un 15% y un 35%, respectivamente, en el caso de la industria y de los transportes y un 50% para el hábitat y el sector servicios.

Prescindiendo de las estaciones del año se intercambian, en el conjunto de los mercados, los productos agrícolas o industriales. Cualquier acontecimiento que se origine en un punto del planeta alcanza una proyección mundial y se vi-

sualiza «en tiempo real». La mínima incidencia bursátil en Tokio, Londres o Nueva York la registran inmediatamente todas las plazas. Los sucesos se producen como si el tiempo y el espacio se hubieran difuminado.

Esta emergencia de lo inmaterial supone ante todo –gracias a que la información suplanta a la energía y a la materia– la consolidación de procesos más eficaces, con menos costes energéticos y materiales; por lo tanto, menos nocivos para el medio ambiente.

En el Prólogo ya describimos la mutación funcional, organizativa y espacial resultante.



IV BIOSFERA

Con el propósito de incorporar la emergencia de la información, así como para subrayar la creciente relevancia de las energías físico-químicas y nuclear, presentamos como complemento a los tres esquemas de las páginas 196, 197 y 198 este cuarto esquema, cuya concepción se desglosa del siguiente modo:

— hemos añadido un polo de **energía** que alimenta al aparato productivo y que, a su vez, se nutre de dos fuentes: la **energía solar** (flujo) o de origen solar (energías fósiles), y las energías **físico-químicas** o **nuclear**;

— hemos destacado, junto con el trabajo **manual**, el trabajo **informático** y **mental** que desemboca en la formación de un **capital inmaterial** que, procediendo de él, contribuye a reforzarlo (feed-back). Dicho trabajo informático y mental sirve de punto de partida para dos flujos de servicios inmateriales:

- un flujo de servicios productivos inmateriales (intermedios) en todos los departamentos de la producción;
- un flujo de servicios, cada vez más importante, dirigido al consumidor final.

Reencontramos aquí la lógica de los *umbrales* que analizamos en páginas anteriores⁴⁷ y sobre la cual no insistiremos. Al franquear determinados niveles críticos de desarrollo, un sistema sufre unas mutaciones funcionales que trastocan sus mecanismos, sus comportamientos, los motores de su crecimiento y sus modalidades de ajuste⁴⁸. A escala económica, tales mutaciones equivalen a la prolongación natural de los cambios que acusó lo viviente cuando el movimiento ininterrumpido hacia la complejidad, inherente a la materia desde los orígenes, provocó la aparición de la vida, después de la consciencia y finalmente de la consciencia reflexiva, patrimonio de la especie humana.

El concepto de umbral permite explicar el paso de una *economía de subsistencia* a una *economía de holgura* y a una economía donde están saturadas las *necesidades en bienes de consumo duraderos*. Esta tercera fase, dependiendo de por donde discorra, podrá desembocar en una economía del ser (que llamaríamos hoy de lo inmaterial), o propiciar la destrucción del medio en el que se desarrolla.

Tal concepto armoniza la unidad de los procesos económicos, que se perciben desde una perspectiva evolutiva, con las contradicciones funcionales observadas entre las economías que discrepan en sus fases de desarrollo⁴⁹. Da lugar a que comprendamos que unas teorías opuestas —enfoque clásico, keynesiano...— hayan podido disfrutar de sus correspondientes períodos de legitimidad en función de los contextos.

Justifica la búsqueda de otros análisis y de nuevos instrumentos orientados a aprehender una realidad muy distinta de aquella para la que se concibieron los sistemas de explicación actualmente vigentes.

Por último, explica las razones por las que, a partir de un determinado nivel de desarrollo, la integración de la economía en la biosfera, que durante siglos no pareció plantear dificultades, se convierte en uno de los problemas capitales con los que se enfrentan las actividades conscientes de los hombres.

¹ Carta reproducida por D. Harlevey, *Essai sur l'accélération de l'histoire*, Plon, 1949, págs. 4-5.

² En la correspondencia intercambiada entre Marx y Engels (*Letras sur les sciences de la Nature*, op. cit.) abundan las alusiones a estos principios. Su contenido nos desvela hasta qué punto ambos autores —cuyos epígonos caen, con demasiada frecuencia, en el vicio de debatir hasta la saciedad sobre las leyes de la reproducción capitalista— se mostraban receptivos ante el movimiento científico de su época.

³ B. Desaignes, *La planification de l'environnement*. Tesis doctoral, París I, 1977.

⁴ M. W. Gilliland, «Energy analysis and public policy», *Science*, vol. 189, n.º 4.208 del 26 sept. 1975.

⁵ Más adelante comprobaremos, en un ejemplo quizá menos infantil, cómo las producciones expresadas en términos energéticos en un cierto número de sistemas agrícolas africanos representan igualmente varias veces la energía derrochada en trabajo para obtenerlas.

⁶ H. T. Odum, *Environment, Power and Society*. Wiley Interscience, 1971.

⁷ U. Heierli, «Bilans énergétiques et développement», *Les Temps Modernes*, agosto-sept. 1975, págs. 279-308.

⁸ H. Laborit, *Société informationnelle*. Cerf, 1973, págs. 29-30.

⁹ J. Vieira da Silva, «Ecologie et développement, le rôle de l'énergie». Informe para el Coloquio de GERMES, Arc et Senans, sept. 1977.

¹⁰ P. Cazamian, «Le système homme-automate» (comunicación presentada el 18-nov.-1977 en las Jornadas del IFOCOP, «Imagination et travail»). Igualmente: M. Calleja, *Niveaux d'automatisation et représentation du vécu des astreintes*. Tesis doctoral, París I, 1977.

¹¹ L. A. White, *The evolution of culture*. Mc Graw-Hill, N. York, 1959.

¹² N. Georgescu-Roegen, *The entropy law and the economic process*. Harvard Univ. Press, 1971.

¹³ G. Bataille, *La part maudite*, op. cit., pág. 62. M. Cepede precisa que «la humanidad consume anualmente en energía fósil entre 1/12.500 y 1/20.000 de la energía de origen solar, o también del orden de 1/5 del equivalente a la que las plantas utilizan para la fotosíntesis» («L'économie en unités de travail», Informe para la Academia de Agricultura, 15 febrero 1978).

¹⁴ «Parece evidente que el desarrollo precisa del crecimiento, el cual, a su vez, se utilizará para aumentar la organización de la diversidad, pero puede ocurrir, y lamentablemente esto es moneda corriente en el Tercer Mundo, que haya crecimiento sin desarrollo o incluso con subdesarrollo si el incremento de un número reducido de actividades desemboca en la supresión de algunas otras y en la creación de un sistema más importante, pero simplificado».

J. Vieira da Silva, «Ecologie et développement, le rôle de l'énergie». Informe presentado en el Coloquio GERMES, celebrado los días 15 y 16 dic.-1977, en París.

¹⁵ M. Grenon, *Pour une politique de l'énergie*. Marabout-Université, n.º 220, 1972, pág. 25; tenemos un esquema idéntico para un período más antiguo (1956) en P. Mailliet, *L'énergie*. PUF, Col. Que sais-je? Cfr. también un artículo posterior de G. Leach, «Energy futures - Wide open to change and choices», *Ambio*, vol. V, n.º 3, 1976.

¹⁶ J. de Raffin realiza un buen análisis de esta cuestión en su Tesis.

¹⁷ No obstante, esta puntualización no debe inducirnos a negar la existencia de tal relación. Da Silva sostiene que el desarrollo de los Estados Unidos se ha basado, en una primera fase, en la energía solar que, en 1850, representaba el 13,4% de la energía total utilizada: la energía per capita entonces disponible era de 36 · 10⁶ kcal, la misma que estaba *al alcance* de los franceses en 1976. «No debe sorprendernos, concluye, que consumiendo y derrochando energía este gigante industrial se haya desarrollado» («Ecologie et développement», art. cit.).

¹⁸ Nos apartamos en este punto de la mayoría de las definiciones que sólo aluden a la satisfacción de las necesidades de restauración «del recurso humano» (por ejemplo: U. Heierli, «Bilan énergétique et développement», *Temps modernes*, sept. 1975, págs. 279 y ss.).

En efecto, nos parece evidente que una economía que no asegure la reproducción de todos sus recursos no se desarrolla, sino que sufre una regresión, incluso si cubre las necesidades fundamentales de los hombres. Así, al crecer con el nivel de desarrollo el peso de las «amortizaciones» requeridas para esta reproducción, el umbral a partir del cual surge el superávit se eleva a la par. Por lo tanto, será a partir del momento en que estén satisfechas las necesidades ligadas a la reproducción de todos los recursos productivos cuando la economía pueda progresar.

¹⁹ F. Correl, *Energy and society*. Westport, Conn., 1970.

²⁰ A. Smith señalaba ya el vínculo que unía la acumulación del capital con la división del trabajo: «Así como la acumulación del capital debe proceder forzosamente a la división del trabajo, tampoco el

trabajo puede ser posteriormente subdividido de no ser en la proporción en que el capital ha sido previamente más y más acumulado» (T. I, pág. 259, Libro II, introd.): Cfr. también A. Leroi-Gourhan, *Le geste et la parole*. Albin Michel, 1972, T. I, págs. 241 y ss.).

²¹ M. J. Herskovits, *The economic life of primitive people*. Londres, N. York, 1941.

²² U. Heierli, «Bilan énergétique...», art. cit.

²³ Evaluaciones de F. Cottrel (*op. cit.*), retomadas por U. Heierli, «Bilan énergétique...», art. cit., págs. 279 y ss.

