

Termoeconomía: El punto de encuentro de la Termodinámica, la Economía y la Ecología

Antonio Valero

CIRCE (Centro de Investigación del Rendimiento de Centrales Eléctricas) - Departamento de Ingeniería Mecánica

Artículo presentado a las Jornadas en homenaje a Nicholas Georgescu-Roegen (Fundación Argentaria).

R E S U M E N

Se propone al tiempo como medida universal para la contabilidad de los recursos naturales y el impacto del hombre sobre la Tierra. Tomando en cuenta que gran parte de la energía de la Tierra tiene origen solar (combustibles fósiles y renovables), la constante solar, $4.921 \text{ MJ/m}^2 \text{ h}$, durante 4.500 millones de años, representan el coste energético absoluto de la vida en la Tierra. Cada segundo de vida en la Tierra recibe $1,74 \times 10^{17} \text{ J}$. Se puede representar a la Naturaleza como una máquina convertidora de energía que transforma la energía solar extraterrestre en biomasa con una eficiencia global aproximada del 0,02 %. Cuando este valor se convierte en tiempo los valores fluctúan considerablemente. Así un bosque desarrollado de clima templado acumula 35 años aproximadamente y los recursos de carbón necesitan 60.000 veces más tiempo que la biomasa para producirse. Se analiza también el tiempo en relación con la irrevocabilidad, irreversibilidad y la termodinámica. Finalmente, se discute que en una visión estática de la economía, la tecnología, la cultura y la Naturaleza son tiempo negativo que pueden contrapesar el consumo de recursos naturales.

1. Introducción

La Termoeconomía trata de costes, bien monetarios (*ptas./kJ*) o puramente energéticos (*kJ de recurso/kJ de producto*), y se utiliza principalmente para la contabilidad, diagnóstico, mejora y diseño y optimización de sistemas térmicos. Pero en mi opinión abarca más, es la ciencia en la que la Termodinámica, y en particular, el segundo principio se une con la Economía, ambas en un sentido amplio. Ahora estamos en el principio y esta ciencia se construirá con las aportaciones de muchos autores, no sólo ingenieros mecánicos. En el futuro habrá que poner orden y sistemática a la gran cantidad de contribuciones que tanto economistas como físicos, biólogos, químicos o ingenieros quieren encontrar en las analogías y explicaciones entre la Termodinámica y la Economía.

Vivimos en un mundo finito y pequeño para la gente que somos y seremos, y los recursos naturales son un bien escaso. Si queremos sobrevivir, debemos conservarlos y aprender a conservarlos mejor y en este propósito la Termoeconomía jugará un papel clave. Debemos conocer los mecanismos por los cuales la

energía y los recursos en general se degradan y debemos también aprender y enseñar a juzgar qué sistemas trabajan mejor con objeto de mejorar sistemáticamente los diseños y reducir el consumo per capita. Además debemos aprender a reutilizar los residuos para evitar daños al ambiente. Esto lo necesitamos urgentemente ya que al menos dos tercios de la humanidad actual vive más pobremente que el mundo desarrollado actual.

Una contabilidad sistemática de los recursos naturales que se están consumiendo sería una herramienta clave para que tomáramos una consciencia global del problema. Y en esta tarea la Termoeconomía jugaría un papel clave.

Desafortunadamente no disponemos de unas bases teóricas para dar respuestas claras. ¿Con qué unidades comunes contabilizamos la deforestación anual de los bosques tropicales, los avances del desierto y la pérdida de tierras cultivables, o el consumo de combustibles fósiles o los problemas del efecto invernadero y la capa de ozono?.

Necesitamos herramientas para gestionar estos hechos de una forma unificada. Podríamos tener la tentación de utilizar el contenido energético, o incluso el contenido exergético de los recursos naturales, pero los resultados son insuficientes. Una persona consciente quizá podría preferir una unidad de exergía de bosque de la Amazonia a la misma unidad de exergía en forma de gas natural, o quizá no. En cualquier caso notamos que no estamos hablando de lo mismo, pero existen muchas otras implicaciones que no podemos poner dentro de un número.

Además la Termoeconomía trata con costes, no con valores. El valor se forma en el intercambio y depende de diversas circunstancias. Sin embargo el coste es algo que podemos intentar objetivar, porque dados unos límites, la estructura y el comportamiento de los componentes de un sistema podemos definir el coste de todos y cada uno de los flujos energéticos que interactúan en dicho sistema. (El problema fundamental del coste. [Valero, Lozano, Muñoz, 1986]).

