

## FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS ESTADÍSTICOS DEL CONCEPTO DE ENTROPÍA

R. Roque Malherbe

Centro Nacional de Investigaciones Científicas

### ABSTRACT

The subject of the present paper is the discussion of the importance of some statistico-thermodynamical concepts, fundamentally: entropy, in the foundation of general laws such as: the causality principle and some philosophical categories as: progress, development, etc. Allowing the translation to physical language of these terms, made more exact its employ in philosophical literature.

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es: el señalar la importancia que tienen los conceptos termodinámico-estadísticos, fundamentalmente, el de entropía, en la fundamentación de leyes generales, como el principio de causalidad y filosóficos como los de progreso, desarrollo, etc., permitiendo ésto la traducción, al lenguaje físico, de estos términos utilizados ampliamente por la filosofía ayudando así a darles una especificación mayor gracias al carácter exacto de esta ciencia.

## RECuento HISTÓRICO

La hipótesis cinético molecular tiene sus raíces en Lucrecio, Gassendi Bernoulli, Lomonosov, etc. aunque su formulación exacta proviene de Joule (1851) el cual se basó en la hipótesis de Herapath, (1821) sobre el movimiento de traslación de las moléculas; con ella Joule explica las características de los gases ideales y hace consideraciones sobre el calor, su transmisión, etc.

Posteriormente Clausius (1857) obtiene teóricamente las leyes de los gases ideales, la relación entre la velocidad media cuadrática y la temperatura e introduce el concepto de recorrido libre medio. En 1859 Maxwell emplea el método estadístico en el estudio de los gases obteniendo su famosa ley de las velocidades, etc.

Por su parte Boltzman (1872) crea las bases de la mecá-

nica estadística, con su teorema H, la introducción de la expresión estadística para la entropía ( $S = k \ln \Omega$ ) y la ecuación cinética que lleva su nombre etc. (lo cual le valió fuertes críticas de Mach, Ostwald, Poincare y Zermelo por basarse en la hipótesis atómica por un lado y por contradecir la reversibilidad de las leyes de la mecánica por otro). Sin embargo la formulación más fructífera de la Termodinámica estadística fue dada por Gibbs alrededor de 1900 introduciéndose un método de gran generalidad con ayuda del concepto (esencialmente estadístico) de "ensemble". Este método fue complementado por Tolman con la introducción del postulado de iguales probabilidades a priori el cual tiene un inmenso valor heurístico.

## CONCEPTO DE ESTADO

Todo sistema cuántico, se encuentra en uno de los estados de un conjunto determinado, compatible con las leyes de la mecánica cuántica, siendo estos estados una característica esencial del sistema. De esta forma definimos un Microestado del sistema, como el estado cuántico particular en que se encuentra el SISTEMA. Ahora existe una clase de estados de gran importancia llamados estados estacionarios, los cuales tienen la característica de que en ellos la energía tiene un valor determinado. Estos estados son propios de los sistemas aislados donde se cumple, la ecuación estacionaria de

Schroedinger siendo cada estado, con una energía  $E_n$  determinada, denominado: Nivel de Energía.

#### CONCEPTO DE MACROESTADO

Cuando el sistema tratado tiene un número de partículas muy grande  $N$  ( $\sim 10^{18}$ - $10^{23}$  partículas, o más) entonces el estado estará descrito por  $3N$  números cuánticos más las coordenadas de espín siendo esto imposible de describir de forma exacta por lo incomensurable de la magnitud de parámetros. Sin embargo con ayuda de los postulados de la termodinámica y algunos conceptos estadísticos simples, es posible describir estos sistemas de FORMA MACROSCÓPICA, con ayuda de algunos parámetros macroscópicos internos al sistema, como la temperatura, la energía, la densidad, la presión, etc. y algunos parámetros externos al sistema como el volumen, y los campos externos en que están inmersas las partículas que componen el sistema. Así, si conocemos por ejemplo: el volumen que ocupa en el espacio el sistema que está aislado, así como las interacciones internas y el intervalo de energía  $E_0 < E < E_0 + \delta E$  en que este sistema se encuentra, podemos establecer en principio el conjunto de niveles de energía del sistema que puedan ser ocupados por él sin contradecir las leyes de la mecánica cuántica y la especificación macroscópica que tenemos del sistema. O sea, de acuerdo con la ecuación estacionaria de Schroedinger tendremos un con-

junto de niveles de energía los cuales son compatibles con lo que sabemos sobre el sistema.