²⁴ En los transportes marítimos, por ejemplo, el viento permite al velero desplazar cargas pesadas en largas travesías con un gasto energético bajo, reducido sólo a la alimentación de los tripulantes. Cottrel estima en 250 CH per cápita y por día el excedente energético generado por un velero. No hay duda, a su juicio, de que este hecho ha contribuido en gran medida al auge económico de la Gran Bretaña, que durante siglos fue la primera potencia marítima del mundo.

²⁵ La utilización de los ríos como vías de transporte fue sin duda uno de los primeros procedimientos al alcance de los hombres para ampliar sus recursos energéticos. La acumulación en el cauce bajo de los recursos producidos en el cauce alto se vio facilitada; en cambio no resultaba ventajoso hacer el recorrido inverso salvo en el caso de materias elaboradas de poco peso, es decir, de los productos manufacturados, no ya de las materias primas. En este fenómeno encontramos seguramente una de las primeras causas históricas de la diferencia espacial entre las ciudades y el interior del país.

²⁶ En la época del Imperio Bizantino, Egipto le destinaba a éste aproximadamente un 12,5% de su producción agrícola y aún podía utilizar, dentro de sus fronteras, un excedente en torno al 10% (Bratiani, *Etudes Byzantines d'Histoire économique et sociale*. París, 1938).

²⁷ Para consultar todos los cálculos: Heierli, art. cit., pág. 28.

²⁸ A. Smith notificaba ya en 1776 que en Edimburgo «sin duda no quedaba un solo trozo de bosques escocés».

²⁹ J. U. Nef, «Les conséquences d'une crise historique de l'énergie». *Science*, Enero 1978, n.º 3, págs. 92-101.

³⁰ U. Heierli, «Bilan énergétique...», art. cit., pág. 287.

³¹ P. A. Tschumi: «Limites de la consommation d'énergie» (*Grenzen des Energiekonsums*) en *Probleme in Geoprähi: Mensch, Energie und Umwelt*. Berna, 1973, pág. 125. Estas cifras, que reflejan cada una la evolución de la demanda en una nación dada y que se aplican a economías de mercado que han concluido su proceso de monetarización, no reúnen los inconvenientes de las comparaciones criticadas en un pasaje anterior.

³² Es una nueva forma de la ley de los rendimientos decrecientes en la modalidad en que nos vemos abocados a analizarla en la Parte III del libro.

³³ Tomado de D. Varguèse (*Le Monde*, 4-dic.-1973), que recoge y actualiza un esquema más antiguo de E. Cook, «The flow of energy in an industrial society»; *Scientific American*, sept. 1971, pág. 136. Dicho esquema adolece de algunos de los puntos débiles que ya señalamos a propósito de este tipo de evaluación. Pero en la medida en que deja patente las diferentes modalidades de uso de la energía, nos ofrece por lo menos una indicación somera acerca de cómo se desarrolla el excedente.

³⁴ C. Cippola, *The Economic history of World Population*. Penguin Books, 1962, pág. 175.

³⁵ F. Mayer, *La surchauffe de la croissance*, *op. cit.* El esquema se ha elaborado combinando dos gráficos del autor (págs. 35 y 59).

³⁶ A. Varguèse, *La conquête des énergies*. París, 1972.

³⁷ J. de Rosnay, *Le Macroscopie*, *op. cit.*, págs. 38-41.

³⁸ R. Margalef, «On certain unifying principles in Ecology». *Amer. Natur.* 97, págs. 357-374, 1963.

³⁹ Da Silva, «Ecologie et développement», art. cit., págs. 8 y ss.

⁴⁰ F. Mayer, *La surchauffe... op. cit.*, pág. 84. En lo fundamental seguimos aquí con bastante fidelidad a este autor, quien ha sintetizado la cuestión de forma admirable. También resultará provechosa la lectura de J. Ruffié, *De la biologie à la culture*, *op. cit.*, págs. 359-366.

⁴¹ Tras haber reconstruido los procedimientos para extraer y tallar la piedra en las distintas épocas, A. Leroi-Gourhan propone como índice del progreso técnico la longitud de filo cortante extraído de 1 kilo de sílex. Obtiene los siguientes resultados:

1.800.000 años; Pebble culture: 0,4 m.
500.000 años; Abbevilliers: 1,0 m.
300.000 años; Achelense: 2,0 m.
120.000 años; Mustériense: 4,0 m.
30.000 años; Auriniacense: 8,0 m.

15.000 años; Magdaleniense: 70,0 m.

5.000 años; Mesolítico: 120,0 m.

Esta relación implica una progresión asombrosa en la técnica, la adquisición de conocimientos y la habilidad que se comunica y transfiere de generación en generación.

En cuanto al criterio del número de utensilios, es claramente menos significativo a nuestro juicio: en efecto, todo depende de cómo se defina el utensilio. No siempre existe una frontera nítida entre el utensilio antiguo perfeccionado y uno nuevo. Cfr. Leroi-Gourhan, *Le geste et la parole*. Albin Michel, 1972, T. I, págs. 90 y ss.

Para todo lo que concierne a la evolución de la técnica resultará también ilustrativo consultar a L. Mumford, *Le mythe de la machine*. 2 vol., Fayard, 1974.

⁴² El esquema está tomado de F. Mayer, quien traslada y traduce para el lego en la materia el esquema más científico propuesto por A. Leroi-Gourhan (*Le geste et la parole*, *op. cit.*).

⁴³ F. Mayer, *La surchauffe... op. cit.*, pág. 94.

⁴⁴ «Si un inmenso catadismo destruyera la totalidad de los países desarrollados y sólo sobrevivieran algunas tribus de Nueva Guinea, el mundo se vería abruptamente retrotraído a 7 u 8.000 años en el pasado. Habría que recomenzarlo todo... Incluso si unos bebés de pocos meses, americanos, rusos o chinos, hijos de los más eminentes sabios del siglo, fueran salvados de la hecatombe y criados entre esas tribus primitivas, tendrían que reaprenderlo y reinventarlo todo... Pero supongamos que el mismo catadismo destruyera a todas las abejas menos a una fecundada. En algunas semanas, la colmena se reconstituiría según las mismas pautas anteriores» (J. Ruffié, *De la biologie à la culture*, *op. cit.*, pág. 365).

⁴⁵ F. Mayer, *La surchauffe... op. cit.*, pág. 94.

⁴⁶ «La creciente interconexión entre los ordenadores y la telecomunicaciones —conocida como «telemática»— abre un horizonte radicalmente distinto... no constituye una red más, sino una red de otra naturaleza... transformará nuestro mundo cultural... incidirá en los equilibrios económicos, modificará las relaciones de poder, ensanchará las maniobras por la supremacía».

S. Nota y A. Minc, «L'informatisation de la Société», Informe presentado al Presidente de la República. Documentation française, enero 1978.

⁴⁷ Cfr. la relación de los trabajos que hemos dedicado a este tema en la nota 23, cap. 1.º, Parte I.

Tercera parte

LA INTEGRACIÓN EN LA BIOSFERA

INTRODUCCIÓN

Tras dilucidar la unidad de los fenómenos que gobiernan la esfera económica y la biosfera, tenemos pendiente la última etapa de nuestro recorrido.

Si resume las responsabilidades que le competen por el privilegio de ser una criatura reflexiva, ¿puede el hombre descubrir, en dicha unidad, los principios y las normas válidos para insertar armoniosamente sus actividades productivas en las regulaciones del medio natural? Nos referimos a una integración, entendiendo por tal la tarea consistente en «agrupar elementos para componer un todo, o en aumentar la cohesión de un todo preexistente» (F. Perroux)¹.

No obstante, sólo nos cabe actuar sobre lo que conocemos a fondo; por lo tanto, nos correspondería saber pasar:

- de la situación de ser conscientes en un plano general —la nuestra en este momento— a ser capaces de medir los fenómenos y de definir los instrumentos adecuados a este fin,
- para, una vez resuelta la evaluación en términos cuantitativos, formular unos principios de organización en cumplimiento de los cuales se desarrollarían los diferentes modelos institucionales sin comprometer la reproducción del medio natural que los sustenta.

¹ F. Perroux, *L'Europe sans rivage*. PUF, 1954, pág. 419.

Capítulo primero

LOS INSTRUMENTOS Y LA MEDIDA

Introducción

Se nos plantea el dilema de comprobar si nuestro razonamiento se circunscribirá a un carácter generalista, abstracto y difuso, o si aterrizaremos en la definición de un instrumento operativo. En una palabra, ¿son cuantificables la energía y la información? En caso afirmativo, ¿le reporta al economista el hecho de evaluarlos unos datos que sus recursos tradicionales, concebidos en términos monetarios, le deniegan?

1. *El instrumento que corresponde a cada tipo de medida está obviamente condicionado por el objeto de la misma.*

Considerada «sensu stricto», la esfera económica tiene su armazón lógico y sus finalidades; a este nivel, el instrumento monetario ha adquirido el rango de un indicador, sin duda imperfecto, pero se trata de un indicador a la postre insustituible una vez corregido: «el peor de todos los sistemas —como se ha afirmado a propósito de la democracia—, cuando se ha hecho tabla rasa de todos los demás». Mi deseo de adquirir un objeto no tiene por qué depender de la cantidad de materia o de energía que lo configura. En cambio, se expresará en la suma de dinero de la que estoy dispuesto a desprenderme para comprarlo. Un bien se encarece cuanto más escaso sea, habida cuenta del nivel de aspiraciones que concita. Por consiguiente, el precio refleja de algún modo unos fenómenos de tensión entre la oferta y la demanda que ninguna unidad energética, obviamente, llegará a expresar.