La humanidad recibió la Tierra hace algunos millones de años y la recibió llena de recursos naturales y sin contaminantes. Pero también sin información, conocimiento y cultura con que empezar. Haciendo una simplificación enorme podremos adivinar que la cultura apareció alrededor del fuego, y el fuego abrió la caja de Pandora de la contaminación, y la agricultura comenzó con la deforestación, pero aparecieron con ella nuevas civilizaciones. Vemos que el conocimiento, la cultura y la utilización han sido obtenidas al coste de utilizar recursos naturales. El segundo principio nos dice que nada se da gratis.

Lo que importa es el coste, no el contenido energético. Es decir, la cantidad de recursos que se necesitan para producir algo. Pero calcular costes puede parecer la historia interminable porque ¿dónde empezamos a contar?. Es decir ¿cuántos son los recursos naturales necesitados para producir una cantidad específica de recurso natural, por ejemplo una tonelada de carbón?.

Lo que sabemos acerca de los recursos naturales y desgraciadamente sin precisión es su edad. Así, a partir de estudios geológicos podemos datar su origen con algunos millones de años de precisión. ¿Pero qué podemos hacer con esto?.

Volvamos a los orígenes: Hace cuatro mil quinientos millones de años, se crearon los planetas. Venus, la Tierra y Marte se formaron del polvo galáctico que condensó en forma de un núcleo férrico, una corteza de densidad media y una atmósfera rica en CO_2 y N_2 . La aparición de la fotosíntesis y la vida, desvió la evolución de la Tierra por otros caminos que los de sus planetas hermanos. La temperatura, las condiciones de la corteza terrestre, el anhídrido carbónico y sobretudo la radiación solar que alimentó el proceso provocaron la diferencia. El dióxido de carbono más agua, lenta pero inexorablemente se convirtieron en oxígeno e hidrocarburos y éstos en vida, y la materia orgánica muerta en recursos fósiles. Ahora son estos recursos fósiles el capital natural que la humanidad dispone para "poblar y dominar el mundo".

2. La constante solar

Desde entonces el Sol ha aparecido todos los días en el horizonte. Este hecho es increíble ya que durante los cuatro mil quinientos millones de años ha aparecido todos los días con la misma intensidad y el mismo espectro electromagnético. Los registros geológicos lo atestiguan.

La constante solar, es decir, la radiación extraterrestre sobre la superficie de la Tierra es 1.367 W/m^2 ó $4.921 \text{ MJ/m}^2/\text{h}$ ó $118,1 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$. (Ver p.ej. [Duffie y Beckman, 1991]. Este flujo estable nunca faltó en la historia de la Tierra e hizo posible su conversión en Gaia, es decir un planeta vivo.

Este hecho, bastante bien explicado por físicos y astrónomos, ha sido quizá poco considerado. Esta constante no es ni universal ni suficientemente constante para ser tenida en cuenta a la hora de construir una teoría de la materia alrededor de ella. Los físicos prefieren la velocidad de la luz, c , o la constante de Planck, h , para explicar el Universo. Es evidente que tienen razón, pero consideremos que hubiera ocurrido en la evolución de la Tierra si esta constante hubiera sido simplemente un pequeño porcentaje diferente. ¿Cuáles son los estrechos límites de la constante solar fuera de los cuales la vida y la humanidad no existirían?

Protágoras nos dijo que "el hombre es la medida de todas las cosas", pero la humanidad no sería nada sin el Sol, no sólo por su energía sino por su constancia en densidad. Muchas religiones y civilizaciones han adorado al Sol como padre de todas las cosas. El antiguo Egipto y los aztecas entre otros muchos. Y las civilizaciones observaron al Sol para medir el paso del tiempo y hacer el calendario, siendo los magos, los astrónomos y los sacerdotes respetados porque conocían sus secretos.

Lo que nunca hemos utilizado antes con consecuencias sociales tan extensas es la constancia energía/tiempo de la constante solar. Probablemente porque hace poco no se tenía certidumbre ni de su valor ni de su constancia.

La constante solar significa algo más que $4.921 \text{ MJ/m}^2/\text{h}$. En realidad significan *4.921 Megajulios* de recursos energéticos para la vida de la Tierra (sea emergida o sumergida) a lo largo de cada hora que la vida late.

