

## **Eficiencia termodinámica y el valor económico**

Julio Sánchez Chóliz

Departamento de Análisis Económico, Univ. de Zaragoza

Gran Vía, 2-4; 50005 Zaragoza

Tel: 34-(9)-76-761826, Fax: 34- 97 6 76 19 96

E-mail: jsanchez@posta.unizar.es

### **Abstract**

El trabajo es una reflexión sobre las relaciones entre Economía y Termodinámica, así como sobre las posibilidades de construir una ciencia que integre el campo científico de ambas y que supere su capacidad de análisis científico. El punto de partida es el carácter opuesto que tienen los procesos de creación del valor económico y de degradación de la energía física. La tasa de eficiencia termodinámica, el valor económico de la energía, el cambio tecnológico y el crecimiento balanceado son los temas principales envueltos en la reflexión. La conclusión final es que, a pesar de la existencia de puntos de contacto significativos entre Economía y Termodinámica, la total integración en una misma ciencia no será probablemente nunca lograda, porque las bases metodológicas de ambas son muy diferentes.

**Palabras clave:** Valor económico, eficiencia termodinámica, cambio técnico, crecimiento proporcional, valores energía.

# Eficiencia termodinámica y el valor económico

Julio Sánchez Chóliz\*

Departamento de Análisis Económico, Univ. de Zaragoza  
Gran Vía, 2-4; 50005 Zaragoza  
Tel: 34-(9)-76-761826, Fax: 34- 97 6 76 19 96  
E-mail: jsanchez@posta.unizar.es

## 1. Introducción

Todos reconocemos hoy la necesidad de analizar la producción económica en un contexto global, que sea respetuoso con el medio ambiente y, en general, que asuma las restricciones que supone el medio físico y el entorno en que vivimos.

El *Segundo principio de la Termodinámica* establece una importante limitación a cualquier transformación que utilice calor o trabajo o energía útil, sea o no económica; nos dice que todo al utilizar trabajo lo reduce. De acuerdo con él, los productos de toda transformación económica contienen solo una parte del trabajo o calor útil utilizado para su obtención, en otras palabras, la producción supone una *reducción de la exergía*<sup>1</sup> y un *aumento de la entropía* del universo.

Por otra parte, un sistema económico no sería viable si el *valor económico* de la producción final fuera menor que el *valor económico* de los recursos utilizados en ella. Más aun, solo habrá producción cuando consigamos que de los productos finales disponibles, tras los procesos de reposición de inputs, pueda obtenerse algún tipo de excedente<sup>2</sup>. Este hecho no puede ser contradictorio con el anterior; la Física y la Economía<sup>3</sup> describen los fenómenos con metodología distintas, pero sus visiones deben ser compatibles.

---

\* Agradezco los comentarios recibidos de Vicente Alcantara y Alfonso Barceló, que mejoraron sustancialmente la primera redacción. No obstante los errores son de mi absoluta responsabilidad. La investigación ha sido posible gracias, en parte, al soporte financiero recibido de la DGA de Aragón, a través del proyecto P52/97.

<sup>1</sup> Para designar el trabajo o calor útil se usa frecuentemente el término energía, que es mucho más general y, por tanto, menos preciso. Por este motivo, en lo que sigue, evitaremos hasta donde sea posible el uso de este término, utilizando en su lugar el de *exergía*. La exergía nos mide las potencialidades termodinámicas de un flujo físico; su valor, aunque definido para unas condiciones ambientales dadas, es independiente del tipo de manifestación material o energética. La exergía podemos medirla en calorías. Una excelente formalización del concepto de exergía puede hallarse en Valero, Lozano y Muñoz (1986)

<sup>2</sup> Puede haber inputs que no puedan reponerse, por ejemplo muchos de los recursos naturales. También es posible que no los sustituyamos aunque sea posible, al no poder la naturaleza obligarnos a ese pago o restitución.

<sup>3</sup> No debe confundirse Economía y Política económica. En opinión del autor, Economía y Política económica son ramas científicas con metodologías y campos de estudio diferentes. Tienen muchos lazos comunes y su intersección no es vacía; la Política económica es básica para la toma de decisiones

En el trabajo analizamos algunas de las relaciones que hay entre el Segundo Principio de la Termodinámica (SPT), las valoraciones económicas, el cambio tecnológico y el crecimiento proporcional, investigando el carácter del puente metodológico que hay entre el SPT y esos aspectos de la ciencia económica. Buscamos una mejor comprensión de los nexos entre Termodinámica y Economía, lo que sin duda ayudará a mejorar las políticas económicas relacionadas con el medio natural. El trabajo se estructura en siete apartados. El siguiente revisa la relación entre degradación y valorización económica de la exergía final, revisión sugerida por la lectura de Georgescu-Roegen (1994) y Naredo (1994). El tercero define la tasa de eficiencia termodinámica en un modelo Leontief usando los valores energía usuales. En los apartados 3, 4 y 5 se analiza el problema a la luz del cambio tecnológico y del crecimiento. Las conclusiones y referencias pueden verse en los apartados 6 y 7. Finalmente, el Anexo presenta un ejemplo basado en un modelo Leontief de dos sectores, como ayuda a una mejor comprensión.

## 2. Relación entre degradación y revalorización económica de la exergía

Suele afirmarse que los procesos de valoración económica son paralelos a los procesos de degradación de la naturaleza y que, en consecuencia, podrían ser sustituidos por valoraciones surgidas de los procesos entrópicos. En esta línea se mueva la siguiente cita

".., el proceso de producción en el enfoque económico estándar exige 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." (Naredo, 1994, página 394),

cuya afirmación central es correcta si la interpretamos en el sentido de que las valoraciones económicas se mueven en sentido contrario que las magnitudes de exergía. Pero tanto su cuantificación como su exacto significado no son inmediatos. Es necesario precisar de que bienes estamos hablando, como valoramos económicamente<sup>4</sup> y cuál es el tipo de crecimiento de la economía.