La finalidad de la esfera social radica en la búsqueda de un bienestar que trasciende los meros aspectos mercantiles de la actividad humana. Los intentos reduccionistas a los que se aferran algunos teóricos neoclásicos únicamente son defendibles al socaire de unas hipótesis teóricas y de unas piruetas intelectuales que caen por su propio peso. Probablemente requiramos una batería completa de indicadores sociales que, más allá de los límites monetarios, midan respectivamente lo que se considera, desde una óptica social, como un índice válido del grado de realización de un objetivo dado.

A escala de la biosfera, por último, el instrumento monetario pierde vigencia: el ritmo de depuración de las aguas o de la atmósfera, su grado de pureza, no son convertibles en dinero. Una reserva de energía expresada en kilocalorías corresponde a una realidad física: traducida a un valor monetario, se vacía de sentido. Nos situamos aquí en la intersección de varias disciplinas. El economista debe equiparse con el instrumental que le permita dialogar con el ecólogo, el físico, el biólogo... y aprovechar las aportaciones que, desde su visiones correspondientes, le brindan estos profesionales. De no ser así, se cierra la posibilidad de asumir las consecuencias que la actividad económica comporta para el medio ambiente. Este diálogo se ha convertido en una condición ineludible para la supervivencia.

2. Su alcance va aún más lejos. Comprobaremos que *los instrumentos diseñados para responder a las necesidades de reproducción de la biosfera —si no eclipsan a los restantes— suponen un complemento útil, pues mejoran la comprensión de los fenómenos inscritos en la esfera económica*. No ha lugar a sorpresas, ya que la relación «economía-sociedad-biosfera», piedra angular de nuestro razonamiento, es una relación de inclusión. En la medida en que no todos los elementos del conjunto mayor pertenecen necesariamente al menor de sus subconjuntos, no cabe aplicar a los que lo trascienden las enseñanzas extraídas de éste. En cambio, al pertenecer por definición cualquier elemento de un subconjunto al conjunto que lo incluye, nada tiene de particular que las enseñanzas que resultan válidas para el mayor entrañen algunas consecuencias útiles para sus componentes. Como ya hemos resaltado, si los fenómenos de la biosfera no se rigen todos por la lógica mercantil, los bienes del mercado, sin excepción, se someten a las leyes de la energía y de la información.

Surge una dificultad añadida. Si la información, como sabemos, no se reduce a la energía, ¿no peligra entonces la propia unidad de la ciencia económica al apoyarse en dos pilares? ¿No nos encaminaremos hacia un sistema interpretativo donde los fenómenos, en función de su naturaleza, dependerían ya de indicadores energéticos, ya de indicadores de la información, sin posibilidades de tender un puente entre ambos campos?

Si superamos esta última dificultad, la coexistencia de las tres esferas mencionadas, cada una con sus finalidades e indicadores peculiares, ¿caso no nos conduciría a una aporía? ¿Cómo establecer un nexo entre las evaluaciones realizadas en términos de precio a escala económica y las evaluaciones expresadas en unidades diferentes con relación a la biosfera? ¿Será factible, por ejemplo, compaginar el respeto por una determinada restricción (norma) de reproducción, dictada por el medio natural y cuantificada en términos físicos, con las implicaciones monetarias que, para el aparato económico, supone acatarla? Es una vía, como veremos, por donde algunos ya se han adentrado.

I. La medida de la información

A) *Cómo se mide la información: la fórmula de Shannon*

1. Información y probabilidad

En un primer nivel de análisis, al economista sólo parece interesarle la información con un significado o información-estructura: qué notifica un mensaje, de qué modo afectará al funcionamiento del aparato económico; cómo transforma la materia un tipo de organización, o un método de gestión, o un procedimiento técnico a fin de satisfacer mejor las necesidades humanas. El economista se pregunta si esto es evaluable.

Ahora bien, lo que se mide a efectos de información no guarda en apariencia relación alguna con este tipo de cuestiones. Se trata de una simple referencia a la probabilidad de que un hecho acontezca.

Según Shannon¹ un suceso, cuando tiene lugar, empieza por informarnos... de que ha tenido lugar. Es el nivel de información mínimo. Si contamos con la certeza de que va a producirse (extracción de una bola negra de un saco que únicamente contiene bolas negras), el hecho de que algo aconteciera no expresaría nada y la cantidad de información suministrada equivaldría exactamente a cero. Pero si la producción de un suceso se plantea en términos aleatorios (extracción de una bola negra de un saco que también contiene bolas blancas), entonces se despejará una incertidumbre: *la ganancia, informativamente hablando, se incrementará en la medida en que sea más remota la probabilidad de que el suceso se produzca*.

Un acontecimiento poco probable reportará una gran cantidad de información, pero su frecuencia de aparición será baja. Por el contrario, la aparición de un suceso altamente probable proporcionará una información escasa, pero su frecuencia será elevada. Shannon expresa pues la cantidad media de información transmitida simbólicamente en un mensaje mediante una función $H(x)$, donde la información transmitida por cada acontecimiento (equivalente aquí a la aparición de un símbolo) se halla ponderada por su probabilidad de suceder $p(i)$:

$$H(x) = - \sum p(i) \cdot \log_2 p(i)$$

La cantidad total de información transmitida por el mensaje será entonces igual al producto de $H(x)$ por el número de símbolos que componen el mensaje.

^a Remitimos al lector desoso de profundizar en este punto a la nota 2 —correspondiente a la Parte III, cap. 1— dentro de la relación: Notas y Referencias, que sigue a la Conclusión del libro.

2. La unidad bit y sus características

Para medir esta información, debemos procurarnos una unidad cuyo valor no cambie en función del mensaje.

Para ello tendremos presente que la cantidad máxima de información que puede suministrar un conjunto cualquiera de acontecimientos está vinculada con su *equiprobabilidad*. En efecto, este es el caso donde la incertidumbre es total: si en un saco guardamos el mismo número de bolas negras, blancas y rojas, nos resultará imposible aventurar a priori qué bola, de entre los tres colores, resultará elegida en el caso de extraer al azar una del saco. Ahora bien, si un color concreto cuenta con una bola más, aumentará su probabilidad de salir y disminuirá la cantidad de información correlativamente.

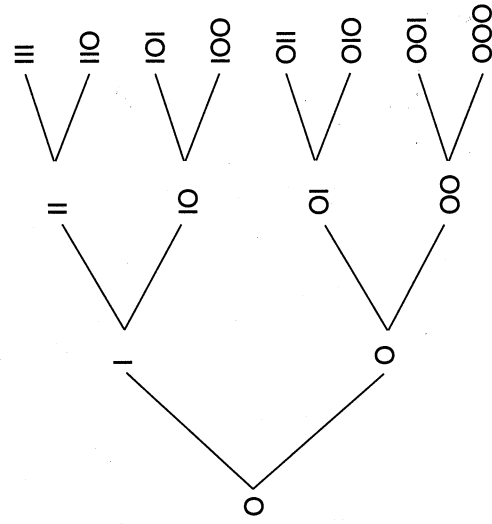
Por otro lado, la información está cada vez más ligada con la tecnología del ordenador, que se basa en la utilización de un alfabeto con dos signos, I y O. La unidad de medida de la información, llamada *bit* («binary digit»), se definirá entonces como la *mayor cantidad de información que pueda suministrar un sistema binario*. Cantidad máxima que, como acabamos de precisar, corresponde a una misma probabilidad de aparición para los dos símbolos.

En tal caso, en efecto, $p(1) = p(2) = 1/2$ y el valor de $H(x)$ en la fórmula de Shannon equivale a la unidad.

La información que contenga un mensaje se expresará, por lo tanto, en bits.

Para ilustrar este punto, recurriremos a un ejemplo de Bertalanffy³ que nos parece muy «elocuente».

Sea un «juego de las veinte preguntas», donde hay que descubrir la naturaleza de un objeto gracias a las respuestas «Sí» (I) o «No» (O) con las que se va contestando.



La cantidad de información que encierra una respuesta procede de una elección entre las dos ramas de una alternativa (así, «animado» e «inanimado»):

- una pregunta hace aflorar dos configuraciones posibles: 2^1 ;
- dos preguntas, cuatro configuraciones: 2^2 ;
- tres preguntas, ocho configuraciones: 2^3 , etc...

La potencia de 2 (el logaritmo de base 2), al expresar el número de configuraciones posibles, sirve pues de medida de la información: la que está contenida en una sola respuesta será: $\log_2 2 = 1$ bit; en dos respuestas: $\log_2 4 = 2$ bits; en tres respuestas $\log_2 8 = 3$ bits, etc...

La elección de dicha unidad determina, por lo tanto, la elección de la base logarítmica 2 que se emplea en la fórmula de Shannon.

En consecuencia verificamos lo siguiente:

- a) «la información es una cantidad abstracta cuyo valor no depende de sobre qué versa, lo mismo que la longitud, el peso o la temperatura tienen unos valores independientes de la naturaleza del objeto con una longitud, un peso o una temperatura;
- b) «la información se relaciona con el conjunto de las modalidades posibles en que puede producirse un hecho, en su sentido amplio (resultados de un experimento; utilización de una letra o de un fonema en una frase escrita o hablada, etc...): su valor varía en función de las probabilidades asociadas con dichas modalidades, pero es totalmente independiente de las causas, o de las consecuencias, de que acontezca el suceso.

... Cualquier clasificación x con unas categorías i y unas probabilidades asociadas $p(i)$ da lugar a que definamos, mediante la fórmula de Shannon, una cantidad de información $H(x)$ que es una función de otras probabilidades»⁴.