Esos $4.921 \text{ MJ/m}^2/\text{h}$ durante 4.500 millones de años son realmente el "coste energético" de la vida en la Tierra, porque esta energía es la que se necesitó para producir por fotosíntesis todos sus hidrocarburos. Nótese que el contenido energético de un metro cuadrado de terreno, bien de bosque o de otro recurso natural, es considerablemente menor que $4.921 \text{ MJ/m}^2/\text{h}$, luego analizaré este hecho.

Pero ahora lo que es importante es el tiempo, porque realmente sabemos cómo evaluar la edad de los recursos naturales y utilizando la constante solar saber cuanta energía solar fue necesaria para su producción en la superficie total de la Tierra ($1,27 \times 10^8 \text{ km}^2$ de círculo máximo). De hecho, si la radiación solar incidente sobre la parte superior de la atmósfera es $1,74 \times 10^{17} \text{ W}$, la constante antrópica energía/tiempo será:

$$I s = 1,74 \times 10^{17} \text{ J}$$

Es decir, el tiempo se convierte en energía en la Tierra y la energía por unidad de superficie de la Tierra puede ser convertida en tiempo a través de esta constante.

El tiempo puede ser la medida universal de los recursos naturales.

3. La tierra como un sistema termoeconómico

La forma en que la Termoeconomía analiza los sistemas es desagregando. La descomposición ayuda a encontrar como se forma el coste, como se interrelacionan los componentes y cuáles son sus verdaderas eficiencias. Una buena desagregación de un sistema localiza las causas de ineficiencia y por ello cuantifica la causalidad a través de los valores de costes.

Hasta que la luz solar llega a la superficie de la Tierra, tienen lugar muchos procesos. Así teniendo en cuenta la esfericidad de la Tierra, la radiación solar extraterrestre, sobre una superficie horizontal en ausencia de atmósfera varía dependiendo de la latitud y el día del año. Esta radiación incidente se refleja por las nubes, el polvo y la superficie de la Tierra. Por ello, desde los $118,1 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$ de la constante solar, toma un valor por ejemplo promedio anual de tan sólo $26,9 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$ en la latitud 43°N . Y un mero valor de $13,17 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$ cuando estamos hablando de la radiación solar anual promedio sobre una superficie horizontal en la misma latitud [Duffie y Beckman, 1991].

Solamente una pequeña parte de esta energía se convierte en biomasa a través de la fotosíntesis. La tabla 1 muestra la producción primaria bruta de la biosfera y su distribución entre los principales ecosistemas. (Datos tomados de [E.P. Odum, 1971]). De esta tabla se ve que la productividad primaria promedio es $8,4 \text{ MJ/m}^2/\text{año}$ ó $0,023 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$, lo que muestra la baja eficiencia energética de la fotosíntesis. Estos recursos concuerdan bien con los suministrados por [Giampietro y Pimentel, 1991] que dan un valor para la formación de energía fósil de $0,016 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$ o bien de $1.000 \text{ kcal}/0,7 \text{ m}^2/\text{año}$.

Tabla 1: **Producción primaria bruta aproximada de la biosfera y su distribución entre los ecosistemas** (Base anual). Datos de [Odum, 1971]

Ecosistema	Superficie (10 ⁶ Km ²)	Productividad primaria (MJ/m ² /año)	Productividad bruta total (10 ¹³ MJ/año)	Coste de formación (10 ⁻⁶ s/KJ)
Marino				
Mar abierto	326	4,2	136,9	23
Zona costera	34	8,4	28,6	110
Zona de marea	0,4	25,4	0,8	3.937
Estuarios y arrecifes	2,0	84,0	16,8	187
Subtotal	362,4		183,4	17
Terrestre				
Desiertos y tundras	40,0	,8	3,4	926
Pradera y pastos	42,0	10,5	44,1	71
Bosques clima seco	9,4	10,5	10,1	312
Bosques de coníferas boreales	10,0	12,6	12,6	71
Tierras cultivadas con poco o nulo subsidio de energía	10,0	12,6	12,6	250
Bosques húmedos templados	4,9	33,6	16,4	192
Agricultura subsidiada (mecanizada)	4,0	5,0	20,2	156
Bosques tropicales y subtropicales (con hojas amplias y siempre verdes)	14,7	84,4	121,8	26
Subtotal	135,0		241	26
Biosfera total (no se incluyen casquetes polares) en números redondos	500,0	8,4	420,0	8

Todos estos números indican la baja productividad que tiene la luz solar en la Tierra para producir biomasa. De acuerdo con [Tyler Miller, 1990] solamente un 0,02% [1] de la radiación solar extraterrestre se convierte a través de la fotosíntesis en biomasa. La energía remanente se reparte en 1% viento y olas, 23% evaporación del agua, 42% calentamiento de la atmósfera y de la superficie terrestre y finalmente el 34% de la radiación incidente se refleja al exterior directamente por las nubes, el polvo y la superficie

terrestre.

