

Termoeconomía Solar

Apuntes metodológicos para el análisis termoeconómico del sistema industrial en su relación con la Biosfera

Ricardo Marqués

1 Introducción

El título del presente trabajo, *termoeconomía solar* está doblemente justificado. *Termoeconomía* porque el autor - y no solamente el autor - está convencido de la necesidad de hacer un análisis termoeconómico [1] de los procesos industriales y del sistema industrial en su globalidad; es decir un análisis de las pérdidas de *exergía* o energía utilizable (o, lo que viene a ser lo mismo, la generación de entropía) que se produce como consecuencia de aquellos, tanto directa como indirectamente. *Solar* porque el autor está igualmente convencido de que la degradación entrópica de la Biosfera, indisolublemente asociada a *este* sistema industrial, no es inevitable ni tiene forzosamente que estar asociada a todo sistema industrial, sino que pueden imaginarse y desarrollarse otras alternativas menos destructivas y más sostenibles. Por supuesto, para ello es *condición necesaria* el uso predominante de fuentes de energía renovables, es decir solar y sus derivadas (eólica, hidráulica, etc.). De aquí el adjetivo *solar* que figura en el título; porque si ese es el objetivo, es necesario incluir desde el principio, en los análisis termoeconómicos de los procesos industriales, el carácter singular de los recursos energéticos renovables y, en especial, de la energía solar.

Aunque pueden encontrarse precedentes históricos [2], la contradicción entre la tendencia universal hacia la degradación entrópica que impone el Segundo Principio de la Termodinámica y la regla del interés compuesto siempre creciente, cuyo optimismo preside toda la ciencia económica convencional, ha estado en el centro de la crítica ecológica de la economía al menos desde la publicación del trabajo pionero de Georgescu-Roegen [3], hasta nuestros días (ver, por ejemplo, [4] [1] entre otros). Una situación similar hasta cierto punto se ha vivido en el terreno de la biología y la teoría de la evolución, en las que se opera parecida contradicción entre la tendencia a una mayor complejidad y organización de los seres vivos y las especies animales y la tendencia universal hacia el desorden y la degradación que impone el Segundo Principio [5].

Tanto en un caso como en el otro la solución de esa aparente paradoja está en el carácter abierto tanto de los seres vivos como de los procesos industriales, que les permite aumentar su organización interna y producir mercancías con un alto contenido de organización, a costa

de producir una degradación entrópica aún mayor del entorno. No obstante aquí se acaba el paralelismo entre el funcionamiento del sistema industrial y los mecanismos de la vida, al menos en lo que respecta al sistema industrial *actual*. Éste funciona en la actualidad como un sistema globalmente abierto, mientras que aquéllos configuran un sistema globalmente cerrado de flujos materiales, alimentado por la energía solar [6].

El carácter finito de la Biosfera impone limitaciones a la capacidad de degradación entrópica del entorno por parte de los procesos industriales. Establecer esos límites y corregir la actual tendencia hacia la degradación del medio ambiente consecuencia de la acción de tales procesos es una de las tareas de la economía ecológica. El término *Termoeconomía* ha sido propuesto recientemente para este análisis [1].

Pero la Biosfera, a su vez, no es un sistema aislado, sino que está sometida a un flujo de energía procedente del Sol que hace posible que todo el sistema en su conjunto presente síntomas de un comportamiento negaentrópico [7], [8]. Ello hace que no sea posible evaluar la contribución de los procesos industriales a la degradación entrópica de la Biosfera a partir de enunciados simplistas del Segundo Principio, válidos solo para sistemas termodinámicos aislados o en contacto térmico con un termostato. El presente trabajo intenta ser una aproximación al análisis de los mecanismos de degradación entrópica de la Biosfera consecuencia de la acción del sistema industrial, utilizando para ello los métodos de la Termodinámica de los Procesos Irreversibles [9].

Una conclusión importante de este trabajo es el papel singular que las energías renovables deberían desempeñar en un hipotético sistema industrial que poseyese características negaentrópicas, en el mismo sentido en que la Biosfera puede poseerlas (ver sec.2 y 4). El carácter singular que por tanto tienen estas fuentes de energía, justifica el título de este trabajo y exige un tratamiento diferenciado de los inputs de energía renovable, lo que se hace por medio de las magnitudes definidas como *netas* a lo largo del mismo (ver sec.4).

Otra conclusión importante es que la generación directa de entropía durante los procesos industriales no es sino una ínfima parte de la generación total de entropía consecuencia de estos procesos, a través de la contaminación provocada por ellos en los mecanismos de autorregulación de la Biosfera (ver sec.6). Por tanto, no debe esperarse que el análisis de la generación directa de entropía o irreversibilidad por los procesos industriales pueda sustituir al análisis detallado de su impacto ambiental. No obstante, puede afirmarse (ver sec.6) que el uso predominante de fuentes de energía renovables, no sólo disminuye la generación directa neta de entropía del sistema industrial, sino que es condición necesaria, aunque no suficiente, de un hipotético sistema industrial que no contribuya a la degradación entrópica indirecta de la Biosfera. Por ello, si bien el estudio de la generación directa neta de entropía por los procesos industriales no puede sustituir al análisis de su impacto ambiental, sí puede dar una idea del grado de cercanía del sistema industrial al objetivo deseable de un sistema que no contribuya a la degradación entrópica de la Biosfera.

2 Los enunciados del Segundo Principio y otros temas afines

El enunciado clásico del Segundo Principio de la Termodinámica puede expresarse así:

- *Todo sistema aislado, evoluciona en el tiempo de modo que su entropía crece o permanece constante en el tiempo*

Por sistema aislado entendemos un sistema que no intercambia ni energía (sea en forma de calor o en forma de trabajo) ni materia con el entorno. En cuanto a la entropía, ésta es una magnitud definida positiva, función de la temperatura, la presión, la composición, etc., del sistema y que se anula sólo a la temperatura del cero absoluto (-273 grados centígrados). El significado del Segundo Principio es pues que todo sistema aislado evoluciona en el tiempo de modo irreversible (puesto que la entropía puede aumentar pero no disminuir) hasta que llega a un estado en el que la entropía alcanza su valor máximo como función de la energía y la composición atómica¹ del sistema (que son invariantes dado el carácter aislado del mismo). En ese momento se dice que el sistema ha alcanzado el *equilibrio termodinámico*. Toda evolución a partir de ahí es imposible, pues ello implicaría una disminución de la entropía del sistema.

Hay que decir que para que la entropía, definida como una magnitud de la temperatura, composición, etc., del sistema pueda crecer con el tiempo, el sistema ha de ser inhomogéneo. Es decir, el sistema en un estado de no equilibrio es en general un sistema inhomogéneo, formado por distintos subsistemas a temperatura y/o composición etc., diferentes. La entropía total se define entonces como la suma de las entropías de cada subsistema:

$$S = \sum_i S_i \quad (1)$$

y el proceso de transición al equilibrio es entonces un proceso por el cual la materia y la energía van fluyendo de un subsistema a otro, de modo que la entropía de los distintos subsistemas va variando (a medida que varía su temperatura, composición etc.), hasta que la entropía total S alcanza el valor máximo compatible con la energía total y la composición global del sistema aislado. La ecuación (1) indica que la entropía es una magnitud *extensiva*, es decir que la entropía de un sistema es igual a la suma de las entropías de sus partes. Esta es una propiedad fundamental de la entropía, que es utilizada ampliamente por la termodinámica de los procesos irreversibles².

