ICE
Revista de Economía

NUMERO 670-671. JUNIO-JULIO 1989

CONSEJO CIENTIFICO
Fabián Estapé · E. Fuentes Quintana · Luis Gámir · José Piera · Jaime Requeijo · L. A. Rojo · J. L. Sampedro · Ramón Tamames · Gabriel Tortella · Félix Varela · M. Varela Parache · Angel Viñas.

CONSEJO DE REDACCION
León Benelbas · Ramón Botas · Manuel Conthe · Indalecio Corugedo · Guillermo de la Dehesa · M. A. Díaz Mier · J. J. Durán · Fernando Eguidazu · V. J. Fernández · Luis de Guindos · Guillermo Kessler · L. A. Mañas · Antonio Oporto · Clemente del Río · J. J. Ruiz · Vicente Saval · Angel Torres.

DIRECTOR
Ernö Pálla

DIRECTOR ADJUNTO
M. Enrique Alejo

REDACCION
Mónica Junquera · Marilén Núñez · Carmen Bahamonde
Isabel Sampedro (Jefe de Redacción)

ESTUDIOS ECONOMICOS E INVESTIGACION
Luis Portillo y Pasqual del Riquelme.

PORTADA
César Bobis

DISEÑO GRAFICO
Nacho Urbina

MAQUETACION
Jesús Ramírez

REDACCION Y ADMINISTRACION
Paseo de la Castellana, 162, piso 16. M-28046
Teléfonos 458 11 78 y 458 00 16

PUBLICIDAD Y SUSCRIPCIONES
CEDISA. Almirante, 21. M-28004. Teléfono 308 06 45
Suscripción anual: 6.500 (IVA incluido)
Precio de este ejemplar: 1.400 ptas.

Información Comercial Española se publica mensualmente por la Secretaría de Estado de Comercio del Ministerio de Economía y Hacienda. «ICE» no se solidariza necesariamente con las opiniones expuestas en los artículos que publica, cuya responsabilidad corresponde a los autores.

Imprime:
GRAFOFFSET, S. L. Getafe (Madrid)
ISSN: 0019-977X
Depósito Legal: M-3.740-1958
NIPO: 102-89-001-9

SUMARIO

ENERGIA

	3	Presentación.
José Manuel Naredo y Antonio Valero	7	Sobre la conexión entre termodinámica y economía convencional.
M.ª Luisa Huidobro	17	Energía y planificación.
Fernando Maravall	35	El sector energético español ante el mercado interior comunitario.
Francisco Mingot y Luis Crespo	43	Energía y medio ambiente. Energías renovables.
Helena Fusté i Munne	53	Energía y medio ambiente. Las nuevas fuentes de energía.
Alberto Ceña	73	La industria española y el ahorro energético.
Luis Arimany de Pablos	87	La energía en el siglo XXI. ¿Enfoque de oferta o de demanda?
Jorge Fabra Utray	97	La explotación del sistema eléctrico nacional en 1988.
Luis del Val	107	Los costes de generación de la energía eléctrica y el debate nuclear.
José Allende	121	Consideraciones generales en torno a los costes de la alternativa nuclear.
Bonifacio García-Siñeriz	129	La exploración de petróleo en España.
Ramón Hugo Chaves Vidal	139	La adaptación del monopolio de petróleos y los problemas del sector de refino.
Valentín Edo Hernández	154	El monopolio español de petróleos 1927-1991: Un análisis descriptivo en el contexto de las características monopolísticas, fiscales, de gestión y estructurales.
Javier Alcaide	164	El sector del gas natural: Evolución y desarrollo futuro ante el Mercado Unico Europeo.
Eloy A. Pelegry	178	Carbón térmico. El papel de las importaciones.

LOS LIBROS

201 Notas críticas, reseñas, lista de libros

Coordinador especial para este número: Luis Arimany de Pablos, M.ª Luisa Huidobro y José Manuel Naredo.

SOBRE LA CONEXION ENTRE TERMODINAMICA Y ECONOMIA CONVENCIONAL

*José Manuel Naredo**
*Antonio Valero***

El propósito de este artículo es mostrar, primero, los puntos de conexión y de divorcio entre la Termodinámica y la Economía convencional, con ánimo de lograr un mejor entendimiento entre termodinámicos y economistas, para indicar después, cómo la función del coste exergético y los conceptos que la soportan pueden contribuir a la aproximación de ambas ciencias sobre la base de elaboraciones cuantitativas comunes.

Introducción

La trascendencia económica de las elaboraciones de la Termodinámica no ha pasado desapercibida para los economistas. Hace ya más de un siglo que A. A. Cournot —a quien a menudo se le atribuye la paternidad de la Economía matemática— había señalado el interés de esta conexión, sobre todo para una ciencia tan necesitada de instrumentos de medida como estimaba que era la Economía[1]. En los últimos tiempos este tipo de preocupaciones aisladas ganaron en amplitud y en elaboración. El libro de otro prestigioso economista matemático, N. Georgescu Roegen, titulado *La Ley de la Entropía y el proceso económico*[2], marcó en 1971 un paso importante en este sentido. Muchos son los autores que han reflexionado desde entonces sobre el significado económico de la Ley de la Entropía o Segundo Principio de la Termodinámica. Pues esta Ley, al presentar la pérdida de energía utilizable como algo inherente a todos los procesos del mundo físico, recae sobre el fundamento mismo de la escasez objetiva con la que está llamada a toparse la ciencia económica.