B) ¿Le compete al economista medir la información? Las dos paradojas de la información

Nos percatamos inmediatamente de que este instrumento se limita a traducir un abanico de probabilidades: por lo tanto, puede decirse que mide y no mide.

Deja escapar la dimensión con contenido de la información: tanto si se transmiten aleatoriamente como si van componiendo frases, 100 letras del alfabeto, desde este punto de vista, comunican la misma cantidad de información: «Desestimamos el valor humano de la información. Atribuimos un determinado valor informativo a 100 letras elegidas al azar y a una frase de 100 letras sacada de un periódico, de una obra de Shakespeare o de un teorema de Einstein. En otras palabras, definimos la información al margen del conocimiento, al que no cabe otorgar un valor numérico» (Atlan).

Es independiente del valor de la información para su receptor y de la *eficacia* con la que contribuiría a generar un número dado de consecuencias (en el campo económico, por ejemplo). La información obtenida del hecho de extraer una carta de un mazo de 32 cartas siempre vale 5 bits, cualquiera que sea la naturaleza del naipe en cuestión (rey, as, reina o sota) y de su repercusión en un juego concreto. Un párrafo de un artículo de Einstein no informa más que un artículo anodino, con el mismo número de símbolos, que se haya obtenido de cualquier revista sensacionalista.

La información no parece guardar relación alguna con el fenómeno de *estructuración* (información-estructura) que supuestamente detectamos en el núcleo de las actividades económicas.

¿Estará condenado el economista a la *imposibilidad* de evaluar uno de los dos aspectos fundamentales de las actividades que le compete explicar? Después de haber definido *lo económico como una actividad de estructuración de la energía mediante la información*, ¿deberá quedarse el economista a ras de la termodinámica, que no medirá el valor económico de las actividades de la información?

Esta conclusión no nos parece tan evidente, y querríamos demostrar que si el economista está eximido de medir la información tal como ahora se la está evaluando, ello no obedece a que la cuestión caiga fuera de su ámbito; por el contrario,

- existe una relación, que nos corresponderá explicar, entre la «información-mensaje» definida por Shannon y la «información-estructura» que maneja la actividad económica;
- por otro lado, al plasmar dicha «información-estructura» sus efectos en los flujos energéticos, las consecuencias económicas de la misma son apreciables a través de estos flujos.

Si nuestra argumentación se sostiene, entonces el economista –bajo una óptica donde se contemplarían exclusivamente los aspectos cuantitativos de la reproducción^b– podría contentarse con medir los flujos energéticos. Ello se justificaría no por una imposibilidad práctica de proceder de otra manera, sino porque valiéndose de dicha medida captaría los impactos de la información en su campo de estudio.

1. Las consecuencias económicas de la información se expresan a través de los flujos energéticos

Un fenómeno cuya naturaleza no se reduce a la energía puede manifestar de hecho sus repercusiones de índole económica a través de ésta. Un

^b Nos ocuparemos de los aspectos cualitativos de la reproducción en el capítulo siguiente.

ejemplo tomado de la Contabilidad Nacional nos ilustrará sobre el particular.

Sabemos que el flujo de los bienes y servicios que un país produce anualmente –el Producto Nacional– puede entenderse de tres maneras distintas: mediante la producción (suma de valores agregados), mediante el gasto (suma de consumos e inversiones) o mediante las rentas (suma de los pagos percibidos como contraprestación a una operación productiva).

En la tercera lectura, la principal dificultad estriba en separar lo que realmente constituye una contrapartida a una creación de bienes o servicios de lo que no es tal. Si un agente productivo detrae una parte de su renta a favor de otro agente a título de donación, diríamos que no existe una creación de producto, sino una transferencia. Esta donación no se refleja pues en la cálculo del Producto Nacional, so pena de figurar por partida doble.

Dicho problema ha surgido especialmente en los países en vías de desarrollo a propósito de las ofrendas que reciben ciertos personajes –con rasgos de chamanes– a cambio de ciertas intervenciones encaminadas a granjearse los favores divinos. ¿Deberían computarse estas ofrendas?

La respuesta negativa que se ha dado a la pregunta anterior no comporta juicio de valor alguno sobre la eficiencia de los conjuros. En efecto:

- o la intervención del personaje en cuestión –para atraer la lluvia en época de sequía, por ejemplo– no obtiene el resultado pretendido, y los dones recibidos se analizan como una simple transferencia sin contrapartida,
- o la intervención logra su meta. En tal caso, las incidencias económicas se manifestarán en un incremento de las cosechas, lo cual determinará mayores ingresos para los agricultores –ingresos que se registrarán a efectos contables–. Por lo tanto, no procede reflejar las ofrendas al chamán so pena de que se computen por partida doble.

La reacción de los flujos reales permite pues captar la eventual productividad de la intervención.

La observación anterior es extrapolable al campo de la información. Una nueva combinación productiva, un procedimiento de gestión innovador, un método de fabricación novedoso, un estilo de organización distinto, un equipamiento técnico renovado –todos ellos, innovaciones que presentan otros tantos aspectos de la información-estructura–, si entrañan algún tipo de eficacia a escala económica, revelarán sus impactos por la vía de los flujos energéticos^c. Por consiguiente, bastará que nuestro esfuerzo por cuantificar se centre sobre estos últimos.

^c O bien habrá una reducción de los flujos energéticos necesarios para obtener un flujo energético dado, o bien habrá una mayor producción de flujos energéticos para un consumo de energía determinado. En ambos casos pues, crecerá el valor de la relación: *output energético / input energético*.

Con la designación de «flujos energéticos» estamos englobando, por lo tanto, todos los inputs y outputs de la empresa o del aparato productivo medidos en términos energéticos.

Podríamos detenemos en esta consideración, pero quizá convenga profundizar en la naturaleza de las relaciones gracias a las cuales evaluaremos las consecuencias de un fenómeno desde un ámbito aparentemente sin conexión alguna con el mismo.

2. El nexo entre energía e información

Partiremos de la analogía, por lo menos formal, que existe entre la fórmula de Shannon:

$$H = - \sum p(i) \cdot \log_2 p(i)$$

y la fórmula con la que Boltzmann expresa la entropía de un sistema termodinámico:

$$S = - k \sum p(i) \cdot \log_e p(i)$$

Salvando la constante, las dos fórmulas son idénticas^d.

L. Couffignal^e atribuye dicha similitud a un azar carente de significado: «la aplicación de la función de Shannon a la termodinámica y a la informática es... un simple azar en el hallazgo de una misma fórmula matemática».

L. Brillouin⁷, en cambio, resalta la existencia de una relación entre las dos series de fenómenos implicados. El célebre demonio de Maxwell^e no puede intervenir dentro de un sistema a no ser que vea las moléculas cuya localización orienta y no las verá a no ser que utilice energía (es decir, a no ser que cree entropía). Su intervención no va a falsar el segundo principio, sino que se resume en:

- una utilización de neguentropía para obtener información,
- a la que seguirá una utilización de información para generar neguentropía.

Por lo tanto, la información y la energía no son tan estancas la una con respecto a la otra como cabría haber supuesto en un principio^f.

^d La «constante de Boltzmann» k es una constante universal igual a la constante de gases perfectos R dividida por el número de Avogadro; es decir: $1,38 \cdot 10^{-16}$ erg/grados (Atlan).

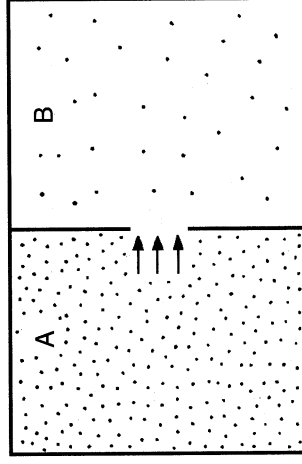
La diferencia en la base del logaritmo (base 2 o base $e = 2,718$, la llamada base de los logaritmos neperianos) carece de importancia, puesto que cabe pasar de un sistema logarítmico a otro mediante una constante.

^e Maxwell, como sabemos, imaginaba un sistema cerrado que contenía un gas y que estaba dividido en dos secciones por un tabique con una zona de paso. Un personaje diminuto, el «demonio», situado dentro del sistema— podía manipular dicha apertura dejando escapar sólo a las moléculas rápidas en una dirección determinada (de A hacia B, por ejemplo) y obligando a las moléculas más lentas a ir en el sentido contrario (de B hacia A en este caso). De este modo se lograría, contraviniendo supuestamente el 2.º principio de la termodinámica, un aumento permanente de la temperatura en la cavidad B y un enfriamiento permanente en la cavidad A.

^f En esta línea, la experiencia de los remolinos de Bernard (cfr. II, Introducción) demuestra que un fenómeno termodinámico (un calentamiento) puede llegar a crear organización (información-estructura).

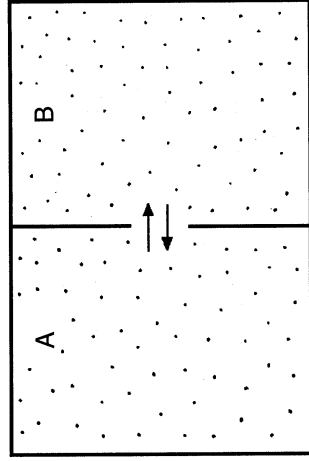
Como vemos, Shannon y Boltzmann manejan unas nociones aparentemente afines a la probabilidad de que tengan lugar distintos sucesos, en el caso de Shannon; a la probabilidad de que se consoliden diferentes microestados en el seno de un macrosistema, en el caso de Boltzmann.

