

Capítulo II.1 (levemente corregido) de Francisco Fernández Buey y Jorge Riechmann: *Ni tribunales. Ideas y materiales para un programa ecosocialista*, editorial Siglo XXI, Madrid 1996.

Jorge Riechmann

POR QUÉ LOS MUERTOS NO RESUCITAN Y EL RECICLADO PERFECTO ES IMPOSIBLE. ECOLOGÍA, ECONOMÍA Y TERMODINÁMICA

"La creencia en un progreso general se basa en el antojadizo sueño de que cabe conseguir algo a cambio de nada. La suposición subyacente es que las ganancias obtenidas en un campo no hay que pagarlas con pérdidas en otros."

Aldous Huxley

"Cada vez que producimos un Cadillac destruimos de modo irrevocable una cantidad de baja entropía que de otra manera se podría utilizar para producir un arado o una pala. En otras palabras, cada vez que producimos un Cadillac lo hacemos a costa de reducir el número de vidas humanas futuras."

Nicholas Georgescu-Roegen

"Por la ley de la entropía/ lo malo se hace peor,/ lo peor, peor todavía."

Jesús López Pacheco

Consideraciones iniciales

Si les pidieran a ustedes que señalaran cuál es la divisa fuerte con la que podrían ir a cualquier lugar, efectuar cualquier pago en su vida... ¿Qué responderían? ¿El euro? ¿El dólar? ¿El yuan? ¿Oro al peso, quizá?

Quizá les sorprenda saber que la verdadera divisa fuerte está cifrada en un concepto que quizá ni siquiera hayan oído hablar nunca: *neguentropía*.¹ Pero si ha sido así, al menos sí que les suena la otra palabra que contiene en su interior: *entropía*. ¿Qué tiene que ver esta noción termodinámica con la economía y con la ecología?

¹ Fue Erwin Schrödinger, en sus famosas conferencias de Dublín de febrero de 1943 (que dieron pie a su libro *¿Qué es la vida?*), quien introdujo la noción de *entropía negativa* (o ñeguentropíaö) para explicar la ñparadoja de Schrödingerö: ñ¿Cómo consigue un organismo concentrar una corriente de orden en sí mismo y escapar así a la desorganización del caos atómico prescrito por la segunda ley de la termodinámica?ö

Cabe señalar que una de las características de la ciencia económica convencional ha venido siendo una irresponsable despreocupación por el sustrato material, biofísico, sobre el que se construyen las economías humanas. Buena muestra de ello son dos creencias que, a modo de incuestionados axiomas, subyacen al entero edificio de la *mainstream economics*: dar por sentado que existe una cantidad infinita de recursos naturales, y la creencia en que estos son indefinidamente sustituibles entre sí, y con el capital y el trabajo humanos. Ninguna de ambas creencias tiene fundamento en la realidad. La primera viene a ser la quintaesencia de lo que Kenneth E. Boulding bautizó como "la economía del cowboy"; habría que rogar a nuestros economistas que se quitasen el sombrero de ala ancha, pues dificulta bastante la visión, y tomasen nota de que la expansión hacia el salvaje Oeste hace ya tiempo que topó con la barrera del Océano Pacífico. En cuanto a la segunda creencia --la sustituibilidad indefinida--, es tan razonable como la actitud de aquel señor del chiste que, al ver que con cierta estufa sus gastos en combustible se reducían a la mitad, se compró otra estufa del mismo tipo convencido de que con dos ¿podría calentar la casa sin combustible alguno!

Pues bien, la crisis ecológico-social ha puesto de manifiesto que semejante despreocupación por el sustrato biofísico sobre el que se apoyan las economías industriales, y la atención prioritaria a los flujos monetarios y el intercambio mercantil, conduce finalmente a tener que pagar un precio trágico (en devastación ambiental, sufrimiento humano y aniquilación de vida).

Desde hace decenios, y con intensidad renovada en los dos últimos, se consagran muchos esfuerzos a una reformulación de la ciencia económica (algunos hablan de un "cambio de paradigma") que sea capaz de dar cuenta de lo que Wendell Berry llamó la Gran Economía: la "economía" de la biosfera, la economía que sostiene la red total de la vida y todo lo que depende de la buena salud de la Tierra y sus ecosistemas². Una parte importante de estos esfuerzos se centran en

² El lector o lectora interesados por los avances hacia esta *economía ecológica* pueden consultar las dos siguientes recopilaciones de artículos: Federico Aguilera Klink/ Vicent Alcántara (comps.), *De la economía ambiental a la economía ecológica* (Icaria, Barcelona 1994); José Manuel Naredo/ Fernando Parra (comps.), *Hacia una ciencia de los recursos naturales* (Siglo XXI, Madrid 1993). Una excelente introducción sistemática a estas cuestiones es *La economía verde* de Michael Jacobs (Icaria, Barcelona 1996). Los apresurados pueden recurrir al breve ensayo de Aguilera Klink "Economía y medio ambiente, un estado de la cuestión" (Fundación Argentaria, Madrid 1996). Para el aspecto histórico la obra de referencia es *La ecología y la economía* de Joan Martínez Alier y Klaus Schlüpmann (FCE, Méjico 1991). Los clásicos de la economía ecológica comenzaron a

esclarecer lo que ciencias naturales como la física y la biología tienen que aportar a la ciencia económica: por ejemplo, conocimientos sobre los límites con que topan los sistemas económicos a causa de su inserción en sistemas biofísicos que contienen a los primeros. Así, entre los fenómenos y nociones biofísicas esenciales para la comprensión de aquella Gran Economía se encuentran:

1. *las leyes de la termodinámica*, en especial la segunda (conocida como *principio de entropía*), o lo que es lo mismo: las constricciones que los principios termodinámicos imponen sobre los procesos sociales;
2. *la fotosíntesis*, como actividad bioquímica de las plantas verdes que emplean la energía solar para transformar agua y dióxido de carbono en hidratos de carbono, proceso que constituye la base de toda la productividad de los sistemas naturales y en última instancia sustenta toda la vida de nuestro planeta;
3. los fenómenos de *crecimiento exponencial dentro de los sistemas cerrados*, con sus típicas pautas de extralimitación seguida de colapso, tal y como son analizados, por ejemplo, en los "informes Meadows" (*Los límites del crecimiento*, 1972; *Más allá de los límites del crecimiento*, 1992; *Los límites del crecimiento ótreinta años después*, 2004)³;
4. los *principios de sustentabilidad ecológica*, tal y como han sido formulados por Herman E. Daly y otros autores.

LA FOTOSÍNTESIS

En el proceso bioquímico conocido como fotosíntesis, las moléculas de clorofila situadas en las plantas captan la energía solar y sintetizan hidratos de carbono a partir del dióxido de carbono atmosférico y el agua y los nutrientes que obtienen del suelo (nitrógeno y fósforo principalmente). En tierra, el promedio de la producción primaria vegetal es de unos 750 grs. de materia orgánica seca por metro cuadrado y año; en el océano, la tercera parte aproximadamente. El límite superior de producción de cualquier ecosistema (ya sea natural o cultivado por el hombre) es de unos 25 gramos por m² y día.