Conviene llamar la atención aquí acerca del carácter *aislado* del sistema para el que se postula el crecimiento continuado de la entropía. Ese carácter aislado es esencial en la formulación clásica del Segundo Principio. Pretender aplicar la ley del crecimiento de la entropía

¹Es decir, suponemos que en el sistema pueden tener lugar reacciones químicas que cambien su composición molecular, pero no reacciones atómicas que cambien su composición atómica. Para tener en cuenta las reacciones atómicas habría que utilizar la equivalencia masa - energía. No lo hacemos para no complicar innecesariamente el tratamiento

²Es asimismo posible tratar sistemas inhomogéneos en los que la distribución de temperaturas, composición, etc, sea continua. En esos casos basta con sustituir el sumatorio de (1) por una integral. En este texto no haremos uso, no obstante, de esta posibilidad.

en la forma simple expresada arriba, a sistemas no aislados, puede llevar a errores de bulto demasiado comunes por desgracia.

Conviene también indicar que la entropía por unidad de masa de cada sustancia, como función de su temperatura, densidad, etc., es una magnitud perfectamente calculable y tabulada para la mayoría de ellas. Asimismo, puede darse una interpretación estadística del significado físico de la entropía, a partir de los trabajos de Boltzmann y Gibbs. Dicha interpretación suele expresarse diciendo que la entropía es una *medida del desorden a escala microscópica*. Es conocida la expresión general debida a Schrodinger [5]:

$$S = k \ln(D) \tag{2}$$

donde D es cierta medida del *desorden microscópico* y $\ln(D)$ su logaritmo neperiano. Así interpretada la entropía, el Segundo Principio se convierte casi en una tautología: todo sistema aislado evoluciona hasta alcanzar el estado de máximo desorden compatible con su energía y composición. De todos modos conviene tener cuidado con estas interpretaciones de la entropía, pues el término desorden es demasiado intuitivo y la expresión de D como medida del *desorden* no siempre es todo lo clara que sería de desear.

La termodinámica suele clasificar los sistemas en aislados (aquellos que no intercambian ni energía ni materia con el exterior), cerrados (aquellos que pueden intercambiar energía pero no materia) y abiertos (aquellos que intercambian tanto materia como energía). Un caso particular interesante de los sistemas cerrados es el de los sistemas cerrados en *contacto térmico* con un *medio ambiente* a temperatura dada, con el que puede intercambiar energía en forma de calor y *solamente con él* (este último punto es esencial). Se supone que la temperatura del medio ambiente no se va a ver afectada, sino de forma infinitesimal, por los intercambios de calor con el sistema cerrado. En ese caso, puede definirse otra magnitud extensiva que cumple una función similar a la de la entropía a la hora de definir la evolución hacia el equilibrio. Dicha magnitud es la *exergía* y tiende a un mínimo en el equilibrio. La exergía de un sistema cerrado en contacto térmico con un medio ambiente a una temperatura dada se define como:

$$E = U - T_a S \tag{3}$$

donde U es la energía interna total del sistema, S su entropía y T_a la temperatura del ambiente³. Puede demostrarse además que la diferencia de exergías entre un estado dado y el estado final de equilibrio es igual al trabajo útil máximo que sería posible extraer de los flujos de energía entre el sistema y el medio ambiente [1]. El resto debe disiparse inevitablemente en forma de calor. Como puede verse, la exergía es una magnitud de indudable interés práctico.

Hasta aquí hemos visto las leyes generales que gobiernan el comportamiento de los sistemas aislados y de los sistemas cerrados en contacto térmico con un medio ambiente a temperatura dada. Sin embargo existen en la naturaleza otros muchos tipos de sistemas. En particular los seres vivos son indudablemente sistemas abiertos. La propia Biosfera, si bien puede considerarse con gran aproximación un sistema cerrado, no puede asimilarse a un sistema cerrado en contacto térmico con un medio a temperatura dada (ver más adelante y también [8]). Los

³Algunos autores prefieren usar el término *energía libre* para la exergía, aunque este término se suele reservar, en la mayoría de los textos de termodinámica para una magnitud algo diferente

procesos industriales, si bien están en contacto con un medio ambiente a temperatura mas o menos constante, no son sistemas cerrados, ni se limitan a intercambiar calor con el ambiente, etc... Es preciso pues formular un criterio general de evolución válido para todo tipo de sistemas. Dicho criterio no debe por supuesto contradecir los criterios antes expuestos para los sistemas aislados y cerrados en contacto térmico con un medio a temperatura dada.

La formulación de tal criterio constituye la base de la termodinámica de los procesos irreversibles y puede considerarse como un enunciado del Segundo Principio más general que el transcrito al comienzo de esta sección. Para ello utilizamos las siguientes propiedades de la entropía [9]:

- La entropía es una magnitud extensiva, es decir la entropía total de un sistema es igual a la suma de las entropías de sus partes.
- La entropía total generada en cualquier proceso debe ser positiva o nula (esto puede considerarse como el enunciado más general posible del Segundo Principio)

Cuando aplicamos estas propiedades de la entropía a un sistema no aislado, debemos tener en cuenta que los posibles flujos de materia y energía entre dicho sistema y el exterior conllevan también flujos de entropía, por lo que la generación de entropía por parte de los procesos que tienen lugar en dicho sistema *no es igual* a la variación de la entropía contenida en el sistema no aislado. Expresaremos esto usando la notación:

$$\Delta S_g = \Delta S + \Phi \Delta t \geq 0 \quad (4)$$

donde Δt es el intervalo de tiempo entre un instante inicial t_1 y uno final $t_2 > t_1$ ($\Delta t = t_2 - t_1$), ΔS_g la entropía total generada en el sistema durante ese intervalo, ΔS el incremento de la entropía contenida en el sistema y Φ el flujo de entropía por unidad de tiempo hacia el exterior del sistema. Φ será positivo si durante el intervalo considerado el sistema suministra entropía al exterior y negativo si es el exterior el que *bombee* entropía hacia el sistema. Nótese que (4) nos dice que la entropía total generada es siempre positiva, pero no nos dice nada acerca del signo de ΔS ni de Φ , salvo que su suma ha de ser positiva o nula.

En el caso particular de sistemas aislados, obviamente $\Phi = 0$, con lo que el enunciado (4) del Segundo Principio se reduce al enunciado clásico: $\Delta S \geq 0$ para un sistema aislado.

También puede demostrarse, a partir de (4), que la exergía (3) de un sistema cerrado en contacto térmico con un medio ambiente a temperatura dada T_a , disminuye o permanece constante a lo largo del tiempo. Para ello basta con tener en cuenta que: i) el incremento de la energía total del sistema ΔU durante el intervalo Δt se reduce en este caso al calor ΔQ absorbido del exterior durante ese tiempo ($\Delta U = \Delta Q$) y ii) el flujo de entropía hacia el exterior del sistema durante ese intervalo es igual al calor cedido por el sistema $-\Delta Q$ por unidad de tiempo, dividido por la temperatura T_a del medio ($\Phi \Delta t = -\Delta Q/T_a$)⁴. Combinando ambas expresiones obtenemos que: $\Phi \Delta t = -\Delta U/T_a$, lo que introducido en (4) conduce finalmente a:

$$\Delta E = \Delta U - T_a \Delta S \leq 0 \quad (5)$$

⁴Este es un enunciado general de la termodinámica, que establece que el flujo de entropía ligado a un flujo de calor es igual al flujo de calor dividido por la temperatura absoluta

Es decir, la exergía del sistema disminuye o permanece constante.