La anterior afirmación es obtenida de esta forma. Sea EP el valor del producto final y ER el de los recursos utilizados en unidades de exergía (calorías), no en unidades monetarias. Por el SPT sabemos que  $ER > EP$ . Sean PP y PR las valoraciones económicas del producto final y de los recursos usados y  $p_p$  y  $p_r$  los precios medios de la caloría de exergía en ambos. Se aceptamos que  $PP > PR$ , esto es, que el valor económico de la producción final es mayor que el de los recursos utilizados<sup>5</sup>, tenemos que:

$$\{PP = EP \cdot p_p; PR = ER \cdot p_r; PP > PR\} \Rightarrow EP \cdot p_p > ER \cdot p_r \Leftrightarrow \frac{p_p}{p_r} > \frac{ER}{EP} = e,$$

siendo "e" la eficiencia termodinámica. Esto probaría que la revalorización económica debe compensar en exceso la degradación termodinámica.

socio-económicas, pero en ella las cuestiones sociales e ideológicas son mucho más relevantes que en la Economía. Una excelente visión del papel de la Política económica en relación a los temas ecológicos puede verse en M'Gonigle (1999).

<sup>4</sup> No podemos olvidar que existen distintas formas de valoración en la economía, están los precios obtenidos del mercado, los distintos tipos de precios teóricos de equilibrio, los valores trabajo o los valores energía.

<sup>5</sup> A esta propiedad la denominaremos de aquí en adelante viabilidad económica estricta (VEE).

El primer problema que tiene este razonamiento es la posibilidad de que la valoración exergética y la económica tengan diferentes referentes, los recursos considerados en cada caso pueden ser distintos. Por ejemplo, si suponemos, como es frecuente en los modelos económicos, que los recursos  $R$  son bienes reproducibles y del mismo tipo que la producción final  $P$ , la afirmación  $ER > EP$  es imposible. Al tenerse que verificar que  $P = R + Y$ , siendo  $Y \geq 0$  la producción neta<sup>6</sup>, y al ser la cantidad de exergía de cada unidad de un bien concreto siempre la misma, la valoración exergética de  $P$  y  $F$  verifica  $EP > ER$ , no la condición contraria. ¿Cómo se explica esto?. Porque esos modelos no contabilizan en  $R$  los recursos no reproducibles (RNR), recursos que son parasitados de la naturaleza y que son necesarios para la producción. Una familia de valoraciones muy importantes que presentan este problema son las asociadas con las tablas Input-Output, en ellas todo bien es asociado a un sector y todo producto se considera producible, no siendo usual incorporar RNR; también en los análisis teóricos, con modelos Leontief, es típico analizar las condiciones de crecimiento proporcional, y la tasa de crecimiento correspondiente, olvidando los problemas de los RNR.<sup>7</sup>

Otro motivo para cuestionarnos el significado de la afirmación anterior nace de la hipótesis de que  $PP > PR$ . Aunque pueda deducirse de  $P = R + Y$ ,  $Y > 0$ , para cualquier  $p > 0$ , asumir la desigualdad equivale a pensar que el valor de excedente,  $pY$ , es un surplus y que no es pago o coste de nada. Esto puede aceptarse si consideramos que los únicos recursos son los inputs físicos del proceso. Otra visión más amplia sería considerar como recursos todo tipo de inputs, incluso los más intangibles como el *capital* y el *trabajo*, y pensar que todos los recursos escasos: *inputs físicos*, *RNR*, *capital*, *trabajo*, ... deben de recibir algún pago; esta es la posición más coherente dentro del análisis económico y la que debemos usar, principalmente, para hablar de valoración económica.

El capital se identifica con unos bienes físicos asociados con la inversión, pero también con una relación social; incluso hay economistas que consideran este segundo aspecto el más relevante, véase Vegara (1982). Aunque siempre se incluyen los inputs físicos de la inversión entre los inputs necesarios, la componente social del capital asociada con los procesos de gestión, estructuración social, ... no está incluida muchas veces de forma explícita en las modelizaciones, aunque también puede considerarse un input e incluso asociarsele un cierto proceso termodinámico.

El trabajo también puede incorporarse en los modelos a través de las cantidades de bienes consumidas por los trabajadores, para su manutención y/o para su formación, pero frecuentemente estos consumos físicos se dejan fuera del modelo económico, especialmente los dedicados a formación. Sin embargo, los procesos educativos, los procesos humanos de realización del trabajo y la propia vida son procesos termodinámicos.

Los recursos no producibles no pueden valorarse por su precio de producción, únicamente el incremento de renta que hacen posible con su utilización permite definir un precio teórico (utilidad marginal) y un precio de mercado a través del intercambio. Esto hace que su precio dependa frecuentemente de los criterios de distribución de la renta más que de los propios costes.

---

<sup>6</sup> La relación debe verificarse aunque  $P$ ,  $F$  e  $Y$  sean vectores de bienes.

<sup>7</sup> Existen también numerosos ejemplos de modelos Leontief, que tratan de incorporar los recursos naturales y los problemas de contaminación a través de filas y columnas específicas, por ejemplo, ver Leontief y Ford (1972), Pajuelo (1980) y Proops, Faber y Wagenhals (1993).