Las plantas sólo aprovechan directamente el 0'2% de la energía solar incidente sobre el planeta; pero más del 25% se consume para evaporar el agua y causar la lluvia, influyendo así también sobre la vida vegetal. Como la capacidad fotosintética del planeta es finita, la pérdida de ésta (por degradación de los ecosistemas) acaba afectando a los sistemas humanos contruidos sobre esos ecosistemas.

publicarse en 1995 en cuidadas ediciones, dentro de la colección ECONOMÍA Y NATURALEZA, dirigida por José Manuel Naredo (primeros volúmenes en Fundación Argentaria/ distr. Visor).

³ Donella H. Meadows/ Dennis L. Meadows/ Jorgen Randers/ William W. Behrens: *Los límites del crecimiento* (Fondo de Cultura Económica, Méjico 1972). Donella H. Meadows/ Dennis L. Meadows/ Jorgen Randers: *Más allá de los límites del crecimiento* (El País/ Aguilar, Madrid 1992). Donella H. Meadows/ Dennis L. Meadows/ Jorgen Randers: *Los límites del crecimiento -30 años después* (Galaxia Gutenberg/ Círculo de Lectores, Barcelona 2006).

La energía solar entra en las cadenas alimentarias de un ecosistema (las redes tróficas) por medio de la fotosíntesis, y fluye a través de los distintos niveles tróficos. Al pasar por cada uno de ellos sólo una pequeña parte (aproximadamente el 10%) se invierte en producción neta, crecimiento y reproducción; la mayor parte de la energía se disipa en la respiración (energía usada en realizar trabajo o perdida como calor) y en las cadenas tróficas laterales (organismos comensales, simbiotes, parásitos...). Como la energía disponible va disminuyendo, el número de niveles tróficos posibles es limitado: no supera los cinco o seis en los casos más complejos.

Esta división de la biomasa por diez en cada paso de un nivel trófico a otro tiene una consecuencia práctica importante para nosotros: la agricultura rinde unas diez veces más por unidad de superficie captadora de la energía solar que la ganadería. Un kilo de carne (biomasa animal) procede, en promedio, de diez kilos de biomasa vegetal. Por ello, los sistemas agropecuarios sustentables incluyen ganadería extensiva (los rumiantes pueden digerir la celulosa de los pastizales, mientras que los estómagos humanos no pueden) pero no animales alimentados con productos agrícolas como los cereales, que los humanos podemos aprovechar directamente.

El recuadro siguiente sintetiza otras nociones biofísicas importantes para la ecologización de la ciencia económica a las que, por razones de espacio, no podremos apenas prestar atención aquí.

LAS "LEYES" BÁSICAS DE LA ECOLOGÍA SEGUN BARRY COMMONER Y NICHOLAS GEORGESCU-ROEGEN

1. Todo está relacionado con todo lo demás. La biosfera es una compleja red, en la cual cada una de las partes que la componen se halla vinculada con las otras por una tupida malla de interrelaciones.
2. Todas las cosas han de ir a parar a alguna parte. Todo ecosistema puede concebirse como la superposición de dos ciclos, el de la materia y el de la energía. El primero es más o menos cerrado; el segundo tiene características diferentes porque la energía se degrada y no es recuperable.
3. La naturaleza es la más sabia ("nature knows better"). Su configuración actual refleja más de cuatro mil millones de años de evolución por "ensayo y error": por ello los seres vivos y la composición química de la biosfera reflejan restricciones que limitan severamente su rango de variación.
4. En todos los procesos dentro de la biosfera, al final tendremos un déficit en términos de materia-energía. (Esta cuarta "ley" no es sino una formulación del principio de entropía, al que vamos a consagrar nuestra atención en este texto.)

Creo que nos hace falta desarrollar masivamente dos formas de ver la realidad de crucial importancia para entender y dar respuesta a la crisis ecológica global. Podemos llamarlos el *punto de vista entrópico* y el *punto de vista sistémico*. Sobre las implicaciones ecológico-económicas de la termodinámica --y en especial del principio de entropía-- hablaremos en este texto; en las

implicaciones de la teoría de sistemas, por razones de espacio, no podremos adentrarnos ahora⁴.

[cf también mi ppt de introducción al punto de vista sistémico]

Importancia de la termodinámica

Todos los fenómenos de la vida (y en particular la vida de los seres humanos y sus sociedades) implican cambios en la materia, y transformaciones de unas formas de energía en otras formas. Los juicios que podamos hacer sobre la viabilidad ecológica de cualquier sistema económico (su sustentabilidad) se referirán, en última instancia, a los intercambios de materia y energía de ese sistema con su entorno biofísico (vale decir a su *metabolismo socio-natural*). De ahí que, de entrada, quepa esperar que el saber sobre la materia-energía y sus transformaciones tenga una gran relevancia para la vida de los seres humanos y el buen funcionamiento de sus sociedades.

La *termodinámica* es la parte de la física que estudia estas transformaciones de la materia-energía (en particular, y desde sus inicios, las relaciones entre energía térmica y trabajo), y constituye uno de los mayores logros intelectuales del siglo XIX⁵. Su esencia está contenida en dos principios conocidos como *las dos leyes de la termodinámica*. Ambas podríamos resumirlas en una sola frase: *el contenido total de materia-energía en un sistema aislado* (probablemente el Universo en su conjunto lo sea⁶) *es constante y la entropía total aumenta*

⁴ La lectora o el lector interesado podrán zambullirse en la materia con un libro de los que probablemente quedarán como clásicos de las ciencias sociales de nuestro siglo, ya citado en la nota anterior. Me refiero a *Más allá de los límites del crecimiento* de Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows y Jorgen Randers, la actualización del famoso informe al Club de Roma *The Limits of Growth*. También se puede acudir a la introducción clásica a la teoría de sistemas, que es la *Teoría general de los sistemas* de Ludwig von Bertalanffy (FCE, Méjico 1976; la edición original inglesa es de 1968, pero este libro reelabora escritos más antiguos, alguno de los cuales se publicó en fecha tan temprana como 1940). Para una aplicación altamente subjetiva y original de la teoría de sistemas a la reflexión sobre las utopías sociales, véase Yona Friedmann, *Utopies réalisables* (Union Générale d'Éditions, París 1975; hay trad. castellana en Ed. Gustavo Gili).

⁵ Su origen se halla en la monografía del ingeniero francés Sadi Carnot *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824); los físicos que la configuraron decisivamente fueron J.P. Joule, William Thomson (Lord Kelvin), Rudolf Clausius y Ludwig Boltzmann. Una buena introducción general a la termodinámica es *La segunda ley* de P.W. Atkins (Prensa Científica --colección Biblioteca Scientific American--, Barcelona 1992).

⁶ En los *sistemas aislados* no se da ningún intercambio con el entorno. En cambio, solemos hablar de *sistemas cerrados* cuando se intercambia energía (pero no materia) con su entorno: el planeta Tierra es cerrado en este sentido (con la excepción de pequeñas cantidades de materia que llegan en forma de meteoritos). Por último, los *sistemas abiertos* intercambian tanto materia como energía con su entorno, y por eso son difíciles de estudiar: intervienen en ellos un gran número de variables (todos los organismos y ecosistemas son sistemas termodinámicos abiertos, por ejemplo). La termodinámica clásica (la del siglo XIX) se centró en el estudio de los sistemas aislados (los más simples), pero en el siglo XX abordó el estudio de los sistemas abiertos. Se

constantemente. Grandes mentes de nuestro siglo fueron conscientes de la suprema importancia de este enunciado. A.S. Eddington lo llamó "la ley básica y superior de la naturaleza"; Einstein señaló que la termodinámica era la única teoría física universal que seguramente nunca se vería refutada; C.P. Snow comparó la ignorancia de la segunda ley con lo que sería --en el terreno de las letras-- no haber leído nunca el Quijote, o no saber quién fue Shakespeare.