Estas reflexiones están llenas de contenido conceptual y filosófico; sin embargo, dejan a los termodinámicos la tarea de la cuantificación. Pero para enfocar y resolver estos problemas de una forma cómoda y general, la Termodinámica convencional no ha dispuesto de herramientas adecuadas. La entropía es una función excesivamente abstrusa cuando se quiere calcular en sustancias reales. La energía utilizable, o «exergía», más simple de aprehender, tiene sin embargo similares o mayores problemas de cálculo y no han sido desarrollados sus análisis a pesar de que esta función se conoce desde principios de siglo.

Era y es necesario desarrollar la Termodinámica en la dirección de la Economía, utilizando los mensajes de ésta y cuantificándolos en términos físicamente objetivables. El libro de J. M. Naredo, *La Economía en evolución*[3], hacía suyo el propósito de «extender las preocupaciones económicas

* NAREDO, J. M., es doctor en Ciencias Económicas y Estadístico Facultativo. Actualmente trabaja como subdirector de Estudios en el Banco de Crédito Agrícola.

** VALERO, A., es doctor en Ciencias Químicas y catedrático del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza.

Nota de la redacción. El lector interesado puede encontrar una explicación clara y concisa del significado económico del 2.° Principio de la Termodinámica en Georgescu Roegen, «Energía y mitos económicos», *Información Comercial Española,* 501, mayo 1975.

[1] Cfr. COURNOT, A. A.: «Traité de l'enchaînement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire», París, Hachette, 1861.

[2] GEORGESCU ROEGEN, N.: «The entropy Law and the Economic Process», Cambridge Mass., Harvard University Press, 1971.

[3] NAREDO, J. M.: «La economía en evolución, Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico», Madrid, Ministerio de Economía y Hacienda. Siglo XXI, 1987.

a los especialistas de otras disciplinas, coadyuvando a que sus elaboraciones teóricas trasciendan de las escalas parcelarias usuales para cubrir las exigencias que plantea la economía en las sociedades de hoy. Desde esta perspectiva, lo económico escaparía de su actual aislamiento para dar lugar a enfoques transdisciplinares capaces de derribar la Torre de Babel de las especialidades». Para ello, en la sexta parte de la obra citada, se apuntaban sendas lagunas teóricas a llenar por los practicantes de las ciencias de la naturaleza utilizando las posibilidades que brindan el Segundo Principio de la Termodinámica y la Teoría General de Sistemas.

A la vez que se hacían este género de reflexiones, en diciembre de 1986, en el Congreso de invierno de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, ASME, dentro de la sección de Sistemas Energéticos Avanzados, se presentó una nueva «Teoría General del Ahorro de Exergía» por los investigadores españoles del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, Antonio Valero, Miguel Angel Lozano y Mariano Muñoz[4].

Partiendo de la finalidad aparentemente modesta de aportar el instrumental teórico necesario para desagregar el análisis de la eficiencia energética de ciertas instalaciones industriales, la teoría propuesta apuntaba hacia aplicaciones mucho más amplias y orientadoras de la gestión económica de la energía y de los materiales en general, respondiendo a las demandas antes mencionadas de establecer las conexiones cuantitativas entre Termodinámica y Economía que más adelante trataremos de esbozar[5].

Esta teoría unificó conceptos previamente establecidos y sentó las bases termodinámicas para la investigación del proceso de formación del coste en los sistemas energéticos, basada en dos ideas fundamentales: la primera, que el ahorro de recursos —materias primas, energía— debe basarse en el Segundo Principio de la Termodinámica, a través de la cuantificación sistemática de la energía utilizable en los procesos o «exergía». Y la segunda, que la Física no es suficiente para calcular los costes de los sistemas diseñados por el hombre. Además de sus leyes, es necesario conferir a los procesos un propósito, una finalidad, que el Segundo Principio se encarga de objetivar después en términos de eficiencia.

Estas dos condiciones permiten, por sí solas, determinar los «costes termodinámicos», es decir, la cantidad de recursos empleados en producir todos y cada uno de los flujos físicos de los sistemas energéticos, cualquiera que sea su complejidad estructural.

A partir del conocimiento de los costes exergéticos o termodinámicos es posible dar una base objetiva al proceso de formación de los costes monetarios en los sistemas térmicos, sin más que conocer los precios de los recursos energéticos y de las materias primas, así como los costes del capital introducido en el diseño y mantenimiento de todos sus componentes.

La teoría presentada no pasó desapercibida en los círculos especializados en ingeniería termodinámica. Así, en 1987 fue galardonada con el premio «Edward F. Obert» (6) a la mejor contribución del año en estos temas y aún los dos años siguientes, 1988 y 1989, ha vuelto a ser galardonada con el mismo premio. Se mostró que su aplicación al análisis del funcionamiento de calderas de vapor de centrales termoeléctricas permitía mejorar sensiblemente su diagnóstico con respecto a las técnicas convencionales actualmente utilizadas. Sin embargo, aunque la nueva función propuesta del coste o gasto exergético ha sido obtenida, aplicada y desarrollada para sistemas térmicos, puede tener aplicaciones mucho más allá del ámbito estricto de su uso inicial.