Ahora de esos son posibles aquellos que cumplen con la condición  $E_0 < E < E_0 + \delta E$ . El número de estos microestados que son compatibles con la descripción macroscópica se llama: Número de estados accesibles y su orden de magnitud en un sistema de partículas es de:  $10^N$  ( $\Omega \sim (10^N)$ ) de esta forma llamaremos estado MACROSCÓPICO al especificado por el conocimiento de los parámetros externos al sistema y el rango de energía  $E_0 < E < E_0 + \delta E$ . El número de estados accesibles  $\Omega$  como se vio es inmenso ( $10^N$ ) lo cual hace posible la utilización de los conceptos estadísticos. Veamos como:

#### TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

El postulado básico que utilizamos es el de igual probabilidad a priori el cual se define de la siguiente forma: Si un sistema aislado está en equilibrio, se encontrará con igual probabilidad en cualquiera de los estados accesibles al sistema. Donde la probabilidad, de encontrarse en un estado se define de la forma, o sea:

$\frac{\# \text{ DE CASOS FAVORABLES}}{\# \text{ DE CASOS POSIBLES}} =$  Probabilidad de ocupación del nivel de energía.

Definamos seguidamente la entropía y veamos su propiedad más destacada.

#### LA ENTROPÍA Y SU LEY DE CRECIMIENTO (4)

Sea un sistema aislado y en desequilibrio con  $\Omega$  estados accesibles  $i = 1, 2, \dots, \Omega$  siendo  $P_i$  la probabilidad del sistema de encontrarse en el estado  $i$  y  $A_{ij}$ , la probabilidad de transición de un estado "i" a "j". Como el sistema está en desequilibrio:  $P_i = P_i(t)$  o sea dependiente de  $t$ . En este caso puede demostrarse que si se cumple la condición de que  $A_{ij} = A_{ji}$  (o sea que la probabilidad de transición, de "i" a "j" la misma de "j" a "i") la función:

$$H = \sum_{n=1}^{\Omega} P_n \ln P_n \quad \text{decrecerá continuamente,}$$

Ahora se sabe que existe una ley general de la naturaleza que dice que la Entropía ( $S$ ) de todos los sistemas aislados realizables en la naturaleza no decrece jamás, ella aumenta o en último caso se queda constante (5). Así si definimos de forma estadística a la entropía como  $S = -k H$  (donde  $k$  es la constante de Boltzman esta función tendrá la propiedad de crecer continuamente pues  $H$  siempre decrece así:

$$S = -k \sum_{n=1}^{\Omega} P_n \ln P_n \quad \text{Definición estadística de entropía}$$

Ahora si el sistema está en equilibrio de acuerdo al principio de igual probabilidad a priori  $P_n = 1/\Omega$  y entonces:

$$S = k \sum_{n=1}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \ln \frac{1}{\Omega} = k \ln \Omega$$

Que es otra definición de entropía que puede extenderse no sólo a estados de equilibrio, y la cual está relacionada directamente con el número de estados accesibles al sistema: Para concluir diremos: que son consistentes con las leyes de la termodinámica y que la forma en que se han expresado nos permitirá relacionar la entropía con la información:

#### ENTROPÍA E INFORMACIÓN

Como vimos, en la termodinámica estadística la entropía es una característica del sistema, que depende de la información que tengamos sobre el (sistema) (pues como sabemos  $\Omega$  depende de la especificación macroscópica que tengamos del sistema), y de forma general podemos decir que la entropía es una medida de el grado de indeterminación de un problema o del conocimiento de un sistema, que cuando todas las probabilidades son iguales (lo cual implica la máxima indeterminación, lo cual como sabemos corresponde al estado de equilibrio) entonces  $S$  es máxima (pues ley del crecimiento de la entropía dice que ésta es máxima para el estado de equilibrio). Sin embargo cuando  $P_1=1$  para  $i=1$  entonces de la definición  $S = -k \sum_{n=1}^{\Omega} P_n \ln P_n$  tendremos que  $S = 0$  (pues  $\ln 1=0$ ) o sea que  $S$  es mínima, lo cual corresponde a

la máxima especificación. Con un ejemplo se entenderá mejor. Si tenemos en un baile máscaras a cuatro muchachas sentadas esperando a que las saquen a bailar nos da lo mismo cualquiera pues no sabemos cual es la que nos gusta. (hecho equiprobable de máxima entropía, máxima indeterminación)

Ahora si se les quita la máscara bailaremos con la que más nos gusta gracias a que la indeterminación desapareció debido a la formación recibida ( $P_1 = 1, P_i = 0 \quad (i \neq 1)$ ) máxima especificación, o sea la información disminuye la indeterminación.

