

Tesis Doctoral:

**UNA REVISIÓN CRÍTICA DE LOS FACTORES
CONDICIONANTES DEL COMPORTAMIENTO
ENERGÉTICO EMPRESARIAL, PREVIO Y POSTERIOR
A LAS CRISIS DE 1.973 y 1.979-80**

VOLUMEN I

Director: Dr. D. Enric RIBAS i MIRÁNGELS
Tutor: Dr. D. Francesc TARRAGÓ i SABATÉ
Realizada por: Joaquín-Andrés MONZÓN GRAUPERA

División de Ciencias Jurídicas Económicas y Sociales.

**Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad de
Barcelona.**

Departamento de Economía y Organización de Empresas.

Septiembre de 1.992.

VOLUMEN I (PARTE PRIMERA)

3. TERMODINÁMICA Y ENTROPÍA

3.1. DEFINICION, OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TERMODINÁMICA

La Termodinámica en sentido estricto puede definirse como "la teoría de las relaciones entre el calor (energía térmica) y la energía mecánica."¹

Esta ciencia ha formalizado progresivamente algunos de los conceptos intuitivos originados en la experiencia cotidiana. Nació con el descubrimiento de la convertibilidad mutua entre calor y trabajo y del deseo de llegar a conocer la eficiencia de dicha transformación.²

En realidad la Termodinámica comprende el estudio de las transformaciones recíprocas de la energía, sean cuales sean sus formas de presentación respectivas.

De este modo, incluso se ha podido afirmar que abarca todo el conjunto de los fenómenos físicos.³ Es probable que la amplitud del campo científico atribuída a la Termodinámica se justifique porque "cada vez que un fenómeno nuevo necesitó una explicación científica, se recurrió a la invención de una nueva forma (abstracta) de energía."⁴

No obstante como "el calor y el trabajo son propiedades de transferencia, suelen ser considerados los vehículos a través de los cuales se produce la interconversión mutua de las demás formas de energía entre sí"⁵, tal como ya se analizó más arriba.

La Termodinámica se ha constituido en una de las primeras ciencias en la aplicación del concepto de sistema. Por ello, una distinción elemental desde el punto de vista formal es la que separa cualquier sistema energético de su entorno, palabra que puede asimilarse a "resto del Universo" si es necesario.

La energía que posee propiamente un sistema (es decir, su contenido energético o energía interna) es la estudiada realmente por la Termodinámica. Por el contrario, el estudio de la energía generada por la posición del sistema en un campo de fuerzas magnético, eléctrico o gravitatorio, o bien por el movimiento conjunto del sistema a través del espacio, tiende a ser eludido en los trabajos de Termodinámica.⁶

Dentro del estudio de la energía interna de los sistemas, se ha procurado diferenciar dos niveles de análisis, estudiados respectivamente por dos ramas de esta ciencia: La Termodinámica del equilibrio se ocupa de la estructura macroscópica de la materia, y la Termodinámica estadística se interesa por problemas de estructura microscópica, tales como el comportamiento de las moléculas. La citada en primer lugar es la rama clásica y principal de la Termodinámica.

Dicha rama, la Termodinámica del equilibrio, se concentró primero en el estudio de los procesos reversibles ó teóricos, llegando a lo sumo al establecimiento de relaciones cualitativas para los procesos reales ó irreversibles.⁷

Tanto el edificio como los fundamentos de la Termodinámica están contruidos sobre dos leyes naturales: La Ley de la conservación de la materia y la energía, y la Ley del crecimiento de la entropía. El desarrollo del significado e implicaciones de ambas se efectuará en próximas páginas.

Completando el panorama general, se puede compartir con COMMONER que la Termodinámica es un cuerpo de conocimientos extraño y peculiar: "Casi todas las leyes físicas fueron ideadas para explicar un proceso que realmente se da en la Naturaleza. Las leyes termodinámicas nacieron de

forma opuesta: La demostración de que el movimiento continuo no puede darse⁸, tanto el de primera especie (mover objetos sin utilizar energía), como el de segunda especie (empleo de la misma energía una y otra vez), según precisa GEORGESCU-ROEGEN.⁹

Por otra parte, LABEYRIE¹⁰ corrobora implícitamente el punto de vista de los autores mencionados, al escribir que el desconocimiento generalizado de las leyes de la Termodinámica es un problema delicado. De todas formas, en opinión de FOLEY, dicha situación se justifica si se admite comprensivamente que los conceptos termodinámicos y otros de tipo general relacionados con ella, como la entropía, son de difícil comprensión o muy esquivos intelectualmente.¹¹ Según COMMONER, esta dificultad está causada por las implicaciones y aplicaciones de las leyes soporte de la Termodinámica, contrastando este hecho con la aparente simplicidad de la enunciación de dichas leyes.¹²

Vamos a efectuar un examen de cada una de las leyes de la Termodinámica.

3.2. LA LEY DE CONSERVACION DE LA ENERGIA

Su enunciado más general afirma que la cantidad total de energía existente en el Universo, es constante. Dicho fenómeno es debido a que la energía no se crea ni se destruye; solamente se transforma de unas formas a otras. Es decir: Los cambios energéticos en el Universo son de índole cualitativa, no cuantitativa.¹³ De otro modo, podemos decir que siempre que se "produzca" una cantidad de una clase de energía, se deberá destruir la equivalente de otra u otras clases.¹⁴

Así pues, no puede haber consumo de energía en un sentido físico, sino que solamente puede admitirse su transformación y dispersión.¹⁵

La Ley de la conservación de la energía es el resultado deductivo del fracaso experimental en la consecución de una máquina de movimiento continuo.¹⁶ Ahora bien, directamente no puede demostrarse la existencia de dicha ley¹⁷ que proviene de la Mecánica clásica newtoniana, cuerpo de conocimientos que representa el mundo como un ciclo de reproducción indefinida, sin orientación temporal. "Dada la posición de un cuerpo en el espacio, su dirección y velocidad, las leyes de Newton son capaces de desvelarnos dónde ha estado y a dónde se dirige. Todas las ecuaciones de movimiento son reversibles en el tiempo."¹⁸ No es necesario distinguir entre pasado y futuro.¹⁹

La irrupción de los trabajos de EINSTEIN, padre de la Física moderna, ha modificado el ámbito de la Ley, hablándose actualmente de la

Ley de la conservación de la materia y de la energía, debido a la posibilidad de convertirlas mutuamente entre sí, al menos en la pura teoría. No obstante y precisamente por esta teoricidad, la influencia indicada no modificará nuestros análisis y conclusiones sobre el asunto.

La Ley de conservación de la energía es asumida por la Termodinámica en su primer principio. No así el segundo principio, cuya orientación es muy diferente. Estudiamos ambos a continuación.

3.3. EL PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINAMICA

JOULE observó que una magnitud dada de trabajo, independientemente de su origen, producía siempre la misma cantidad de calor. Enunció el equivalente mecánico de la caloría, que lleva su nombre.

En 1.847, VON HELMHOLTZ mostró que el fracaso en el logro del movimiento perpetuo y la equivalencia entre trabajo y calor eran aspectos parciales de una generalización más amplia: La Ley de conservación de la energía.²⁰

La equivalencia entre formas de energía no impide la conversión recíproca de unas en otras. En principio, dicha transformación debería ser total, en cualquier sentido. Sin embargo, la experiencia muestra que esto no es posible. En otras palabras, el primer principio de la Termodinámica acepta la reversibilidad de las transformaciones, pero los procesos termodinámicos tienen en la realidad un claro sentido unidireccional.

Por ejemplo: La diferencia de calidad entre el trabajo y el calor se hace notoria cuando observamos que la transformación del primero en el segundo, es mucho más fácil que en sentido inverso. Además, se obtiene un rendimiento muy superior en el primer caso²¹, tal como ya se ha visto más arriba.

Para hallar una explicación rápida y científica, debemos desplazarnos momentáneamente del estudio de la Termodinámica clásica al de la Termodinámica estadística o microscópica.

Según afirma CHANG²², es sabido que las formas de energía de alta calidad (energía cinética, energía potencial, etc.) son de tipo ordenado. Por ejemplo, la producción de energía cinética se debe al movimiento a la misma velocidad y en la misma dirección, de las moléculas que componen un cuerpo que se traslada en el espacio. Por el contrario, la energía térmica proviene del movimiento desordenado de las moléculas, fenómeno que está directamente correlacionado con la temperatura que presenta el cuerpo. Tales moléculas se mueven al azar, siendo la velocidad media igual a cero en cualquier dirección.

La experiencia muestra que la energía ordenada puede convertirse fácilmente en energía desordenada: La energía mecánica y la eléctrica se transforman en calor por el rozamiento o por el efecto JOULE, respectivamente. Las energías ordenadas se transforman entre sí también con facilidad. Por el contrario, existen límites naturales a la conversión de una energía desordenada en ordenada. Dichos límites pueden establecerse mediante la investigación teórica.

Resumiendo: El primer principio de la Termodinámica es sólo un corolario de la Ley de la conservación de la energía, que afirma las equivalencias cuantitativas de la energía. Pero no precisa el problema de las relaciones cualitativas, que es abordado por el segundo principio. Antes de estudiarlo, debemos profundizar en la base metodológica de la Termodinámica.

3.4. TRANSFORMACIONES REVERSIBLES E IRREVERSIBLES

Dentro de un sistema cerrado²³, en Termodinámica se distinguen dos tipos de transformación de la energía: Reversibles e irreversibles.