En efecto, si en todos los procesos físicos, cualquiera que sea su naturaleza, se pierde energía utilizable, es razonable pensar que la función del coste exergético pueda ser una base objetiva para medir los costes de producción. Nótese que no estamos diciendo su precio o su valor sino los costes medidos en unidades de recursos empleados. Ello daría pie a una reformulación de la Economía, que permitiría cuantificar, a la luz del Segundo Principio de la Termodinámica, problemas relacionados

[4] VALERO, A.; LOZANO, M. A. y MUÑOZ, M.: «A general theory of exergy saving», New York, The American Society of Mechanical Engineers, 1987.

[5] Tenemos que expresar nuestro agradecimiento a la clarividencia de FERNÁNDEZ YAÑEZ, M. C. al apreciar la convergencia entre las preocupaciones y los trabajos de los autores del presente artículo, facilitando así su relación por encima de barreras académicas y geográficas.

[6] Premio concedido por el Comité de Sistemas Energéticos Avanzados de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, que constituye hoy el foro internacional más prestigioso en esta materia.

con la disposición y degradación de nuestros recursos naturales, la evolución del medio ambiente hacia temperaturas más elevadas y con composición más dispersa, el problema del ahorro de recursos por reciclado, la valoración más objetiva y a diferentes niveles de agregación de los efectos nocivos de la producción y del consiguiente aumento de residuos, cada vez más y más acelerado, etcétera.

El propósito de este artículo es mostrar, primero, los puntos de conexión y de divorcio entre la Termodinámica y la Economía convencional, con ánimo de lograr un mejor entendimiento entre termodinámicos y economistas, para indicar, después, cómo la función del coste exergético y los conceptos que la soportan pueden servir de base para la aproximación de ambas ciencias.

I. Enfoque termodinámico del proceso de «producción»

Nomenclatura

F Recursos utilizados en el proceso.
P Producto obtenido en el proceso.
I Irreversibilidad total o degradación total originada por el proceso.
L Pérdidas de calidad interna.
R Residuos generados.

Unidades

Las unidades de F, P e I deben ser energéticas y vinculadas, por tanto, al Sistema Internacional de Unidades y no unidades monetarias. Para ello se utiliza el concepto de «exergía», que es una medida objetiva que equipara todas las potencialidades termodinámicas de un flujo físico. Su valor es objetivo respecto de unas condiciones ambientales dadas y es independiente del aprecio que se tenga por un tipo u otro de manifestación material o energética.

Ecuación básica representativa del proceso

$F - P = L + R = I$

postulado: $F > P$ ó $I > 0$ [1]

Como la irreversibilidad debe ser siempre positiva, dada la definición termodinámica de rendimiento:

$$\eta = \frac{P}{F};$$

tenemos que: $0 < \eta < 1$.

Es decir, que en virtud de la Segunda Ley de la Termodinámica, la eficiencia absoluta de todos los procesos físicos siempre está comprendida entre cero y uno.

II. Enfoque económico standard del proceso de «producción»

Nomenclatura

CI Recursos utilizados en el proceso (o consumos intermedios).
PR Producto obtenido en el proceso.
VA Valor añadido en el proceso.

Unidades

CI, PR y VA deben medirse en las mismas unidades monetarias y no en unidades físicas.

Ecuación básica representativa del proceso

$PR - CI = VA$

postulado: $PR > CI$ ó $VA > 0$ [2]

La única acepción concreta y medible que se da en economía al término «producción» se refiere a la producción de valores monetarios. El proceso así denominado debe arrojar, por tanto, valores añadidos positivos y, si esto no ocurriera, se estima que el proceso en cuestión carece de viabilidad económica.

Siendo $PR > CI$ y definiendo la rentabilidad monetaria de un proceso como

$$\xi = \frac{PR}{CI},$$

se postula que en los procesos económicos viables: $\xi > 1$.

III. Conexión formal entre ambos enfoques

a) Supongamos que [1] y [2] se refieren a aspectos físicos y monetarios de un mismo proceso.

b) Supongamos que los recursos utilizados F y el producto P en [1] coinciden exactamente con los que son objeto de valoración monetaria en [2].

c) Supongamos que se conoce el precio de las unidades físicas de los recursos introducidos y de los productos obtenidos en el proceso, expresadas todas ellas en las mismas unidades (por ejemplo: calorías) como se puntualizó en el epígrafe I.

d) Supongamos que no existen más costes monetarios, que los derivados de las unidades físicas introducidas en el proceso.

Considerando, para simplificar, un único flujo físico de recursos utilizados y un único flujo de producto (medibles, por ejemplo: en calorías), con precios p_F y p_P, respectivamente, tenemos:

$$\begin{array}{l|l} PR = P \cdot p_P & \text{como, según [2], } PR > CI \\ CI = F \cdot p_F & \text{tenemos que } P \cdot p_P > F \cdot p_F \end{array}$$

$$\text{y que } \frac{p_P}{p_F} > \frac{P}{F} \qquad [3]$$

o, en otras palabras, el proceso de «producción» en el enfoque económico standard exige que la relación entre el precio de una unidad de producto y el de una unidad de gasto sea mayor que el número de unidades físicas de recursos requeridas para obtener una unidad de producto; o, dicho de otra manera, que la revalorización unitaria del gasto monetario, supere a la pérdida física por unidad de producto; o, también, que la ganancia de calidad alcanzada en el proceso, medida en términos monetarios, compense la dispersión generada en términos físicos.