Puede verse por tanto que el enunciado (4) del Segundo Principio no contradice enunciados anteriores, sino que los contiene como caso particular.

Como ya indicamos más arriba, (4) puede cumplirse tanto con incrementos de entropía del sistema negativos ($\Delta S < 0$), como con flujos de entropía hacia el exterior del sistema negativos ($\Phi < 0$), aunque no con ambos negativos a la vez. Ejemplos de sistemas en los que se produce un descenso de la entropía del sistema, compensado por un flujo de entropía hacia el exterior mayor que aquel, pueden encontrarse en los textos de introducción a la termodinámica de procesos irreversible [9] y también en mi artículo [8]. La característica general de dichos sistemas es que la disminución de entropía interna se produce a costa de la disipación de un flujo de energía que los atraviesa, por lo que se denominan sistemas *disipativos*. Ejemplos de sistemas donde se produce un flujo negativo de entropía (es decir, la entropía fluye hacia dentro del sistema), compensado por un aumento mayor de la entropía interna, también son comunes; entre ellos todas las reacciones químicas endotérmicas.

3 Los seres vivos y la Biosfera como sistemas disipativos negaentrópicos

Desde siempre ha llamado la atención la aparente contradicción entre las leyes de la evolución biológica, con su tendencia hacia una complejidad cada vez mayor y las leyes de la termodinámica, particularmente la ley del crecimiento de la entropía, que parece indicar una tendencia generalizada hacia el desorden y la muerte. La aparente paradoja fué ya resuelta, entre otros, por Schrodinger en su célebre monografía *¿Qué es la vida?* [5], al indicar que la aparente disminución de entropía que se daba en los seres vivos era compensada con creces por el aumento de entropía que éstos provocaban en su entorno más inmediato. Dicho de acuerdo con la notación empleada en (4): en los seres vivos se produce una disminución de la entropía ($\Delta S < 0$) compensada por un flujo positivo de entropía hacia el exterior ($\Phi > 0$). Los seres vivos caerían así dentro de la categoría de los sistemas *disipativos negaentrópicos*, es decir sistemas que mediante la disipación de un flujo de energía que los atraviesa (en forma de alimentos, energía solar...) consiguen un aumento de su organización interna con la consiguiente disminución de su propia entropía.

Más recientemente, Lovelock [7] ha adelantado la hipótesis de que la propia Biosfera puede comportarse como un sistema disipativo negaentrópico. Existen indicios indudables para ello, entre los que destaca la composición de la propia atmósfera terrestre. Dicha composición es claramente de origen biológico y se mantiene gracias a la acción de los seres vivos y, en especial, de las plantas verdes. Sin las plantas verdes no se habrían podido producir ni el oxígeno ni las bajas concentraciones de CO_2 que hoy caracterizan nuestra atmósfera. Es más, sin la acción continuada de las plantas verdes, la actual composición de la atmósfera no podría mantenerse por mucho tiempo, haciéndose en poco tiempo irrespirable para el resto de los seres vivos. Ello indica que el estado actual de la atmósfera es un estado muy alejado del estado de equilibrio termodinámico (al que tendería sin la acción de las plantas verdes) o estado de máxima entropía. Es decir, la actual composición de la atmósfera parece corresponderse con

un estado de relativamente baja entropía, mantenido gracias a la acción de las plantas verdes. Dado que las plantas verdes se caracterizan por aprovecharse, mediante la fotosíntesis, del flujo de energía solar que atraviesa la Biosfera, el sistema formado por la atmósfera y las plantas verdes parece comportarse como un sistema disipativo negaentrópico, alimentado por el flujo de energía solar. Lovelock propone ampliar estas consideraciones al conjunto de la Biosfera.

En una reciente publicación el autor ha analizado en detalle, desde el punto de vista termodinámico, la posibilidad de que se dé dicho comportamiento negaentrópico de la Biosfera [8], por lo que aquí solo haré un resumen de los razonamientos allí expuestos. La Biosfera puede considerarse con gran aproximación como un sistema cerrado que intercambia energía pero no materia con el exterior. No puede considerarse en cambio como un sistema cerrado en contacto térmico con el exterior, por cuanto recibe un flujo de energía por parte del Sol en forma de radiación electromagnética incoherente, con un espectro de frecuencias que se corresponde muy aproximadamente con el de la luz emitida por un cuerpo incandescente a 6.000 grados Kelvin o absolutos, es decir a la temperatura de la corona solar. El hecho de que la radiación recibida del Sol sea incoherente implica que dicho aporte de energía puede asimilarse a un aporte de calor ΔQ_s , donde el subíndice s indica que procede del Sol. La absorción de dicho aporte energético por la Tierra supone un flujo de entropía negativo (es decir hacia el interior del sistema) dado por $\Phi_1 = -\Delta Q_s/(T_s \delta t)$, donde T_s es la temperatura absoluta de la corona solar ($T_s = 6000K$) aproximadamente y Δt el intervalo temporal durante el que es absorbido el calor ΔQ_s . Al mismo tiempo, la Tierra emite radiación infrarroja hacia el exterior, con un espectro de frecuencias correspondiente a la radiación de un cuerpo a la temperatura ambiente $T_a \simeq 300K$ (o 27 grados centígrados). Dicho flujo de calor hacia el exterior implica un flujo de entropía positivo (hacia fuera del sistema) dado por $\Phi_2 = \Delta Q_T/(T_a \Delta t)$, donde ΔQ_T es el flujo de calor emitido por la Tierra hacia el exterior en forma de radiación infrarroja durante el intervalo Δt . No existen otros aportes importantes de energía hacia la Biosfera, por cuanto la energía geotérmica procedente del interior del Planeta es menos del 0,1% del flujo de energía solar [10]. Por otra parte, puede decirse, con gran aproximación, que el flujo de energía procedente del Sol es igual al flujo de energía emitido por la Tierra al exterior en forma de radiación infrarroja ($\Delta Q_s \simeq \Delta Q_T$), ya que de no ser así sería imposible mantener una temperatura aproximadamente constante en promedio temporal sobre la Tierra. Así pues, podemos decir que el flujo de entropía hacia el exterior de la Biosfera viene dado por:

$$\Phi \simeq \Phi_1 + \Phi_2 \simeq \frac{\Delta Q_s}{\Delta t} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right) \simeq \frac{\Delta Q_s}{\Delta t} \frac{1}{T_a} \quad (6)$$

donde la última igualdad viene justificada por ser $1/T_s$ mucho menor que $1/T_a$ (aproximadamente un 5%). La aplicación del Segundo Principio (4) lleva entonces a:

$$\Delta S \geq -\frac{\Delta Q_s}{\Delta t} \frac{1}{T_a} \quad (7)$$

La expresión (7) indica que la entropía total de la Biosfera podría disminuir como consecuencia del flujo positivo de entropía hacia el exterior de la misma, generado por la disipación del flujo de energía que atraviesa la Biosfera procedente del Sol. La Biosfera es pues un

sistema disipativo y nada impide, desde el punto de vista del Segundo Principio, que tenga características negaentrópicas. De hecho, como hemos indicado más arriba, hay numerosos indicios en ese sentido.