Una forma simplista de ver este sistema sería:

Este modelo representa a la Naturaleza como una máquina convertidora de energía con una baja eficiencia y cuyo coste energético medio es $118/0,023 = 5146,6$. En comparación, el coste energético medio para producir una unidad de energía eléctrica a partir de carbón es sólo 3. Estos números dan idea de las posibilidades de mejora de la eficiencia que la humanidad dispone aún para utilizar mejor la energía solar. No obstante vale la pena hacer algunas anotaciones:

1. El modelo no representa, como es obvio, el "producto" de la Naturaleza. O en otras palabras, para producir biomasa se necesitan también lluvia, viento, calor, nutrientes que también necesitaron energía solar para producirse. Por ello esta "máquina" perfeccionada a lo largo de miles de millones de años difícilmente puede ser mejorada. Sólo una pequeña fracción de lo que la Naturaleza realiza podrá ser aprovechada por el hombre de una forma más eficiente y desde luego analizando cuidadosamente sus efectos en el largo plazo.
2. Cada molécula de CO_2 que se convierta en carbono sólido, es decir en biomasa, es una molécula menos que ayuda a disminuir el (incremento artificial del) efecto invernadero. La materia orgánica promedio contiene un 44,58% de carbono [Colinvaux, 1986], lo que implica que la fijación de la reacción de fotosíntesis consiste en la formación de nuevo protoplasma en la proporción:

*5.434 MJ de radiación solar + elementos minerales = 54,34 MJ de protoplasma contenido en 3.258 g de composición media
106 C, 180 H, 46 O, 16 N, 1 P, 815 g de ceniza mineral + 154 O₂
+ 4891 MJ de calor disipado (1% eficiencia energética).*

Estos números significan que cada kg de materia orgánica promedio producida por fotosíntesis almacenan 16,7 MJ de exergía y 1,6 kg de CO_2 , y el coste en radiación solar extraterrestre es 5154,6 o bien $86,1 \times 10^3$ MJ/MJ de materia orgánica producida.

Es evidente que plantar biomasa es la única manera de compensar la producción global de CO_2 . Así por ejemplo, si un europeo medio produce 8,20 toneladas métricas de CO_2 al año [World Resources Institute, 1994] y un bosque templado tiene una productividad primaria neta de $17 \text{ MJ/m}^2/\text{año} * 1 \text{ kg materia orgánica/m}^2/\text{año} * 1,6 \text{ kg } CO_2/\text{m}^2/\text{año}$, entonces cada europeo debería plantar aproximadamente entre 0,5 - 1 Has de bosque a lo largo de su vida. Como dice el refrán "ten un niño, escribe un libro y planta un bosque".

Tabla 2: *Producción total de productividad primaria neta promedio de ecosistemas importantes.*

Ecosistema	PPN promedio (MJ/m ² /año)	Producción global (Gt/año)
Bosque	22	20
Tropical	33	10
Templado	17	15
Boreal	17	30
Pradera	17	20
Tropical	17	10
Templada	17	8
Zonas húmedas	25	7
Zonas agrícolas	8	3
Ciudades	8	2
Desiertos	2	1
Tundras	2,45	1
Total	15	114

Datos calculados a partir de [Smil, 1991]

4. Coste temporal de los recursos naturales

Ahora ya podemos calcular los costes ecológicos o temporales de los recursos naturales. Así, si un bosque templado dado, tiene una densidad energética de 594 MJ/m^2 y su productividad primaria neta promedio es de $17 \text{ MJ/m}^2/\text{año}$, se necesitaran 34, años para reemplazarlo. Desde un punto de vista energético un bosque es un sistema agrícola ineficiente. La agricultura energética hoy permite plantar chopos, eucaliptos o sauces que puedan ser cortados entre 2 y 8 años dependiendo de la especie y su localización [Brower, 1992]. Este es un ejemplo de cómo el conocimiento y la tecnología pueden ser utilizados para compensar más rápidamente el daño del hombre sobre la Tierra.