El cumplimiento de la condición [3] también puede expresarse diciendo que

$$1 > \eta > \frac{p_F}{p_P}$$

es decir, que la eficiencia termodinámica

$$\left(\eta = \frac{P}{F} \right)$$

ha de ser mayor que la relación entre el precio del recurso y el del producto. La expresión [3] en cualquiera de sus manifestaciones, puede presentarse como el *teorema de conexión* entre las dos versiones del proceso de «producción» que nos ofrecen la Termodinámica y la Economía standard.

En el caso general de *m* flujos de recursos $F = [F_1 \ldots F_m]$ y de *n* flujos de productos $P = [P_1 \ldots P_n]$ con *m* y *n* precios, respectivamente

$$p_F = \begin{bmatrix} p_{F_1} \\ \vdots \\ p_{F_m} \end{bmatrix}; \quad p_P = \begin{bmatrix} p_{P_1} \\ \vdots \\ p_{P_n} \end{bmatrix}, \text{ la expresión } P \cdot p_P > F \cdot p_F$$

mostraría la desigualdad entre los dos escalares resultantes de los dos productos matriciales

$$P \cdot p_P = \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot p_{P_i}$$

$$F \cdot p_F = \sum_{j=1}^{m} F_j \cdot p_{F_j}$$

De un modo general, la expresión

$$P \cdot p_P > F \cdot p_F \qquad [4]$$

es la condición de la existencia misma de «producción» en el enfoque económico standard: por definición, el valor total (en términos monetarios) de los productos obtenidos ha de ser mayor que el valor monetario total de lo gastado en el proceso. O lo que es lo mismo, ha de producirse una revalorización monetaria (media ponderada) de las unidades físicas introducidas en el proceso, que supere al valor (medio ponderado) de las pérdidas físicas que se han ido produciendo a lo largo del mismo en virtud de la Segunda Ley de la Termodinámica.

La expresión [4] muestra un claro isomorfismo con aquélla relativa al equilibrio de la palanca: si atribuimos a P y F el papel de fuerzas y postulamos que $P < F$, la condición de viabilidad económica del proceso exigiría que los precios, ejerciendo el papel de brazos de la palanca, invirtieran el desequilibrio entre P y F en favor del producto medido en términos monetarios, haciendo que $P \cdot p_P > F \cdot p_F$.

IV. Diferencias y convergencias entre ambos enfoques

Las distintas unidades en que se expresan [1] y [2] señalan una primera diferencia a tener en cuenta: [1] se expresa en unidades físicas vinculadas al SI, que permanecen invariables en todo tiempo y lugar, pudiendo servir de base a elabo-

raciones de la ciencia cuantitativa. Por el contrario, [2] sólo puede expresarse en unidades monetarias (no vinculadas al SI), cuyo poder adquisitivo está sujeto a variaciones en el espacio y en el tiempo que sólo cabe corregir de modo parcial y arbitrario, no pudiendo servir de base a elaboraciones de una ciencia cuantitativa, en el sentido estricto que se le concede a este término.

La oposición entre los postulados adoptados en los epígrafes I y II lleva a la oposición formal entre las expresiones [1] y [2]. En efecto, en virtud del Segundo Principio de la Termodinámica, el número de unidades (físicas) de producto ha de ser en [1] siempre inferior al número de unidades (físicas) de recursos empleados. Y, al ser siempre $F > P$, el saldo de [1] es una pérdida o residuo no deseado, cuyo montante trata de reducirse para que el proceso gane eficiencia desde el punto de vista termodinámico.

Por el contrario, en [2] se postula que el número de unidades monetarias que vale el producto ha de ser siempre superior al número de unidades monetarias que valen los recursos empleados. Y al cumplirse que $PR > CI$, el saldo de [2] es una ganancia monetaria deseada, cuyo montante trata de ampliarse para que el proceso gane en rentabilidad monetaria.

Esta oposición formal entre los postulados en los que se basa uno y otro enfoque, hace que sea lógicamente incoherente la pretensión de aplicar símiles termodinámicos para razonar sobre la noción usual de sistema económico, de la que forma parte la noción de producción recogida en [2] y viceversa.

Cabe observar, sin embargo, que el objetivo de aumentar la eficiencia termodinámica

$$\left(\eta = \frac{P}{F} \right)$$

converge con el objetivo de aumentar la rentabilidad monetaria

$$\left(\xi = \frac{PR}{CI} \right)$$

Puesto que $\dfrac{PR}{CI} = \dfrac{P \cdot p_P}{F \cdot p_F}$

(si suponemos dados p_P y p_F), tenemos que un aumento de la eficiencia

$$\left(\frac{P}{F} \right)$$

se traduce automáticamente en un aumento de la rentabilidad

$$\left(\frac{PR}{CI} \right)$$

De esta manera, cualquier investigación que apunte a mejorar la eficiencia termodinámica de un proceso dado no sólo es compatible, sino que converge con el objetivo de la Economía standard de mejorar la rentabilidad económica de ese proceso. Lo que no quita para que la primera siga postulando que $\eta < 1$ y la segunda que $\xi > 1$.

No deja de sorprender que esta conexión entre Termodinámica y Economía no haya sido formalizada y dispuesta para ser aplicada en la gestión hasta hace muy poco: es a partir de los trabajos de Valero, Lozano y Muñoz[7] que se dispone de un instrumental analítico útil para el estudio desagregado de la eficiencia energética de un proceso de «producción» determinado, en relación con los costes monetarios que genera, permitiendo abordar conjuntamente la mejora de la eficiencia energética y la reducción de los costes monetarios.