Toda transformación de un sistema termodinámico es un cambio de estado, es decir, un cambio no arbitrario en los valores de las magnitudes que definen el estado, llamadas variables de estado.²⁴ Dada la composición de un sistema, normalmente se definen tres variables en cualquier transformación termodinámica: presión, volumen y temperatura.²⁶ Son variables que están sujetas a relaciones precisas entre sí²⁶. Si se definen los valores que toman dos de ellas, la tercera queda determinada automáticamente. Estas relaciones pueden representarse con ecuaciones de estado²⁷.

Se dice que un proceso es reversible termodinámicamente cuando los cambios que tienen lugar en el proceso se invierten cuando éste se verifica en dirección opuesta²⁸.

Un camino reversible puede implicar un cambio de temperatura, presión o volumen. Sin embargo, es necesario que el proceso tenga lugar de tal manera que el sistema esté siempre en equilibrio termodinámico²⁹. Ello implica que debe verificarse de manera infinitesimalmente lenta, lo que requiere un tiempo infinito para su conclusión³⁰.

Como es lógico, los procesos de transformación reversibles sólo existen en la teoría, bajo la premisa de que son estados ideales no alcanzables que limitan el rendimiento máximo de cualquier conversión termodinámica.³¹

Un ejemplo de proceso reversible sería el de carácter isotérmico que se describe a continuación:

Supóngase la transformación de una cantidad de calor recibida o transferida, Q , en igual cantidad de trabajo W , ejecutada: por o sobre el sistema, alternativamente. Así:

$$Q = W \quad (1)$$

Teóricamente dicha igualdad no contradice el primer principio de la Termodinámica, pero concede la posibilidad de que pueda darse la conversión reversible en trabajo, W , de idéntica cantidad de calor inicial, Q . Si existiera dicha posibilidad, significaría que podría reproducirse un movimiento cíclico indefinido con una cantidad finita de energía.³²

No obstante, si se efectúa este proceso repetidas veces, queda conculcada la condición básica de la reversibilidad, consistente en que el proceso debe realizarse a una velocidad infinitamente lenta. Así pues, la conversión sucesiva del calor en trabajo y del trabajo en calor, implicaría una pérdida de trabajo (W_f) debida a la fricción y consiguientemente el trabajo útil (W_u) sería menor en dicha medida.

$$Q = W_u + W_f \quad (2)$$

W_f se disiparía en forma de calor inutilizable. Pero además, si este proceso pudiese existir en la práctica, nadie podría negar la existencia de pérdidas caloríficas en el sistema, (aparte de las meramente debidas al rozamiento) a causa de la imposibilidad de lograr un sistema cerrado. Por ello, no habrá más remedio sino conceder que una parte del calor inicial Q , -equivalente a Q_d - se pierde fuera del sistema.³³ Así:

$$Q = W_u + W_f + Q_d \quad (3)$$

Dicha pérdida significaría que la reproducción del trabajo W_u varias veces implicaría la necesidad de que el calor producido en el trabajo de rozamiento (W_f) y el calor perdido por el sistema (Q_d) fueran capturados otra vez para empezar de nuevo el ciclo al nivel inicial. O alternativamente, cada ciclo debería ser comenzado con el calor suministrado por la conversión del trabajo útil W_u del ciclo anterior. De este modo, el ciclo sería finito y la cantidad de trabajo realizado tendería a cero.³⁴

La aceptación de las ecuaciones (2) y (3) implica una idea práctica de irreversibilidad de los procesos termodinámicos, forzada por la evidencia de que no pueden darse en la realidad procesos reversibles, isotérmicos y cerrados. Estos procesos, de existir, tendrían la propiedad de efectuar el máximo trabajo posible³⁵.

Por el contrario, cualquier fuente de irreversibilidad disminuye la cantidad máxima de trabajo efectuable.

Un proceso reversible teóricamente e irreversible en la práctica, es aquél en que un cuerpo de alta temperatura entrega calor a otro de

temperatura inferior. Dicho proceso se lleva a cabo en máquinas bitérmicas, que son sistemas en los que se admiten diferencias de temperatura internas.

El traspaso de calor causado por una diferencia de potencial térmico, implica que parte de éste se transfiere como calor, pero otra parte puede transformarse en trabajo. El estado final del proceso no prejuzga cuáles han sido el ritmo y el camino seguidos, puesto que son dependientes de los valores tomados por las variables de estado. El estado final se produce cuando ambos cuerpos pertenecientes al sistema están a la misma temperatura. En este punto el sistema ya es incapaz de proveer trabajo. Un caso específico de este tipo de procesos es el ciclo de CARNOT.

3.5. EL CICLO DE CARNOT Y SUS RENDIMIENTOS TERMODINÁMICOS

El ciclo de CARNOT se basa en la existencia en el sistema de dos focos de calor y una máquina que produce trabajo en base a la diferencia de potencial calorífico de dichos focos. Puede³⁶ utilizarse como máquina térmica o como frigorífica, introduciendo cíclicamente cambios en las variables de estado. El ciclo de CARNOT utiliza dos transformaciones adiabáticas reversibles y dos de naturaleza isotérmica.³⁷

Prescindiendo del aparato conceptual y metodológico inherente al estudio del ciclo de CARNOT (que no es nuestro objeto abordar aquí) de todos modos es posible revisar las conclusiones más cercanas al campo económico.

Supóngase una máquina reversible intercalada entre un foco de calor, con una cantidad Q_1 a una temperatura T_1 y otro foco con una cantidad de calor Q_2 a una temperatura T_2 , siendo $T_1 > T_2$, temperaturas medidas en la escala KELVIN³⁸.

La consecuencia básica del pensamiento de CARNOT, consiste en que una máquina que genera trabajo ha de estar caliente en un lugar y fría en otro. Al fluir el calor del lugar caliente al frío se obtiene trabajo, en una cuantía que depende de la diferencia de temperaturas entre los dos lugares³⁹.

El rendimiento en la obtención de dicho trabajo W , denominado r_t , es equivalente a la relación⁴⁰:

$$r_t = \frac{\text{Energía recibida utilizable teóricamente como trabajo}}{\text{Energía total recibida.}} \quad (4)$$

Es decir:

$$r_t = W / Q_1 = 1 - Q_2 / Q_1 \quad (5)$$

puesto que:

$$W = Q_1 - Q_2$$

por el principio de conservación de la energía.

En el límite teórico se demuestra que:

$$Q_2 / Q_1 = T_2 / T_1 \quad (6)$$

Por ello, el rendimiento máximo obtenible teóricamente es:⁴¹

$$r_t = 1 - T_2 / T_1 \quad (7)$$

De lo que se deduce que en la máquina de CARNOT no existen los rendimientos de escala, en pura teoría, sino los derivados de la diferencia de temperaturas absolutas, cualesquiera que sean las cantidades de calor manejadas.

Si deseamos acercarnos a las condiciones reales mediante el estudio dinámico de los procesos irreversibles, se puede demostrar que el rendimiento correspondiente r_t ajustado a tales circunstancias, es menor que en el supuesto de reversibilidad. Esto es así porque las temperaturas máxima y mínima de los focos de calor, tienden a ser rápidamente menor y mayor respectivamente, lo que reduce el trabajo teórico realizable y con ello, el rendimiento térmico.

Definidos cualitativamente los límites de r_t , conviene añadir que el trabajo realizable depende del concepto denominado EXERGIA.

3. 5. 1. LA EXERGÍA

La exergía puede medirse usando la siguiente ecuación, coherente con la (7):

$$E_x = Q_1 * (1 - T_2 / T_1) = Q_1 * r_t \quad (8)$$

Es decir, la exergía puede definirse como la cantidad de calor del foco caliente potencialmente transformable en trabajo según el coeficiente de rendimiento térmico, calculado teniendo en cuenta las limitaciones expresadas.

Como es lógico, si el trabajo teórico posible, W , es igual a la diferencia de cantidades de calor entre los 2 focos:

$$W = Q_1 - Q_2 ;$$

Se tendrá la siguiente desigualdad, despejado en la ecuación de rendimiento:

$$E_x < W \quad (9)$$

A su vez, convendrá conocer de qué variables depende el valor de la exergía: La exergía depende de dos variables nuevas: La entalpía y la entropía.

La exergía varía directamente con grado de entalpía.

3. 5. 2. EXERGÍA Y ENTALPÍA

La ENTALPÍA se define como el grado de calidad de la conversión de las calorías en trabajo.

Como se desprende de las ecuaciones anteriores, a mayor temperatura de la caloría, mayor aptitud presenta ésta para generar trabajo⁴².

Pero en situaciones prácticas, dicha calidad no está relacionada en forma efectiva con la temperatura del foco caliente, sino con la temperatura que es posible transmitir a la entrada de la máquina térmica, temperatura que resulta ser siempre bastante inferior.

De ordinario la transmisión se realiza mediante un fluido caloportador, normalmente vapor de agua. Es a la presión y la temperatura del fluido como variables de estado a las que se asocia el concepto de entalpía, condicionante de la exergía en sentido directo: A mayor entalpía, ceteris páribus, mayor exergía. Debe recordarse que antes se ha concluido que a mayor exergía, mayor cantidad de trabajo podrá realizarse potencialmente; y la exergía depende de la temperatura del foco caliente y del rendimiento térmico de la máquina, que varía directamente con la diferencia de temperaturas de los focos caliente y frío.