Con la entropía hemos topado: un concepto central donde los haya para comprender nuestro mundo, y en particular para comprender las complejas relaciones entre las sociedades humanas y su medio natural. Enseguida explicaré de qué se trata. Pero quiero adelantar ahora que un mundo sin entropía, un mundo en el que no rigiese la segunda ley de la termodinámica, sería en verdad un mundo muy singular. En él el fruto podría retroceder hasta la flor, los muertos resucitarían, la gasolina quemada podría recuperarse, o la copa de cristal rota se reconstruiría en nuestra mano⁷. En ese mundo no existiría la asimetría ni la irreversibilidad: el tiempo, por así decirlo, sería capaz de retroceder sobre sí mismo.

¿Por qué nuestro mundo real no se parece a este fantástico mundo que acabo de evocar? Si llegamos a comprenderlo, obtendremos al mismo tiempo algunos conocimientos fundamentales sobre la interacción entre economía y ecología, y sobre las posibles soluciones a la crisis ecológica global.

La primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica se conoce también como *ley de conservación de la energía* (o si se quiere: de la materia-energía). Dice que *la energía* (la materia-energía) *no se crea ni se destruye, sólo se transforma de unas formas a otras*. Si cierta cantidad de energía desaparece de alguna forma o de algún lugar, la misma cantidad de energía ha de reaparecer en otra forma o en

formó así una nueva (sub)disciplina llamada *termodinámica de sistemas abiertos*, o *termodinámica del no-equilibrio*, sobre la que volveremos más abajo.

⁷ Como han escrito los Ehrlich: "Si la ley de la entropía no se mantuviese, el mundo sería en verdad interesante: los cubos de hielo tendrían tantas posibilidades de aparecer espontáneamente en un martini como de derretirse en él, separar la sal mezclada con el azúcar sería tan fácil como mezclarlos, y los gatos atropellados en la carretera se levantarían y partirían con su elegante paso". Paul R. Ehrlich y Anne H. Ehrlich: "La Humanidad en la encrucijada", en Herman E. Daly: *Economía, ecología y ética* (FCE, Méjico 1989), p. 52.

otro lugar⁸. Todas las cosas han de ir a parar a alguna parte, como rezaba la segunda "ley" de la ecología de Commoner.

Nótese que esto implica que *los conceptos de "consumo energético", o de "producción energética", son erróneos*: no producimos energía, sino que la aprovechamos; no la consumimos, sino que la utilizamos. No somos capaces de crearla ni de destruirla.

Esto, de entrada, tiene ya una importante consecuencia económico-ecológica: *cada empleo de una unidad de recursos naturales produce una unidad de desperdicios y residuos*. Nada se pierde en el proceso productivo, simplemente adquiere otra forma. No se puede obtener algo a cambio de nada (o, como dice nuestro refrán, "el que algo quiere, algo le cuesta"), ni tampoco podemos producir sin generar residuos. Ello es una imposibilidad física. Como han escrito Federico Aguilera Klink y Vicent Alcántara, "a pesar de que esta ley se usa para justificar una visión mecánica e irreal de una economía que no agota recursos, la realidad es que permite echar por tierra la noción de externalidades ambientales -entendidas como algo ocasional-- puesto que es evidente, de acuerdo con la citada ley, que la generación de residuos es algo inherente a los procesos de producción y consumo"⁹.

La segunda ley de la termodinámica: la dimensión cualitativa

Si la materia-energía no se pierde, sino que solamente se transforma, ¿no desaparecen como por ensalmo todos los problemas de *límites al crecimiento económico* que preocupan a los ecologistas? ¿No cobra verosimilitud esa "economía que no agota recursos" que los economistas ecológicos a quienes acabamos de citar tildaban de "irreal"? Si la energía contenida en cierta fuente energética simplemente adquiere otra forma, ¿no podremos recuperarla para

⁸ Las clases de energía que sufren estas transformaciones son seis: cinética, potencial (gravitatoria), magnética, eléctrica, química y nuclear (le energía de los enlaces nucleares).

⁹ Federico Aguilera Klink/ Vicent Alcántara (comps.): *De la economía ambiental a la economía ecológica* (Icaria, Barcelona 1994), p. 28. Sobre las "externalidades", Susan George puntualiza: "Los economistas [convencionales] llaman "externalidades" a la destrucción sistemática del medio ambiente: meros efectos secundarios desafortunados de las actividades económicas productoras de renta. Esta idea, al igual que otras creencias de la economía neoliberal o de la corriente dominante, es descabellada. Tal como decía el difunto economista Kenneth Boulding, "para creer que la economía puede crecer indefinidamente en un sistema finito hay que ser un loco o un economista". *Sus crisis, nuestras soluciones*, Icaria, Barcelona 2010, p. 9.

utilizarla otra vez? Si la energía es esencialmente *trabajo almacenado*¹⁰, ¿el principio de conservación de la energía no implica que ese trabajo no se puede perder?

La respuesta a estas preguntas, para nuestra desgracia, es un rotundo *no*: y aquí es donde entra en escena el segundo principio (o la segunda ley) de la termodinámica. *Los diversos tipos de energía (de trabajo almacenado) no son igualmente convertibles en trabajo útil. Si se quiere decir de otra forma: existen formas de energía de "buena" y "mala" calidad para nosotros*¹¹.

Al grado de convertibilidad de la energía (conversión de trabajo almacenado en trabajo útil) se le llama *disponibilidad de la energía*. La energía de alta disponibilidad es de "buena calidad", fácilmente convertible en trabajo (ejemplo: los combustibles fósiles); la energía de baja disponibilidad es de "mala calidad", no convertible en trabajo (ejemplo: la inmensa cantidad de calor contenida en el agua de los océanos).

"La medida cuantitativa de la disponibilidad de energía térmica es la temperatura. Más específicamente, cuanto mayor sea la *diferencia de temperatura* entre una sustancia y su medio, tanto más convertible en trabajo aplicado es la energía térmica de la sustancia; en otras palabras, cuanto mayor sea la diferencia de temperatura tanto mayor es la disponibilidad. Una pequeña cacerola de agua hirviendo a 100 grados centígrados en un medio que está a 20 grados representa una considerable energía disponible debido a la diferencia de temperatura; el agua de una piscina a los mismos 20 grados del medio contiene mucha más energía térmica que la cacerola, pero su disponibilidad es cero, ya que no hay diferencia de temperatura entre ella y su medio."¹²

Pues bien: el segundo principio de la termodinámica afirma que en un sistema cerrado, *todos los procesos físicos, naturales y tecnológicos ocurren de tal manera que la disponibilidad de la energía implicada decrece*. O también: todas las transformaciones energéticas conducen, a través de una serie de estadios sucesivos, a la forma de calor a baja temperatura, energía no disponible que ya no puede producir trabajo útil. *La cantidad de energía permanece constante (por la primera ley); pero su calidad se degrada constantemente (por la segunda ley)*.

¹⁰ Con más precisión: capacidad (almacenada) de producir trabajo. El trabajo es la transferencia de energía en una acción coherente.