En otro caso extremo a la producción de biomasa, se encuentra el carbón. Así, si los recursos de una región como Aragón, se estiman en $9,7 \text{ EJ}$ ($1 \text{ EJ (exajulio)} = 10^{18} \text{ J}$) [Turégano, 1984] y su tiempo de formación ha sido de 200 millones de años, su coste temporal unitario será de $0,5 \text{ s/kJ}$ ó $0,18 \text{ h/MJ}$ ó $0,02 \text{ año/GJ}$ (se ha considerado el poder calorífico superior del lignito de Teruel de $12,5 \text{ GJ/tm}$).

La tabla 1 muestra el coste de formación en unidades de tiempo de diferentes ecosistemas en s/kJ , y se calcula como la inversa de su producción bruta total. Así en ecosistemas marinos se necesitan $17 \times 10^{-6} \text{ segundos}$ para producir un kilojulio de biomasa mientras que los ecosistemas terrestres son muy productivos necesitándose $3 \times 10^{-6} \text{ segundos}$ en promedio.

En otras palabras la biomasa es producida por la biosfera $0,5/(8 \times 10^{-6})$ 60.000 veces más rápida que los combustibles fósiles. Este resultado manifiesta la urgente necesidad que tiene la humanidad de utilizar

recursos renovables en lugar de no renovables. Su coste temporal es 10^5 veces mayor. Ahora, ya tenemos unidades para evaluar la deforestación de la Amazonia o la disminución de la capa de ozono, son simplemente unidades de tiempo para restaurarlos bien en condiciones naturales o en algunos procesos artificiales acelerados (teniendo presente los peligros de la ignorancia con que la Naturaleza actúa).

5. Energía, espacio y tiempo en la Tierra

Las ideas anteriormente expuestas son solamente nuevas en un pequeño contexto ya que muchos autores sobretodo del campo ecológico-económico han propuesto ideas similares. Entre los distintos autores es importante reconocer el trabajo de M.T. Odum quien utilizó ampliamente el concepto de energía embutida para analizar las relaciones entre el hombre y la biosfera.

[Kümmel, 1989] y [Kümmel y Schüssler, 1991] propusieron calcular el "requerimiento energético para prevenir la contaminación" que es la cantidad de combustibles fósiles y su producción asociada de dióxido de carbono, que se necesita para eliminar un contaminante. En términos termoeconómicos esto se llama coste exergético de los residuos. No obstante estos autores convierten este parámetro en el parámetro "espacio solar" que es la cantidad de terreno necesario para asimilar naturalmente la contaminación producida. Hacen análisis sobre los requerimientos de espacio solar para producir productos diferentes en tanto que disponen de la energía fósil embutida, las emisiones, así como las necesidades de espacio industrial y urbano. Todas estas necesidades de espacio son una contribución negativa a la sostenibilidad.

Por otra parte, [Giampietro y Pimentel, 1991] consideran que los combustibles fósiles y los fertilizantes representan una prima de espacio tiempo para la sociedad. Proponen que 1.000 kcal de combustible fósil es equivalente a $0,7 \text{ m}^2$ año de actividad espacio temporal de la biosfera y un kilogramo de fertilizante nitrogenado son $822,6 \text{ m}^2$ año de actividad espacio-temporal de biosfera.

[Puntí, 1982] propuso el uso de tiempo como medida del coste ecológico y proporcionó balances de tiempo para distintos recursos así como para el caso de la agricultura española. Su trabajo es el antecedente de este artículo.

La energía, energía embutida, necesidad de espacio solar, actividad espacio temporal de la biosfera, y tiempo son conceptos que se han propuesto para contabilizar la relación entre el hombre y los recursos naturales. ¿Son todos ellos equivalentes?

Una persona puede ser rica en espacio o en energía, nunca en tiempo. Incluso la nación más poderosa no puede comprar el tiempo. La historia nos enseña que las guerras se han producido por la necesidad de espacio (lebensraum de los nazis) o por la necesidad de recursos fósiles (como la guerra del Golfo). El sacrificio de recursos humanos siempre se hizo en el nombre de adquirir o salvaguardar otros recursos. A mi entender, nunca hubo guerras buscando el tiempo.