Volviendo al problema de considerar todo tipo de inputs como recursos, cuando todos los inputs se tienen en cuenta, las valoraciones económicas dan el mismo valor a los inputs que a los outputs. El Equilibrio General de la Economía neoclásica está basado en esta igualdad. Más aún, casi todas las corrientes económicas, incluso la sraffiana y la marxista, aceptan que el valor económico de los inputs es igual al valor económico de los outputs. Un tema distinto es la desigualdad entre exergía entrante y saliente del proceso productivo. En este tema, este trabajo asume el argumento de Amir (1994), página 125, de que toda economía (como sistema abierto que es), permite el flujo de materia y de energía a través de sus fronteras, siendo capaz de mantenerse en estado estacionario únicamente porque transporta valor del entorno para restablecer el valor que se consume dentro del sistema y que se disipa. Notemos, sin embargo, que este valor no es valor económico sino exergía. En resumen, de acuerdo con los criterios dominantes en la Ciencia Económica lo que se verifica es  $PP = PR$  y no se cumple  $PP > PR$ .

Clarificadas estas cuestiones podemos probar un Teorema y un Corolario que generalizan las afirmaciones de Naredo (1994) y que muestran las relaciones entre la eficiencia termodinámica y la valorización económica de la exergía antes y después del proceso de producción. En el enunciado diremos que tenemos viabilidad económica (VE) cuando  $PP \geq PR$ , y que tenemos viabilidad asociada a los bienes físicos (VEF) cuando los inputs y outputs se restringen a los bienes físicos; en este último caso existirá VEE.

*Teorema 1.* Si en un proceso productivo (más exactamente, en la modelización del proceso productivo) los inputs incluyen los RNR y tenemos VE:

a) la eficiencia termodinámica del proceso económico,  $e$ , es menor que 1,  $e < 1$ ;

b) la ratio de revalorización de la exergía,  $\frac{p_p}{p_r}$ , es mayor que la unidad,  $\frac{p_p}{p_r} > 1$ ;

c) se verifica:

$$1 > e \geq \frac{p_r}{p_p}; e \geq \frac{p_r}{p_p} \Leftrightarrow e \frac{p_p}{p_r} \geq 1 \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{p_p}{p_r} \geq 1;$$

d) si hay VEE, y en particular si tenemos VEF, se verifica:

$$1 > e > \frac{p_r}{p_p}; e > \frac{p_r}{p_p} \Leftrightarrow e \frac{p_p}{p_r} > 1 \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{p_p}{p_r} > 1.$$

e) Si los precios son de equilibrio, o si la valoración económica utilizada atribuye al output exactamente el valor económico asignado a los inputs del proceso, la relación entre eficiencia termodinámica y ratio de revalorización está dada por:

$$1 > e = \frac{p_r}{p_p}; e = \frac{p_r}{p_p} \Leftrightarrow e \frac{p_p}{p_r} = 1 \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{p_p}{p_r} = 1,$$

luego la revalorización es la inversa de la eficiencia termodinámica.

f) Si tenemos VE con beneficios extraordinarios, la relación entre eficiencia termodinámica y ratio de revalorización de la exergía está dada por:

$$1 > e > \frac{p_r}{p_p}; e > \frac{p_r}{p_p} \Leftrightarrow e \frac{p_p}{p_r} > 1 \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{p_p}{p_r} > 1.$$

*Demostración.*

a) Es consecuencia inmediata del SPT porque se verifica:  $EP < ER \Leftrightarrow e = \frac{EP}{ER} < 1$ .

b) Al tener VE podemos deducir

$$PP \geq PR \Leftrightarrow EP p_p \geq ER p_r \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{p_p}{p_r} \geq 1 \Leftrightarrow e \frac{p_p}{p_r} \geq 1 \Rightarrow \frac{p_p}{p_r} > 1.$$

c) El punto a) y el resultado obtenido en la demostración de b),  $e \frac{p_p}{p_r} \geq 1$ , nos permiten

afirmar:  $1 > e \geq \frac{p_r}{p_p}; e \geq \frac{p_r}{p_p} \Leftrightarrow e \frac{p_p}{p_r} \geq 1 \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{p_p}{p_r} \geq 1.$

d) Si la viabilidad económica es estricta,  $PP > PR$ , razonamientos similares a los hechos nos permiten probar lo afirmado.

e) Como  $PP = PR$ , es suficiente con repetir lo hecho en b) y c).

f) Cuando hay beneficios extraordinarios, a los precios existentes, la retribución de los factores es menor que el valor final, luego estamos ante una situación de VEE y f) es consecuencia de d).

En el *Teorema 1* hemos razonado como si hubiera un solo bien, o al menos, sin preocuparnos de la pluralidad de bienes. Si esto se tiene en cuenta, los resultados no cambian, como vamos a ver.

*Corolario 1.* Si el producto final y los recursos están constituidos por un conjunto finito de bienes diferentes y los inputs incluyen los RNR,

a) si tenemos viabilidad económica (VE) se verifica::

$$1 > \bar{e} \geq \frac{\bar{p}_r}{\bar{p}_p}; \bar{e} \geq \frac{\bar{p}_r}{\bar{p}_p} \Leftrightarrow \bar{e} \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}_r} \geq 1 \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}_r} \geq 1;$$

donde indicamos con el símbolo " - " valor medio.

b) más aun, si la VE no es VEE, la relación anterior se convierte en

$$1 > \bar{e} = \frac{\bar{p}_r}{\bar{p}_p}; \bar{e} = \frac{\bar{p}_r}{\bar{p}_p} \Leftrightarrow \bar{e} \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}_r} = 1 \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}_r} = 1.$$