Prescindiendo de la variable presión, se puede poner un ejemplo según el cual el foco caliente es una caldera, en el seno de la cual se logra una temperatura de 1.500 grados centígrados. Puede considerarse que el foco frío es la temperatura ambiente (25° C, por ejemplo). De utilizarse totalmente a aquella temperatura el calor producido en la combustión, el

rendimiento térmico sería, sabiendo que T viene expresado en grados KELVIN (Grados centígrados + 273)⁴³:

$$r_t = 1 - T_2 / T_1 = 1 - (25 + 273) / (1.500 + 273) = 83\%$$

Agotando el valor explicativo de este ejemplo, se puede establecer la relación entre varios pares de valores de la temperatura del foco caliente y el rendimiento térmico, a temperatura constante del foco frío:

Por ejemplo, si el fluido de trabajo (vapor de agua) alcanza 200 grados centígrados en su entrada en la máquina térmica (turbina), el rendimiento es 37%.

Si la temperatura del foco caliente crece un 100% (400° C), el rendimiento térmico sólo llega al 56%, lo que significa un crecimiento del rendimiento del 51%; la elasticidad del rendimiento es algo superior a 0,5..

Si la temperatura del foco caliente vuelve a duplicarse (hasta 800° C) el rendimiento térmico sólo llega al 72%, lo que significa un crecimiento de rendimiento del 29%, es decir, la elasticidad ya ha descendido por debajo del 30%.

La elasticidad del rendimiento con relación a la temperatura del foco caliente nunca alcanza la unidad, pero conforme se va calentando el foco caliente, la elasticidad del rendimiento disminuye porque éste crece menos que proporcionalmente que la temperatura.

Es decir: No solamente es muy problemático el logro técnico de mayores temperaturas de trabajo por la restricción que impone la capacidad de resistencia de las aleaciones explicada en el apartado 2.3.2.2., sino que estos dificultosos incrementos de temperatura proporcionan un incremento

proporcionalmente mucho más pobre del rendimiento teórico de las máquinas térmicas.

Ceteris paribus la temperatura del foco frío, la causa principal de que el rendimiento térmico teórico crezca de forma menos que proporcional al crecimiento de la temperatura en grados centígrados del foco caliente, estriba en la presencia de la constante 273 en el cociente T_2 / T_1 , tanto en el numerador como en el denominador.

3. 5. 3. EXERGÍA Y ENTROPÍA

La exergía depende en forma inversa de la entropía.

La ENTROPÍA crece con el grado de irreversibilidad del proceso⁴⁴.

Modernamente, este término tiene una significación mucho más amplia que la estrictamente tecnológica o de ingeniería, que es la tratada aquí.

Desde este punto de vista tradicional, se acepta el cálculo de CLAUSIUS y PLANCK, según el cual la entropía es la derivada del calor con relación a su temperatura⁴⁵.

Existe una ratio que polariza la atención y los esfuerzos de los expertos en Termodinámica aplicada:

$$C_c = r_t \text{ real} / r_t \text{ teórico} \quad (9)$$

C_c es el coeficiente de calidad de la máquina térmica, y puede oscilar entre cero y la unidad, valor este último que los ingenieros persiguen desde hace décadas como ideal inalcanzable.

Los procedimientos para lograr la mejora del coeficiente de calidad C_c , es decir, para obtener la mejora de los rendimientos térmicos de conversión del calor en trabajo (y por tanto ahuyentar al "espectro de CARNOT" como escriben irónicamente SNYDER y CHILTON)⁴⁸, pueden resumirse en tres:

- I. Evitar el uso de las máquinas térmicas (calderas, turbinas, motores, etc).
- II. Si no se han podido evitar, operar con máquinas térmicas con una T_1 mayor y una T_2 menor. (Y, añadimos nosotros, con una temperatura de trabajo superior en la propia máquina).
- III. Encontrar usos económicos para el calor de baja calidad Q_2 a temperatura T_2 , procedente del foco frío de la máquina térmica.

Estas soluciones y otras que puedan existir, son de difícil puesta a punto, ya que representan desafíos tecnológicos y económicos de gran magnitud, dado el acervo de conocimientos acumulados existente y también -por qué no decirlo- la inercia de la Sociedad que se acostumbra en seguida a prestaciones cómodas pero no ahorradoras de energía.

Se puede concluir que la ciencia de la Termodinámica tiene criterios y métodos establecidos para medir la calidad de la energía y procurar la maximización de los rendimientos térmicos⁴⁷.

Se ha dicho antes que existen varias acepciones de entropía y sólo se ha usado la tradicional. Ahora hay que introducirse en el estudio del crucial segundo Principio de la Termodinámica, que requiere una visión de la entropía mucho más general y abstracta, que tiene incluso una trascendencia interdisciplinaria.

3.6. EL SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Por más que se desprende del trabajo precursor de CARNOT⁴⁸, el segundo principio de la Termodinámica está asociado a los trabajos de CLAUSIUS y Lord KELVIN, quienes lo enunciaron por separado en 1.850 y 1.851, respectivamente⁴⁹.

El segundo principio reviste una gran importancia práctica y tiene un buen muestrario de variantes expositivas en su definición. Todas ellas tienen como rasgo común la propiedad de describir hechos que no son difíciles de observar cada día como realidades concretas. A continuación se exponen algunas:

"El calor no pasa nunca espontáneamente de un cuerpo frío a otro caliente."⁶⁰

Un complemento a explicitar es la afirmación inversa a la proposición anterior:

"El calor fluye siempre espontáneamente del cuerpo más caliente al más frío".⁶¹

"Ningún dispositivo físico real puede transformar íntegramente la energía térmica en trabajo. Siempre se pierde trabajo."⁶²

"El movimiento perpetuo de segunda especie es imposible ya que implicaría la transformación total del calor en trabajo y viceversa".⁶³

"La energía que se presenta como calor almacenado en un sólo depósito, no puede ser utilizada para efectuar un trabajo." Como ejemplo el autor cita el calor del agua del mar, con relación al cero absoluto, y la imposibilidad para ser utilizado por los barcos que lo navegan.⁶⁴

"Es imposible convertir completamente una cantidad dada de calor en trabajo. En un proceso macroscópico que implique conversión de energía, se degrada la calidad de una parte de la energía por lo que se pierde su posibilidad de conversión en trabajo."⁶⁵

El segundo principio de la Termodinámica corrige la simplicidad del primero, introduciendo la calidad o el valor de las energías.

El estudio técnico de esta cuestión ya ha sido efectuado en el subcapítulo anterior. Dos calorías, una a 100° C de temperatura y otra a 20° C son equivalentes según el primer principio de la Termodinámica, pero no lo son en el seno de lo afirmado por el 2° principio, que tiene en cuenta la "calidad" de la energía. Es precisamente el grado de calidad el que confiere mayor o menor valor económico a la energía.⁶⁶

Estos enunciados del segundo principio conectan con la problemática estudiada en el subcapítulo anterior y podemos considerarlos como generalizaciones de experiencias concretas ensayables una y otra vez en el laboratorio y verificables directamente en la práctica.

Hay otras formulaciones cuyo objetivo ya es totalizador e incluso teleológico: Pretenden buscar consecuencias globales de los hechos verificados que han servido de base a los enunciados anteriores.

Un razonamiento de enlace sería el siguiente: Mientras el primer principio de la Termodinámica ofrece un sentido de estabilidad, el segundo principio da una idea de evolución. Es la expresión de la irreversibilidad de los procesos que suceden efectivamente en el Universo.⁶⁷

Al usar energía, ésta se disipa en forma de calor, que es irrecuperable para nuevos usos en caso de expelerse a baja temperatura.

Así pues, mientras el montante total de energía del Universo es constante, el total de energía potencialmente utilizable para nuevos usos tiende a decrecer. El uso de energía aumenta el nivel de entropía del Universo, tal como habrá ocasión de estudiar en el subcapítulo siguiente. Este concepto de entropía está relacionado -entre otras cuestiones- con el nivel de desorden cósmico.⁵⁸

Como resumen, cabe afirmar que el significado crucial de la segunda ley de la Termodinámica, consiste en que el Universo está haciéndose irremisiblemente menos ordenado de lo que fue⁵⁹;

Los expertos en Termodinámica estadística proporcionan evidencia de carácter microscópico o de laboratorio, cuando afirman que el calor (energía degradada) mantiene en desorden las moléculas del cuerpo al que se asocia, tal como se ha escrito anteriormente.

En realidad, los procesos reales de la Naturaleza son espontáneos e irreversibles porque siguen una dirección de cambio bien definida: La "flecha del tiempo" expuesta por EDDINGTON⁶⁰.

Para invertir el curso normal de los acontecimientos, es decir, para contrariar el concepto del autor citado, es preciso realizar un trabajo contra o sobre el sistema afectado, lo que supone un gasto de energía.

Un ejemplo descrito por COMMONER permite entender mejor lo expresado⁶¹:

La energía cinética provocada con la caída del agua por las cataratas del río Niágara, se degrada en forma de calor por una cantidad equivalente a dicha energía. Esta degradación se traduce en un incremento de temperatura de 0,125°C del agua después de haber caído, con relación a la temperatura antes del salto. Si bien la equivalencia energética entre la energía cinética y la subsecuente energía calorífica es perfecta, deviene

imposible restituir el agua a su posición inicial "pre-caída", pretendiendo emplear como instrumento energético el calor responsable del aumento de temperatura de la masa de agua.