En efecto, un determinado número de magnitudes, tales como N (número de moléculas), V (volumen), T (temperatura), etc..., caracterizan un sistema dado en el plano macroscópico. Pero tales magnitudes son medias establecidas al nivel de la totalidad del sistema y su valor es compatible con varias distribuciones de los elementos que lo configuran: éstos pueden estar distribuidos igual o desigualmente en el seno del sistema. Cada uno de los elementos puede tener la misma temperatura T o ser ésta la media obtenida a partir de los subsistemas alternativamente calientes o fríos, etc... Cada uno de estos conjuntos de características microscópicas se define como uno de los posibles estados del sistema. Ahora bien, los diferentes estados no son equiprobables y en cada uno de ellos puede revertir una probabilidad $p(i)$ a la que alude Boltzmann.



Los más organizados, los más estructurados, son los menos probables. Si repartimos un gas, por ejemplo, entre los dos compartimentos comunicantes —A y B— de un sistema cerrado, de tal modo que el 90% se acumule en la primera cavidad y el 10% restante en la segunda (estructuración, organización), los choques de las moléculas contra el tabique de separación y, por consiguiente, el número de fugas por la zona de paso, serán 9 veces más importantes en el sentido de A hacia B que a la inversa. Pero esta diferencia irá menguando a medida que A se vacíe y B se llene. Cuando el gas esté uniformemente repartido entre las dos secciones, se compensarán las fugas y la situación se mantendrá indefinidamente estacionaria. El sistema se hallará en estado de entropía. Por lo tanto, ésta se relaciona con el juego de las probabilidades: es un puro fenómeno de probabilidad (número desigual de choques en la dirección de A hacia B, comparado con lo que ocu-

re en la dirección contraria) lo que ha alterado la organización inicial del sistema; también es un puro fenómeno de probabilidad (equivalencia de choques en los dos sentidos) lo que sostiene la situación de entropía. Esta tiene lugar y se estabiliza porque corresponde al estado más probable del sistema.



Reseñaremos, porque la observación nos servirá posteriormente, que estamos otra vez ante una situación de equiprobabilidad: las posibilidades de hallar tal o cual molécula en un punto concreto del sistema son estrictamente equivalentes —todas las configuraciones son igualmente posibles en el seno del sistema—; en la situación inicial en cambio, una molécula cualquiera tenía nueve opciones, sobre 10, de hallarse en la cavidad A frente a una opción de hallarse en B.

La entropía, con todo, no se limita a ser un mero fenómeno de probabilidades, pues también atañe a lo energético. Las diferentes formas de la energía, aunque existan trasvases entre unas y otras, están de algún modo jerarquizadas por su grado de estructuración: «toda forma de energía de un nivel superior corresponde a unos movimientos ordenados de grupos de moléculas (energía mecánica), o de cargas eléctricas (energía eléctrica). Dicho de manera muy esquemática: un trozo de materia se desplaza cuando un gran número de moléculas se mueven simultáneamente en la misma dirección. Por el contrario, si moléculas y cargas se desplazan sin orden, al azar y en cualquier dirección, no se producirá ningún movimiento macroscópico (no habrá energía mecánica). No por ello dejan de representar estos desplazamientos una determinada cantidad de energía crítica en el plano macroscópico: precisamente esta energía constituye el calor» (Atlan)⁸.

El segundo principio de la termodinámica —principio de entropía o de degradación de la materia— expresa así el tránsito de lo menos a lo más probable; esto es, de un sistema estructurado a un sistema desorganizado, de las formas «superiores» de la energía hacia su forma degradada, que es el calor. Esta degradación es lo que mide la fórmula de Boltzmann. El movi-

miento en sentido inverso, que caracteriza especialmente la evolución de la materia viva, recibe el apelativo de neguentropía (entropía negativa) por parte de Brillouin.

Cuando la entropía es máxima, no puede obtenerse trabajo mecánico alguno del sistema, aunque éste encierre siempre la misma cantidad de energía.

Como ya sabemos, la «energía libre» en un sistema es la parte de energía disponible para una transformación en trabajo. En situación de entropía equivale a cero. Sólo alcanzará un valor positivo cuando el sistema reciba una estructuración dada. Por ejemplo, no podrá obtenerse trabajo de un sistema que contenga una cantidad de energía térmica que se distribuye al azar: el choque desordenado de moléculas no favorecerá la creación de un movimiento. Si la misma cantidad de energía está estructurada (información-estructura), de tal modo que en el interior del sistema se cuente con una fuente de calor y con un «pozo» de temperatura más baja, se originará un flujo orientado de moléculas de la primera hacia el segundo. De dicho flujo podrá extraerse trabajo, hasta llegar a un techo donde imperará de nuevo el estado final de equilibrio en que consiste la entropía.

¿Quién no percibe entonces la importancia de esta constatación para el tema que estamos analizando?

De hecho *la energía, por sí misma, nada crea*. El sistema en situación de entropía encierra exactamente la misma cantidad de energía que el sistema estructurado. La organización (es decir, la cantidad de información-estructura de la que el sistema está dotado) es lo que le permite liberar un trabajo mecánico. *En otras palabras, la energía supone el medio a través del cual la información-estructura se materializa en un trabajo mecánico.*

Cuanto más estructurado es un sistema, menos probable será, más se distanciará de la situación de entropía y de más cantidad de energía libre dispondrá. *Existe una correlación positiva entre información-estructura y energía libre; la información positiva entre información-estructura y energía libre; la información-estructura y la entropía correlacionan negativamente.*

Reencontramos a Shannon: cuanto más estructurado está un sistema, más se aleja de la situación de equiprobabilidad (que también comparte con la entropía), situación donde la aparición de un suceso nos suministraba el máximo de datos.

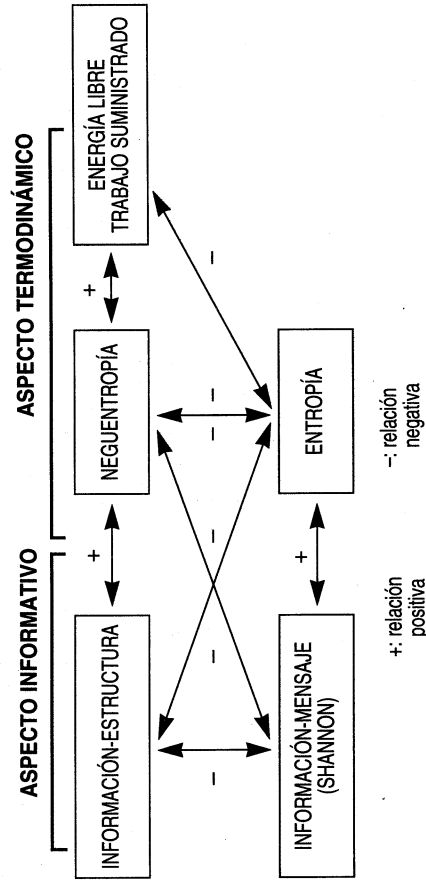
La primera paradoja de la información estriba pues en esta proporcionalidad de signo inverso: a más información-estructura, menos información-mensaje⁸, ya que el sistema se distancia entonces de la situación de equiprobabilidad.

La entropía de un sistema y la información-mensaje que, de poderla valorar, suministraría la realización de uno de sus micro-estados posibles co-

⁸ En la acepción de Shannon.

varían. La similitud apreciada entre las fórmulas de Shannon y Boltzmann no obedece, por lo tanto, al azar^h.

Podemos ya presentar aquí el conjunto de las relaciones que se establecen entre los fenómenos de la información y los fenómenos termodinámicos (cfr. Esquema ref. III-1, 4).



La energía se hace entonces productiva mediante la información.

La segunda paradoja de la información consiste así en lo siguiente: aunque un sistema termodinámico sólo sea productivo gracias a la información que lo estructura, el economista debe medir la energía en vez de la información, porque a través de la primera se manifiesta la productividad de la segunda.

He aquí la respuesta a la pregunta que teníamos planteada: al medir los fenómenos energéticos, el economista mide también las consecuencias económicas de la información.

II. La medida en términos energéticos: el análisis eco-energético

La termodinámica estudia las leyes de la transformación de la energía en trabajo mecánico. Concebida, como su nombre indica, con ocasión del desarrollo de los sistemas térmicos, en un principio se centró en la determinación de los límites del rendimiento de las máquinas de vapor.

^h Cfr. la Nota Complementaria -con la que finaliza nuestra relación: Notas y Referencias-, dedicada a las objeciones que sobre el particular plantea J. Tonnelat (*Thermodynamique et Biologie*, 2 vol., Maloine Ed., 1977 y 1978).

Los conceptos que por entonces se acuñaron -energía libre, energía utilizable, entropía...- permiten definir la cantidad de energía que se requiere para que un sistema pase de un estado a otro. La comparación de esta cantidad con la que se invierte en la práctica evidencia un derroche desde el punto de vista teórico, cuya causa puede imputarse ya a las tecnologías, ya a la organización social. El fenómeno urbano, por ejemplo, acarrea gastos energéticos asociados con los transportes, el almacenamiento de productos alimentarios, la eliminación de residuos... El problema adquiere entonces una dimensión social. Como precisa J. de Rosnay, el objeto del Análisis Eco-Energético (AEE) consiste, concretamente, en «el estudio de la regulación de los flujos de energía en la sociedad»⁹. Configura un sistema de análisis nuevo, que permite calibrar las bases ecológicas de la gestión de los Recursos Naturales en diversos sistemas sociales y económicos¹⁰.