Desde el punto de vista de la física y de la tecnología, la humanidad más tarde o más temprano, tendrá la posibilidad de descubrir nuevas fuentes de energía como la de la fusión. Aparentemente no existen límites a la cantidad de energía que el hombre puede manejar. El espacio es otra cuestión, porque la Tierra es un planeta vivo limitado, y no todas las superficies son igualmente apropiadas para la vida. En pocas décadas el espacio será un recurso escaso si no lo es ya en algunas áreas.

No obstante el tiempo, es el recurso más limitado que disponemos. Nuestra vida y eso es todo. La promesa más común de todas las religiones es tiempo, eternidad.

Tiempo, espacio y energía no son interconvertibles definitivamente. Energía y espacio se pueden convertir en tiempo (humano) pero lo opuesto no es verdadero.

[Georgescu-Roegen, 1971] apunta dos conceptos asociados al paso del tiempo: Irrevocabilidad e irreversibilidad. Algunas veces son términos que se confunden. Irrevocabilidad es la imposibilidad de ir hacia atrás restaurando lo que fue. Irrevocable es algo que ya no puede ser cambiado una vez que empezó.

Si quemamos una obra de arte, ésta se habrá destruido para siempre; y si muero nadie me resucitará. Por el contrario, la irreversibilidad se asocia con la reconstrucción, es decir con el coste de ir hacia atrás cuando queremos reemplazar algo.

El segundo principio nos habla de irreversibilidad, no de irrevocabilidad, porque cuando algún proceso es irreversible significa que o podemos ir para atrás extrayendo del ambiente exactamente la misma cantidad de calor y trabajo que el proceso nos dio. Necesitamos un extra de calor y/o trabajo para realizar el proceso opuesto. No obstante este proceso opuesto es siempre posible. El coste exergético de ir hacia atrás es siempre mayor que la exergía proporcionada por el proceso hacia adelante.

La Termodinámica trata con procesos irreversibles, no con procesos irrevocables. Por ello la flecha termodinámica del tiempo está ligada a la irreversibilidad, y la irreversibilidad está ligada con la contabilidad de costes de los recursos.

La contabilidad nos habla de flujos y reservas, no sólo flujos sino también fondos. Además la verdadera naturaleza del tiempo es dinámica, el tiempo fluye inexorablemente.

Por ello, necesitamos inventar otro tipo de tiempo, el tiempo "estático" para contabilizar las reservas de recursos. Incluso aunque estas palabras "estático" y "tiempo" son contradictorias, se necesitan conceptualmente. Cuando utilizamos recursos naturales, lo que estamos destruyendo rápidamente es tiempo acumulado.

La Termodinámica convencional o incluso mejor la Termoestática, no utiliza el tiempo para describir los procesos. Un proceso cuasiestático es un proceso con suficiente duración para considerar todos los estados intermedios en equilibrio. Todas las magnitudes se definen para los estados de equilibrio, incluso la entropía. No obstante, estamos seguros del paso del tiempo cuando medimos la entropía, tanto del sistema como la de sus alrededores. ¿Cómo es posible una ciencia que explícitamente excluye los efectos del tiempo de sus análisis y sin embargo da cuenta del efecto más esencial del tiempo, es decir, la irreversibilidad?. Esta contradicción aparente se relaciona con la manera en la cuál la Termodinámica considera al tiempo como una sucesión de estados de entropía creciente. Si no hay incremento de entropía no hay paso termodinámico del tiempo. Para un sistema aislado en equilibrio, no hay tiempo termodinámico incluso aunque el tiempo pase. En otras palabras, no todos los aspectos del tiempo están contenidos en la flecha termodinámica del tiempo. Esta flecha está relacionada con una naturaleza estática más que dinámica en el sentido que el tiempo estático no cambia si la entropía (del universo) no aumenta. La acumulación de bienes, recursos naturales y obras de arte requieren energía pero sobretodo tiempo. La energía del Sol a lo largo de 4500 millones de años es el coste de la vida en la Tierra.

¿Por qué no medir este capital natural del que dispone la humanidad en unidades de tiempo (estático)?. El tiempo acumulado puede ser una medida de los recursos y de la diversidad.