En caso de intentar el experimento con una forma de energía de calidad superior, la evidencia continuaría siendo incontestable: Tampoco sería posible efectuar la operación mencionada, haciendo que la fuerza lograda por una hipotética turbina hidráulica, (energía mecánica en lugar de térmica) que funcionara en el salto de agua, se aplicase a la reascensión total del agua hasta la posición inicial de precaída.

En el caso de que ambos eventos fuesen posibles al cien por cien (conversión de energía cinética en a) energía térmica o b) energía mecánica, con posibilidad de restituir un proceso natural a una situación primitiva con dicha energía), entonces -y sólo entonces- el tiempo no sería unidireccional, sino reversible.

En la realidad, como se ha indicado anteriormente, la única forma de lograr la operación comentada consistiría en gastar una cantidad adicional de energía, exterior al sistema. A su vez esta energía pasaría del estado de energía "disponible" al "no disponible", en la misma forma que el incremento de temperatura en $0,125^{\circ}\text{C}$ mide un incremento de energía no disponible.

El sistema global formado por el subsistema "catarata" y el subsistema "fuente energética exterior" habría degradado parte de su energía en la operación.

Convendría profundizar en el concepto que acabamos de exponer. Si consideramos el mayor sistema posible como marco o entorno de nuestra existencia (el Universo como tal, con preferencia al sistema Solar o la Tierra, que son meros subsistemas del Universo) se puede establecer una distinción antropomórfica -y por tanto subjetiva- entre la energía libre ó disponible y la energía no disponible. A efectos prácticos, la línea que separa ambos tipos de energía es la cualidad de ser útiles o inútiles para la satisfacción de las necesidades del hombre, respectivamente.

Obviamente el grado de utilidad y la porción de energía que puede considerarse útil puede depender de complejos factores sociales, económicos y tecnológicos⁸² que marcan cada peldaño de la civilización.

Centrando y concretando más el análisis en una perspectiva dinámica y de futuro, es necesario distinguir varias subcategorías dentro de la energía que actualmente resulta no disponible ó está disponible con muchos condicionantes:

I. Energía degradada.

Es equivalente a la cantidad de energía ya usada por el hombre, que es imposible de utilizar de nuevo como consecuencia del segundo principio de la Termodinámica. Tal energía es llamada difusa (CARNOT) o disipada.

II. Energía útil no disponible.

No disponible hoy y tampoco, presumiblemente, en el futuro. Por ejemplo, la inmensa cantidad de energía contenida fuera del sistema solar.

III. Energía del sistema solar no disponible hoy, por razones tecnológicas.

Su período de maduración de investigación científica y puesta a punto comercial es pronosticado muchas veces irreflexivamente cayendo en el defecto del determinismo tecnológico: Por ejemplo, la energía de fusión o la energía solar concentrada en grandes cantidades.

IV. Energía disponible, pero cuestionada por razones económicas o ecológicas.

Ejemplos del primer tipo son:

La energía solar, la maremotriz, la eólica, la geotérmica, la explotación de los esquistos bituminosos etc.

Ejemplos del segundo tipo son: energía nuclear de fisión, carbón con exceso de sustancias contaminantes etc..

La energía nuclear de fisión se ha incluido en el apartado de energía disponible con muchos condicionantes, debido a la gran diferencia de potencial que existe entre la posibilidad de explotación intensiva de los recursos radiactivos y la posibilidad real, muy inferior, por presiones de los grupos ecologistas y por el temor de la población, reverdecido tras los accidentes ya mencionados en el capítulo anterior.

Abandonemos la atención sobre las energías de los tipos a) y b), por su reconocida irrecuperabilidad e indisponibilidad, respectivamente, después de constatar que la energía de tipo a) tiende a crecer continuamente en la Tierra, por conversión de los stocks de energía disponible en no disponible.

Llegados a este punto sería fácil alegar que la conversión en plenamente disponibles de las energías hoy situadas en las categorías c) y d), ahuyentará el fantasma de la escasez de energía.

Esto podría ser cierto si a partir de ahora cesa el cumplimiento de las tendencias históricas. Dichas tendencias arrojan el siguiente resultado: El rendimiento en la conversión de energías, de "no disponibles" a "disponibles" es decreciente en sentido energético. En otras palabras:

Existe una tendencia creciente en la cantidad de energía disponible que se necesita utilizar para poner al alcance del hombre una unidad de energía anteriormente no disponible.

Este fenómeno acrecienta el stock de energía definitivamente no disponible (que es el total de energía degradada en nuestro entorno dominable) y dicha utilización desviada constituye un lastre que disminuye el porcentaje de la energía disponible que puede utilizarse para usos finales.

El destino teórico de esta evolución -si no aparecen factores externos que la perturben, retarden o anulen-, es que tal proceso de degradación y pérdida de rendimiento energético seguirá en teoría hasta que la producción y uso de una unidad marginal de energía no disponible, requiera para lograr su conversión a disponibilidad, más de una unidad de energía previamente ya disponible⁶³.

Una cuestión crucial, que debería tratar de preverse científicamente, consistiría en conocer las tendencias de rendimiento energético neto y el calendario previsible en el que la humanidad atravesaría el umbral del rendimiento energético negativo. Dicho momento estaría relacionado estrechamente con la decadencia y extinción de la Humanidad.

La importante conclusión que se extrae de estos razonamientos es que en el entorno dominable -y en general en el Universo- no existe un "ciclo de la energía" reproducible perpetuamente, sino una corriente de energía disponible con una sola dirección⁶⁴, cuyo destino final es la muerte térmica.

Esta es la conclusión más importante que puede extraerse del estudio del segundo principio de la Termodinámica, realizado durante más de cien años por los pensadores y científicos de mayor visión a largo plazo y cuyo campo de estudios ha abarcado un horizonte más amplio que el meramente ligado a los avances técnico-económicos de cada momento asociadas estas dos condiciones a una tercera: Interés personal en los problemas de supervivencia de la Humanidad.

Ahora deseamos formalizar este proceso de degradación en el concepto de alto nivel de abstracción que simboliza la medida de la energía no disponible en un sistema termodinámico cualquiera: La entropía.⁶⁶

3.7. LA ENTROPÍA, UN CONCEPTO INTERDISCIPLINAR

El término "entropía" fue acuñado por CLAUSIUS⁶⁶. Corresponde a una palabra griega que significa "transformación", "evolución". Su propio significado etimológico le confiere un ámbito de validez muy amplio en multitud de disciplinas científicas.

Centrándonos en el tema de nuestro trabajo hay que decir que la palabra entropía está ligada estrechamente al segundo principio de la Termodinámica, como ya se ha apuntado en otros lugares de este subcapítulo. Así como el primer principio de la Termodinámica es un corolario de la ley de la conservación de la materia y la energía, el segundo principio de la Termodinámica es un caso particular de la llamada ley de la entropía. Tal ley enuncia el crecimiento continuo e irrevocable de la entropía de un sistema cerrado hasta que su energía interna (constante, por definición) se convierte totalmente en no disponible.

Una definición que relaciona más estrechamente la ley de la entropía con el segundo principio de la Termodinámica, puede ser la del propio CLAUSIUS, interpretada por FOLEY como sigue⁶⁷: "La entropía es la medida de la indisponibilidad de la energía térmica para ser transformada en trabajo mecánico".

De todas formas, el significado y alcance del concepto entropía es mucho más amplio que el abarcado por la ciencia Termodinámica. La entropía afecta a la materia, además de la energía. Por otra parte, afecta a los

seres vivos y por ello al estudio de la Biología. La entropía está relacionada con ramas concretas del saber abstracto, como la teoría de la probabilidad y la teoría de la información.

De este modo, la entropía y el estudio de sus leyes conforman un campo de conocimiento interdisciplinar.

Es probable que la profundización en el estudio de las leyes entrópicas provoque la aparición de nuevos paradigmas⁶⁸ con relación a los manejados por la Ciencia denominada convencional. Se supone que el estudio de tales leyes será el elemento fundamental que permitirá desligar a muchas ciencias naturales y sociales de la epistemología mecanicista tradicional.

El poder explicativo y la validez de la entropía como concepto, residen en la demostración y aceptación del aserto que indica que el Universo está desordenándose paulatinamente⁶⁹. Ya se ha indicado anteriormente que esta afirmación está fundamentando el segundo principio de la Termodinámica.

La energía disponible o libre, tiene una estructura microscópica interna esencialmente ordenada. En un sentido termodinámico, el orden molecular es una medida del grado en que las propiedades generales de un sistema físico dictan la selección de una particular disposición interna de sus componentes⁷⁰. La energía degradada es desordenada y ha perdido esta propiedad.

Una entropía nula señalaría una situación de máximo orden, y en un plano físico se correlacionaría con la temperatura cero absoluto o cero grados KELVIN (-273°C), tal como señala la denominada Ley de ERNST denominada por algunos, el tercer principio de la Termodinámica⁷¹.

En general, puede identificarse una situación de orden termodinámico como de entropía baja y una situación desordenada como de alta entropía.

El estado final del Universo está predestinado a ser absolutamente desordenado⁷². Este fenómeno se producirá en una situación termodinámica de equilibrio real, que a su vez proporcionará la máxima entropía cuando las temperaturas de las diversas moléculas del espacio sean idénticas debido a las cesiones de calor de los cuerpos calientes a los fríos. No es importante discutir aquí si el estado final de equilibrio será el de "muerte térmica"⁷³ o el de "caos absoluto"⁷⁴. Ambos llevan a la misma conclusión.