*Demostración.*

a) Denominamos con  $EP_j$  el output de tipo  $j$  y con  $RR_j$  el input o recurso de tipo  $j$ , ambos valorados en unidades de exergía. Por el SPT, aunque existan varios subprocesos productivos con eficiencias técnicas diferentes, podemos asegurar

$$\bar{e} = \frac{\sum_j EP_j}{\sum_j ER_j} = \frac{EP}{ER} < 1;$$

por otra parte, al tener VE, si por  $p_j^p$  denominamos el precio del output  $j$  que contiene una unidad de exergía y por  $p_j^r$  el del input  $j$  con contenido exergético unitario, se verifica la desigualdad  $\sum_j EP_j p_j^p \geq \sum_j ER_j p_j^r$ , y como

$$\sum_j EP_j p_j^p = \left( \sum_s EP_s \right) \frac{\sum_j (EP_j p_j^p)}{\sum_s EP_s} = EP \sum_j \frac{EP_j}{\sum_s EP_s} p_j^p = EP \bar{p}_p,$$

$$\sum_j ER_j p_j^r = \left( \sum_s ER_s \right) \frac{\sum_j (ER_j p_j^r)}{\sum_s ER_s} = ER \sum_j \frac{ER_j}{\sum_s ER_s} p_j^r = ER \bar{p}_r,$$

podemos obtener directamente lo que queríamos demostrar

$$1 > \bar{e} \geq \frac{\bar{p}_r}{\bar{p}_p}; \bar{e} \geq \frac{\bar{p}_r}{\bar{p}_p} \Leftrightarrow \bar{e} \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}_r} \geq 1 \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}_r} \geq 1.$$

b) Si la situaciones de partida es VE pero no de VEE, la relación que describe la viabilidad es  $\sum_j EP_j p_j^p = \sum_j ER_j p_j^r$ , y, razonando como en a) llegamos a las relaciones buscadas.

El significado de los puntos c) y d) del *Teorema 1* es bastante claro, nos dicen que *la forma de valorar en los procesos económicos cuantifica y no ignora el proceso destructivo de tipo termodinámico*, que siempre está en la base física de la transformación. Esta es una información cualitativa relevante pero en el trabajo argumentamos que hay dudas sobre su operatividad, ya que *desde un punto de vista económico* es muy difícil aceptar valoraciones económicas que no compensen los costes. El punto e) del *Teorema 1* nos mide la revalorización económica que sufre la exergía para los precios de equilibrio, que son los más relevantes, y nos dice que es siempre exactamente la inversa de la eficiencia termodinámica. Lo mismo sucede para otras valoraciones que reparten entre los inputs la totalidad del valor asignado al output. En resumen, el fenómeno de la revalorización económica no parece incorporar información relevante al proceso de valoración económica, salvo la existencia del hecho físico de la degradación, hecho que pertenece al marco físico sobre que construimos la Economía<sup>8</sup>. El *Corolario 1* confirma estos hechos para el caso de varios bienes.

### 3. Eficiencia termodinámica y valores exergía

Una forma de acercarse a la problemática ecológica, desde los modelos Input-Output, ha sido la utilización de los valores energía y las valoraciones en energía que ellos definen. Recordemos que si tenemos los procesos descritos por una matriz cuadrada de coeficientes técnicos  $A = (a_{ij})$ , es suficiente establecer los consumos energéticos unitarios de cada proceso de producción  $i$ ,  $w_i$ , para poder calcular los valores energía<sup>9</sup>. En concreto, si  $W = (w_i)$ , los valores energía están dados por el vector  $\Lambda = (\lambda_i)$  definido por

$$\Lambda = \Lambda A + W \Leftrightarrow \Lambda = W (I - A)^{-1}.$$

<sup>8</sup> Un ejemplo exagerado del tipo de relación existente entre Termodinámica y Economía sería el existente entre la Teoría de la gravedad y el comportamiento, alimentación y producción de leche en una ganadería, la gravedad es un hecho esencial, que determina el movimiento, la circulación de alimentos y el proceso de ordeño, pero es simplemente el marco físico y poco más, a pesar de su relevancia, se puede decir.

<sup>9</sup> Aunque utilice los valores energía, no identifico por las razones explicadas anteriormente energía incorporada con valor económico tal como se hace, por ejemplo, en Costanza (1980). Una profunda crítica de las tesis de Costanza pueden verse en Georgescu-Roegen (1983).

Es bien conocido el significado de estos  $\lambda_i$ , representan la energía necesaria directa o indirectamente para obtener una unidad neta de bien  $i$ . Los valores energía miden el consumo de energía realizado en el proceso que genera el producto final y en los procesos utilizados para obtener los inputs o recursos.

Aunque al definir estos valores siempre se habla de energía, al obtener sus estimaciones numéricas se usa únicamente la energía obtenible de los distintos recursos o combustibles, luego sería más exacto hablar de valores exergía. Así lo haremos de ahora en adelante, denominando a los  $\Lambda$  valores exergía usada. Al hacer este salto asumimos que  $w_i$  representa todas las entradas exergéticas directas del proceso  $i$ , se vayan a incorporar como input energético o como input de cualquier otro tipo, que no este contabilizado a través de la matriz  $A$ .

Desgraciadamente, en el cálculo tradicional de los  $\lambda_i$  no se considera normalmente el problema de la eficiencia termodinámica, pero podemos hacerlo. El método más simple es dividir la exergía, directamente incorporada en cada proceso sectorial, que hemos designado por  $w_i$ , en dos componentes, una  $w_i^u$ , que corresponde a la parte de  $w_i$  que es incorporada en la producción del sector y que no es degradada en el proceso productivo sectorial, y otra  $w_i^d$ , que mide cuanto de  $w_i$  se pierde en ese proceso.