El enfoque termodinámico puede contribuir también a mejorar la rentabilidad monetaria de una determinada actividad «productiva», informando sobre la manera de desplazar los flujos de entrada hacia aquellos recursos con precios más bajos e, incluso, carentes de precio. Información que debe complementarse, claro está, con el análisis de los costes monetarios de captación y transformación de los recursos en el propio proceso. De esta manera, los procesos más rentables no tienen por qué ser los más eficientes desde el punto de vista termodinámico, ya que el menor coste de los recursos utilizados puede compensar ampliamente las mayores pérdidas originadas a lo largo del mismo, con relación a otros procesos más eficientes pero basados en recursos cuya obtención o captación resulta más costosa. Desde esta perspectiva, el enfoque termodinámico puede ser un auxiliar importante para el logro de la finalidad propia del enfoque económico standard, que aparece así revestido de una mayor generali-

[7] VALERO, A.; LOZANO, M. A. y MUÑOZ, M.: *Op. cit.*

dad. Pero también cabría decir lo contrario, por las razones que exponemos más adelante.

En efecto, al tratar de la conexión entre el enfoque termodinámico y el enfoque económico standard en el tratamiento del proceso de «producción», hemos supuesto *(vid.* epígrafe III) que los recursos y los productos considerados en el primero (F y P) coincidían exactamente con los que eran objeto de valoración monetaria en el segundo (F' y P') (es decir, que F = F' y P = P'). Sin embargo, esta identidad no suele darse en la práctica, siendo lo corriente que F ≠ F' y P ≠ P' al existir componentes de F y de P que no aparecen recogidos en F' y P' por carecer de valoración monetaria y ser altamente arbitrario imputársela. De esta manera, la Termodinámica puede orientar con criterios económicos la gestión del mundo físico más allá de los confines del universo de los valores de cambio, al que se circunscribe el enfoque económico corriente.

La mayor amplitud de horizonte que puede brindar la Termodinámica con relación a la Economía crematística corriente fue advertida ya por los padres de aquélla hace más de un siglo. Tanto Carnot, como Thomson y Clausius fueron conscientes de que estaban respondiendo a preocupaciones netamente económicas con un instrumental más potente que el de la Economía standard para orientar la gestión, a los diversos niveles de agregación, de los flujos de energía y materiales que recorren el globo terráqueo y posibilitan el mantenimiento de la biosfera y de la especie humana.

Por otra parte, definir la eficiencia termodinámica exige delimitar el sistema considerado y la finalidad que se le atribuye, que tampoco tienen que coincidir con los que toma como base el enfoque económico standard guiado por el exclusivo afán de acrecentar su producto monetario.

Estos aspectos, relacionados con la mayor amplitud del enfoque termodinámico han sido ya tratados por Georgescu-Roegen, en su libro *La Ley de la Entropía y el proceso económico,* y retomados por J. M. Naredo, en el libro *La Economía en evolución.* No se trata, pues, de repetir aquí lo ya dicho, sino de resaltar las paradojas y aspectos más problemáticos que, a nuestro juicio, deben reclamar la atención de termodinámicos y economistas.

Hasta aquí hemos apuntado la naturaleza de las convergencias y divergencias que pueden plantearse entre los objetivos económicos perseguidos en cada uno de los dos enfoques considerados: el económico standard (o crematístico) y el termodinámico. Centremos ahora la atención en la asimetría que se acusa entre las lecturas diferentes del proceso, llamado de «producción», que ofrecen estos enfoques.

La principal paradoja que plantean las visiones distintas del proceso de «producción» que ofrecen estos dos enfoques arrancan del carácter opuesto de sus respectivos postulados y de los saldos que arrojan cada una de sus fórmulas básicas. Como se ha apuntado, el saldo resultante siempre refleja en el enfoque termodinámico una pérdida, como consecuencia de establecer eficiencias menores que la unidad

$$\eta = \frac{P}{F} < 1.$$

Por el contrario, en el enfoque económico standard, el saldo resultante del proceso llamado de «producción» refleja una ganancia, al postular una rentabilidad mayor que la unidad

$$\xi = \frac{PR}{CI} > 1.$$

Si bien los precios permitieron conectar las valoraciones monetarias del producto y de los recursos con sus mediciones en unidades energéticas, no ocurre lo mismo con la pérdida y la ganancia que se obtienen como saldo de las expresiones [1] y [2]. En efecto, la energía perdida o dispersada al carecer, por definición, de todo valor de uso, carece también de precio. A la vez que el valor añadido como simple saldo monetario no tiene ninguna correspondencia con unidades físicas, a diferencia de lo ocurrido con la valoración de los recursos y del producto. Nos encontramos así con dos resultados contrapuestos e inconexos que se derivan de dos enfoques diferentes de un mismo proceso, uno que registra pérdidas y otro que registra ganancias; uno refleja un deterioro neto de calidad y otro una revalorización neta; o uno refleja coste físico y otro valor monetario. La asimetría entre estas dos versiones del proceso llamado de «producción» podría chocar con el hábito propio de la lógica aristotélica de razonar identificando la contradicción con el error, pero no con los enfoques pluridimensionales de la cien-

cia moderna, que culminan con el dualismo entre ondas y partículas observado en la Física cuántica como expresión de una misma realidad.

La confusión aparece cuando no se acepta la multidimensionalidad de enfoques como algo deseable y se atribuyen a cualquiera de ellos pretensiones desmesuradas de universalidad: es decir, cuando los economistas tratan de extender sus enfoques corrientes a la gestión del «medio ambiente» físico que los envuelve o cuando los termodinámicos tratan de construir nuevas teorías del valor «energético»[8].