Hay que destacar que el mecanismo clave por el que la Biosfera parece tener características negaentrópicas es la utilización del flujo de energía solar por las plantas verdes. Por ello no es de extrañar que la actividad industrial humana, que se basa fundamentalmente en el uso de fuentes de energía fósil almacenadas en la Biosfera, esté contribuyendo a alterar los posibles mecanismos negaentrópicos de la Biosfera. No otra cosa es el efecto invernadero, con la consiguiente elevación de la temperatura ambiente, que opera justamente en dirección inversa a lo que ha sido la actividad de las plantas verdes desde hace miles de millones de años: disminuir la cantidad de CO_2 en la atmósfera, aumentando la de oxígeno.

4 Balance entrópico de los procesos industriales y producción bruta de entropía

El flujo de energía que un ser humano necesita para mantener su metabolismo es de aproximadamente 100 vatios. Sin embargo, en los países industrializados el consumo exosomático de energía por persona es superior al kilowatio, es decir más de diez veces mayor. En algunos países, como Estados Unidos, llega a ser cien veces superior. Ese consumo exosomático de energía se realiza a través del sistema industrial, que transforma materias primas y energía en mercancías útiles, residuos y calor. El flujo de energía movilizado durante el funcionamiento del sistema industrial humano es despreciable si se compara con el flujo de energía solar recibido por la Biosfera (apenas un 0,01% de éste), pero comienza a resultar apreciable si se compara con el flujo anual de energía solar que es captado por las plantas verdes, del que llega a ser casi el 10%. Dado que el posible comportamiento negaentrópico de la Biosfera está ligado necesariamente a la acción de las plantas verdes, es indudable que tiene sentido preguntarse por el modo en que el funcionamiento del sistema industrial afecta al balance entrópico de la Biosfera, someramente descrito en la sección precedente.

Podemos considerar el sistema industrial dividido en procesos y subprocesos industriales, entre los que se producen flujos de materia y energía. La generación de entropía global de todo el sistema industrial sería entonces la suma de la generación de entropía en cada proceso y subproceso industrial (recuérdese el carácter *extensivo* de la entropía). Por supuesto, la división de todo el sistema en procesos y subprocesos es arbitraria, lo que permite elegir en cada caso la subdivisión más conveniente, sin que ello afecte a la suma final. Los procesos y subprocesos industriales pueden considerarse además con gran aproximación como sistemas estacionarios, o al menos cíclicos, de modo que las condiciones en el interior de cada proceso (el capital fijo) permanece aproximadamente constante en el tiempo⁵. Así pues, es siempre

⁵Al hacer esto despreciamos el inevitable desgaste de la maquinaria y su necesaria amortización. Este aspecto es fundamental desde el de vista monetario, pero puede despreciarse en primera aproximación para el cálculo de la generación de entropía, por lo que se despreciará en lo que sigue. Ello no obstante, no habría dificultad alguna en introducir en el futuro términos correctivos que tuviesen en cuenta este aspecto de la cuestión

posible elegir Δt en (4) de modo que las condiciones en el interior del proceso industrial sean idénticas, con gran aproximación, al inicio y al final del intervalo. Así, con esa elección de Δt , podemos hacer $\Delta S \simeq 0$ en (4), con la que la generación de entropía correspondiente al proceso industrial se reduce a la correspondiente a los flujos de energía y materia (*inputs* y *outputs*) que lo atraviesan.

Los flujos de entropía correspondientes a los diversos *inputs* y *outputs* los clasificaremos en:

- Flujos de energía directamente transformables en trabajo útil (energía eléctrica, energía mecánica, etc.). El flujo de entropía asociado a estos flujos energéticos es, como se sabe, nulo.
- Flujos de calor. El flujo de entropía asociado viene dado por $\Phi = -\frac{\Delta Q}{T\Delta t}$ donde ΔQ es el calor *absorbido* por el proceso y T la temperatura. Así, si ΔQ es cedido al ambiente como consecuencia de la disipación $T = T_a$; si ΔQ es cedido al proceso mediante un intercambiador de calor a temperatura T_c , $T = T_c$, etc..
- Flujos de entropía asociados al flujo de materiales. Dicho flujo de materiales incluye a los combustibles que se quemen durante el proceso, a las materias primas, a los desechos y a los subproductos, aparte del producto industrial en su sentido habitual. El flujo de entropía asociado al flujo de un material puede expresarse como $\Phi = s \Delta m / \Delta t$, donde Δm es la cantidad de masa que fluye hacia el exterior del proceso en el intervalo Δt y s la entropía por unidad de masa del material a la temperatura y presión considerada⁶.

Consideremos ahora un proceso industrial caracterizado, en el intervalo Δt por una serie de *inputs* de calor ΔQ_i^{in} , de materiales Δm_i^{in} , y de energía directamente transformable en trabajo Δw_i^{in} y de *outputs* ΔQ_j^{out} , Δm_j^{out} , Δw_j^{out} . Si el intervalo Δt cumple las condiciones impuestas al comienzo de esta sección, la generación total de entropía por unidad de tiempo del proceso es:

$$\frac{\Delta S_g}{\Delta t} = \sum_j \frac{\Delta Q_j^{out}}{\Delta t} \frac{1}{T_j} - \sum_i \frac{\Delta Q_i^{out}}{\Delta t} \frac{1}{T_i} + \sum_j s_j^{out} \frac{\Delta m_j^{out}}{\Delta t} - \sum_i s_i^{in} \frac{\Delta m_i^{in}}{\Delta t} \geq 0 \quad (8)$$

donde s_i^{in} y s_j^{out} son las entropías por unidad de masa de los materiales que entran y salen del proceso. $\Delta S_g / \Delta t$ es la entropía por unidad de tiempo que el proceso genera en el intervalo Δt , que en virtud de (4) ha de ser mayor que cero o a lo sumo igual. Nótese que las energías directamente transformables en trabajo útil (como la energía eléctrica), no contribuyen a la generación de entropía, ni como *inputs* ni como *outputs*.

La expresión (8) puede parecer formidable y de cálculo prácticamente imposible. Sin embargo, todos sus sumandos son en principio perfectamente calculables en base a los actuales conocimientos de ingeniería química e industrial. Además, en muchas ocasiones puede recurrirse a aproximaciones, la más común de las cuales consiste en despreciar los dos últimos sumandos de (8), lo que a veces es posible (ver más adelante).

⁶La entropía por unidad de masa es una magnitud bien definida que puede calcularse para los compuestos químicos a partir de su entalpía por unidad de masa h y de su potencial químico μ a la temperatura y presión consideradas (que casi siempre serán las del ambiente) según: $s = (h - \mu) / T$. Para las mezclas existen también expresiones que pueden encontrarse en los textos de termodinámica.

Para mejor entender la expresión (8) daremos un ejemplo. Sea un proceso industrial para producción de agua potable a partir de agua de mar por ósmosis inversa. Los inputs son energía eléctrica y agua de mar y los outputs agua desalada, salmuera y calor producido por el calentamiento de las bombas y por el paso del agua salada a través de las membranas que retienen la sal disuelta en el agua de mar. La generación de entropía durante el proceso será, de acuerdo con (8):

$$\frac{\Delta S_g}{\Delta t} = \frac{\Delta Q^{out}}{\Delta t} \frac{1}{T_a} + s_1^{out} \frac{\Delta m_1^{out}}{\Delta t} + s_2^{out} \frac{\Delta m_2^{out}}{\Delta t} - s^{in} \frac{\Delta m^{in}}{\Delta t} \geq 0 \quad (9)$$

donde los subíndices 1 y 2 hacen referencia a los dos productos materiales del proceso (agua potable y salmuera), y T_a es la temperatura ambiente.