Quizá ninguna otra ley ocupe una posición singular en la Ciencia como lo hace la ley de la entropía. Es la única ley natural que reconoce la sujeción del mundo material a un cambio cualitativo irreversible, a través de un proceso evolutivo⁷⁵, según recalca GEORGESCU-ROEGEN, quien también observa que la ley de la entropía, a diferencia de otras leyes naturales, deja fuertemente indeterminada la velocidad de degradación del Universo y por ello el estado de sus estructuras futuras⁷⁶.

Sólo se conoce que la entropía del Universo -o de cualquier subsistema cerrado- crece constantemente y llega a un máximo una vez alcanzado el estado de equilibrio⁷⁷. Si el subsistema estudiado es abierto al entorno, puede procurar la mejora de sus reservas de baja entropía si -y sólo si- la capta del medio ambiente, es decir, del exterior del subsistema⁷⁸.

Desde un punto de vista estrictamente energético podemos efectuar la distinción teórica ya conocida entre sistemas reversibles e irreversibles. En los primeros, la ganancia de entropía al efectuar una actividad, sobre el papel se compensa exactamente con la pérdida de baja entropía. Por tanto, en una situación ideal con sistemas reversibles, la entropía del sistema mayor (el subsistema abierto más el entorno) se mantendría constante⁷⁹.

De acuerdo con la definición de CLAUSIUS-PLANCK comentada anteriormente, desde un punto de vista macroscópico la entropía es una propiedad de estado, analizable sólo en términos relativos mediante análisis

diferencial. Si S es la notación del nivel de entropía, en un sistema reversible se tendrá la siguiente expresión⁹⁰:

$$dS = dQ / T = 0 \quad (10)$$

En los sistemas con procesos irreversibles, que son los que existen realmente en la Naturaleza, la captación de baja entropía por el sistema es a costa de la producción de una cantidad más que proporcional de entropía en el entorno, de tal forma que aumenta la entropía del conjunto del sistema. Analíticamente⁹¹:

$$dS = dQ / T > 0 \quad (11)$$

Lo mismo ocurre en un sistema irreversible cerrado. La entropía del sistema crece, aunque no interaccione con la entropía del entorno⁹².

Actualmente existe una fuerte polémica sobre si existen sistemas y procesos que escapen a la ley de la entropía, y que por ello puedan producir "neguentropía". Por ejemplo, hay quienes creen que el proceso de la vida es neguentrópico⁹³ y los hay que afirman que es entrópico⁹⁴. Lo que nadie discute es que la supuesta neguentropía del proceso vital, genera entropía en el resto del Universo, Esta afirmación no se contradice con las conclusiones anteriores⁹⁵. Por otra parte, precisamente la indeterminación entrópica es la responsable de que exista la vida, plasmada en las múltiples formas biológicas conocidas⁹⁶ o por conocer.

Siguiendo con el estudio de las múltiples facetas del concepto de entropía, podemos observar su relación con la teoría de la probabilidad.

Según COMMONER, la concepción de tendencia a la máxima probabilidad está relacionada con el significado de las palabras "orden" y "desorden".

Un sistema ordenado tiene una particular disposición de sus componentes, que le confiere una muy baja probabilidad de ocurrencia. Por ello, los sistemas y procesos ordenados son valiosos puesto que de ellos puede obtenerse una utilidad derivada de su baja entropía. Su escasa probabilidad de ocurrencia produce escasez y por tanto, valor.

A medida que transcurre el tiempo, en el Universo se pasa de un estado general ordenado y poco probable, a un estado desordenado y de máxima probabilidad, que acontecerá cuando haya sido disipada toda la energía disponible. La probabilidad de dicho estado es igual a la unidad, aunque no se pueda conocer cuando ocurrirá.

Así pues, otra forma de enlazar la segunda ley de la Termodinámica con la teoría de la información es: "Todo sistema que evolucione continuamente, en general cambiará para tender a una condición de máxima probabilidad."⁸⁷

También puede afirmarse con el profesor NIETO DE ALBA⁸⁸, que todo proceso en el que entra el azar donde antes estaba excluido, es un proceso de entropía creciente.

Circunscribiendo otra vez el concepto de entropía al campo termodinámico estricto, se descubrirán enfoques diferentes según se conduzca el razonamiento, bien a partir de la metodología de la Termodinámica del equilibrio o desde la correspondiente a la Termodinámica estadística.

Como ha quedado indicado anteriormente, la primera disciplina trabaja con macroestados, que son los elementos definidores globales de la propiedad de un sistema. El macroestado más significativo de un sistema termodinámico es su temperatura, T . La medida de ésta, cuantifica la energía media del conjunto de moléculas del sistema termodinámico considerado.

Pero a ese macroestado, que es un valor medio, le corresponden múltiples microestados moleculares en continuo cambio y transición, a pesar de la aparente estabilidad del valor medio que define el macroestado. Tales microestados termodinámicos son del máximo interés para la Termodinámica estadística.

El número de los distintos microestados que corresponden a un macroestado dado (por ejemplo, la temperatura T), es conocido como la probabilidad termodinámica⁹⁹.

Si un cuerpo tiene todas sus moléculas moviéndose a la misma velocidad y en la misma dirección que el propio cuerpo, y además todas las partes de éste exhiben idéntica temperatura, se dice que pertenece a un macroestado con un sólo microestado (el indicado).

Este estado de máximo orden interno molecular tiene una probabilidad termodinámica mínima. Y viceversa: Una probabilidad termodinámica alta corresponde a un gran desorden, lo que arroja muy poca información sobre la estructura de los movimientos internos, ya que existe mucho mayor número de alternativas o variantes.

El logaritmo de la probabilidad termodinámica es la entropía, cuyo valor está relacionado inversamente con la cantidad de información. A mayor entropía mayor caos molecular y por tanto, menor información.

Así pues, la entropía es la medida de nuestra ignorancia en el conocimiento de la estructura molecular. Por ello, se identifica la cantidad de información con la cantidad de neguentropía. No es raro por tanto, que un proceso neguentrópico que aparentemente contradice a la segunda ley de la Termodinámica, como es la vida, revista formas aisladas y temporales de organización basadas en códigos informacionales como el DNA y las encimas, que son causa y consecuencia a la vez de neguentropía. Pero hay que repetir que la entropía global descendente es imposible, a pesar de los procesos vitales existentes.

La tensión entre los postulados de la Termodinámica de equilibrio y la Termodinámica estadística estriba en los periódicos intentos realizados por parte de los cultivadores de la segunda, conducentes a demostrar que es posible una reversibilidad en el crecimiento constante de la entropía del Universo, basada al principio en la ley de probabilidad y la paradoja de MAXWELL y más tarde en la propia teoría de la información, e incluso desde el campo de la Economía Política⁹⁰.

Tal postura ha sido calificada por sus detractores como "contrabando de entropía"⁹¹. En la actualidad se acepta que sus postulados están basados en proposiciones muy teóricas, sin probabilidad significativa de ocurrencia.

Aunque pueden haber dudas fundadas sobre la identidad de resultados cuantitativos de la medida de entropía según la Termodinámica del equilibrio y la Termodinámica estadística, lo que sí es cierto es que cualitativa y conceptualmente son perfectamente coherentes.

Se conoce que la entropía aumenta con la temperatura de un sistema, puesto que el concepto entrópico está vinculado a la medida directa de la irreversibilidad práctica de un proceso termodinámico. El calor irradiado crece con la temperatura y es conocido que el calor es irrecuperable para nuevos usos energéticos de calidad.

Por otra parte, desde el punto de vista de la Termodinámica estadística, la entropía crece con la probabilidad termodinámica y ésta aumenta a su vez con la temperatura, propiedad de macroestado que genera la propiedad microestatal de desorden molecular.

Así pues, los dos conceptos termodinámicos de entropía son armónicos en cuanto a sus tendencias, y a pesar de los casos particulares expuestos por la Termodinámica estadística existe un acuerdo básico en las siguientes afirmaciones que se pueden exponer como resumen de este subcapítulo:

1. Existe una cantidad limitada de baja entropía en el Universo, y en particular en nuestro entorno accesible que actualmente consiste únicamente en una pequeña parte del sistema solar.

2. La baja entropía es una medida de máximo orden en Termodinámica; es una medida de poca probabilidad en la teoría de la probabilidad; y de alta información en la teoría de la información. Las tres situaciones están muy relacionadas por la condición de constituir recursos escasos y por tanto, social y económicamente valiosos.

3. En la medida que las reservas de entropía -limitadas según 1.- se consumen, se genera alta entropía, decreciendo la posibilidad de efectuar un trabajo y de mantener y procesar información.

4. La generación de procesos "neguentrópicos" como la vida y la producción de información -pudiendo asimilar esta última al progreso científico y tecnológico- sólo lo es aparentemente, puesto que dichos procesos crean una cantidad de baja entropía que es inferior al nivel de alta entropía que expulsan al entorno.

5. Por ello, la ley de la entropía es de validez general mientras no se demuestre lo contrario en base a constataciones que de momento están fuera del alcance humano, tanto espacial como temporalmente.