¹¹ La *exergía* es la magnitud termodinámica que mide la calidad de la energía: su capacidad para realizar trabajo útil. Cuando la energía proporciona trabajo, su exergía ósu calidadô disminuye: éste es otro enunciado de la segunda ley.

¹² Paul R. Ehrlich/ Anne H. Ehrlich/ John P. Holdr en: "Disponibilidad, entropía y las leyes de la termodinámica", en Herman E. Daly: *Economía, ecología y ética* (FCE, Méjico 1989), p. 57.

Por decirlo de otra manera: la disponibilidad de una cantidad dada de energía sólo puede usarse una vez; es decir, la convertibilidad en trabajo útil no se puede "reciclar". Todavía de otra manera equivalente: toda la energía fluye en una sola dirección, degradándose en el proceso; *el acontecer del universo tiene una dirección*. El universo es fundamentalmente *asimétrico*: los cuerpos calientes se enfrían, pero los cuerpos fríos no se calientan espontáneamente; la pelota que bota acaba por detenerse, pero ninguna pelota se pone a botar espontáneamente; los vivos mueren, pero los muertos no resucitan. El segundo principio de la termodinámica determina la dirección del tiempo, *la flecha del tiempo*¹³.

Hay una formulación del segundo principio que no es inmediatamente equivalente a las anteriores. Se trata de la siguiente: en los procesos espontáneos que ocurren dentro de sistemas cerrados, *las concentraciones (de lo que sea) tienden a dispersarse, la estructura tiende a degradarse y desaparecer, el orden se convierte en desorden*. Es obvio que en esta formulación, además de energía, estamos hablando de materia. Esta formulación de la segunda ley se relaciona con las anteriores por medio del concepto de *entropía*.

Entropía viene del griego *entropain*, y etimológicamente significa *transformación*¹⁴. La entropía es *una medida del desorden del mundo físico*: alta entropía significa desorden, baja entropía significa orden. Así, una formulación de la segunda ley de la termodinámica que equivale a todas las anteriores es: *todos los procesos naturales ocurren de tal manera que la entropía del universo aumenta*. "La entropía es una variable de estado, es la medida científica de todas las cosas que ya no pueden ser como eran antes, de la energía que se conserva pero que termina en un estado irreversible de calor, es la medida de nuestro envejecimiento y del envejecimiento del Universo"¹⁵.

Decir que la entropía es medida del desorden equivale a decir que es una medida de la disponibilidad de la energía: mide la cantidad de energía que ya no se puede aprovechar transformándola en trabajo. Un aumento de la entropía supone

¹³ Título de una buena novela de Martin Amis que precisamente especula con un tiempo de sentido invertido, aunque sus preocupaciones sean éticas más que termodinámicas. Acerca de la relación entre entropía y tiempo véase "Entropía y dirección del tiempo", cap. 7 del libro de Richard Morris *Las flechas del tiempo* (Salvat, Barcelona 1994).

¹⁴ Fue el físico alemán Rudolf Clausius quien introdujo el concepto en 1865.

¹⁵ Carlo Rubbia: *El dilema nuclear* (Crítica, Barcelona 1989), p. 112.

una disminución de la energía disponible: ni el carbón ni el petróleo pueden quemarse dos veces. Podemos vincular la idea de entropía con los recursos naturales que empleamos para nuestra subsistencia de la siguiente forma: *el recurso natural más básico y fundamental es la materia-energía de baja entropía* (vale decir: materia-energía con alto grado de orden y disponibilidad: aquí es donde entra el concepto de *neguentropía* al que aludíamos al comienzo de estas páginas)¹⁶. El mineral de hierro con alta concentración de metal es un recurso precioso para nosotros, mientras que el hierro disuelto en el océano es prácticamente inutilizable. Más adelante insistiremos sobre esta idea.

Algunos ejemplos sencillos ayudarán a captar la idea de entropía. Imaginemos que dejamos caer un terrón de azúcar en un vaso de agua. Al principio tenemos un sistema ordenado, de baja entropía: moléculas de agua por un lado, separadas de las moléculas de azúcar. Al cabo de un rato, el azúcar se disuelve, agua y azúcar se mezclan en una masa homogénea de agua azucarada, y en principio no podemos volver a separarlos. Ha aumentado la entropía de nuestro sistema.

Otro ejemplo que a menudo se aduce en este contexto es el del kilo de arroz que se nos cae por el suelo: recoger los primeros granos es fácil, recoger los últimos muy difícil (andan por debajo de los muebles), y siempre nos quedan algunos irre recuperables. Por mucho esfuerzo que le echemos, al final no reuniremos la totalidad de nuestro arroz.

Un tercer y último ejemplo: si intentamos fabricar abono orgánico a partir de basuras urbanas sin clasificar (materia de alta entropía), en general obtendremos un abono inservible por altamente tóxico (contendrá por ejemplo metales pesados procedentes de pilas eléctricas). Si partimos de basura seleccionada, de baja entropía, y retenemos exclusivamente la basura de carácter orgánico, podremos fabricar un *compost* de alta calidad (y después reciclar también adecuadamente el resto de la basura separada en origen). Este ejemplo muestra bien cómo *el valor de uso de los bienes* (y su valor económico) *está vinculado con el bajo contenido de entropía*.

¹⁶ Véase a este respecto Herman E. Daly/ John B. Cobb: *Para el bien común. Reorientando la economía hacia la comunidad, el ambiente y un futuro sostenible* (FCE, Méjico 1993), p. 18. En realidad, técnicamente resulta más apropiado el concepto de *exergía*, que mide la energía òlibre o disponible para realizar trabajo.

Minimizar la entropía es preservar la vida

La Tierra como un todo constituye un sistema cerrado, excepto en un aspecto: la energía solar (en forma de radiación solar) que recibe ininterrumpidamente en grandes cantidades. Esta es la energía que ha hecho girar sin descanso la rueda de la vida --todos los procesos bioquímicos de nuestra biosfera-- desde hace miles de millones de años. La energía solar es, en última instancia, la responsable de organizar la vida en el espacio y hacerla evolucionar a través del tiempo.

Podría parecer que la evolución biológica viola el principio de entropía (tal es la ñparadoja de Schrödingerö), puesto que los organismos progresan hacia formas cada vez más ordenadas, más organizadas, menos entrópicas: pero esta violación es sólo aparente. El proceso evolutivo dentro de la biosfera lo alimenta la radiación solar, y la disminución de entropía en el planeta --la estructuración crecientemente compleja de la biosfera-- la contrarresta con creces el aumento de entropía en el sol... aunque esto no tenga que preocuparnos en exceso, ya que su energía nos seguirá bañando al menos durante cuatro o cinco mil millones de años más. La "muerte térmica" que constituye el destino inevitable del sistema solar queda demasiado lejos como para que, a efectos prácticos, tenga que interesarnos.

Según el segundo principio de la termodinámica, *cada vez que en algún lugar se invierte el aumento de entropía es a costa de aumentar la entropía general en el ambiente circundante*. Tal es el gran truco de la vida: los organismos se mantienen en un estado ordenado a costa de incrementar la entropía en su entorno. El objetivo de todos los seres vivos es mantener sus organismos y su ambiente en un estado de baja entropía, favorable para ellos (podemos concebir la muerte como un aumento incontrolable de entropía). Por eso dijimos antes que la materia-energía de baja entropía es en realidad el recurso natural más fundamental y básico.