En el caso que nos ocupa, la asimetría antes indicada debe servir de acicate para mostrar la conveniencia de introducir la multidimensionalidad de enfoques en el razonamiento económico y para practicar los desarrollos teóricos que ello requiere. Pues ciertamente, la relación que establece entre ambas versiones del proceso el isomorfismo de la palanca antes mencionado, aunque razonable, es de una pobreza tan manifiesta que no permite tomarlo como única guía para asegurar la economicidad de la gestión de recursos. En primer lugar, hay que recordar que tal isomorfismo puede producirse porque las formulaciones [1] y [2] están regidas por una ley de conservación (de la energía y del valor, respectivamente) y por una finalidad maximizadora (de la eficiencia y de la rentabilidad o, lo que es lo mismo, de minimización de la pérdida exergética y maximización de la ganancia monetaria). Es decir, porque ambas formulaciones se han mantenido dentro del campo de razonamiento de la mecánica clásica, delimitado por una ley general de conservación y un principio de maximización, no dejando cabida al estudio de otros aspectos cualitativos o preocupaciones que escapan a ese campo. Así, el Segundo Principio de la Termodinámica sólo interviene para postular en [1] que $P < F$ o que $\eta < 1$. Pero, tal y como hemos advertido, tanto P como F se expresan en unidades energéticas homogéneas (por ejemplo, calorías), por lo que la expresión [1] no puede registrar esa mejora de calidad entre F y P que constituye la base del llamado proceso de «producción», y que se refleja en la revalorización monetaria observada entre p_F y p_P[9].

El enfoque económico standard recoge así implícitamente —a través de la revalorización monetaria— esa mejora de calidad, pero es incapaz de informar nada sobre el deterioro de calidad que supone la pérdida o dispersión de recursos que inevitablemente se origina a lo largo del proceso. Las otras limitaciones que plantea el enfoque económico standard para el tratamiento de los recursos naturales aparecen expuestas en el libro *La Economía en evolución* (sintetizadas en su capítulo 24) y no sería oportuno repetirlas aquí.

Parece, pues, evidente la conveniencia de profundizar en el estudio de los logros pretendidamente neguentrópicos de los procesos de «producción» transcendiendo del marco puntual y mediatizado por la subjetividad y las instituciones humanas que ofrece el análisis monetario, y de compararlos con el aumento no deseado de la entropía que originan, en un amplio contexto espacio-temporal. El problema estriba en que los objetivos de mejorar la eficiencia de un sistema no pueden ser objetivos absolutos, sino relativos a un determinado «consumo energético» de materiales, supuesta una finalidad utilitaria. De ahí que derivar la Termodinámica hacia la problemática que plantea la gestión de los materiales sea una de las cuestiones teóricas más importantes a resolver, tal y como se desarrolla en el capítulo 26 del libro de Naredo, antes citado, apuntando las líneas de investigación más sugerentes.

Valga señalar que, por ejemplo, las calorías irradiadas por el sol o aquellas otras invertidas por el hombre bajo la forma de medios químicos o trabajo mecánico a lo largo de los procesos agrarios, tienen un significado cualitativo bien diferente al de las contenidas en los alimentos, materias primas textiles, etcétera, que se obtienen. La Termodinámica tradicional deja de lado el análisis de la finalidad neguentrópica de los procesos llamados de «producción», que apunta generalmente a lograr ganancias de orden y de estructura en los materiales procesados, incurriendo para ello en pérdidas y deterioros. Sin embargo, la relación entre la Termodinámica y la Teoría de la información y entre la estructura y la energía de interacción que la mantiene, ofrecen la posibilidad de desarrollar un análisis termodiná-

[8] Para una crítica del «energetismo», véase GEORGESCU ROEGEN, N.: «La teoría energética del valor económico: un sofisma económico particular», *El Trimestre Económico,* número 198, abril-junio, 1983.

[9] Pero sí puede medir en unidades físicas vinculadas al SI (cal° K) la entropía inicial y final del sistema termodinámico en el que se desenvuelve un proceso de producción, mostrando la energía disipada y su calidad.

mico que sirva para orientar la gestión económica de los materiales permitiendo avanzar en la construcción de una teoría física amplia que estudie la relación del hombre con la biosfera, cuya necesidad apuntaba Margalef en su libro *La biosfera.*

En un momento en el que existen posibilidades sin precedentes en la manipulación de los materiales, la energía, e incluso los genes —con consecuencias destructivas también sin precedentes— las razones económicas se imponen para delimitar lo que puede ser técnicamente posible —e incluso en ocasiones financieramente rentable— de aquello cuya aplicación generalizada en el espacio y el tiempo resulta viable y deseable. Como se indica en el libro de Naredo antes citado, «el criterio general que debe informar, desde este punto de vista, sobre la economicidad de las posibles manipulaciones de los materiales, es el que observa hasta qué punto las ganancias de orden, de estructura, de información, que se persiguen, serán capaces de amortizar el aumento de entropía que origina en la Tierra la construcción y el funcionamiento de los convertidores y plantas que las posibilitan. Sólo una vez aclarado lo concerniente a la entropía de los materiales y a su escasez objetiva, cabe dar una orientación económica global a las intervenciones humanas encaminadas a combatirlas, mediante el trabajo y la técnica, como procesos de vocación neguentrópica. Una orientación que trascienda de ese enfoque mecánico causal, dominante en la civilización industrial, asegurando que las actuaciones del homo faber, además de apuntar a logros más o menos parciales y extravagantes, atiendan también al objetivo fundamental del mantenimiento de la biosfera y de la especie humana».