Si nos apoyamos en  $W^u = (w_i^u)$  y  $W^d = (w_i^d)$ , es fácil definir dos nuevos valores exergía, a saber

$$\begin{aligned} \Lambda^u &= \Lambda^u A + W^u \Leftrightarrow \Lambda^u = W^u (I - A)^{-1}, \\ \Lambda^d &= \Lambda^d A + W^d \Leftrightarrow \Lambda^d = W^d (I - A)^{-1}, \end{aligned}$$

que representan la exergía útil por unidad de output y la exergía perdida o degradada por unidad en el proceso de producción. A  $\Lambda^u$  y  $\Lambda^d$  los llamaré valores exergía y valores exergía degradada.  $\Lambda^u$  y  $\Lambda^d$  nos dicen, para cada bien  $i$ , cuanta exergía de la utilizada por unidad,  $\Lambda$ , se mantiene en el output final,  $\Lambda^u$ , y cuanta se pierde,  $\Lambda^d$ , por la imposibilidad de una eficiencia termodinámica del 100%.

Para confirmar esta última afirmación conviene comprobar que la suma de los valores exergía y exergía degradada son los valores exergía usada. Ello se comprueba a continuación.

$$\Lambda^u + \Lambda^d = W^u (I - A)^{-1} + W^d (I - A)^{-1} = (W^u + W^d) (I - A)^{-1} = W (I - A)^{-1} = \Lambda.$$

Los valores exergía y exergía degradada nos permiten establecer el nivel de eficiencia termodinámica. Si la producción neta final está dada por  $y$ , tendremos que

$$e = \frac{\Lambda^u y}{\Lambda^u y + \Lambda^d y} = \frac{\Lambda^u y}{\Lambda y};$$

y si designamos por  $e_i = \frac{w_i^u}{w_i}$  la eficiencia en el uso energético directo de cada proceso,

podemos escribir la eficiencia anterior, que será una eficiencia media, como

$$\bar{e} = \frac{(w_1^u, w_2^u, \dots, w_n^u) (I - A)^{-1} y}{(w_1, w_2, \dots, w_n) (I - A)^{-1} y} = \frac{(e_1 w_1, e_2 w_2, \dots, e_n w_n) (I - A)^{-1} y}{(w_1, w_2, \dots, w_n) (I - A)^{-1} y}.$$

Los tres valores exergía obtenidos, con independencia de su significado económico, son valoraciones económicas que asignan el mismo valor al output final y a los recursos utilizados. Por esta razón, y de acuerdo con el apartado e) del *Teorema 1* y el b) del *Corolario 1*, los tres revalorizan las unidades de exergía en la misma proporción,  $1/\bar{e}$ , verificándose

$$1 > \bar{e} = \frac{\bar{p}_r}{\bar{p}_p}; \bar{e} = \frac{\bar{p}_r}{\bar{p}_p} \Leftrightarrow \bar{e} \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}_r} = 1 \Leftrightarrow \frac{EP}{ER} \frac{\bar{p}_p}{\bar{p}_r} = 1.$$

Esto es una nueva prueba de que la revalorización de la exergía, en las valoraciones económicas, añade poca o nula información adicional.

#### 4. Eficiencia termodinámica y cambio tecnológico

Una idea intuitiva y muy popular es que el cambio tecnológico reduce la degradación termodinámica en el proceso de producción, suponiendo, por tanto, el cambio tecnológico una reducción de la entropía, una de las formas de combatir el incremento constante de esta en el universo. Usando los conceptos previos, vamos a ver si esta intuición es cierta y a investigar la relación existente entre tasas de eficiencia termodinámica y varios tipos de cambio tecnológico. Las conclusiones obtenidas son recogidas en el *Teorema 2*.

*Teorema 2.* En un modelo de Leontief de producción simple descrito por una matriz cuadrada  $A$  indescomponible de coeficientes técnicos, los siguientes cambios técnicos

a) reducción de todos los  $w_i$  en un porcentaje fijo, sin que se altere la tasa de

eficiencia directa<sup>10</sup>,  $e_i = \frac{w_i^u}{w_i}$ , de cada proceso sectorial,

b) reducción de un  $w_s$  sin que se alteren las tasas de eficiencia directa  $e_i$ ,

c) aumento de todos los niveles de eficiencia directa sin alteración de las  $w_i$  requeridas,

d) aumento de un nivel de eficiencia  $e_s$  sin alteración de las  $w_i$  requeridas,

e) reducción de alguno de los coeficientes técnicos sin modificación de los  $w_i$  y de los  $e_s$ ,

f) reducción de varios coeficientes técnicos sin cambio de los  $w_i$  y de los  $e_i$ ;

nunca aumentan la cantidad global de exergía utilizada; los cambios c) y d) aumentan la eficiencia media, pero los efectos de los demás cambios sobre la eficiencia media son dudosos.

*Demostración.*

---

<sup>10</sup> No debe confundirse con la eficiencia del proceso de obtención del bien  $i$ , que depende también de la eficiencia en todos los procesos asociados con la obtención de sus inputs y con los de generación de los inputs de sus inputs.

Nos apoyaremos en la expresión de la eficiencia media que hemos obtenido antes y que, con  $(I - A)^{-1} = (\alpha_{ij})$ , podemos escribirla así,

$$\bar{e} = \frac{\text{exergía final}}{\text{exergía inicial}} = \frac{(e_1 w_1, e_2 w_2, \dots, e_n w_n) (I - A)^{-1} y}{(w_1, w_2, \dots, w_n) (I - A)^{-1} y} = \frac{\sum_{i,j} e_i w_i \alpha_{ij} y_j}{\sum_{i,j} w_i \alpha_{ij} y_j}.$$

En el cambio de tipo a) es fácil ver que el valor de  $\bar{e}$  no cambia al reducirse en el mismo porcentaje el numerador y el denominador de la última expresión. En consecuencia el cambio técnico reduce la cantidad de exergía utilizada pero no la eficiencia del proceso, que sigue siendo la misma.