Surgido al filo de 1940 como fruto de la preocupación de los ecólogos por medir los flujos energéticos en los ecosistemas, el AEE, especialmente impulsado por H. T. Odum¹¹, dio lugar a las primeras aplicaciones económicas en la década de los setenta.

A) La productividad energética de los ecosistemas

El conocimiento acerca de cómo se propagan los flujos energéticos en los ecosistemas traza los límites dentro de los cuales se sitúa, en un momento dado, el juego de las actividades económicas.

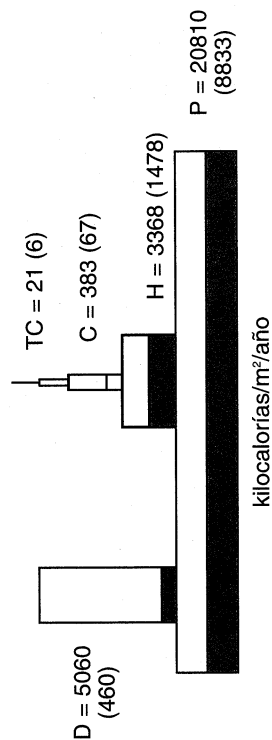
Las investigaciones de los ecólogos han ido afinándose continuamente desde la medida, poco significativa, del número de individuos que componen cada eslabón trófico de un ecosistema a la evaluación estática (en gramos de materia seca o en kilocalorías por unidad de superficie) de la biomasa representada en estos distintos niveles, hasta llegar a la producción y al rendimiento energético de los ecosistemas por unidad de tiempo.

A H. T. Odum le debemos, en particular, el notable progreso de nuevos conocimientos en el tema. Su descripción, ya clásica, de las transferencias de energía en el ecosistema de Silver Springs evidencia cuan acusada pérdida sufren los flujos energéticos al pasar de un nivel trófico al siguiente:

- de 1.700.000 kcal de insolación total por año y metro cuadrado, sólo penetran en el sistema 400.000 kcal,
- de las cuales la fotosíntesis no aprovecha más que 28.010 kcal; una vez utilizadas por las plantas para asegurar su propio funcionamiento, éstas

se reducen a 8.833 kcal. de producción de materia orgánica. Tales cifras miden la productividad primaria del ecosistemaⁱ;

— el primer nivel trófico (herbívoros), al que sólo acceden realmente 3.363 kcal., produce 383; el segundo nivel (carnívoros) suministra a su vez al eslabón siguiente 21 kcal. Se explica por qué se restringe siempre a tres o cuatro el número de niveles de un ecosistema. Asimismo se explica que la representación de las transferencias de los flujos energéticos en el seno de los ecosistemas asuma la forma de una pirámide.



Las cifras remiten a kilocalorías por metro cuadrado y año: las zonas sombreadas y los valores que figuran entre paréntesis reflejan la energía fijada en calidad de biomasa.

P, productores; H, herbívoros; C, carnívoros; TC, peces carnívoros; D, descomponedores (tomado de Odum).

Los esquemas descritos afectan al economista desde una triple perspectiva:

1. *Marcan uno de los límites con los que topa la actividad económica en un momento dado.*

En efecto, el desarrollo de la actividad económica se asienta:

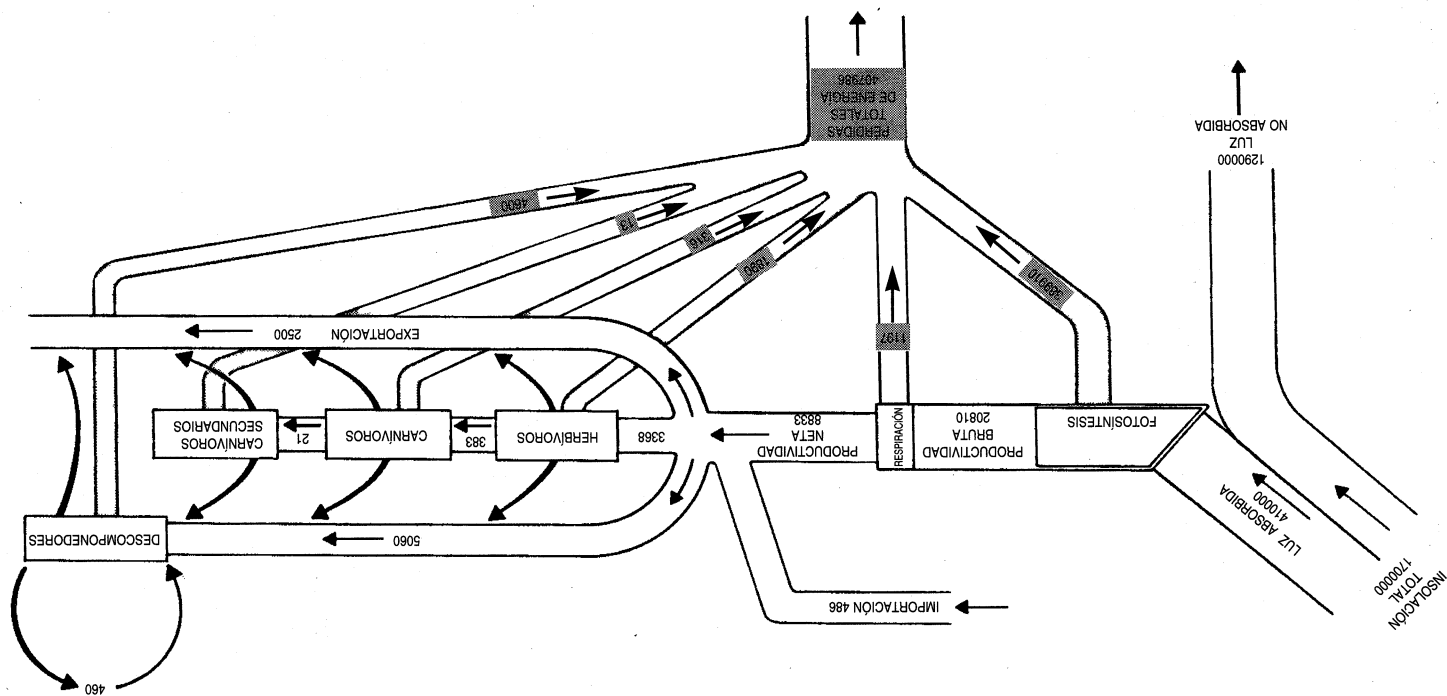
- por un lado, en la explotación de las reservas energéticas enterradas en el subsuelo y cuyos ritmos de renovación, o márgenes para que se agoten, ha de prever a largo plazo;
- por otro lado, en los flujos energéticos (perpetuamente renovables hasta la «extinción» del sol), en cuyo ámbito se inscribe la actividad económica.

Los vegetales son los auténticos «productores» de los flujos energéticos renovables de los que pueden disponer los ecosistemas a los que pertenecen los hombres.

ⁱ «Esta productividad primaria se califica de:

- *bruta*, cuando engloba toda la energía producida bajo la forma de materia orgánica, incluyendo la que se oxida simultáneamente con la respiración a fin de asegurar el funcionamiento de las plantas;
- *netá*, cuando refleja exclusivamente el aumento final de materia orgánica de las plantas (Ph. Dreux, *Précis d'Ecologie*, PUF, 1974, pág. 174).

Transferencias de energía en los Silver Springs, en kcal/m²/año.
En sombreado, pérdidas debidas a la respiración y a través de los vegetales
bajo la forma de calor (Odum, 1957).



Siendo el rendimiento de la fotosíntesis del orden del 1%, las 400.000 kcal. por metro cuadrado y año que penetran en nuestro planeta facilitan, como máximo, la formación de 4.000 kcal. de materia vegetal¹².

La cantidad de biomasa que los niveles tróficos superiores (consumidores primarios o secundarios) dejan a disposición de los hombres también se ve limitada por su rendimiento. Dicho rendimiento, del orden del 10%, suele ser más elevado entre los carnívoros que entre los herbívoros, aunque obviamente se supedita a la fracción de energía que asimilan de hecho los últimos mencionados¹³.

A escala planetaria, la insolación anual total es de $5 \cdot 10^{20}$ kcal, distribuidas entre $1,4 \cdot 10^{20}$ kcal para los continentes y $3,6 \cdot 10^{20}$ kcal para la masa oceánica¹⁴. Los diversos ecosistemas se clasifican en Bosques, Estepas, Cultivos, Desiertos, Antártico y Océanos: conocemos sus respectivas superficies y evaluamos, de forma aproximada, los correspondientes rendimientos fotosintéticos (cfr. cuadro subsiguiente). La productividad primaria total de la biosfera se estima así en $61 \cdot 10^9$ toneladas de masa orgánica, que representan $2,5 \cdot 10^{17}$ kcal.

	Superficie en millones de km ²	Rendimiento de la fotosíntesis (%)	Productividad en t/hal año	Producción total de materia orgánica (en miles de millones de toneladas)
Bosques	40,7	0,33	5	20,4
Estepas	25,7	0,1	1,5	3,8
Cultivos	14,0	0,25	4	5,6
Desiertos	54,9	0,01	0,2	1,1
Antártida	12,7	0	0	0
Océanos	363	0,05	0,8	30
	511,0			60,9

Si comparamos esta cantidad con los $5 \cdot 10^{20}$ kcal de energía bajo forma de luz que recibe la Tierra, podemos estimar en 0,05% la eficacia media de la fotosíntesis a escala planetaria¹⁵. Aun cuando sea muy débil, este rendimiento corresponde a la fijación de una ingente cantidad de materia, pues representa 60 veces el conjunto de las producciones químicas y mineras de los hombres, que suman alrededor de 10^9 toneladas¹⁶.