Desde esta perspectiva, la Termodinámica puede adoptar planteamientos mucho más amplios y flexibles que los del enfoque económico standard, permitiendo examinar aspectos ignorados o considerados «exógenos» en este último, así como extender su red analítica más allá del campo de los valores monetarios.

V. La teoría general del coste exergético

Vamos a ver resumidamente en este capítulo cómo la Termodinámica sirve de base para una Teoría General del cálculo de los costes derivados de la manipulación y el uso de los materiales y la energía. Para luego vislumbrar algunas de sus aplicaciones a otros campos más allá de la propia Termodinámica Clásica.

Observemos que la inversa del rendimiento o eficiencia:

$$\kappa = \frac{F}{P} = \frac{1}{\eta} \qquad [5]$$

puede definirse como un consumo unitario de recursos termodinámicos y que sus valores estarán comprendidos entre cero, para un proceso totalmente reversible, e infinito, para un proceso totalmente disipativo sin producción de ningún producto útil.

Esta magnitud mide con certeza y universalidad la cantidad de recursos puestos en juego en un proceso. Es decir, el «coste o gasto exergético unitario» que ha tenido lugar en el subsistema. Si llegamos a conocer el precio en unidades monetarias de esos recursos, estaremos en condiciones de calcular el coste monetario de producir P.

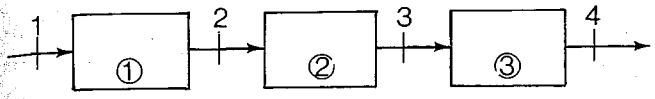
Obsérvese la estructura del razonamiento:

$$\begin{array}{ccccccccc} \text{Segundo Principio} & \rightarrow & \text{Eficiencia} & \rightarrow & \text{Gasto} & \rightarrow & \text{Coste exergético} & \rightarrow & \text{Coste monetario} \\ & & & & & & \uparrow & & \\ & & & & & & \text{Precios} & & \end{array}$$

En otras palabras, estamos diciendo que la única manera rigurosa de medir el coste de producción —atención, no la asignación de precios— es mediante el Segundo Principio. Porque a través de este Principio es posible identificar, localizar, cuantificar y causalizar las ineficiencias de los procesos reales, que son las generadoras del consumo de recursos y, por tanto, el origen del proceso de formación del «coste exergético» y de su reflejo en términos monetarios.

El concepto de coste exergético aún está dentro de la Termodinámica pero ya participa de muchas características propias de la Economía. Es claramente un eslabón conceptual de transición entre ambas ciencias.

Veamos el ejemplo sencillo de un sistema lineal compuesto por subsistemas en serie tales que el producto de uno es el fuel o recurso del siguiente:



Para calcular el coste termodinámico de producir el flujo 4 final, sólo se necesita del conocimiento del coste del fuel de entrada, 1, y de los rendimientos de cada equipo. Es decir, si k_j^* denota el coste exergético unitario del flujo i, y k_j denota el consumo exergético unitario del equipo j, o sea, el inverso del rendimiento, $\eta_j = 1/k_j$, podremos poner:

$$k_4^* = k_3^* \cdot k_3 = k_2^* \cdot k_2 \cdot k_3 = k_1^* \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \qquad [6]$$

siendo $k_j = F_j / P_j$.

Es decir, conociendo en este caso las exergías de los flujos que interconectan el sistema y el coste del flujo de entrada, es posible obtener el coste de todos y cualesquiera de los flujos del sistema.

O sea, la definición de eficiencia según el Segundo Principio y el conocimiento del costo de los flujos de entrada son necesarios y suficientes para calcular los costes de todos los flujos en un sistema lineal.

Cuando aparecen bifurcaciones de flujos, el problema se complica. Para calcular los costes se requiere alguna información adicional. Es lo que en términos técnicos se denomina «asignación» de costes. En concreto, se necesitan tantas ecuaciones adicionales como bifurcaciones. Pues bien, con la teoría termodinámica desarrollada se demuestra que estas ecuaciones se obtienen del análisis de la «finalidad» del equipo, es decir, del concepto de lo que es su producto y su fuel, en otras palabras: la definición particular que realicemos de la eficiencia del equipo bifurcante determina el coste de los flujos.

Es decir, es el concepto de eficiencia el que resuelve el problema del cálculo de los costes en cualquier sistema, cualquiera que sea su complejidad.

Pero, para resolver el problema de los costes hemos pagado un precio muy caro: hemos introducido la «finalidad» y la «subjetividad» dentro del sistema. Ya no valen los fríos valores objetivos de las exergías de todos y cada uno de los flujos para saber sus costes. Cualquier sistema energético real por simple que sea presenta recirculaciones y, por tanto, la correcta asignación de costes necesitará del concepto de eficiencia que tengamos de los equipos de la instalación.

Además, depende sólo de tres factores:

a) De la estructura física de las interrelaciones energéticas de los subsistemas. De cómo interaccionan entre sí y con el exterior.

b) Del coste de los recursos entrantes al sistema puestos en juego.

c) De la finalidad productiva o estructura productiva que tienen los subsistemas y el sistema general.