En el caso b) la reducción de  $w_s$  afecta tanto al numerador como al denominador, pero el efecto conjunto puede mantener, incrementar o reducir el valor de  $\bar{e}$ . Si  $e_s > \bar{e}$ , la reducción de  $w_s$  reduce el nivel de eficiencia medio; si  $e_s < \bar{e}$ , el efecto será el contrario y, finalmente, si  $e_s = \bar{e}$  la reducción de  $w_s$  no afectará a la eficiencia media.

En el cambio de tipo c) el efecto es un incremento de la eficiencia media sin reducción de la exergía usada; notemos que el denominador de la expresión de la eficiencia media no cambia, al no modificarse las  $w_i$  requeridas, lo que aumenta es el numerador al ser menor la exergía degradada.

En el cambio tipo d) el efecto es el mismo que en c); la prueba es semejante.

En el cambio de tipo e) se produce una reducción de la exergía usada pero el efecto sobre la eficiencia media puede ir en cualquier sentido. La reducción de un coeficiente de la matriz  $A$ , como esta es indescomponible, reduce los valores de todos los  $\alpha_{ij}$ , luego reduce estrictamente  $\Lambda$ ,  $\Lambda^u$  y  $\Lambda^d$ . Ello supone una reducción de los requerimientos de exergía, de la exergía degradada y de la exergía final. No obstante el efecto sobre  $\bar{e}$  es dudoso, la modificación de un  $a_{ij}$  modifica en porcentajes diversos los valores de los  $\alpha_{ij}$ , luego el efecto final dependerá de los  $e_i$ .

Finalmente, los cambios de tipo f) tendrán el mismo carácter que los de tipo e), ya que son simplemente una agregación de cambios del tipo anterior.

Resumiendo, la incorporación del cambio tecnológico tiende a reducir el consumo de exergía y, por tanto, la degradación entrópica, pero no mueve, en general, en una única dirección a la tasa de eficiencia termodinámica. De nuevo nos encontramos con una relación entre Termodinámica y Economía, *el cambio técnico reduce el consumo de exergía*, que forma parte del marco físico del cambio técnico, pero las medidas de eficiencia termodinámica y de cambio técnico son distintas y cambian de forma diferente porque responden a dos visiones científicas distintas, la termodinámica y la económica. La caracterización del cambio tecnológico puede mejorarse a costa de hacer los razonamientos más complejos, pero ello no anula o modifica las conclusiones obtenidas, los resultados son idénticos.

## 5. Tasa de eficiencia termodinámica y ratio de crecimiento proporcional

En un modelo Leontief el output  $q$  de crecimiento proporcional está dado por las expresiones

$$\lambda_R q = A q \Leftrightarrow q = (1 + R) A q, \text{ con } 1+R = \frac{1}{\lambda_R};$$

donde  $\lambda_R$  es la Raíz de Frobenius de la matriz  $A$  y  $1+R$  la denominada Razón patrón de Sraffa. La viabilidad de la economía requiere que sea  $\lambda_R \leq 1$ . El caso  $\lambda_R = 1$  sólo es admisible si suponemos que los pagos físicos por todos los inputs están considerados en la matriz  $A$ , lo que es bastante raro en las modelizaciones; por este motivo supondremos  $\lambda_R < 1$ .

Si nos fijamos en la expresión  $\lambda_R q = \frac{1}{1+R} q = A q$ , con  $\lambda_R < 1$ , podemos pensar que  $\lambda_R$  y las tasas de eficiencia termodinámica  $e_i$  pueden tener una fuerte relación. Aprovechando las relaciones vistas entre cambio tecnológico y eficiencia, vemos en el *Corolario 2* que esto no es cierto, que  $\lambda_R$  y los  $e_i$  corresponden a visiones científicas diferentes e informan, en lo esencial, de aspectos distintos de la realidad.

*Corolario 2.* En un modelo de Leontief definido por una  $A$  indescomponible,

a)  $\lambda_R = \frac{1}{1+R}$  puede ser  $>$ ,  $=$  ó  $<$  que  $\bar{e}$ , la eficiencia termodinámica,

b) si las tasas de eficiencia directa  $e_i$  de todos los procesos sectoriales son iguales a  $e$ , solo se consideran los bienes reproducibles y la producción sigue la senda del crecimiento proporcional, la ratio de revalorización de la exergía en el modelo es igual a  $\frac{1+R}{e}$ .

*Demostración.*

a) Supongamos que partimos de una  $A$  que tiene una Raíz de Frobenius,  $\lambda_R$ , suficientemente cercana a uno para que  $\bar{e} < \lambda_R$ . Se lleva a cabo una reducción suficientemente grande y proporcional de todos los coeficientes de  $A$ , sin alterar las  $w_i$  ni las eficiencias directas  $e_i$ , la consecuencia es que todos los coeficientes de la inversa de Leontief se reducen y pueden reducir el valor de  $\bar{e}$ , pero su valor final nunca será menor que  $e_{\min} = \min_j e_j$ . Por el contrario, si la reducción es suficientemente grande, la nueva Raíz de Frobenius  $\lambda_R$  podrá verificar:  $\lambda_R < e_{\min} < \bar{e}$ .

$$b) \text{ Al ser todas las } e_i \text{ iguales, } \bar{e} = \frac{\sum_{i,j} e_i w_i \alpha_{ij} y_j}{\sum_{i,j} w_i \alpha_{ij} y_j} = \frac{\text{exergía final}}{\text{exergía inicial}} = e, \quad \forall y = (y_j),$$

luego

$$q = (1+R)Aq \Rightarrow pq = (1+R)pAq \Rightarrow (\text{exergía final})p_p = (1+R)(\text{exergía inicial})p_r \Rightarrow$$

$$e (\text{exergía inicial}) p_p = (1+R) (\text{exergía inicial}) p_r \Rightarrow \frac{p_p}{p_r} = \frac{1+R}{e} = \frac{1}{e \lambda_R};$$

como queríamos demostrar.