En la Tierra existen de forma natural "depósitos de baja entropía", islas de ñentropía negativaö o "neguentropía" que desde los comienzos de la Revolución Industrial hemos ido agotando rápidamente: se trata de las reservas de combustibles fósiles, los yacimientos minerales, etc. Dilapidar de forma

irresponsable la riqueza natural que constituyen estos "depósitos de baja entropía" restringe cada vez más las opciones vitales de los seres humanos que nos sucederán. En cierto sentido, el imperativo de una sociedad ecológicamente sustentable podría formularse como *un imperativo de minimización de entropía*. Como ha señalado Atkins,

"a medida que nuestra sociedad tecnológica va quemando, voraz, sus recursos, la entropía del universo va incrementándose inexorablemente y, en consecuencia, la calidad de la energía que almacena decaerá. No nos encontramos, pues, inmersos en una crisis energética; estamos en el umbral de una crisis entrópica. Podemos decir que la civilización moderna está viviendo a costa de la degradación de las reservas de energía del Universo. No se trata tanto de conservar la energía, algo que la Naturaleza hace automáticamente, cuanto de preservar su calidad. En otras palabras, debemos encontrar formas de promover y mantener nuestra civilización con una menor producción de entropía: la conservación de la calidad de la energía es la esencia del problema y constituye nuestro deber para con las futuras generaciones"¹⁷.

Una última precisión semántica: dado que la materia circula constantemente a través de los ecosistemas (y de los sistemas productivos), mientras que la energía se degrada y no puede usarse dos veces, resultará pertinente hablar de *ciclos* de materia y de *flujos* de energía.

Termodinámica, economía y ecología

La economía convencional ha tenido en cuenta, más o menos, la primera ley de la termodinámica; pero no la segunda, *que es incomparablemente más importante que la primera a efectos prácticos*. Si uno observa la representación clásica del proceso económico en los manuales al uso, verá que en realidad se trata de una máquina de movimiento perpetuo, o sea, un objeto imposible. La termodinámica enseña que esos diagramas circulares, ese movimiento pendular entre producción y consumo en un sistema completamente autárquico, no corresponde a la realidad. El hecho de que el sistema económico se halle inserto dentro de sistemas biofísicos que forman una biosfera altamente compleja, y que dependa para su funcionamiento de *fuentes* de materiales de baja entropía y de *sumideros* para los desechos de alta entropía producidos; el hecho de que el principio de entropía gobierna todos los procesos del mundo material, sencillamente se ignora en la economía convencional.

¹⁷ P.W. Atkins: *La segunda ley* (Prensa Científica --colección Biblioteca Scientific American--, Barcelona 1992), p. 39.

Ya se mencionó que en cierta ocasión Kenneth Boulding afirmó que "quien crea que el crecimiento exponencial puede durar eternamente en un mundo finito, o es un loco o es un economista". Podríamos parafrasear la humorada del modo siguiente: quien crea que se puede violar la ley de la entropía, o es un loco o es un economista convencional. Pues, en efecto, los economistas convencionales tienen tantos problemas con la ley de la entropía como con los fenómenos de crecimiento exponencial en sistemas cerrados (y por razones parecidas).

La economía ecológica, por el contrario, sitúa la segunda ley de la termodinámica en el centro de sus reflexiones. Parte de la premisa de que *el proceso económico es entrópico en todas sus etapas materiales*¹⁸. La segunda ley de la termodinámica tiene importantes implicaciones económico-ecológicas. Lo que muestra es esencialmente que la actividad económica está constreñida por ciertos límites insuperables:

(I) *Límites al reciclado: el reciclado perfecto es imposible*. Sólo se puede recuperar una parte; siempre hay un resto que se pierde irrecuperablemente. (Por lo demás, el problema se desplaza al terreno de la entropía energética: reciclar exige siempre utilizar energía, en cantidades que pueden ser muy grandes, inabordables.) Los neumáticos pueden reciclarse; las partículas de neumático adheridas al asfalto no. El plomo de las baterías puede recuperarse en un alto porcentaje; el plomo emitido a la atmósfera junto con los gases de escape de los automóviles no. El cierre total de los ciclos es imposible, y las pérdidas de materia inevitables.

Algún optimista tecnológico insuficientemente consciente de los límites que las leyes de la termodinámica imponen a la ecologización de la economía ha postulado que "los elementos químicos que constituyen los recursos del planeta pueden ser reciclados y reutilizados indefinidamente, siempre y cuando la energía necesaria para recogerlos y refinarlos esté disponible"¹⁹.

¹⁸ El hombre a quien se debe el mayor esfuerzo por integrar termodinámica y economía en una reflexión unitaria es el economista rumano exiliado a EEUU Nicholas Georgescu-Roegen. Una breve selección de textos: Nicholas Georgescu-Roegen, *Ensayos bioeconómicos*, Los Libros de la Catarata, Madrid 2007. Una breve introducción a su vida y obra es "La economía ecológica de Nicholas Georgescu-Roegen" de Joan Martínez Alier, capítulo 1 de su libro *De la economía ecológica al ecologismo popular* (Icaria, Barcelona 1992). Una excelente monografía en castellano: Óscar Carpintero, *La bioeconomía de Georgescu-Roegen*, Montesinos, Barcelona 2006.

¹⁹ Barry Commoner: *En paz con el planeta* (Crítica, Barcelona 1992), p. 142.

Ahora bien: sin entrar en otros problemas que plantearía la extremosidad de este planteamiento, *el reciclado perfecto es un imposible termodinámico*, y por eso esta "solución" falla. Un ejemplo aducido a veces en este contexto prueba en realidad lo contrario de lo que se supone que tendría que probar. "A pesar de su enorme dispersión, más de la mitad del oro extraído hasta ahora sigue controlado hasta hoy día, siendo reunido cuando es necesario gastando energía"²⁰. El ejemplo se vuelve contra la intención de quien lo propuso: a pesar de que el oro ha sido un metal valiosísimo para todas las civilizaciones, y de que los seres humanos lo han reunido, atesorado y conservado (o sea, reciclado) como ningún otro material en toda la historia humana, *sólo algo más de la mitad* de todo el oro extraído en toda la historia humana está hoy disponible. ¡Piénsese lo que ha ocurrido y ocurrirá con materiales menos preciados! Y no vale replicar que, con las escaseces crecientes o con los nuevos impuestos ecológicos, el latón o el papel llegarán a ser tan valiosos como el oro: sería una salida por la tangente fraudulenta, que no tendría en cuenta hechos termodinámicos básicos, por no hablar de los supuestos irreales sobre la organización social y la psique humana.

En definitiva, el reciclado perfecto es imposible; y precisamente podríamos enunciar el segundo principio de la termodinámica también de la siguiente forma: *la energía no puede reciclarse, y la materia no puede reciclarse nunca al 100%*²¹.

(II) *Límites al aprovechamiento de los recursos naturales*. Detrás de las distintas *leyes de rendimientos decrecientes* con que tropieza el género humano se halla por lo general la estructura entrópica de nuestro mundo. Por ejemplo, en lo que se refiere a los recursos naturales: a medida que consumimos los mejores yacimientos minerales, los depósitos de combustibles fósiles más accesibles, sólo nos van quedando (en una corteza terrestre progresivamente más desorganizada) depósitos de materia-energía con mayor entropía, y por ello menos disponibles, menos útiles, menos aprovechables y cada vez más caros de explotar. "Cada vez nos acercamos más al momento en que la obtención de una tonelada de petróleo implique el consumo de tanta energía como la que contiene ese petróleo. En esa tesitura de nada sirve ya la sabiduría del economista, según la cual todo es sólo

²⁰ Commoner, *En paz con el planeta*, p. 142.