3.8. REFLEXIONES FINALES

De los argumentos y evidencias científicas estudiados en este capítulo, se pueden extraer las siguientes consecuencias y emitir las siguientes opiniones:

1. La ley de la conservación de la energía y con ella el primer principio de la Termodinámica e incluso el segundo principio, prácticamente se han constituido en axiomas no discutidos ni en el seno de las ciencias naturales -por ser un paradigma actual en dichas ciencias-; ni en el de las ciencias sociales -por ser tácitamente admitidos como algo remoto que no afecta a su campo de investigación-. Tales leyes y principios proceden de la Mecánica clásica. Son paradigmas de la Ciencia, hemos dicho, a pesar de las matizaciones introducidas por la teoría de la relatividad de EINSTEIN.

2. En cambio, la ley de la entropía como ámbito científico de mucha mayor generalidad que el segundo principio de la Termodinámica (al que abarca), si bien es un paradigma científico en el sector de las ciencias naturales, constituye un concepto sensible cuya discusión, aceptación y aplicación para extraer consecuencias está mucho menos avanzado en las ciencias sociales. Como ejemplo característico podemos citar en el campo económico y tecnológico, el ritmo de uso y consumo irreversible de los recursos energéticos disponibles de mayor calidad.

3. Parece que en general las ciencias sociales y en particular la Economía convencional, no han tenido en cuenta la ley de la entropía, no ya

en sus elaboraciones teóricas -cuestión que se analizará en el capítulo siguiente-, sino en la actuación práctica de los individuos que toman decisiones que influyen en el ritmo y clases de uso de la energía y por extensión, de los recursos naturales no renovables. Cualquier físico puede afirmar que el nivel de entropía está creciendo continuamente. También es cierto que físicos y tecnólogos conformes con la ortodoxia del comportamiento humano real dirán que este incremento entrópico es pequeño con relación a la baja entropía de los recursos aún disponibles. Pero toda relación en la que el numerador (recursos al alcance) está menguando continuamente y el denominador -recursos no disponibles- está creciendo continuamente también, tiene una tendencia exponencial a la disminución con un límite que tiende a cero. Y cero significa la extinción de la Humanidad.

4. Entremezclados con los anteriores, están los problemas de contaminación y deterioro del medio ambiente. Es sabido que la corrección de estas disfunciones atentatorias contra la supervivencia humana, requiere y requerirá cantidades crecientes de energía que no se usan ni se usarán productivamente, sino que se gastan y gastarán con la esperanza de restituir un "statu-quo" ecológico que nunca debió deteriorarse. Aunque económicamente forman parte del Producto Mundial Bruto, tales despilfarros de energía anti-polución no deberían contabilizarse como tal.

5. Es lógico creer que si la baja entropía es el recurso humano -en abstracto- más valioso en el plano físico, y puesto que la ciencia económica se ocupa de los recursos escasos y de las combinaciones óptimas entre recursos alternativos para satisfacer las necesidades sociales, la economía debería disponer de un tratamiento satisfactorio del fenómeno de la entropía. Siguiendo este proceso de razonamiento, posiblemente cabría llegar a la conclusión de que la ciencia económica debería haber orientado correctamente las opciones seculares de política económica general y de política energética en particular, otorgando más importancia al fenómeno entrópico.

6. Si la ciencia económica hasta ahora no ha efectuado dicha tarea, es dable pensar que han existido razones muy poderosas que explican

este apartamiento o ignorancia de los principios de la Física. La Ciencia en general avanza mediante la especialización en ramas cada vez más profundas y ramificadas, pero de tanto en tanto han de surgir enfoques integrales que confronten y aglutinen las materias especializadas con el fin de lograr un mutuo pulimento y mayor adecuación a la realidad que intentan explicar y predecir, dejando el microscopio y usando atinadamente el telescopio, para expresarnos con términos gráficos. Los puntos de sutura y acuerdo entre Física, Biología y Ecología por un lado y Economía por otro, no han sido excesivamente brillantes en el pasado.

En el próximo capítulo, se analizará el tratamiento histórico de los recursos no renovables en la ciencia económica y en el quinto, se intentará abordar un panorama actual del tratamiento que, tanto la economía como otras ciencias y saberes, otorgan a la problemática de los recursos naturales y el medio ambiente.

NOTAS DEL CAPITULO 3

- 1 HELLMAN, H: *Energía en el mundo del futuro*. Ediciones Tres Tiempos. Buenos Aires. 1.973, pg. 31. Nota 4.
- 2 AGUIRRE, F.: *Termodinámica del equilibrio*. Ed. Interamericana. México. 1ª Ed. 1.971. Pg. 14; También:
LAFITA, F.: *El ahorro energético*. En: Revista "DYNA" Vol. LVI. Nº 12. Diciembre 1.981. Pg. 19.
- 3 LUCINI, M.: *Termodinámica aplicada*. Ed. Labor. Barcelona. 3ª ed. revisada, 1.949. Pg. 3.
- 4 AGUIRRE, F: *Op. cit.*, Pg. 72.
- 5 AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 73.
- 6 GLASSTONE, S.: *Termodinámica para químicos*. Ed. Aguilar, Madrid. 4ª edición, 5ª reimpresión, 1.977. Pg. 44.
- 7 AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 13 y s.
- 8 COMMONER, B.: *La escasez de energía*. Ed. Plaza y Janés. Barcelona 1.977. Pg. 19 y s.
- 9 GEORGESCU-ROEGEN, N.: *Energía y mitos económicos*. En: "El Trimestre económico". Nº 168, Pg. 782. La edición original inglesa de este artículo apareció en la revista "The Southern Economic Journal". Vol XVI, Nº 3. Enero 1.975. Ver pg. 349 (347-381). Dicho artículo fue reproducido en GEORGESCU-ROEGEN, N.: *Energy and Economic Myths. Institutional and Analytical Economic Essays*. Pergamon Press. Nueva York, 1.976. Pg. 5 y ss. Ver también:
AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 97;
LABEYRIE, V.: *Énergie, développement, écologie*. En "La Pensée. Revue du rationalisme moderne". Nº 216. Diciembre 1.980. Pg. 117.
- 10 LABEYRIE, V.: *Ibidem*.
- 11 FOLEY, G.: *La cuestión energética*. Ediciones del Serbal. Barcelona, 1.981. Pg. 73.
- 12 GEORGESCU-ROEGEN, N.: *De la science économique a la bioéconomie*. En: "Revue d'Économie Politique". Año 88. Nº 3. Mayo-Junio 1.978. Pg. 354.
- 13 Estas ideas pueden considerarse muy compartidas, pues son muchos los autores que están de acuerdo con ellas. Ver, entre otros:
COMMONER, B.: *Op. cit.* Pg. 24.
GLASSTONE, S.: *Op. cit.* Pg. 43.

- HELLMAN, H.: *Op. cit.*, Pg. 31.
FOLEY, G.: *Op. cit.*, Pg. 69.
LABEYRIE, V.: *Op. cit.*, Pg. 117.
CHANG, S.S.L.: *Conversion de l'énergie*. Ed. Dunod. París. 1.966. Pg. 12 y s.
HEINZ, R.: *Energy Trends in the Eighties*. En: "Business Horizons". Vol 24. N° 1. Enero-Febrero 1.981. Pg. 33.
SCHIPPER, L.: *Raising the Productivity of Energy Utilization*. En: "Annual Review of Energy". Hollander & Simmons, Editors. Vol 1, 1.976. Pg. 457.
- 14 AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 43.
- 15 LABEYRIE, V.: *Op. cit.*, Pg. 117.
- 16 GLASSTONE, S.: *Op. cit.*, Pg. 43.
- 17 CHANG, S.S.L.: *Op. cit.*, Pg. 13.
LUCINI comenta que en realidad se postula la validez "a priori" de los principios de la Termodinámica. No son demostrables como no lo son otros tantos principios físicos. (*Op. cit.*, pg. 11). Lo que se sabe es que no existen experiencias contrarias a dichos principios, por lo que no se han falsabilizado.
- 18 COMMONER, B.: *Op. cit.*, Pg. 20.
- 19 KITTEL, C.: *Física térmica*. Ed. Reverté, Barcelona. 1.973. Pg. 71.
- 20 GLASSTONE, S.: *Op. cit.* Pg. 42 y s.
Puede verse una definición técnicamente más rigurosa en:
LUCINI, M.: *Op. cit.* Pg. 7 y s.
KITTEL, C.: *Op. cit.* Pg. 68, nota 17.
En otro lugar de su obra, LUCINI comenta que el primer principio de la Termodinámica no es más que "un corolario" del principio de la conservación de la energía. (*Op. cit.*, pg. 53.)
- 21 AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 96.
- 22 CHANG, S.S.L.: *Op. cit.*, Pg. 19 y s.
- 23 Un sistema termodinámico cerrado es aquél que no intercambia energía con el exterior. Ver:
GEORGESCU-ROEGEN, N.: *De la science économique...* *Op. cit.*, Pg. 358.
La **transformación adiabática** es aquella en el curso de la cual no hay intercambio de calor entre el sistema considerado y el exterior. Así pues, en el transcurso de dicha transformación el sistema es cerrado. Ver:
CHANG, S.S.L.: *Op. cit.*, Pg. 15.

La transformación isotérmica es aquella que mantiene la misma temperatura a lo largo del proceso.