En la generación de entropía (8) pueden observarse dos tipos de sumandos. Los dos primeros hacen referencia a la disipación de energía y los dos últimos a la disipación de la materia por medio de su degradación. Escribamos esto según:

$$\frac{\Delta S_g}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta S_g}{\Delta t} \right)_Q + \left(\frac{\Delta S_g}{\Delta t} \right)_m \geq 0 \quad (10)$$

donde el primer cociente es igual a los dos primeros sumandos de (8) y equivale a la generación de entropía por disipación de energía; y el segundo es igual a la suma de los dos últimos sumandos de (8) y equivale a la generación de entropía por degradación de la materia. En general ambos cocientes serán positivos cuando se tengan en cuenta correctamente todos los flujos de materia y energía, aunque pueden darse ejemplos en que uno de ellos es negativo. El ejemplo anterior de proceso de desalación de agua de mar, es un ejemplo de proceso en el que la generación de entropía por degradación de la materia es negativa, ya que la suma de las entropías contenidas en el agua dulce y la salmuera es inferior a la del volumen correspondiente de agua de mar. Ello quiere decir que se produce un fenómeno de mayor organización del flujo de materia que atraviesa el proceso industrial, alimentado por la disipación del flujo de energía que lo atraviesa. Ejemplos de procesos industriales con generación negativa de entropía por disipación de energía (compensada por una mayor degradación de la materia) pueden ser algunos procesos, hoy en desuso, de producción de frío mediante la disolución en agua de ciertas mezclas sales (llamadas *mezclas frigoríficas*). Por supuesto, la suma total (10) debe ser siempre positiva, de acuerdo con (8).

Hay que decir que en el actual sistema industrial, basado casi exclusivamente en la producción de energía por la quema de combustibles fósiles, la generación de entropía por disipación de energía en forma de calor es, con mucho, el sumando dominante a nivel global. En efecto, considerémos como ejemplo la quema de petróleo en un motor de combustión. Los inputs del proceso son petróleo y oxígeno atmosférico que actúa como comburente, los outputs CO_2 y otros gases de combustión, calor y trabajo útil. En dicho proceso, la diferencia de entropía entre los inputs y outputs materiales, a presión y temperatura ambiente, es mucho menor que la correspondiente a la disipación de la energía liberada en la combustión, que se vierte al ambiente en forma de calor en un porcentaje cercano al 80%. Sin embargo, si hubiésemos combinado petróleo y oxígeno en una *célula de combustible*, podríamos haber conseguido que

un porcentaje de la energía liberada en la reacción cercano al 100% se transformase en energía eléctrica, es decir en energía directamente transformable en trabajo útil, con una generación mínima de entropía por disipación de energía. En ese caso, la variación de entropía entre los flujos materiales entrante y saliente ya no sería despreciable frente a la generación de entropía por disipación de energía. Así pues, no siempre resulta posible despreciar el segundo sumando de (10) frente al primero.

Algunos autores [1] prefieren usar la *irreversibilidad* $I = T_a \Delta S_g$, en lugar de la generación de entropía, como parámetro para describir la degradación de la materia y la energía como consecuencia de los procesos industriales. Es evidente que al ser la temperatura ambiente T_a aproximadamente una constante⁷, basta con multiplicar (8) por T_a para obtener la irreversibilidad. Como expresión para I suele usarse sin embargo:

$$I = E^{in} - E^{out} \geq 0 \quad (11)$$

donde E^{in} y E^{out} son las exergías entrante y saliente respectivamente. En el Apéndice demostramos que esta expresión equivale por completo a $I = T_a \Delta S_g$, siempre que las exergías se definan adecuadamente como el trabajo útil máximo que puede extraerse de los flujos de materia y calor. Es decir, siempre que para la exergía contenida en los materiales se use la expresión (3) y para la exergía contenida en los aportes de calor la expresión, debida a Carnot, que dá el trabajo máximo extraíble de ellos:

$$E = \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) Q = \eta Q \quad (12)$$

donde Q es el aporte de calor y T la temperatura a la que es transferido⁸. En el Apéndice se muestra también que si se desprecia la variación de la entropía de los materiales (o generación de entropía por degradación de la materia), entonces debe despreciarse el sumando $-T_a S$ en la definición de la exergía contenida en los materiales, y la irreversibilidad generada es simplemente la disipación de energía (o pérdidas de energía) en forma de calor durante el proceso. De la expresión (11), se deduce finalmente que la irreversibilidad $I = T_a \Delta S_g$ generada durante un proceso industrial es igual a la pérdida de exergía o energía utilizable durante el mismo

5 Generación neta de entropía e irreversibilidad por los procesos industriales. El papel singular de las energías renovables

⁷Recuérdese que la temperatura absoluta es $T = 273 + t^0C$, siendo t^0C la temperatura en grados centígrados, de modo que las variaciones de la temperatura ambiente pueden considerarse pequeñas respecto de 273

⁸El coeficiente η definido en (12) se denomina *coeficiente de Carnot*. Obsérvese que en los flujos de calor directamente disipados al ambiente, la exergía transmitida es cero, ya que $T = T_a$

Considerémos de nuevo el ejemplo de proceso industrial de la sección anterior (desalación de agua de mar por ósmosis inversa), pero supongamos ahora que la fuente de energía motriz es renovable, por ejemplo una minicentral eléctrica solar que produce la electricidad que mueve las bombas. Si consideramos el proceso completo, incluyendo la fuente de energía, y tratamos de calcular la producción de entropía según (8), habremos de contar con los siguientes inputs: energía solar (en el porcentaje en que sea captada por la central) y agua de mar. Los outputs serán calor a temperatura ambiente (incluyendo ahora el calor disipado al ambiente por el funcionamiento de la minicentral solar), salmuera y agua potable. Supongamos que en el caso en que las bombas son movidas por una central eléctrica solar, el rendimiento energético de la central es del 15% (el 15% de la energía solar captada se transforma en electricidad y el resto se disipa al ambiente en forma de calor), lo que es un rendimiento bastante alto para la actual tecnología. Comparemos este proceso con el mismo proceso de desalación, pero movido ahora por un grupo electrógeno convencional, con un rendimiento del 30% (lo que entra dentro de lo normal con la actual tecnología). Si aplicamos ahora (8) para calcular la generación de entropía de ambos procesos completos, nos encontramos con que, al ser menor el rendimiento de la central solar que el del grupo electrógeno, se produce más calor en el primer proceso que en el segundo por kilogramo de agua potable conseguido. Es decir, el primer proceso disipa más energía que el segundo y, por tanto, la generación de entropía así como como la irreversibilidad del primer proceso será mayor que la del segundo. Intuitivamente comprendemos de inmediato que algo falla en el razonamiento que acabamos de exponer y que el impacto ambiental del proceso movido por energía solar no puede ser mayor que el del proceso movido por energía fósil, independientemente de cuales sean los rendimientos de la minicentral solar y del grupo electrógeno.