El apartado a) del *Corolario 2* prueba que las ordenaciones asociadas a las tasas de eficiencia termodinámica y a las raíces de Frobenius son, en general, diferentes, siendo su relación muy débil; lo mismo ocurre para la tasa de eficiencia termodinámica y la Razón

patrón de Sraffa. Esta es un buen indicador del nivel de cambio técnico, véase Sánchez Chóliz (1989), pero los aspectos del cambio técnico que recoge y los captados por la tasa de eficiencia termodinámica son diferentes. En consecuencia, ni la Raíz de Frobenius de  $A$ , ni la tasa de crecimiento proporcional asociada con ella son indicadores aceptables de la eficiencia termodinámica.

Esto se confirma con el apartado b) donde, para una misma  $e$ , podemos tener diferentes  $R$  y, por tanto, diferentes niveles de cambio tecnológico. Para cada  $R$  lo que tendremos es una revalorización monetaria de la exergía distinta.

El resultado del apartado b) puede parecer contradictorio con el b) del *Corolario 1*, pero no lo es. Notemos que el valor asignado a los recursos es únicamente  $p A q$ , mientras el valor del producto final es  $p q > p A q$ . Estamos en la situación ya comentada de que no todo el valor se asigna a los recursos, verificándose entonces que la revalorización de la exergía es mayor que  $1/e$ . En b) el parámetro  $R$  es una medida del valor no asignado a los inputs y contabilizado como incremento de producción.

## 6. Últimas reflexiones

En los anteriores apartados, nos hemos guiado por las relaciones entre eficiencia termodinámica y valoración económica a la hora de buscar conexiones entre Termodinámica y Economía. Los *Teoremas 1* y *2* y sus corolarios muestran los principales resultados.

La eficiencia termodinámica se define sobre los inputs físicos, reproducibles o no, y nunca, según el Segundo Principio de la Termodinámica, la eficiencia es del 100%. Además utiliza el marco metodológico de la Física, cuantificándose la exergía de acuerdo con los criterios de esta. Por el contrario, en las valoraciones económicas el concepto de input y la asignación de valor se hace a través del entramado económico-social, que puede aceptar como inputs entes con un carácter material muy complejo, por ejemplo el capital. Asumido este entramado social, el criterio dominante en la Ciencia Económica es distribuir todo el valor generado (el asociable con el output) entre los inputs; el criterio busca asegurar un valor no negativo a la obtención de utilidad o bienestar. Este punto de vista está muy bien recogido por Georgescu-Roegen:

El verdadero producto del proceso económico no es un flujo material de desechos sino un flujo psicológico: el disfrute de la vida. Si no incluimos este factor esencialmente humano no estaremos en el campo económico.

(Georgescu-Roegen, 1983, página 857),

y es la causa de que no sea posible ahora, y probablemente tampoco en el futuro, una sustitución de los valores económicos por los valores exergéticos. Podrán establecerse equivalencias entre unidades exergéticas y unidades de valor económico, pero nunca podrá la valoración exergética la componente social y humana que tienen la Economía y los valores económicos.

Esta dificultad para sustituir la Economía por la Termodinámica es también la base de los resultados del *Teorema 2* y del *Corolario 2*. El cambio tecnológico tiene medidas de eficiencia muy diferentes de las que miden la eficiencia termodinámica. Los parámetros  $R$  y  $e$  no miden lo mismo, ni tienen una relación que nos permita afirmar que son medidas de fenómenos equivalentes. Aunque es cierto que el cambio técnico reduce, directa o indirectamente, los requerimientos exergéticos, esto ya es recogido a través de la propiedad de que todo cambio técnico viable reduce los costes.

Resumiendo, la conexión entre degradación termodinámica y valoración económica existe, pero los lazos de unión parecen débiles y dan pocas esperanzas de que se pueda lograr una valoración común, que sea realmente operativa tanto en el campo de la Termodinámica como en el de la Economía.

Todo esto nos lleva a defender, sin negar la conveniencia de contactos, puentes y colaboraciones entre la Termodinámica y la Economía, que ambas ciencias deben, en lo esencial, conservar sus metodologías porque cubren áreas científicas difícilmente integrables.