- 24 LUCINI, M.: *Op. cit.*, Pg. 4.
- 25 GLASSTONE, S.: *Op. cit.*, Pg. 18.
- 26 LUCINI, M.: *Op. cit.*, Pg. 4.
- 27 GLASSTONE, S.: *Op. cit.* Pg. 18.
- 28 GLASSTONE, S.: *Op. cit.*, Pg. 51. También:
KLING, R.: *Thermodynamique générale et applications*. Editions Technip, París, 1.967. Pg. 6.
- 29 KLING, R.: *Ibidem*.
- 30 KLING, R.: *Op. cit.*, Pg. 56. También:
GEORGESCU-ROEGEN, N.: *De la science économique... Op. cit.* Pg. 359.
- 31 GEORGESCU-ROEGEN, N.: *Ibidem*.
- 32 Las ideas básicas de este razonamiento están tomadas de:
GEORGESCU-ROEGEN, N.: *De la science économique... Op. cit.* Pg. 359 y s. Y también:
GLASSTONE, S.: *Op. cit.*, Pg. 48 y s.
- 33 Lo que no significa que el proceso deja de ser isotérmico, puesto que la cantidad de calor que resta dentro del sistema mantiene la misma temperatura. Según AGUIRRE: "el concepto de temperatura puede ser establecido a través de la idea de la existencia de un flujo de calor entre dos cuerpos en contacto térmico. Como ambos cuerpos deben ser considerados como sistemas mecánicamente aislados, la medición de la variación de temperatura proporciona una indicación directa de la cuantía de la transferencia de calor, ya que éste es el único proceso permitido". (*Op. cit.*, Pg. 34).
Para una discusión adicional del concepto de temperatura, ver:
GLASSTONE, S.: *Op. cit.*, Pg. 4-8.
KITTEL, C.: *Op. cit.*, Pg. 54 y s.
- 34 AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg 97.
- 35 KLING, R.: *Op. cit.*, Pg. 67.
- 36 Puede consultarse cualquier manual especializado. Por ejemplo:

- CHANG, S.S.L.: *Op. cit.*, Pg. 27-31.
LUCINI, M.: *Op. cit.*, Pg. 64 y ss.
- ³⁷ Ver la nota 23.
- ³⁸ La escala de temperatura KELVIN empieza en el cero absoluto admitido en temperatura. (0° K), equivalente a -273,16 °C. Existe una relación lineal entre ambas escalas, °K y °C. Así pues, debe sumarse 273 a los grados KELVIN para hallar su conversión a grados centígrados.
- ³⁹ COMMONER, B.: *Op. cit.*, Pg. 36.
- ⁴⁰ LE GOFF, P.: *Les rendements d'utilisation de l'énergie par et pour les êtres humains*. En: "Revue Générale Thermique Française". Tomo XVI. N° 181 Enero 1.977. Pg. 15. Asimismo, ver:
SCHIPPER, L.: *Op. cit.*, Pg. 463.
- ⁴¹ BIDARD, R.: *Exergie, rendements de cycles, rendements de machines*. En: "Revue Générale Thermique Française". T. XIII. N° 150-151. Junio-Julio 1.974. Pg. 481-482. La equivalencia propuesta es posible, debido a que en un ciclo reversible las cantidades de calor tomadas del foco caliente y cedidas al foco frío, son proporcionales a las temperaturas absolutas respectivas (° K). Dicha propiedad no se cumple en los procesos térmicos irreversibles. Ver:
AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 105, ejemplo 4.1. Ver también:
LUCINI, M.: *Op. cit.*, Pg. 66.
- ⁴² SCHIPPER, L.: *Op. cit.*, Pg. 457.
- ⁴³ LUCINI, M.: *Op. cit.*, Pg. 106. En el caso de transformaciones irreversibles, la exergía es menor aún.
- ⁴⁴ LE GOFF, P.: *Op. cit.*, Pg. 17-20.
- ⁴⁵ LUCINI, M.: *Op. cit.*, Pg. 108.
- ⁴⁶ SNYDER, M.J., y CHILTON, C.: *Planning on Uncertainty: Energy in the Years 1.975-2.000*. En: "Batelle Research Outlook". Monográfico: *Our Energy Supply and its future*. Vol 4. N° 1. 1.972. Pg. 4.
- ⁴⁷ Esto sucede tanto para las máquinas que se rigen por el ciclo de CARNOT como para otras diferentes cuyo estudio no podemos abordar aquí.
- ⁴⁸ SADI-CARNOT, N.L.: *Reflexions sur la puissance motrice du feu et des machines propres a développer cette puissance*. París. 1.824. Citado por LUCINI M.: *Op. cit.*, Pg. 63 y s.

- 49 CHANG, S.S.L.: *Op. cit.*, Pg. 20.
- 50 FOLEY, G.: *Op. cit.*, Pg. 69.
- 51 *Ibidem.*
- 52 HELLMAN, H.: *Op. cit.*, Pg. 31.
- 53 AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 103.
- 54 COMMONER, B.: *Op. cit.*, Pg. 24.
- 56 SCHIPPER, L.: *Op. cit.*, Pg. 437.
- 56 PANTOJA, A.: *A propósito de la comparación de diferentes fuentes de energía.* En: "Industria Minera. N° 194. Octubre 1.979. Pg. 15.
- 57 LUCINI, M.: *Op. cit.*, Pg. 106. Ver también:
KITTEL, C.: *Op. cit.*, Pg. 65.
- 58 HEINZ, R.: *Op. cit.*, Pg. 33.
- 59 COMMONER, B.: *Op. cit.*, Pg. 31.
- 60 Ver, entre otros:
AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 96.
GEORGESCU-ROEGEN, N.: *De la science économique... Op. cit.*, Pg. 355 y s.
GEORGESCU-ROEGEN, N.: *The Entropy Law and the Economic Process.* Harvard University Press. Cambridge, Massachussets. 1.971. Pg. 128 y 134.
SINGH, J.: *Ideas fundamentales sobre la teoría de la información, del lenguaje y de la cibernética.* Alianza Editorial. Madrid. 1.972. Pg. 88.
GEORGESCU-ROEGEN propone en la primera obra citada aquí, la analogía de un sistema cerrado con un reloj de arena con el fin de explicar adecuadamente el concepto referido de EDDINGTON.
- 61 COMMONER, B.: *Op. cit.*, Pg. 24.
- 62 La idea de separar antropomórficamente la energía aprovechable en los subconjuntos: "energía accesible" y "energía inaccesible", está tomada de GEORGESCU-ROEGEN, N.: *De la science économique.. Op. cit.*, Pg. 785 y 790. También divulga las ideas del "análisis energético" y el concepto concreto de "energía neta". Dicho autor señala que solamente la energía accesible o disponible tiene un real o posible valor económico para el hombre. Pero además, considera que a largo plazo únicamente

contará la eficacia energética (energía neta útil obtenida) para establecer la accesibilidad. También es de interés:

VERGÉS, J.C.: *Malthus, Marx, Meadows y la historia económica de la catástrofe. ¿Es posible la crisis mundial de recursos?*. En: "Moneda y Crédito". Nº 150. Septiembre 1.979. Pg. 3-23. Dicho autor sigue -en este punto- a GEORGESCU-ROEGEN, cuando afirma que la indisponibilidad de la energía es función de la economía y de la tecnología, y depende de restricciones biológicas, temporales y espaciales.

LE GOFF (*Op. cit.*, Pg. 15), pretende distinguir dos aspectos: objetivo y subjetivo. El primero estaría relacionado con el segundo principio de la Termodinámica, con el crecimiento de la entropía y la disminución subsecuente de la energía libre. El segundo evalúa la disminución de la energía utilizable ó la degradación de la energía, poniendo en relación las propiedades termodinámicas de la energía para satisfacer las necesidades humanas. LE GOFF cree que ambos aspectos son confundidos frecuentemente, debido a la analogía realizada a menudo entre energías nobles y energías apreciadas. Afirma que dicha analogía no siempre se puede establecer con rigor, ya que los usos térmicos de la energía, considerados como poco nobles, gastan mayor cantidad de energía que los usos mecánicos.

En todo caso, creemos que la existencia de diferentes temperaturas, (que equivale a decir: diferentes calidades de usos térmicos), continúa requiriendo una distinción entre energías aprovechables y energías no aprovechables. Esta distinción siempre será subjetiva, y dependerá de muchos factores, tanto tecnológicos como económicos y sociales.

⁶³ Ver: INFORMACION COMERCIAL ESPAÑOLA: *Una autopsia de la energía*. En: "Información Comercial Española". Nº 501. Mayo 1.975. Pg. 92.

⁶⁴ ZISCHKA, A.: *Energía liberada*. Ed. Destino. Barcelona. 1.956. Pg. 287.

⁶⁵ En esta frase está contenida implícitamente una versión no literal de la siguiente definición de la entropía: "una medida de la energía inasequible dentro de un sistema termodinámico" que fue proporcionada en la edición de 1.948 por el WEBSTER'S: COLLEGIATE DICTIONARY. Esta cita está tomada de: GEORGESCU-ROEGEN, N.: "La Ley de la Entropía y el problema económico". En: "Gaceta del Fondo de Cultura Económica". Año VI. Nº 65. Mayo 1.976. Pg. 24. Puede verse un artículo del mismo autor y con el mismo título pero en inglés y con un contenido más amplio y detallado, en:

GEORGESCU-ROEGEN, N.: *The Entropy Law and the Economic Problem (1.970)*. Reproducido en la obra: *Energy and the Economic Myths*. *Op. cit.* Pg. 53-64, en especial, pg. 54. También resulta de interés al respecto:

VERGÉS, J.C.: *Op. cit.*, Pg. 19.