²¹ Herman E. Daly: *Steady-State Economics* (Island Press, Washington 1991), p. 8.

una cuestión de precios, pues el precio debe ser pagado en la única divisa fuerte de este mundo, a saber, en energía"²².

PRODUCCIÓN Y CONSUMO A LA LUZ DE LA TERMODINÁMICA

"Producir es para los economistas [convencionales] llevar a cabo actividades que generen ingresos o valor añadido; se habla de *producir petróleo* como se habla de producir trigo sin tener en cuenta que las dos actividades son totalmente diferentes respecto a la periodicidad, es decir, a su relación con la naturaleza, a la relación entre el tiempo biogeoquímico y el tiempo económico. Una consiste en extraer una parte de un *stock*, de un fondo ya existente, mientras que la otra consiste básicamente, en el caso de la agricultura tradicional, en captar energía solar, que llega como un flujo renovable, y transformarla en la energía de los alimentos. O se afirma que la agricultura de los EE.UU. es más productiva que la de México, aunque utilice mucho los recursos energéticos no renovables, y a pesar de que la agricultura del sur de México --en peligro por culpa del NAFTA-- es energéticamente más eficiente y además ha conservado mucha más biodiversidad.

(...) [Para los economistas convencionales] todo es escaso únicamente a corto plazo, porque a largo plazo se cree ciegamente en el cambio técnico, en la posibilidad de la sustitución sin límites: de apropiarse cada vez de nuevos recursos naturales, de utilizarlos sin crear problemas ambientales, y además de sustituir recursos naturales por capital --sin tener en cuenta el hecho elemental de que el capital es también fruto del trabajo y los recursos naturales.

El concepto de *consumo* como destino final de los bienes producidos también puede cuestionarse si tenemos en cuenta que, por la ley de conservación de la materia, todo lo utilizado por las empresas y los consumidores, antes o después, o bien es reciclado o bien vuelve a la naturaleza.

(...) Por consiguiente no se justifica la distinción habitual de los economistas entre los bienes producidos, que tienen un valor de cambio, y los bienes que se suponen *libres* --como el aire que respiramos-- de los que se considera que se dispone de una cantidad determinada independientemente de cuál sea la actividad económica. En realidad, los bienes considerados libres se ven afectados a menudo --y a veces de forma irreversible-- por las actividades de extracción, de producción, de consumo y de generación de residuos, aunque las *externalidades* o *costes ecológicos* y *sociales* de estas actividades no entran dentro de la contabilidad de las empresas y de los consumidores."

Joan Martínez Alier y Jordi Roca Jusmet: "El valor de la natura", en *Medi ambient* 9 (monográfico sobre *La porta verda de l'economia*; Barcelona 1994), p. 84.

(III) *Límites al crecimiento*. Los productivistas suelen argumentar que la preocupación por el medio ambiente más bien refuerza que debilita la necesidad de crecimiento económico, pues --según ellos-- la protección y la restauración del medio ambiente exigen recursos económicos que previamente deben conseguirse mediante más crecimiento. (Obsérvese que todas las políticas ecokeynesianas y socialdemócratas salpimentadas de verde presuponen este

²² Christian Schütze: "La incompatibilidad entre economía y ecología", *Debats* 35/36 (monográfico sobre *Crisis ecológica y sociedad*; Valencia 1991), p. 44.

argumento.) Pero este argumento encierra una petición de principio, pues el medio ambiente no sólo puede conservarse mediante la reparación del daño causado, sino evitando las actividades que ocasionan el daño. El ecólogo Antoni Farràs equiparaba el proceder del productivista con el de un hombre que se deja cortar un dedo a cambio de dinero para pagar con ese dinero los trabajos de un cirujano y un ortopedista fabricante de dedos artificiales, que le implantan la prótesis correspondiente: prótesis que naturalmente nunca hubiese necesitado si no se hubiese dejado cortar el dedo.

Pretender que para proteger el medio ambiente lo que necesitamos es más crecimiento económico constituye un absurdo que sólo se mantiene mientras se mantenga la desconexión entre la economía monetaria (el "cajón de sastre de la producción de valor", lo llama José Manuel Naredo) y su soporte biofísico. Desde la perspectiva de una economía ecológica consciente de los rudimentos de la termodinámica es un disparate: equivale, directamente, a negar el principio de entropía²³.

"La fórmula mágica 'necesitamos crecimiento económico para poder pagar la protección del medio ambiente' es una manifestación fundamental de la *ignorancia de la entropía*. Las consecuencias negativas para el medio ambiente de la correspondiente adición al crecimiento serían superiores a los beneficios derivados de esa protección técnica del medio ambiente, aun cuando esa adición se dedicase en su integridad a protección técnica. Así lo determina el segundo principio de la termodinámica"²⁴.

Aquí topamos, de nuevo, con una ley de rendimientos decrecientes de fundamento entrópico. Podemos verlo bien con un ejemplo: la eliminación de contaminantes atmosféricos como los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre²⁵. Es relativamente barato eliminar hasta el 75% de las emisiones por medio de tecnologías "de final de tubería": a partir de ahí los costes se disparan exponencialmente, hasta hacerse literalmente impagables, y es imposible eliminar el 100% de la contaminación. Queda siempre, por tanto, *un resto*

²³ Pero también podemos ejemplificar. Chernóbil por ejemplo: "En el estudio más detallado y comprehensivo que se ha realizado hasta la fecha sobre el accidente de Chernóbil, Yuri Koriakin, economista jefe del Instituto de Investigación y Desarrollo de Ingeniería Energética de la Unión Soviética en el momento del accidente, valoró las pérdidas para la ex-URSS entre el año 1986 y el 2000 en una cantidad que puede oscilar entre los 170.000 y los 215.000 millones de rublos. Esta suma equivale, al cambio oficial de la época, a unos 40 billones de pesetas, cantidad muy superior a la suma total de las inversiones del programa nuclear civil soviético desde 1954" (Carlos Brevo/ Antxon Olabe: "Chernóbil", *El País*, 24 de abril de 1996, p. 12). ¡Y eso sin contar el medio millón de muertes que estima la OMS se producirán en los tres decenios posteriores a la fecha fatídica del 26 de abril de 1986!

²⁴ Schütze, "La incompatibilidad entre economía y ecología", *Debats* 35/36, p. 45.

²⁵ Véase Donella H. Meadows/ Dennis L. Meadows/ Jorgen Randers: *Más allá de los límites del crecimiento* (El País/ Aguilar, Madrid 1992), p. 219-220.

ineliminable por razones económicas en primer término y entrópicas en última instancia (puede ser entre un 5 y un 15% en el ejemplo que nos ocupa); en un nivel alto de emisiones, este 5-15% puede estar por encima de los niveles asumibles. Más crecimiento económico no puede mejorar el problema, sino sólo empeorarlo.