6. Termoeconomía, economía y conocimiento

Todos los procesos naturales pueden ser reconvertidos en unidades temporales, dividiendo la densidad de su energía acumulada $[E]/[L^2]$ por su productividad natural $[E]/[L^2]/[t]$, tal y como se indicó anteriormente. Y todos los procesos artificiales pueden igualmente ser reconvertidos en unidades temporales, dividiendo la potencia por la energía.

El tiempo estático es acumulativo. El tiempo necesario para producir recursos, incrementado en el tiempo de residencia del proceso equivale al tiempo necesario para la fabricación de los productos. Por tanto, podemos hacer balances temporales de la misma manera que lo hacemos con la exergía o el dinero. La Termoeconomía puede también aplicarse en la contabilización del tiempo, y en muchos casos para la medida del bio-espacio-tiempo. No existe motivo alguno para excluir tales unidades de medida.

La economía siempre ha considerado que el tiempo es un factor relevante en la producción. El refrán "el tiempo es dinero", resume de una forma expresiva esta idea. La expresión "costes de oportunidad",

"estrategia", y otras expresiones similares, muestran la naturaleza dinámica, en mayor medida que estática, de la economía. Las finanzas constituyen en sí mismas un mundo aparte dentro del mundo de la economía convencional. Pero, no tenemos tiempo suficiente para medir nuestro consumo de tiempo.

Se dice que la economía está dirigida por el mercado y que el mercado es el resultado de todas las fuerzas que confluyen en la sociedad en un momento dado. Pero la "ciencia de la casa", la ciencia del "oikos", ha sido convertida en algo profundamente ajeno a la misma. Todo es valorado/asignado a un precio dado. Sin embargo nadie es consciente del coste de cualquier bien en términos de recursos naturales.

El valor de mercado de los recursos naturales se asimilan en la práctica a su coste de extracción en términos monetarios. Ello siempre será barato, debido bien sea al bajo coste laboral propio de los países en vías de desarrollo, o bien gracias a la maquinaria ultramoderna, que goza de una elevada productividad en términos de tonelada/hora trabajada.

Los recursos naturales, en términos de coste/hora no valen prácticamente nada, ni tampoco es significativo su coste de transporte. Lo realmente valorado es el valor añadido que aplicamos a los productos transformados. Esto explica claramente el desequilibrio de la balanza de pagos de los países y regiones que exportan materias primas, que no consiguen escapar de su subdesarrollo, y que están irreversiblemente condenados a agotar sus recursos naturales.

Los balances energéticos no nos dan una clara imagen de lo que realmente intercambiamos a diferencia de lo que ocurre con las balanzas de pagos. Lo que realmente da una clara imagen complementaria de la economía son los balances de costes de las materias expresadas en unidades de recurso natural que se da entre las regiones y los países.

Un mundo limitado, con recursos materiales finitos, y una capacidad de reposición de los mismos extremadamente lenta, precisa de manera urgente instrumentos de medida del tiempo que doten a los gobiernos, la humanidad y a los individuos de la consciencia de que lo que realmente estamos perdiendo es tiempo. Irónicamente, cuanto más rápido vamos, más tiempo perdemos.

El único modo de ahorrar tiempo es incrementando la eficiencia, la conservación, y el uso creciente de las energías renovables.

La ciencia y la investigación nos permiten conocer cada vez mejor los mecanismos esenciales, y aprender a aprovecharnos de ellos para usarlos en beneficio propio. Nuestro desarrollo no debe ser cuestionado únicamente a causa de nuestro despilfarro de recursos naturales; existe algo positivo en el hecho de que se fomenta también el desarrollo de nuestro conocimiento. A medida que avanzamos, incorporamos las nuevas tecnologías aprendidas a nuestros adelantos.

El conocimiento puede ser recopilado en libros y ser reutilizado de forma indefinida. La energía puede ser usada una sola vez y queda degradada.

Esta tecnología puede ser utilizada tanto incrementando el conocimiento del público, enseñándole a ser más eficiente, como incrementando el poder de ciertos individuos frente a los demás. Al final siempre reaparece una bifurcación esencial: la tecnología da al hombre omnisciencia u omnipotencia, pero no ambas en igual medida.

Intercambiar recursos por tecnología, éste es el lema. Conocimiento es lo que legaremos a las generaciones futuras, y al final el conocimiento y el desarrollo presentan nuestra contribución a aquellos países que venden sus recursos naturales a cambio de poco.