Efectivamente, la utilización de la energía solar como fuente de abastecimiento energético introduce un factor importante a tener en cuenta. Como vimos en secciones precedentes, la Biosfera emite al exterior un flujo de entropía dado por (6), independientemente del uso que se le dé al flujo de energía solar que la atraviesa. Por tanto, todo flujo de energía solar (o sus derivadas directas como la eólica, hidráulica, etc.) supone un flujo de entropía hacia el exterior de la Biosfera dado por (6), que debe ser restado de la entropía generada en el proceso industrial si queremos evaluar el aporte neto de entropía del proceso al resto de la Biosfera. Desde el punto de vista de la irreversibilidad generada por el proceso llegamos a idéntica conclusión: la irreversibilidad neta debería medir la disminución de exergía o energía utilizable en la Biosfera; pero el uso de fuentes renovables de energía no supone merma alguna en la energía disponible en la Biosfera, de modo que las pérdidas de exergía en el flujo de energía renovable no deben ser tenidas en cuenta a la hora de calcular las pérdidas de exergía netas, es decir a la hora de calcular la irreversibilidad neta generada.

Es más, si parte del flujo de energía solar no es disipado, sino que es incorporado al flujo saliente de materiales, entonces podemos decir que habrá habido una generación neta de exergía, es decir una irreversibilidad neta negativa. Dado que $I = T_a \Delta S_g$, una irreversibilidad neta negativa supondrá un aporte neto de entropía negativo para la Biosfera, es decir el proceso industrial contribuirá a la disminución de la entropía total de la Biosfera. Digamos para concluir que ello no es sino lo que vienen haciendo las plantas verdes sobre la Biosfera desde hace millones de años.

Resumiendo, la captación de un flujo de energía renovable ΔQ_r , del tipo que sea, supone evitar la disipación directa de esa energía, con una producción de entropía dada por (6) con ΔQ_r en lugar de ΔQ_s , de modo que para evaluar la generación neta de entropía por un proceso industrial que use total o parcialmente aportes de energía renovable, hay que restar esta cantidad de la generación total de entropía dada por (8) o alguna de sus aproximaciones:

$$\left(\frac{\Delta S_g}{\Delta t}\right)^{neta} = \left(\frac{\Delta S_g}{\Delta t}\right) - \frac{\Delta Q_r}{T_a \Delta t} \quad (13)$$

Análogamente, la irreversibilidad neta generada será:

$$I^{neta} = T_a \Delta S_g^{neta} = I - \Delta Q_r \quad (14)$$

Téngase en cuenta ahora que podemos igualar la exergía contenida en el aporte de energía renovable al aporte mismo de energía ΔQ_r , dada la temperatura equivalente de 6000K del flujo de energía solar, fuente primera de todas las energías renovables, lo que hace que al aplicar la ecuación (12) para el cálculo de su exergía, esta sea aproximadamente igual al aporte de energía ΔQ_r . Por tanto, la irreversibilidad neta generada (14) sigue manteniendo el significado general de la irreversibilidad, es decir es la disminución neta de exergía o energía utilizable en la Biosfera. Destaquemos de nuevo que tanto ΔS_g^{neta} como I^{neta} pueden ser menores que cero cuando se consideran aportes de energía renovable.

Destaquemos para terminar que las expresiones (13) y (14) sólo deben aplicarse a los procesos o subprocesos industriales que incluyen la captación directa de la energía renovable, so pena de restar dos veces la misma cantidad. Por ejemplo, en caso de que tengamos una central eléctrica solar que alimente un proceso de desalación de agua de mar y hayamos decidido dividir este proceso en dos subprocesos, la cantidad ΔQ_r sólo debe restarse a la generación de irreversibilidad por el primer subproceso (la central), y no al segundo subproceso (la desalación), aunque *sepamos* que la electricidad usada en este subproceso es de origen renovable. Si lo hiciéramos estaríamos restando dos veces la misma cantidad.

6 El rendimiento de los procesos industriales. Rendimiento exergético y rendimiento entrópico

El rendimiento de los procesos industriales es una magnitud útil en el sentido de que permite optar por una u otra tecnología para alcanzar un fin predeterminado. El rendimiento suele expresarse en términos de energía, como el cociente entre la energía utilizada y el resultado obtenido. En caso de que el resultado pueda medirse también en unidades de energía resulta un número adimensional.

El uso del rendimiento energético para evaluar la *bondad* de las distintas alternativas tecnológicas en función de un objetivo dado, presenta sin embargo algunas dificultades. Así, por ejemplo, en un informe de 1972 encargado por el Gobierno Norteamericano acerca de la eficiencia de los distintos sistemas de transformación energética, se puede leer "...la mayor eficiencia se

dá en la calefacción eléctrica de edificios, con un rendimiento del 95%...⁹ Sin embargo, muchas personas saben hoy en día que la calefacción eléctrica no es, ni de lejos, la forma más eficiente de calefacción. Incluso usando la electricidad como fuente energética, existen tecnologías, como la *bomba de calor*, que permiten obtener un flujo de calor varias veces superior al flujo de energía eléctrica disponible, es decir, rendimientos energéticos varias veces superiores a la unidad¹⁰. En otro orden de cosas, el rendimiento energético de una máquina térmica (una máquina de vapor, un motor, una turbina, etc.) que opere entre una temperatura máxima T y el ambiente a temperatura T_a nunca puede ser mayor que el coeficiente de Carnot definido en (12), que es siempre menor que uno. Resulta por tanto injusto medir el rendimiento de una máquina térmica usando su rendimiento energético, dado que éste no podrá ser nunca igual a uno, ni siquiera el caso de una máquina ideal. Resulta ilustrativa de las confusiones a que puede dar lugar el uso del rendimiento energético como medida de la *bondad* de los procesos industriales, la anécdota de aquel Ministro de Industria que, en una inauguración de curso de una escuela de ingeniería, exhortaba a los alumnos y profesores a investigar y conseguir turbinas y motores de rendimiento energético igual a la unidad. Al parecer nadie había informado al Sr. Ministro de la existencia del coeficiente de Carnot.

Buena parte de los inconvenientes ligados al uso del rendimiento energético como medida de la efectividad de un proceso industrial se eliminan si, en lugar de los flujos de energía, se utilizan los flujos de exergía o energía disponible para la definición del rendimiento de los procesos industriales. El *rendimiento exergético* R_E se define como el cociente entre la exergía saliente y la exergía entrante en el proceso, lo que de acuerdo con (11) puede expresarse como:

$$R_E = \frac{E^{out}}{E^{in}} = \frac{E^{out}}{E^{out} + I} \leq 1 \quad (15)$$

El uso de R_E para medir el rendimiento de los procesos industriales tiene numerosas ventajas, la más importante de las cuales es que se hace igual a uno cuando se utiliza la mejor tecnología posible, es decir la que permite obtener el objetivo deseado sin generación de entropía (proceso reversible). Así, según la definición (15), los rendimientos exergéticos de una bomba de calor reversible (rendimiento energético igual a $1/\eta > 1$) o de una máquina térmica reversible (rendimiento energético igual a $\eta, < 1$), serán ambos iguales a la unidad, como corresponde al hecho de haberse conseguido en ambos casos el mejor comportamiento posible. El rendimiento exergético de una estufa eléctrica ya no será en cambio igual a la unidad (valor de su rendimiento energético), sino menor que uno, ya que existen tecnologías que permiten un mayor rendimiento en la obtención de calor, como la bomba de calor.