Por otro lado, *es sencillamente falso que todos los efectos perniciosos del crecimiento económico sean reversibles*: no lo son la erosión del suelo, ni la concentración de tóxicos organoclorados en las cadenas tróficas, ni el agotamiento del petróleo; ninguna cantidad adicional de recursos permitirá convertir los desechos radiactivos en isótopos fisionables. Siendo la contaminación en lo esencial un amasijo de elementos en intrincada mixtura, su reversión resulta muchas veces desesperadamente costosa o simplemente imposible: vivimos en un mundo en el que tiene vigencia el principio de entropía.

(IV) *Límites al progreso técnico*. Algunos adictos al crecimiento económico reaccionaron a las malas noticias contenidas en el informe al Club de Roma *Los límites del crecimiento* (1972) y otros estudios semejantes postulando un hipotético *crecimiento exponencial de la tecnología* que nos sacaría siempre las castañas del fuego. Pero se trata de una ilusión (suelo hablar en estos contextos de *tecnolatría*). Las leyes de la termodinámica también imponen límites inflexibles a la eficiencia de nuestra tecnología.

ALGUNOS ARGUMENTOS CONTRA EL OPTIMISMO TECNOLÓGICO DESBOCADO

1. La confianza en que los problemas que genera la moderna tecnociencia se resolverán a base de *más de lo mismo* es irracional y obstruye el proceso de percepción social de los graves riesgos e incertidumbres a que la especie humana se halla actualmente expuesta. En lo que atañe al desarrollo futuro de nuestros conocimientos estamos necesariamente en la incertidumbre: pues si hoy ya supiésemos a ciencia cierta lo que sabremos mañana, entonces los conocimientos de mañana serían ya los de hoy. Transmitir a nuestros descendientes problemas gravísimos que nosotros hemos creado y sobre cuya solución no tenemos ni la más remota idea (el ejemplo de los residuos nucleares viene al caso) delata una irresponsabilidad abismal.
2. Es arriesgado postular límites para los conocimientos futuros; pero aún más arriesgado es suponer que los nuevos conocimientos no contendrán el descubrimiento de nuevos límites, sino sólo la superación de los antiguos límites. De hecho, el nuevo conocimiento a menudo descubre nuevos límites con mayor rapidez que elimina límites antiguos. El descubrimiento del uranio fue un conocimiento nuevo que incrementó nuestra base de recursos naturales, pero el descubrimiento posterior de los peligros de la radiactividad no incrementó la utilidad del uranio, sino que la redujo. El descubrimiento de que las

microfibras de amianto provocan cáncer de pulmón limita, en lugar de aumentar, la utilidad de las reservas de amianto.

3. Casi todas las leyes básicas de la ciencia son enunciados de imposibilidad: es imposible viajar más deprisa que la velocidad de la luz, o tener un movimiento perpetuo, o la generación espontánea de seres vivos, o la creación de materia de la nada... Es probable que los nuevos conocimientos incorporen nuevos enunciados de imposibilidad.

4. Es cierto que el desarrollo futuro de la tecnociencia depende en parte de los recursos que se asignen a su cultivo. Pero como el gran científico Max Planck indicó en sus memorias, sucede que "con cada nuevo progreso crece también la dificultad de la ulterior tarea investigadora". Se da una especie de ley de rendimientos decrecientes en la investigación científica: para cantidades iguales de recursos invertidos en investigación, los rendimientos de ésta descienden. Esto no implica que el progreso científico tope con límites completamente infranqueables en todas direcciones, pero sí que implica la ralentización inevitable del ritmo de progreso científico en un mundo de recursos limitados.

5. El mero conocimiento significa poco para el sistema económico si no está incorporado en estructuras físicas. Kenneth Boulding observa que el capital es esencialmente conocimiento impuesto al mundo físico en forma de arreglos improbables. Pero el conocimiento no puede operar sobre cualquier clase de materia mediante cualquier clase de energía. (Si no fuese así, podríamos construir un molino de viento de arena empleando para ello la energía de las mareas y emplearlo luego para extraer el oro disuelto en el océano.) El ojo de aguja por el que el conocimiento "entra" en el mundo físico para darle forma es la disponibilidad de materia-energía de baja entropía, y si no existen fondos de materia-energía de baja entropía tampoco habrá capital por mucho conocimiento que tengamos. Así nos lo garantiza la segunda ley de la termodinámica.

Podemos mejorar el bienestar humano que obtenemos de una cantidad dada de recursos naturales, y aquí el margen de maniobra es afortunadamente muy amplio; pero no podemos eludir los límites impuestos a la escala física de la economía por la finitud de la biosfera, la entropía y la interdependencia ecológica.

Extractado de Herman E. Daly y John B. Cobb, *Para el bien común* (FCE, Méjico 1993), p. 183-184; y de Antoni Domènech, "La ciencia moderna, los peligros antropogénicos presentes y la racionalidad de la política de la ciencia y la tecnología", *Arbor* (enero de 1986).

El teorema de Carnot --bautizado con el nombre del descubridor de la termodinámica, el ingeniero francés Sadi Carnot-- impone límites últimos a la eficiencia de los motores. En esencia, lo que afirma este importantísimo resultado es que el rendimiento de una máquina²⁶ es igual a la unidad menos el cociente entre la temperatura de la fuente fría y la temperatura de la fuente caliente. Es decir, hay una fracción máxima de energía térmica que se puede transformar en energía mecánica, y esta fracción sólo depende de la diferencia de temperaturas entre la fuente caliente y la fuente fría (entre el estado inicial y el estado final), con independencia del tipo de motor que consideremos y del tipo

²⁶ Con más precisión: una máquina de Carnot, es decir, una máquina que aprovecha la diferencia de temperaturas entre una fuente fría y una fuente caliente para obtener trabajo mecánico.

de sustancia con que opere. Cuanto menor sea la diferencia de temperaturas entre el estado inicial y el final, menor será la eficiencia del motor.

"La mayoría de las modernas centrales eléctricas utilizan vapor a temperaturas de aproximadamente 800 K (527 grados centígrados) y fuentes frías de aproximadamente 373 K (100 grados centígrados). Su rendimiento límite se sitúa por tanto alrededor del 54%, aunque otras pérdidas lo reducen hasta el 40%. Los rendimientos mejorarían si se usaran temperaturas más altas en la fuente caliente, pero esto introduciría nuevos problemas, ya que los materiales empezaría a fallar. Por razones de seguridad, los reactores nucleares operan con temperaturas de la fuente caliente más bajas (unos 620 K, 350 grados centígrados) que limitan su rendimiento teórico al 40%, e incluso al 32% si contamos las pérdidas. Por citar ejemplos de otros sistemas relacionados con la vida cotidiana, el motor de automóvil funciona con una temperatura de entrada de más de 3300 K (alrededor de 3000 grados centígrados) mantenida durante un tiempo muy corto, y expulsa los gases a una temperatura de alrededor de 1400 K (1000 grados centígrados) con un rendimiento teórico del 56%. En realidad, los motores de automóvil siguen un diseño ligero para conseguir buenas prestaciones de facilidad de respuesta y movilidad, por cuya razón alcanzan un rendimiento de menos del 25%"²⁷.

La importancia del teorema de Carnot es que establece un límite absoluto para el rendimiento de las máquinas, un límite independiente de la inventiva de nuestros científicos e ingenieros.