Como la estructura física debe delimitar qué subsistemas y flujos componen el sistema, el coste de un flujo va a ser función de los límites que elijamos para el cálculo.

Así, por ejemplo, la cantidad de combustible necesaria para producir una unidad de energía eléctrica dependerá de si en los cálculos incluimos sólo la planta de producción, o ésta y el transporte del combustible hasta la planta, o éstos y la energía necesaria para su extracción del fondo de la Tierra, o éstos y la energía solar que fue necesaria para producirlos, etcétera. Se ve que no existe un coste absoluto de la obtención de un determinado producto, ya que depende de los límites del sistema al que circunscribamos nuestros razonamientos. Estos límites se pueden ampliar considerando causas y estadios cada vez más remotos sin que se plantee otro problema que el de disponer de datos fidedignos sobre los k correspondientes a cada proceso, tal y como se esquematiza en [6]. Este afán de remontarnos en el razonamiento puede cerrarse por convención, definiendo un ambiente de referencia de máxima entropía (o, lo que es lo mismo, de mínima energía utilizable) a partir del cual se calcule la exergía requerida para obtener productos que se determinen. La definición de ese ambiente de referencia y el cálculo sistemático de los k en los procesos reales, son tareas que están todavía por hacer, aunque el marco teórico esté ya lo suficientemente definido como para asegurar su viabilidad y su interés práctico para orientar la gestión a los distintos niveles de agregación.

La estructura física describe cómo los subsistemas abiertos se ordenan a través de interacciones, bifurcantes o no, constituyendo un todo coherente. Para que funcione, será necesario aportar recursos. De tal manera que podemos identificar orden con estructura física. Pero imaginemos un grupo escultórico representando una máquina. Podemos aceptarlo e identificarlo como una máquina porque muestra la disposición espacial y

ordenación de las piezas, pero por mucho que le suministremos energía no funcionará porque su «finalidad» no es esa.

Observamos que la organización es algo más que el orden: para que un sistema esté organizado para producir algo, se requiere que todos sus componentes trabajen, se comporten, con un rendimiento predeterminado.

Así que, si el Segundo Principio puede ser aplicado a todos los sistemas físicos, ello significa que los anteriores asertos tienen validez general. Es decir:

ORGANIZACION = ESTRUCTURA +
+ RECURSOS + EFICIENCIA

Y esto no es una consecuencia de especulación sino una conclusión obtenida de una aplicación rigurosa de la teoría desarrollada.

Estructura, recursos y eficiencia son los tres pilares conceptuales sobre los que se ha desarrollado la nueva Termodinámica.

Nótese que ésta sólo objetiva el coste de producción en términos de pérdida de energía utilizable, pero no tiene nada que decir sobre el precio, el valor, la riqueza, el mercado, etcétera. Estos términos se dejan a la teoría económica standard.

Así, por ejemplo, se puede calcular el coste termodinámico, es decir, la cantidad de recursos naturales empleados en obtener los materiales, sin más que analizar simultáneamente todos los procesos interactivos de extracción y tratamiento para cada sistema referido a una región, un país, o la propia Tierra. No importa la complejidad del estudio, pues se dispone de técnicas matriciales de resolución que permiten calcular los costes termodinámicos de formación de productos desde unas condiciones iniciales hasta su producción final.

No obstante, la sociedad, una vez utilizados los productos, termina desechándolos; por ello, al final, la ecuación resultante no es $F = P + I$ sino que definitivamente P se convierte en residuos, es decir, degradación, y la ecuación resultante es $F = I$. O lo que es lo mismo, extraemos materiales y energía de la naturaleza en forma concentrada, o sea, con exergía, para lo cual consuminos recursos energéticos y materiales para obtener productos que finalmente devolvemos a la naturaleza en forma degradada, diluída, o sea sin exergía. Por lo que el análisis no sólo debe abrirse hacia el tratamiento de los recursos antes de haber sido captados, transformados y valorados, sino también hacia su posterior degradación y pérdida de valor, considerando su existencia física en forma de residuos.

El análisis no estaría completo si no admitiéramos que la finalidad, la *causa formalis* aristotélica, de ese proceso de producción es o debería ser, como dice N. Georgescu-Roegen, el disfrute de la vida y nuestra propia supervivencia. Sin embargo, precisamente por eso debemos conocer, cuantificar y analizar los efectos de la degradación originada y disminuirla al máximo posible. Existe en Termodinámica la Ley de Gouy-Stodola, que dice que la irreversibilidad generada en un proceso vale

$$I = T_O S_g,$$

siendo T_O la temperatura ambiental y S_g la generación de entropía, de desorden medido en términos temodinámicos del proceso. Esta Ley recoge el gran conflicto fáustico al que se enfrenta la gestión económica en la sociedad industrial: a mayor irreversibilidad generada por los crecientes y desenfrenados procesos «productivos» realizados por el hombre, mayor será la temperatura ambiental, la contaminación térmica, y mayor la creación de desorden, es decir, mayor la dilución de materiales en la Tierra, el Agua y el Aire.

En suma, que la Economía y la Termodinámica, desarrolladas por generaciones de científicos, deben ayudar a resolver problemas que al final se reducen a aportar instrumentos analíticos útiles para orientar la gestión de los cuatro elementos primordiales enunciados por los filósofos presocráticos: El Fuego (Calor, Temperatura, Combustión), la Tierra, el Agua y el Aire... Afinemos, pues, esos instrumentos.