El rendimiento exergético puede también utilizarse para medir el rendimiento de procesos industriales cuyo objetivo no sea la producción de algún producto energético (calor, frío, trabajo

⁹Citado por Barry Commoner en *The Poverty of Power*, 1976

¹⁰La bomba de calor puede describirse como el inverso de las máquinas térmicas. Es decir, un input de energía directamente transformable en trabajo útil, como la electricidad, es usado para crear un flujo de calor entre el medio ambiente y el recinto que se quiere caldear. El rendimiento energético de una bomba de calor se define como el cociente entre el flujo de calor transmitido al recinto y el trabajo aportado a la bomba de calor. El rendimiento energético máximo obtenible de una bomba de calor es el inverso del coeficiente de Carnot η definido en (12) y, por tanto, mayor que uno

útil...), sino de productos materiales. Para ello basta con utilizar la expresión 3 que nos da la exergía contenida en los inputs y los outputs materiales del proceso (por supuesto, en la expresión (15) deben considerarse todos los outputs e inputs, materiales y energéticos, del proceso). El uso del rendimiento exergético para procesos en los que la exergía de los inputs y outputs materiales es significativa tiene sin embargo una dificultad, consistente en que la energía interna U de los diferentes inputs y outputs materiales está indefinida en una constante aditiva [9]. Esta indefinición hace que el cociente (15) quede indefinido, a la espera de la fijación de esa constante arbitraria. Aunque esta puede no ser, en muchos casos, una dificultad importante, para resolver el problema puede utilizarse el *rendimiento entrópico* R_S del proceso, definido como el cociente entre la entropía entrante y la saliente, lo que, teniendo en cuenta la definición de la irreversibilidad $I = T_a \Delta S_g$, puede expresarse como:

$$R_S = \frac{S^{in}}{S^{out}} = \frac{S^{in}}{S^{in} + I/T_a} \leq 1 \quad (16)$$

El rendimiento entrópico (16) es una magnitud definida sin arbitrariedad alguna, pues la entropía es una magnitud bien definida para todos los flujos materiales y energéticos, que se hace cero para todos los materiales a la temperatura del cero absoluto (o -273 grados centígrados). El rendimiento entrópico se hace igual a uno, al igual que el exergético, en el caso ideal de un proceso industrial que no genera entropía ($I = 0$). El rendimiento entrópico presenta en cambio un problema cuando los inputs de un proceso industrial se reducen a inputs de energía directamente transformable en trabajo útil ($S^{in} = 0$), como en el caso citado de la estufa eléctrica. En ese caso, de acuerdo con (16), el rendimiento entrópico es siempre igual a cero, lo que no da ninguna pista acerca del rendimiento del proceso. En mi opinión, el rendimiento exergético resulta más adecuado para los procesos que involucren fundamentalmente transformaciones de energía, y el entrópico para aquellos procesos que involucren básicamente transformaciones de materia.

En aquellos procesos que involucren captación directa de energía solar o renovable, puede ser conveniente definir los rendimientos exergético y entrópico netos, de acuerdo con la filosofía expuesta en la sección precedente. El rendimiento exergético neto se define como el cociente entre la exergía obtenida del proceso y la exergía entrante procedente de fuentes no renovables. De acuerdo con (14), el rendimiento exergético neto vendrá dado por:

$$R_E^{neto} = \frac{E^{out}}{E^{in} - \Delta Q_r} = \frac{E^{out}}{E^{out} + I^{meta}} \quad (17)$$

que podrá ser ahora mayor que la unidad si ΔQ_r es distinto de cero (ó $I^{meta} < 0$). Por su parte, el rendimiento entrópico neto vendrá dado por:

$$R_S^{neto} = \frac{S^{in}}{S^{out} - \Delta Q_r/T_a} = \frac{S^{in}}{S^{in} + I^{meta}/T_a} \quad (18)$$

que igualmente puede ser mayor que la unidad. Estos valores menores que uno de los rendimientos netos significan que, gracias al uso de fuentes renovables de energía, el resultado

del proceso no es ni una disminución de las reservas totales de exergía en la Biosfera, ni una contribución neta a su degradación entrópica.

Para mejor entender el significado de los diferentes tipos de rendimiento aquí analizados pondremos un ejemplo. Se trata de elegir entre tres tecnologías disponibles en el mercado para calentar agua con fines sanitarios (a 90 grados centígrados aproximadamente): un *termo* eléctrico convencional, un calentador de gas butano y una placa solar. Si elegimos como criterio el rendimiento energético, el *termo* eléctrico es, sin duda, el que mejor rendimiento ofrece. Si elegimos el rendimiento exergético, el vencedor será sin duda el calentador a gas (considerado como un intercambiador de calor, pues carecemos de una tecnología mejor para el aprovechamiento del gas), pero si elegimos el rendimiento exergético neto, la placa solar será sin duda la tecnología que ofrezca mejores prestaciones.

7 La relación de los procesos industriales entre sí y con el resto de la Biosfera. Generación directa e indirecta de entropía

Los procesos industriales son procesos abiertos que intercambian con el entorno y con los otros procesos industriales materia y energía. El sistema industrial es, en su globalidad, también un sistema abierto, que consume recursos naturales y genera residuos. Por tanto, a la generación directa de entropía por parte de los procesos industriales que componen en sistema industrial de la humanidad, hay que sumarle la generación indirecta de entropía, que se produce como consecuencia de la contaminación de los mecanismos naturales de autorregulación de la Biosfera por la acción del sistema industrial humano. Dichos mecanismos son, sin embargo, mucho más complejos y mucho menos conocidos que los procesos industriales, por lo que cualquier valoración en ese sentido sería aventurada. Por otra parte, desde el punto de vista metodológico, es más que dudoso que la metodología desarrollada en las secciones precedentes para el análisis de la producción global neta de entropía por los procesos industriales sea aplicable a este nuevo problema, ya que los procesos naturales presentan una complejidad que hace muy difícil su descomposición en procesos individuales estacionarios o periódicos en el tiempo.

Es posible, sin embargo, adelantar algunas conclusiones de carácter general, la más importante de las cuales es que la producción neta de entropía debida a estos efectos supera con mucho a la producción neta directa por parte del propio sistema industrial, analizada en las secciones precedentes. Consideremos para ello como ejemplo el *efecto invernadero* o calentamiento de la atmósfera terrestre como consecuencia de las emisiones de CO_2 por los procesos industriales. Es posible comparar los aumentos de temperatura predichos por los diversos modelos, que oscilan entre uno y varios grados centígrados para las próximas décadas, con el aumento de temperatura que cabría esperar como mera consecuencia directa de la contaminación térmica generada por los procesos industriales. Este último puede evaluarse a partir de la Ley de Stefan, que establece que la cantidad de energía radiada por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta $\Delta U = \sigma T^{411}$. Dado que el flujo de energía

¹¹En el caso de un cuerpo ideal que emita en todas las frecuencias σ es la constante de Stefan-Boltzmann,

vertida a la Biosfera por el sistema industrial es de aproximadamente la diezmilésima parte del flujo de energía solar y dado que la temperatura ambiente es $T_a \simeq 300K$, una simple operación muestra que para expulsar el flujo adicional de energía generado por el sistema industrial *sin cambios en la composición de la atmósfera*, el incremento de la temperatura ambiental necesario sería solo de ¡Una centésima de grado aproximadamente!. Vemos pues que los cambios de composición de la atmósfera son mucho más determinantes del incremento de la temperatura ambiental media que la emisión directa de calor a la atmósfera por los procesos industriales¹². Lo mismo cabe decir respecto de la producción neta de entropía directa e indirecta por parte del sistema industrial (la entropía es una función creciente de la temperatura para todas las sustancias), de las que sería muy superior la indirecta.