### **Bibliografía**

- Amin, S. (1994): "The role of thermodynamics in the study of economic and ecological systems". *Ecological Economics*, 10, pág.125-142.
- Costanza, R. (1980): "Embodied Energy and Economic Valuation". *Science*, 210, 12 de Diciembre de 1980, pág.1219-1224.
- Georgescu-Roegen, N. (1977): "What Thermodynamics and Biology Can Teach Economist?..", *Atlantic Economic Journal*, V, páginas 13-21. Traducción castellana en Aguilera Klink, F. y Alcántara, V. (ed.) (1994): *De la economía ambiental a la economía ecológica*. Barcelona: ICARIA-FUHEM.
- Georgescu-Roegen, N. (1983): "La teoría energética del valor económico: un sofisma económico particular". *El Trimestre Económico*, 50, pág. 829-60
- Leontief, W.; Ford, D. (1972): "Air pollution and the economic structure: empirical results of input-output computations", en A. Brody y A.P. Carter (edit.): *Input-output techniques*. Amsterdam: North Holland
- M'Gonigle, R.M. (1999): "Ecological economics and political ecology: towards a necessary synthesis". *Ecological Economics*, 28, pág. 11-26
- Naredo, J.M. (1994): "Fundamentos de la economía ecológica", en Aguilera Klink, F. y Alcántara, V. (ed.) (1994): *De la economía ambiental a la economía ecológica*. Barcelona: ICARIA-FUHEM.
- Sánchez Chóliz, J. (1989): "La razón patrón de Sraffa y el cambio técnico". *Investigaciones Económicas*, 2ª época, vol. XIII, n. 1, páginas 137-154.
- Valero, A; Muñoz, M.; Lozano, M.A: (1986): "A General Theory of Exergy Savings I. On the Exergetic Cost" , en R.A. Gaggioli (editor): *Computer-Aided Engineering and Energy Systems, vol 3: Second Law Analysis and Modelling*. Publicado por The American Society of Mechanical Engineers.
- Vegara, J.M. (editor) (1982): *Lecturas sobre economía política marxista contemporánea*. Barcelona: Antoni Bosch.

### **Anexo: Cálculos para un ejemplo concreto**

Supongamos que la economía está descrita por la matriz de coeficientes técnicos  $A = \begin{pmatrix} 0'5 & 0'3 \\ 0'3 & 0'5 \end{pmatrix}$

en la que suponemos contabilizados todos los inputs físicos utilizados para la producción. En cada proceso los inputs directos de exergía por unidad producida, incorporados a través de bienes físicos, son  $W = (1,1)$ , siendo la eficiencia directa del 60% y 40% respectivamente. Este vector W contiene la exergía de todos los inputs del proceso que no están contabilizados por los coeficientes técnicos de la matriz A.

Los precios de equilibrio del modelo están dados por:

$$(p_1, p_2) = p = (1+R)p \begin{pmatrix} 0.5 & 0.3 \\ 0.3 & 0.5 \end{pmatrix} \Rightarrow p_1 = p_2 = 1; 1+R = 5/4 = 1.25; R = 0.25.$$

Los valores exergía usada se obtienen de esta manera:

$$(\lambda_1, \lambda_2) = \Lambda = (1,1) (I-A)^{-1} = (1,1) \begin{pmatrix} 25/8 & 15/8 \\ 15/8 & 25/8 \end{pmatrix} \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 = 5.$$

Los valores exergía verifican:

$$(\lambda_1^u, \lambda_2^u) = \Lambda^u = (0.6, 0.4) (I-A)^{-1} = (0.6, 0.4) \begin{pmatrix} 25/8 & 15/8 \\ 15/8 & 25/8 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\lambda_1^u = 21/8; \lambda_2^u = 19/8.$$

Los valores exergía degradada se obtienen con:

$$(\lambda_1^d, \lambda_2^d) = \Lambda^d = (0.4, 0.6) (I-A)^{-1} = (0.4, 0.6) \begin{pmatrix} 25/8 & 15/8 \\ 15/8 & 25/8 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\lambda_1^d = 19/8; \lambda_2^d = 21/8.$$

Observemos que, como se probó en el apartado 2,  $\Lambda = \Lambda^u + \Lambda^d$ .

Las eficiencias en la obtención de bien 1 y de bien 2 se hallan a partir de  $\Lambda^u$  y  $\Lambda$ , teniendo los valores:

$$\varepsilon_1 = \frac{\lambda_1^u}{\lambda_1} = \frac{21/8}{5} = 21/40 = 0.525;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\lambda_2^u}{\lambda_2} = \frac{19/8}{5} = 19/40 = 0.475.$$

Notemos que las eficiencias en la obtención de cada bien son diferentes de las eficiencias directas, que son eficiencias de proceso sectorial. La eficiencia directa es la eficiencia en el uso de la exergía incorporada directamente en el sector, pero no la eficiencia en los procesos de producción de los inputs; este es el origen de las diferencias entre ambos tipos de eficiencia.

Supongamos ahora que el output es de crecimiento proporcional, esto es, que está dado por:

$$(x_1, x_2) = X = (1+R) \begin{pmatrix} 0.5 & 0.3 \\ 0.3 & 0.5 \end{pmatrix} X \Rightarrow x_1 = x_2 = 10,^{11}$$

lo que supone que el output neto es (2,2).

Para este  $X = (10,10)$ , las magnitudes de la exergía son

$$\text{Exergía utilizada} = E = 5 \cdot 2 + 5 \cdot 2 = 20;$$

$$\text{Exergía final} = E^u = \frac{21}{8} \cdot 2 + \frac{19}{8} \cdot 2 = 10;$$

$$\text{Exergía degradada} = E^d = \frac{19}{8} \cdot 2 + \frac{21}{8} \cdot 2 = 10;$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{E^d}{E} = \frac{10}{20} = 0.5;$$

observemos que  $\bar{\varepsilon} = 0.5$  es el valor medio de las eficiencias  $\varepsilon_i$

---

<sup>11</sup> La elección de 10 unidades de output en cada sector es arbitraria, se ha hecho así para simplificar cálculos posteriores

$$\frac{2 * 0.525 + 2 * 0.475}{2+2} = \frac{1.05+0.95}{4} = 0.5 \quad .$$

Finalmente, la tasa de revalorización de la exergía estará dada por:

$$r = \frac{(1*10 + 1*10)/10}{[(1*8 + 1*8) + (1*8 + 1*8) * 0.25]/20} = \frac{20/10}{(16+4)/20} = 2 = 1/\bar{e} ;$$

resultado que es coherente con lo visto en *Corolario 1*.