⁶⁶ GEORGESCU-ROEGEN, N.: *Energía y mitos...* *Op. cit.*, Pg. 787. Nota 12. Ver la pg. 786 para estudiar la equivalencia de las dos formulaciones de la segunda ley de la Termodinámica: La formulación clásica, y la ley de la entropía, que en realidad es de carácter más general.

⁶⁷ FOLEY, G.: *Op. cit.*, Pg. 73.

- ⁶⁸ En el sentido establecido por KUHN:
KUHN, T.S.: *La estructura de las revoluciones científicas*. Ed. Fondo de Cultura Económica. México. 1.975. Pg. 51.
- ⁶⁹ La cuestión es altamente compleja y muy especulativa, puesto que los propios astrónomos y astrofísicos no se ponen de acuerdo al respecto. Existen varias teorías sobre el nacimiento y evolución del Universo, que están relacionadas con la noción de si es finito o infinito.
Según la que parece teoría más aceptada actualmente y con recientes respaldos empíricos muy fundamentados, el Universo es el producto de la gran explosión inicial (big bang) de un cuerpo celeste de una densidad inimaginable, y las galaxias están dispersándose y alejándose mutuamente todavía como consecuencia de este hecho primigenio.
Otra teoría señala la posibilidad de que haya existido un proceso de contracción y expansión alternativas del Universo durante casi eternos lapsos de tiempo. Si esta teoría fuese certera, la entropía no sería necesariamente una magnitud con un sólo sentido de evolución. Ver:
ASIMOV, I.: *Op. cit.*, en especial, el capítulo 15.
KITTEL, C.: *Op. cit.*, Pg. 71 y s.
- ⁷⁰ COMMONER, B.: *Op. cit.*, Pg. 30.
Continúa COMMONER: "El orden expresa la relación de las propiedades del conjunto con las propiedades de sus partes. Significa que el conjunto no es la simple suma de las propiedades de las partes, hallándose fuertemente afectado por la relación entre ellas. Por consiguiente, el conjunto origina un sistema cuyo comportamiento resulta energéticamente afectado por su disposición interna."
- ⁷¹ KLING, R.: *Op. cit.*, Pg. 169 y ss.
KITTEL, C.: *Op. cit.*, Pg. 53.
- ⁷² HEINZ, R.: *Op. cit.* Pg. 33.
- ⁷³ La "muerte térmica" (Wärmetod) fue pronosticada por CLAUSIUS. Ver:
LUCINI, M.: *Op. cit.*, Pg. 106. También:
GEORGESCU-ROEGEN, N.: *Energía y mitos económicos. Op. cit.* Pg. 787.
- ⁷⁴ SINGH, J.: *Op. cit.*, Pg. 92.
- ⁷⁵ GEORGESCU-ROEGEN, N.: *Energía y mitos económicos. Op. cit.* Pg. 787.
- ⁷⁶ GEORGESCU-ROEGEN, N.: *De la science économique... Op. cit.* Pg. 355.
- ⁷⁷ AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 110.
GEORGESCU-ROEGEN, N.: *De la science économique... Op. cit.* Pg. 355.

- GEORGESCU-ROEGEN, N.: *La Ley de la Entropía y el problema económico. Op. cit.*, Pg. 24.
- ⁷⁸ GEORGESCU-ROEGEN, N.: *La Ley de la entropía y el problema económico. Op. cit.*, Pg. 25.
- ⁷⁹ AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 107-109.
CHANG, S.S.L.: *Op. cit.*, Pg. 33.
- ⁸⁰ CONDOMINAS, S.: *Curso de Doctorado "Economía y Entropía"*. Clase del día 5-3-76. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad de Barcelona.
AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 104.
- ⁸¹ CONDOMINAS, S.: *Op. cit.*
AGUIRRE, F.: *Op. cit.*, Pg. 108.
- ⁸² NIETO DE ALBA, U.: *La función de entropía en las decisiones de inversión*. En: "Anales del CUNEF". Curso 1.979-1.980. Pg. 254. Dicho autor efectúa el siguiente razonamiento:
Para un sistema cerrado (físico):
Tiempo: $t_1 < t_2$;
Entropía: $S_1 < S_2$; $dS/dT > 0$.
- ⁸³ ORÓ, J.: *El origen de la vida*. En: "Boletín informativo de la Fundación Juan March". N° 64. Octubre 1.977. Pg. 9-10.
Otros pensadores como THEILLARD DE CHARDIN han hablado de la vida como "un desafío a la entropía" y N. WIENER comenta que los seres vivos son "islotes de neguentropía". Estas citas son debidas a:
KLING, R.: *Op. cit.*, Pg. 82.
- ⁸⁴ GEORGESCU-ROEGEN, N.: *La Ley de la entropía y el problema económico. Op. cit.* Pg. 24.
- ⁸⁵ ORÓ, J.: *Op. cit.* Pg. 9.
- ⁸⁶ GEORGESCU-ROEGEN, N.: *Energía y mitos económicos. Op. cit.* Pg. 789.
- ⁸⁷ COMMONER, B.: *Op. cit.*, Pg. 31.
- ⁸⁸ NIETO DE ALBA, U.: *Op. cit.*, Pg. 254.
- ⁸⁹ SINGH, J.: *Op. cit.*, Pg. 87 y ss.

⁹⁰ Por ejemplo, LEWIS calculó que la probabilidad real de que un objeto que pesara 10 billonésimas de gramo llegara a ser encontrado a 100 billonésimas de centímetro o más sobre la superficie de sustentación, sería equivalente en tiempo y frecuencia a 6,32 veces cada millón de años. Con este razonamiento se intentaba demostrar que estadísticamente no existen sucesos imposibles. Ver:

COMMONER, B.: *Op. cit.*, Pg. 32.

Por otra parte, ligando la teoría de la probabilidad y la teoría de la información, se ha especulado con sucesos improbables tales como la posibilidad de que un conjunto de monos golpeando al azar durante millones de años, sus correspondientes máquinas de escribir, fuesen capaces de redactar todos los libros del British Museum. Obviamente es un asunto absurdo. Con gran paciencia, KITTEL ha demostrado que la probabilidad de que tal hecho haya sucedido desde el principio del Universo, es de: $10^{-164.346}$.

El novelista argentino BORGES, hizo un estudio que está entre la matemática y la literatura de ficción sobre este asunto:

BORGES, J.L.: *The Library of Babel*. Grove Press. 1.962. Pg. 79-88. Citado por KITTEL, C. *Op. cit.*, Pg. 73.

Por otra parte, la paradoja de MAXWELL es la más inteligente de las ideas expuestas para argumentar teóricamente la base de un posible "contrabando de entropía".

Se trata de considerar un depósito dividido en 2 partes, A y B, separadas por una membrana con un agujero microscópico central. En tal envase hay moléculas distribuidas entre los 2 compartimentos. Supongamos que pertenecen a un gas.

Si podemos imaginarnos un "demonio" microscópico que estuviese situado junto al orificio intermedio, estaríamos en condiciones de pensar que dicho demonio podría ser capaz de distinguir entre moléculas rápidas y lentas, dejando pasar sólo las primeras de A hacia B y sólo las segundas de B hacia A. De este modo, al cabo de un tiempo se habría creado desde una situación de entropía máxima (igualdad térmica de ambos compartimentos), una situación de entropía menor, con una diferencia de potencial termodinámico capaz de producir un trabajo.

De este modo se habría conculcado la ley de la entropía.

Evidentemente, SZILARD al resolver dicha paradoja, observó la relación entre información y baja entropía.

La refutación de la Paradoja de MAXWELL se ha ceñido a: La imposibilidad de la existencia de tal demonio y a la necesidad que dicho ser tendría de efectuar consumos de energía, sea para vigilar la entrada de las moléculas, sea para iluminar su trayectoria, al objeto de poder elegir las adecuadamente. Dicha cuestión provoca al menos la necesidad de demostrar si estos gastos de energía se producirían en cantidad mayor, igual o menor que la diferencia de potencial logrado con su trabajo.

Con relación a la paradoja de MAXWELL, ver:

SINGH, J.: *Op. cit.*, Pg. 90 y ss.

GEORGESCU-ROEGEN, N.: *The Entropy Law and the Economic Process*. *Op. cit.* Pg. 187-189.

LUCINI, M.: *Op. cit.*, Pg. 108 y ss.

Dicho autor efectúa un análisis de tipo similar al referido a los improbables sucesos mencionados anteriormente y llega asimismo a la conclusión de que la probabilidad de que ocurra una observación y actuación del hipotético demonio, sería remota, del orden de una vez en millones de años.

Desde el campo bioquímico, sí ha existido un trasunto biológico del demonio de MAXWELL, que no es otro que el ácido desóxidorribonucleico (DNA), y las encimas que se citan en el texto. Ya se ha indicado que la denominada "neguentropía" no soluciona el problema energético, por necesitar una aportación exterior de energía al sistema.

Desde el punto de vista económico han existido muchos mitos que han tendido a obviar el sentido de la entropía, siendo ésta la clave del alejamiento de la Economía de un tratamiento coherente del fenómeno energético.

- ⁹¹ La expresión "contrabando de entropía" fue acuñada por: BRIDGMAN, P.W.: *Statistical Mechanics and the Second Law of Thermodynamics. Reflections of a Physicist*. Nueva York. 2ª Ed. Philosophical Library. 1.955. Pg. 236 a 268. Citado por GEORGESCU-ROEGEN, N.: *Energía y mitos económicos. Op. cit.*, Pg. 799 y 833.