2. Estos esquemas evidencian además las interdependencias que se crean entre los distintos niveles de transformación de la energía.

La cantidad de energía que entraña un nivel trófico está determinada por la del nivel precedente y subordina la del nivel superior. Así, la biomasa de los vegetales es la más importante a escala planetaria, luego viene la de los herbívoros, después la de los carnívoros, etc... «La biomasa animal en el medio terrestre no supera, por lo general, el 1% de la biomasa vegetal. La relación biomasa vegetal / biomasa de los herbívoros ha variado de 10^2 en las estepas y desiertos a 10^3 en las estepas con vegetación, a 10^4 en la tundra y 10^5 en la taiga, los bosques de coníferas y los bosques de árboles caducifolios. La relación biomasa de los herbívoros/ biomasa de los carnívoros se sitúa invariablemente en torno a 10^3 » (Dajoz)¹⁷.

Las pérdidas que van acusándose a lo largo de las cadenas alimentarias impulsan a las poblaciones con bajos niveles de renta a aprovechar al máximo la energía transmitida por los ecosistemas: por ello, en lo que está a su alcance, «truncan» un escalón de la pirámide. En efecto, el consumo de carne, que no permite recuperar más allá del 10% de la energía captada por los vegetales, supone un lujo energético del que sólo disfrutarán quienes cuenten con unos excedentes significativos. El trigo, el arroz, el yute y el ñame constituyen así la dieta básica entre los pueblos más desfavorecidos de la tierra. Ehrlich nos explica¹⁸ que «se requieren unos 100 quintales de trigo para producir 1 tonelada de ganado que, a su vez, podrá destinarse a la producción de 100 kg de seres humanos.

Al hacer que el hombre descienda el equivalente a un eslabón de la cadena alimentaria, podrá utilizarse directamente una cantidad de energía diez veces superior, pues los 100 quintales de trigo empleados en la producción de 1 tonelada de ganado se asignarán entonces a la producción de 1 tonelada de seres humanos¹. A esta pauta se acogen los países subdesarrollados, quienes así se adaptan instintivamente a las leyes de los flujos energéticos.

Por lo tanto, se entiende que cualquier daño infligido a cualquier eslabón de la pirámide —por ejemplo, la deforestación ligada al desarrollo urbano o industrial— repercute sobre el conjunto y, a la postre, determine a cuanta población humana puede ofrecerle sustento el ecosistema terrestre.

3. Por último, estos esquemas dan pie a evaluar cómo inciden las políticas orientadas a suavizar la restricción que, en un momento dado, impone la finitud de los flujos energéticos susceptibles de transformación a manos del hombre.

¹ Sólo se trata de un ejemplo teórico. En efecto, no olvidemos que la alimentación humana es algo más que una simple cuestión de calorías: también tiene su importancia la composición del ración en la dieta (especialmente, el número de proteínas de origen vegetal o animal que ésta comporta).

Así sucedió en el Neolítico, cuando las poblaciones que se asentaron en un territorio fijo se dedicaron a utilizar sistemáticamente el suelo como un transformador de energía. Lo mismo fue sucediendo cada vez que se domaron nuevas fuerzas: animales, hidráulica y eólica, fósiles o físico-químicas. Cabe esperar que siga ocurriendo igual en el futuro, según vayan controlándose la energía solar, geotérmica, nuclear...

Cuando algunos biólogos proponen, por ejemplo, que se mejore la captación de la energía solar mediante la selección de plantas con un alto rendimiento fotosintético (caña de azúcar, jacintos de agua...), o cuando otros biólogos aprovechan la propia fotosíntesis para introducir al inicio de la cadena trófica, en un medio acuático, una alimentación enriquecida, se está intentando ampliar un flujo de entrada destinado a propagarse en el conjunto de las actividades humanas.

Considerada diacrónicamente, la restricción que viene dictada por la limitación de los flujos energéticos no es tan drástica como se habría supuesto. Aun cuando modificar la radiación solar quede fuera de su alcance, los hombres aprenden a recuperar, en provecho propio, una parte de las cuantiosas pérdidas sufridas por dicha energía. No obstante, no habrá lugar a calibrar verdaderamente las implicaciones económicas de las innovaciones gracias a las cuales se logra esta mejora si no es conociendo la amplitud y los modos de propagarse los flujos en los que tales innovaciones revierten.

B) Los balances energéticos de la actividad económica

No es nueva la idea de aplicar a las actividades económicas un sistema de medidas expresado en unidades energéticas. En una carta a Marx fechada el 19 de diciembre de 1882, Engels destaca con entusiasmo los trabajos de un tal Podolinski^k: su «trascendental descubrimiento», en opinión de Engels, consiste en demostrar que «el trabajo humano es capaz de retener y prolongar la acción del sol, en la superficie terrestre, más de lo que ésta duraría de no mediar dicho trabajo». No obstante, Engels censura a Podolinski por pretender algo que él tacha de «absolutamente imposible», como es «querer expresar unas relaciones económicas en unidades de medida propias de la física»²¹.

Muchos estudios contemporáneos²², fruto de los imparables progresos de la termodinámica desde la época en que escribía Engels, han dejado patente que el escepticismo de éste era infundado. Aceptamos su apreciación

^k Sobre los trabajos de Podolinski, remitimos al estudio de J. Martínez Alier y J. M. Naredo: «La noción de «fuerzas productivas» y la cuestión de la energía», *Cuadernos de Ruedo Ibérico*, n.º 63-66, 1978 (págs. 71-90).

de que se trataba de una tarea efectivamente ardua y arriesgada, pero no estaba en lo cierto al sostener que equivalía a una pretensión «intrínsecamente imposible»²³.

1. Los problemas metodológicos.

Un informe de 1977 subraya tanto las dificultades de la tarea como las precauciones que deben tomarse para llevarla a buen término²⁴. Se señala, en efecto:

a) *la insuficiencia de las estadísticas*: la mayoría de los cálculos disponibles se limitan a reflejar la energía directa; es decir, el carburante que consumen los motores, la electricidad que se gasta, etc... No se contemplan el conjunto de las energías invertidas en la producción de los factores (vehículos, abonos, materias primas...), cuya evaluación convendría realizar además remontando, una por una, las fases de su fabricación. Prácticamente por las mismas fechas, otros autores (Stephen Berry, Pimentel, Heerden...) adoptaron el método consistente en combinar el marco ofrecido por las matrices input-output de Leontief con la evaluación de los flujos energéticos en los procesos industriales, tales como los determinan los ingenieros químicos. Se obtienen así unas matrices en cuyas casillas los coeficientes técnicos que manejan los economistas quedan reemplazados por los flujos energéticos (generalmente expresados en kilocalorías) recibidos o transmitidos entre los sectores industriales.

b) *El desglose y el nivel de agregación de los sistemas*. Los espacios de los ecosistemas sociales que definen un conjunto de interacciones mediante las cuales logran su coherencia no suelen coincidir con los espacios de las unidades económicas o administrativas.

Por lo tanto, habrá que diferenciar los sistemas que, en un mismo sector, presentan caracteres hasta tal punto discrepantes que no podemos representarlos con medias significativas. Así ocurre, por ejemplo, con los modernos sistemas de monocultivo frente a los tradicionales sistemas de policultivo: sus estructuras energéticas difieren tanto que ninguna media nacional podrá representarlos de forma significativa.

La reagrupación de lo que es compatible cabe plantearla en diferentes niveles de agregación, de los que dependerán la naturaleza de los flujos por medirse y el alcance de las conclusiones a las que se llegará. Así, los trabajos de Pimentel de los que nos ocuparemos más adelante, centrados en el cultivo del maíz, evidencian un decrecimiento significativo de los rendimientos energéticos a nivel de la explotación, pero dejan de lado, por imprevistos experimentales, todo un abanico de fenómenos ajenos a ésta: los gastos energéticos ligados a la distribución de los productos en el mercado, a los cambios en los hábitos alimentarios de la población, a las nuevas actividades de los agricultores orillados por el progreso técnico, etc... El estudio de Steinhart en cambio, que investiga el sistema agro-alimentario glo-

bal en los Estados Unidos, los toma en cuenta. Aunque proporcione datos de menor alcance a escala de las unidades de producción, su estudio refleja unas mutaciones a nivel nacional que no entraban en el campo de análisis del trabajo anterior.

Finalmente, de acuerdo con la realidad ecológica, surge la alternativa de insertar a los hombres en los ecosistemas o, por el contrario, considerarlos como unos usuarios «externos» de los productos formados por un conjunto de factores que movilizan mediante su trabajo. En el primer caso, habrá que incluir los aportes y los gastos energéticos asociados con los esfuerzos productivos y con los consumos de toda la población. En el segundo caso, bastará con el trabajo directo desempeñado por la población activa. Esta última solución es la que más se prodiga.