Ocurre pues que la producción neta indirecta de entropía que se produce a consecuencia de los cambios en la composición material de la Biosfera, consecuencia a su vez de la acción del sistema industrial, es posiblemente la más importante, como acabamos de ver en el análisis del efecto invernadero. Se presenta aquí una paradoja y es que, mientras que la producción directa de entropía en los procesos industriales ligada a los flujos de materia es, con frecuencia, despreciable respecto de la producción de entropía ligada a los flujos de energía, la producción indirecta de entropía debida a la interacción de estos flujos de materia (recursos y residuos) con la Biosfera, supera con mucho a todas las demás. No trataremos aquí obviamente de evaluar esta última, simplemente adelantamos la conclusión, bastante evidente a la luz de los datos disponibles, de que ésta es la contribución dominante en la degradación entrópica de la Biosfera a consecuencia de los procesos industriales. Esta conclusión, junto con la dificultad de prever las interacciones entre los contaminantes industriales de todo tipo y el resto de la Biosfera, lleva de inmediato a establecer el objetivo deseable de un sistema industrial *cerrado* en sentido termodinámico, es decir que intercambie energía pero no materia con la Biosfera. Es evidente que esta característica de *cerrado* sólo tiene sentido para el sistema global, como consecuencia del reciclado de los materiales tras su uso por los procesos industriales y los consumidores individuales, y sólo como objetivo ideal, pues nunca será posible reciclar los materiales al 100%. Sólo mediante el cierre de los ciclos de los materiales en el sistema industrial será posible minimizar el impacto de éstos en la Biosfera y con ello estar razonablemente seguros de una generación indirecta de entropía reducida.

Hay que decir que en esta tarea de alcanzar un sistema industrial lo mas *cerrado* posible, de nuevo el uso de fuentes de energía renovables juega un papel esencial, puesto que el uso de cualquier otra fuente de energía supone inevitablemente unos flujos de materiales desde y hacia la Biosfera, *esencialmente imposibles de reciclar*, ya que la energía se obtiene *precisamente* de tales flujos (por ejemplo, de los inputs petróleo más oxígeno sale energía más CO_2 , siendo imposible invertir el proceso sin recurrir a más petróleo y oxígeno a su vez, etc.). Así pues, las energías renovables no solo reducen la producción neta directa de entropía en los procesos industriales, sino que su uso es *condición necesaria*, aunque no suficiente, para el desarrollo de un sistema industrial lo más *cerrado* posible.

Las anteriores consideraciones colocan en su verdadera dimensión la metodología desarro-

de valor conocido. En el caso más general, σ dependerá de la composición del cuerpo

¹²Sin embargo, esto puede no ser cierto en el entorno inmediato de algunas grandes ciudades industriales

llada en las secciones precedentes para analizar la generación neta directa de entropía por los procesos industriales. Su análisis es importante no porque la generación neta *directa* de entropía por los procesos industriales describa adecuadamente la degradación entrópica de la Biosfera a consecuencia del sistema industrial; sino porque el análisis de la generación neta directa de entropía del sistema industrial da una idea del grado de cumplimiento del objetivo expresado de alcanzar un sistema industrial que no contribuya a la degradación entrópica de la Biosfera, o contribuya lo menos posible. Ello es así porque una baja o nula generación neta directa de entropía - lograda gracias al uso de energías renovables - es, como hemos visto, condición *necesaria* para un sistema industrial que no contribuya a la degradación entrópica de la Biosfera.

Remarquemos también el hecho de que, siendo el uso de energías renovables *condición necesaria* para lograr un sistema industrial que no contribuya, o contribuya lo menos posible, a la degradación entrópica de la Biosfera, las energías renovables deben ocupar desde el principio un lugar central y privilegiado en la metodología de análisis de la generación de entropía y el rendimiento de los procesos industriales. Esto es lo que se ha intentado hacer en el presente trabajo a partir de las magnitudes que hemos llamado *netas*.

Digamos para finalizar que el análisis entrópico y/o exergético de los procesos industriales es, obviamente, sólo una parte del análisis global de los mismos desde el punto de vista de la ecología política, que no puede sustituir a otros análisis ecológicos ni, mucho menos, sociales. Digámoslo una vez más: un buen rendimiento entrópico neto de los procesos industriales es *condición necesaria pero no suficiente* para su sostenibilidad ecológica global.

8 Apéndice

En este apéndice mostraremos cómo la descripción de los procesos industriales en términos de pérdidas de exergía y/o generación de entropía son equivalentes. Para ello vemos, en primer lugar, que la expresión (3) que define la exergía contenida en un material es idéntica a la expresión (12) que define el flujo de exergía asociado a un aporte de calor, a condición de usar como expresión de la entropía de ese flujo de calor $S = Q/T$ (ver nota 4). Usaremos pues la expresión (3) como expresión de la exergía válida en todos los casos. A continuación demostraremos que la definición (11) de la irreversibilidad es equivalente a la expresión $I = T_a \Delta S_g$.

Para ello sustituimos (3) en (11), obteniéndose

$$I = U^{in} - U^{out} - T_a S^{in} + T_a S^{out} \quad (19)$$

Ahora bien, la energía debe conservarse (primer principio de la termodinámica), lo que indica que para procesos estacionarios o periódicos, $U^{in} = U^{out}$, es decir los dos primeros sumandos se anulan. Por otra parte, dado que el proceso industrial se considera estacionario o periódico¹³, la generación de entropía durante el mismo será $\Delta S_g = S^{out} - S^{in}$, de modo que

$$I = T_a \Delta S_g \quad (20)$$

¹³Es decir, $\Delta S = 0$ en (4)

Por otra parte, si despreciamos las diferencias de entropía entre los flujos de materia entrante y saliente, ello equivale lógicamente a tomar la exergía de los materiales igual a su energía interna ($E = U$ para los materiales, pero no para los flujos de energía). No obstante, no puede despreciarse la energía interna contenida en los materiales, porque ésta puede transformarse durante el proceso en calor u otra forma de energía y viceversa, de forma que las variaciones de energía interna entre los materiales entrantes y salientes no serán en general despreciables, aunque podamos despreciar las diferencias de entropía entre ellos.

Referencias

- [1] A.Valero *La Termoeconomía ¿Una Ciencia de los Recursos Naturales?* en *Hacia una Ciencia de los Recursos Naturales* (comp.). Ed. Siglo XXI, 1993
- [2] J. Martínez Alier y K. Schlupmann *La Ecología y la Economía*. Ed. Fondo de Cultura Económica, 1991
- [3] N. Georgescu Roegen *La Ley de la Entropía y el Proceso Económico* (trad.). Ed Fundación Argentaria, 1996
- [4] J.M. Naredo *La economía en evolución*. Ed. Siglo XXI, 1987.
- [5] E. Schrodinger *¿Qué es la Vida?* (trad.). Tusquets. Ed.
- [6] R. Ayres *Metabolismo Industrial y Cambio Ambiental Mundial* en *Revista Int. de Ciencias Sociales* num.121, Sept.1989.
- [7] J. Lovelock *Las Edades de Gaia* (trad.). Tusquets Ed., 1993.
- [8] R. Marqués *Entropía Autoorganización e Hipótesis Gea* en *En los Albores de la Era Solar* (comp.). Ed. Comares (por aparecer).
- [9] I. Prigogine *Introducción a la Termodinámica de los Procesos Irreversibles* (trad.). Ed. Selecciones Científicas.
- [10] R. Margaleff *Ecología*. Ed. Planeta, 1992