Cada vez que ahorramos energía y mejoramos la eficiencia en el uso de los recursos naturales, frenamos la irreductible máquina del tiempo. Así, desde una visión estática de la economía, la tecnología, la cultura y agricultura actúan como un tiempo negativo que contrarrestan nuestro consumo de materias primas.

El tiempo negativo existe únicamente dentro de una visión estática/termodinámica del tiempo y puede ser medida en términos de mejora en la eficiencia de los recursos naturales.

La eficiencia representa el vínculo conceptual que relaciona la termodinámica con la economía y con la teoría de la información.

Según [Månsson, 1990], a temperatura ambiente, la unidad "natural" de exergía relacionada con un bit de información $KT \ln 2$, es aproximadamente $3 \times 10^{-21} J$. Este autor propone que la media antrópica de la constante solar energía/tiempo es de $1 s = 1,73 \times 10^{17} J$. Esto significa que la conversión información/tiempo es $1 bit = 1,72 \times 10^{-38} s$.

Estos valores son limitativos en el sentido de que son las máximas alcanzables por el hombre. Todo el mundo es conocedor de que están afectadas por la actual eficiencia de los procesos naturales y artificiales que tienen lugar en la Tierra. Sin embargo, son unos números hermosos debido a su enormidad.

Son la prueba de que la esperanza no debe perderse.

7. Referencias

Brower, M. (1992) **Coal Energy Renewable Solutions to Environmental Problems**. (Ed. by The MIT Press. Cambridge. Massachusetts)

Colinvaux, P. (1986) **Ecology**. (Ed. by John Wiley and Sons, New York)

Duffie, J.A.; Beckman, W.A. (1991) **Solar Engineering of Thermal Processes**. (Ed. by John Wiley & Sons, New York)

Georgescu-Roegen, N. (1971) **The Entropy Law and the Economic Process**. (Harvard Univ. Press. Cambridge. Massachusetts)

Giampietro, M.; Pimentel, D. (1991) **Ecological Economics**. 4. (117-144)

Kümmel, R. (1989) **Energy as a Factor of Production and Entropy as a Pollution Indicator in Macroeconomic Modelling**. *Environmental Economics* 1 (2), pp. 161-180

Kümmel, R.; Schüssler, V. (1991) **Heat Equivalents of Noxious Substances: A Pollution Indicator for Environmental Accounting**. (*Ecological Economics* 3 (2), pp. 139-156)

Månsson, B.Å. (1990) **Thermodynamics and Economics. In the book: Finite-Time Thermodynamics and Thermoeconomics**. (Ed. by S. Sieniutycz and P. Salamon. Taylor and Francis, New York)

Odum, E.P. (1971) **Ecología**. (Ed. by Interamericana. Mexico)

Puntí, A. (1982) **Balance Energético y Costo Ecológico de la Agricultura Española**. (*Agricultura y Sociedad*. Abril-Junio, pp. 289-300)

Smil, V. (1991) **General Energetics, Energy in the Biosphere and Civilization**. (Ed. by John Wiley and Sons. New York)

Sverdrup, H.U.; Johnson, M.W.; Fleming, R. (1942) **The Oceans, their Physics, Chemistry and General Biology**. (Ed. by Prentice Hall Inc. New Jersey)

Turégano, J.A. et al. 1984 **Inventario Energético de Aragón**. (Ed. by Cometa. Zaragoza, Spain)

Tyler Miller Jr., G. (1990) **Resource Conservation and Management**. (Ed. by Wadsworth Pub. Co. Belmont. California)

Valero, A.; Lozano, M.A.; Muñoz, M. (1986) **A general theory of exergy saving, I, II and III**. (Computed Aided Engineering and Energy Systems: Second Law Analysis and Modelling, AES Vol. 2-3, ASME Book H0341C, pp. 1-21, New York)

World Resources (1994-1995) **A report by the World Resources Institute**. (ISBN 0-19-521045-X. Oxford Univ. Press, Oxford)

Fecha de referencia: 30-4-1998

1: El número 0,02% se debe tomar como una estimación aproximada ya que varía dependiendo de los autores.

Boletín CF+S > 5 -- Especial: LA CONSTRUCCIÓN DE LA CIUDAD DESPUÉS DE KIOTO >
<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n5/aaval.html>

Edita: Instituto Juan de Herrera. Av. Juan de Herrera 4. 28040 MADRID. ESPAÑA. ISSN: 1578-097X