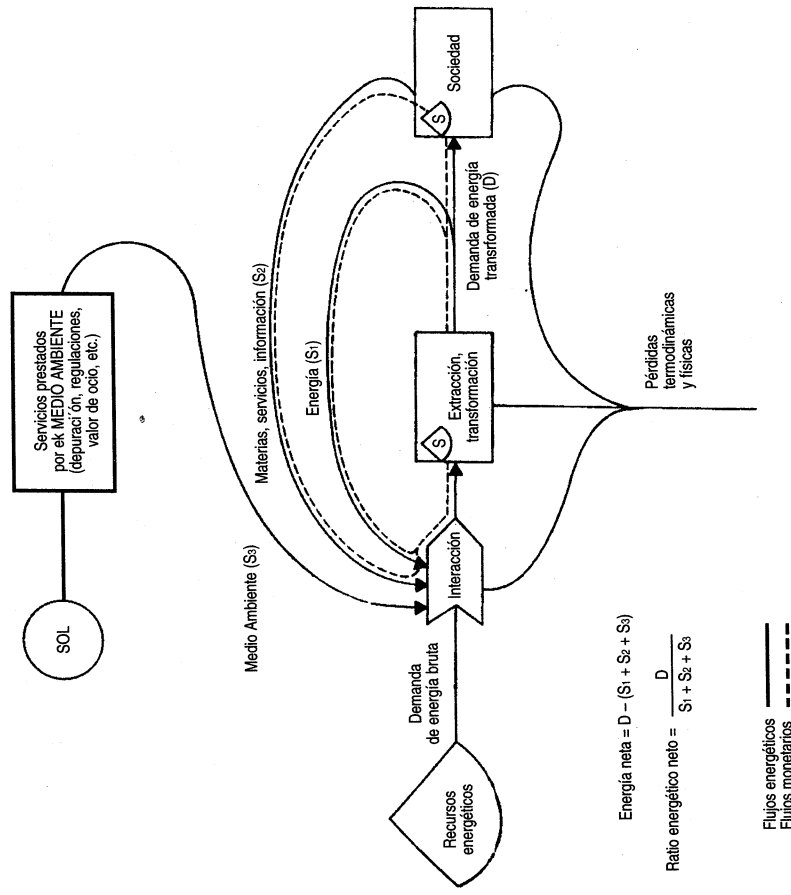
c) Las diferentes formas de la energía.

Si la kilocaloría es... la kilocaloría, no es irrelevante que nos detengamos en su fuente de procedencia.

La utilización de un flujo renovable (energía solar y derivadas) no comporta el mismo alcance que la de un stock finito (energías fósiles). El hecho de medir la primera fuente adquiere un sentido concreto en el cálculo de los rendimientos fotosintéticos de los ecosistemas. Ahora bien, una vez que se transfieren a los sistemas de producción «con el mismo rango que la energía humana, la tracción animal y la energía fósil, éstas últimas se quedan reducidas, en los balances, a la dimensión de un ruido de fondo que apenas cuenta»²⁵. La toma en consideración de los recursos que se renuevan automáticamente difumina entonces la importancia aparente de los que se agotan y deben gestionarse. No obstante, algunas modalidades de los renovables no se libran de la acción del hombre: el patrimonio forestal, cualquier recurso viviente, se rigen por unos ritmos naturales propios de renovación y crecimiento. No hay que confundir, pues, lo que suponiendo una deducción sobre la productividad neta no compromete la reproducción del recurso con aquello que, suponiendo una destrucción de la biomasa, terminará por entrafñar su desaparición.

Por último, hay que contemplar el estado de concentración o de dispersión en el que se presenta la energía. «La concentración del petróleo multiplica por 2.000 la de la energía solar, por 40 la de la energía eólica, por 20 la de la energía de la fotosíntesis contenida en el azúcar... La energía eléctrica es 3,5 veces más concentrada que la del petróleo» (J. de Rosnay)²⁶.

A cantidades iguales expresadas por el mismo número de kilocalorías, dos fuentes de energía con una concentración distinta no tendrán la misma productividad neta en un trabajo mecánico. La concentración de la forma más dispersa requerirá que se arbitren procedimientos, por lo tanto un gasto energético que habrá que detraer de la producción aparente. Los instrumentos de medida utilizados deben atender esta circunstancia.



Relación funcional entre energía neta, demanda energética y subsidio energético (tomado de M. W. Gilliland: «Energy Analysis and Public Policy», 26 sept. 1975, vol. 189, n.º 4208).

d) La elección de los indicadores.

Las modalidades de cómputo y los ratios utilizados deben pues variar en función de la realidad que nos proponemos expresar. Se distingue fundamentalmente:

- el Consumo Energético Bruto («Gross Energy Requirement»: GER), o cantidad total de energía directa e indirecta absorbida por el proceso de fabricación de un bien o de un servicio²⁷;
- el Consumo Energético Neto («Net Energy Requirement»: NER), o cantidad de energía absorbida, teniendo presente que el producto acabado puede poseer, a su vez, una capacidad determinada para restituir la energía que conserva²⁸; en tal caso, ésta última se detrae de la energía absorbida por el proceso de fabricación;

— la Cantidad de Energía Requerida para producir Energía («Energy Requirement for Energy»: ERE), que se calcula mediante la fórmula: energía absorbida - energía restituida / energía restituida.

Si la totalidad de la energía absorbida pudiera ser recuperada, entonces es obvio que este cociente sería igual a cero; cuanto más se eleva, más cantidad de energía se requerirá para que 1 kilocaloría quede a disposición de los hombres. Por ejemplo, si se precisan 4 kWh para poner 1 kWh de electricidad a disposición del consumidor final (29), el cociente se fija así:

$$4 - 1 / 1 = 3.$$

La ERE constituye sin duda el indicador que mejor informa, el «más espectacular» del Análisis Eco-energético en palabras de Slesser.

2. Las aplicaciones

La aplicación de los anteriores instrumentos en los sectores agrícola e industrial, al dejar al descubierto algunos fenómenos que los indicadores tradicionales del mercado no reflejan, ilustra significativamente el comportamiento de las economías actuales.

Ahora bien, por causas de carácter termodinámico, los criterios de evaluación no podrían ser los mismos en ambos sectores.

— En el caso de la agricultura, en efecto, el concepto de *output* energético es específico: la kilocaloría contenida en el producto es exactamente lo que consume el destinatario final. Por consiguiente, no resulta extemporáneo relacionar este *output* energético con la suma de los *inputs*, a su vez expresados en energía necesaria para la producción. Como el concurso de la naturaleza se considera gratuito, suelen contabilizarse únicamente los *inputs* debidos a la actividad de los hombres. Por lo tanto, podrán constatarse rendimientos superiores a 1 sin infringir la ley de Carnot, según la cual es imposible que se logren rendimientos de este tipo: sencillamente, no se han contabilizado parte de los *inputs*.

— En el caso de la industria, no es la energía contenida en la materia que configura al objeto, sino el servicio que éste presta lo que representa el *output* deseado por el consumidor. Desde tal perspectiva, no interesa el contenido energético de la materia de la que está hecho el automóvil. Por lo demás, la naturaleza tampoco interviene para aumentar graciosamente la masa de materia en la que se fija la energía. Por consiguiente, el rendimiento energético de un proceso industrial, como el de cualquier proceso de transformación, es inferior a la unidad. La productividad energética en sentido estricto (la relación de un *output* y un *input*) se vacía de contenido. En cambio, la comparación de la energía utilizada para fabricar un objeto con la cantidad mínima que hubiera sido precisa en condiciones ideales (óptimo de Carnot, donde interviene la diferencia de

temperatura entre la «fuente caliente» y el «pozo frío» entre los que circula el flujo energético) proporciona una información útil sobre el rendimiento alcanzado por el sistema productivo.

a) *En el sector agrícola*, el hecho más destacado desde la finalización de la II Guerra consistió en un incremento espectacular de las producciones, lo cual permitió que prosiguiera la expansión demográfica mundial³⁰. El progreso técnico supuestamente contradice, de forma indefinida, la ley de los rendimientos decrecientes, relegada así a la categoría de una tendencia, cuyo juego estaría en función de un requisito: «en igualdad de condiciones, además», que nunca se cumple:

— la productividad por trabajador, tomando como base 1 el Tercer Mundo, se elevaba, según un informe de 1977, a 6 en la URSS, a 14 en Europa y a 80 en los Estados Unidos³¹;

— por unidad de superficie, el rendimiento mundial medio en trigo era de 11,9 quintales/ha en 1961, elevándose a 16,1 quintales/ha en 1974³², y los rendimientos alcanzados en algunos puntos del globo (en Francia, 47 quintales/ha) permitieron vislumbrar unas perspectivas halagüeñas para los años subsiguientes.

En 1985-86, el rendimiento medio por hectárea de trigo en Francia se evaluaba en 72 quintales. Los rendimientos de 100 quintales/ha no constituían un hecho excepcional. Algunos expertos apuntan hoy a la perspectiva de 300 quintales/ha como un objetivo alcanzable. (E. Pisani: *Pour une agriculture marchande et ménagère*, ed. de l'Aube, 1994).

«El mundo, proclamaba en 1975 R. Mac Namara, puede aumentar su producción de alimentos en unas proporciones suficientes como para equilibrar el crecimiento demográfico, en los límites de nuestras posibilidades de mejorar el nivel de vida. Afirmando que el mundo puede conseguirlo»³³.

Ahora bien, los indicadores tradicionales sobre los que se fundamentaría este optimismo encubren en qué condiciones se logran tales resultados:

- con la sustitución masiva de los abonos naturales por los fertilizantes químicos y con una escalada en la utilización de los mismos³⁴;
- con el constante abuso de los pesticidas³⁵;
- con la sustitución de la energía que anteriormente suministraban el trabajo humano y animal, o los elementos naturales, por la energía extraída de los combustibles fósiles³⁶.

Unos procedimientos que tienen el denominador común de ser grandes consumidores de energía fósil —cara y no renovable— han venido a desbancar a una energía renovable, casi siempre gratuita y captada de un flujo permanente.

M. Slesser³⁷ designa con el apelativo de *subsidio energético* la cantidad de energía, expresada en kcal/ha, que se suma por el aporte del conjunto de