"Una ilustración de la fuerza de las leyes de la termodinámica es que en muchas situaciones se pueden usar para predecir la eficiencia máxima que se puede lograr con una máquina perfecta, sin especificar detalle alguno de ella. (La eficiencia se puede definir en este caso como la proporción entre el trabajo útil y el flujo total de energía.) Así, se puede especificar, por ejemplo, la cantidad *mínima* de energía necesaria para separar la sal del agua marina, los metales de sus minerales y los contaminantes de los escapes de los automóviles sin conocer detalles de lo que se podría inventar en el futuro para lograr estos propósitos. De manera similar, si se conoce la temperatura de una fuente de energía termal (como, por ejemplo, una roca caliente en las profundidades de la corteza terrestre) se puede calcular fácilmente la eficiencia máxima con que esta energía térmica se puede convertir en trabajo aplicado, independientemente de la habilidad de los inventores futuros. En otras palabras, *existen límites fijos a la innovación tecnológica, colocados allí por las leyes fundamentales de la naturaleza*"²⁸.

²⁷ Atkins, *La segunda ley*, p. 41.

²⁸ Ehrlich/ Ehrlich/ Holdren: "Disponibilidad, entropía y las leyes de la termodinámica", p. 59.

La naturaleza aborrece los gradientes

Al comienzo de su formidable libro *La termodinámica de la vida*, Eric D. Schneider y Dorion Sagan citan unas líneas del sabio taoísta Chuan Zu: òel que quiera tener acierto sin error,/ orden sin desorden,/ es que no entiende los principios/ del cielo y la tierra./ No sabe cómo/ encajan las cosas.ö²⁹ En el siglo XX, y sobre todo en su segunda mitad, la *termodinámica del no-equilibrio* (o termodinámica de los sistemas abiertos) ha aportado una comprensión profunda de cómo muchos sistemas termodinámicos (y en particular los organismos vivos) son capaces de *generar orden a partir del desorden*, valiéndose para ello de la segunda ley de la termodinámica (lo cual, en principio, parece paradójico). La vida ha de considerarse como un sistema abierto integrado en el flujo de energía.

õSiempre ha existido una relación entre energía y riqueza, energía y vida, energía y exuberancia. Las economías, las reacciones químicas, los ecosistemas y los sistemas solares se organizan en torno a gradientes energéticos, diferencias naturales de temperatura, presión y potencial químico que establecen las condiciones para el flujo de energía. (...) La tendencia de la naturaleza a reducir gradientes, es decir, la tendencia de la energía a disiparse conforme a la segunda ley de la termodinámica, es asistida por organizaciones complejas, vivas y no vivas.ö³⁰

El lema básico en estos nuevos desarrollos de la termodinámica (encauzados por la obra de investigadores como Alfred Lotka, Lars Onsager e Ilya Prigogine) podría ser: *la naturaleza aborrece los gradientes*³¹. Allí donde se dan diferencias importantes de temperatura, presión o potencial químico, la acción de la segunda ley se aplica a desbaratarlos... y de camino produce estructuras altamente complejas (desde los tornados hasta los complejos petroquímicos). Los gradientes inducen un flujo de energía y, si se dan ciertas condiciones favorables, surgen sistemas complejos que contribuyen a reducir esos gradientes medioambientales.

õLejos de predecir la extinción cósmica, la termodinámica moderna nos dice que, en regiones del universo expuestas a un flujo de energía, a menudo surgen estructuras complejas, vivas o no, que se expanden e incrementan su complejidad. Puesto que las interacciones entre las fuerzas fundamentales del universo óla gravedad, el electromagnetismo y las fuerzas nucleares débil y fuerteö no están completamente integradas, como tampoco lo está la materia total del universo conocido, la expectativa de una muerte térmica (o siquiera de un final) no es científicamente creíble. (...) [La evolución de la termodinámica en los últimos cincuenta años] ha permitido el estudio de una nueva clase de sistemas termodinámicos conocidos como ñsistemas

²⁹ Eric D. Schneider y Dorion Sagan, *La termodinámica de la vida* de (Tusquets, Barcelona 2008), p. 11.

³⁰ Schneider/Sagan, op. cit., p. 18-19.

³¹ Schneider/Sagan, op. cit., p. 31.

dispativosø o de no-equilibrio óporque existen a cierta distancia del equilibrio termodinámico--.
Las estructuras estudiadas por esta nueva ciencia incluyen los cumulonimbos, los remolinos, los
ciclos químicos intrincados y los seres vivos.ö³²

Está fuera de lugar aquí desarrollar las riquísimas implicaciones de estas perspectivas, que en cierta forma subrayan el ñlado buenoö de la segunda ley de la termodinámica. Bajo esta luz, no se trata de una tendencia unívoca a la degradación, la destrucción y la muerte (puesto que al operar en ese sentido la segunda ley genera complejidad y produce vida): más bien destrucción y creación se nos muestran intrínsecamente unidas. Eso es precisamente lo que las palabras de Chuan Zu sugerían (como una muestra de mucho pensamiento oriental, en la India, China y Japón, que desde hace muchos siglos subraya el no-dualismo e insiste en la complementariedad de *yin* y *yang*).

Conclusión

En buena medida, la crisis ecológica actual puede interpretarse como un salto en el aumento de entropía dentro de la biosfera, y un debilitamiento de los mecanismos de reducción de entropía de la propia biosfera; salto y debilitamiento producidos por la actividad humana. Como ha sintetizado magistralmente Daly:

"Una característica de la Revolución Industrial cuyas implicaciones no se aprecian suficientemente es el cambio al uso de los combustibles fósiles y los materiales minerales. Este es un cambio de la explotación de la superficie de la Tierra a la explotación del subsuelo; o como dice Georgescu-Roegen (1971), es un cambio de la dependencia de la energía proveniente a cada momento del sol a la energía almacenada en la Tierra. (...) La Revolución Industrial ha cambiado la dependencia, de un fuente relativamente abundante [la luz solar] a otra relativamente escasa del recurso final: la materia-energía de baja entropía"³³.

Para superar la crisis ecológica y reconstruir nuestras sociedades industriales de forma que resulten sustentables (es decir, ecológicamente compatibles con la biosfera en el largo plazo) es necesario un gran esfuerzo colectivo para invertir la tendencia al desbordamiento de entropía que hoy impera. Esquemáticamente, se trataría de *aprovechar la energía disponible de la luz solar para reducir la entropía material de nuestro mundo*. Para ello es necesario conservar o regenerar la productividad natural de la biosfera, basada en la fotosíntesis de las plantas

³² Schneider/Sagan, op. cit., p. 30.

³³ Daly/ Cobb: *Para el bien común*, p. 18

verdes, la preservación de la biodiversidad y el correcto funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos del planeta; realizar la transición desde el sistema energético actual (basado en los combustibles fósiles y la energía nuclear) a un sistema energético basado en las energías renovables; y "cerrar los ciclos" de la producción industrial y agrícola, alimentándola con energías renovables. Si algún tema merece ser llamado el tema de nuestro tiempo, yo diría que es éste.³⁴

³⁴ Para seguir leyendo: Jorge Riechmann, "Producir bienes y producir males: la idea de producción conjunta", capítulo 5 de *Biomímesis*, Los Libros de la Catarata, Madrid 2006. Así como un libro fascinante que ya antes recomendé: *La termodinámica de la vida* de Dorion Sagan y Eric Schneider (Tusquets, Barcelona 2008).