Veamos ahora un experimento mental donde entropía e información coinciden en valor absoluto. Si pasamos una mezcla de dos gases A y B ionizados por un campo magnético, esta mezcla se separa en el componente A y el componente B, se puede demostrar fácilmente que la variación de entropía de este proceso es:  $\Delta S = -kN \ln 2$  donde  $N = N_A + N_B$  es el número de moléculas de A y B respectivamente o sea  $\Delta S = -k \ln 2^N$ . Ahora si este proceso de separación lo hiciera un ser consciente tal que pudiera tomar las moléculas y preguntar es "A" y echarlas en dos cajas de acuerdo a la respuesta "sí o no" necesitaría N unidades "sí o no" para separarlas pues haría tantas preguntas como moléculas hay en la mezcla; de esta forma la información recibida sería  $I = N$  bits o sea de acuerdo a la definición de información  $I = \log_2 \Omega$  tendremos  $I = \log_2 2^N$  lo cual implica que la diferencia entre

$\Delta S$  e  $I$  sólo está en las unidades tomadas para medirlas, o sea la base de logaritmos diferentes y la utilización de la constante de Boltzman, así utilizando el mismo sistema de unidades, podemos decir que:

$$\Delta S = -I$$

y en general decir que  $S$  es una medida de la indeterminación o del desorden (como vimos) y  $(-S)$  la neguentropía será lo contrario una medición del orden, o de la especificación pudiéndose definir la información necesaria para llevar un sistema de un estado de entropía máxima  $S$  a un estado más definido con entropía  $S_f$  como:

Veamos ahora, después de discutir someramente la formulación matemática de los conceptos de entropía e información su trascendencia filosófica.

#### ASPECTOS FILOSÓFICOS DEL CONCEPTO DE ENTROPIA

Valor de la concepción termodinámica y la relación entre el crecimiento de la entropía y la dirección del tiempo

Los Principios

1. Existencia del estado de equilibrio
2. Aditividad de los sistemas
3. Existencia de la temperatura como parámetros de estado, los cuales aunque experimentalmente se cumplen en la gran mayoría de los sistemas, no existe en las leyes de

la física, ninguna prohibición que implique que ellos deben de cumplirse siempre y si no se cumplieran. Significaría, entre otras cosas de ser cierto que existirían zonas en el universo donde por ejemplo no se cumple la ley del crecimiento de la entropía, o sea existirían zonas donde decrecería, como esta ley de acuerdo a nuestras representaciones cotidianas es la única que está relacionada directamente, con el sentido irreversible del tiempo (5,6) implicaría, zonas donde el tiempo fluiría inversamente.

Por otra parte de acuerdo con la mecánica cuántica un sistema medido en dos instante consecutivos  $t_1$  y  $t_2$  ( $t_1 < t_2$ ) se perturbará en ambas ocasiones producto de la medición y de esa forma lo que ocurre en  $t_1$  se reflejará en la medición hecha en  $t_2$  pero nunca pasará lo contrario lo cual implica una asimetría en el tiempo, o sea, implicaciones de causa y efecto.

Ahora en un mundo donde la entropía decrezca, los hechos ocurrirán como una película puesta al revés lo cual indica que aquí cambia el concepto del pasado y futuro, pues el futuro será pasado y el pasado será futuro, sin embargo el concepto de asimetría del tiempo se mantendrá como vimos de acuerdo a los principios de la mecánica cuántica, manteniéndose también la relación de causa y efecto, aunque en este caso estará invertida; de esta forma podremos ver que la vio-

lación de las leyes de la termodinámica en su formulación corriente tiene implicaciones filosóficas muy profundas con relación al sentido del tiempo y a la expresión del principio de causalidad, lo cual nos indica la generalidad que tiene el concepto de entropía. Analicemos ahora el desarrollo y el progreso como aspectos donde podemos descubrir también los conceptos de la termodinámica estadística.

#### DESARROLLO Y PROGRESO

De acuerdo a la definición clásica de Bertalanffy (7) sistema: Es un conjunto de elementos que se encuentran en interacción o de forma más rica como: Conjunto de objetos, cuya interacción produce la aparición de nuevas cualidades integrativas no inherentes a los componentes aislados que constituyen el sistema (8) siendo las características de un sistema.

1. Composición. Sustancias que lo integran
2. Estructura. Forma de disponerse los elementos componentes.
3. Funcionamiento. Actividad de los elementos del sistema con otros sistemas.
4. Medio en el cual se encuentra. Sistemas ajenos al sistema en estudio, con el cual está en interacción energético material y del cual extrae energías para su desarrollo.

Así la naturaleza puede considerarse como una escalera jerárquica de sistemas incluidos e incluyentes donde el primer fundamento es: el Universo, la Metagalaxia, el sistema solar. El segundo fundamento es la tierra, la biósfera y el tercer fundamento ya dependerá del sistema en estudio.

(a) De esta forma los sistemas incluidos dependen de los sistemas incluyentes y viceversa, siendo el desarrollo y el progreso el producto de la interacción de los sistemas incluidos e incluyentes así:

Según sabemos todo sistema finito nace, se desarrolla y perece existiendo por lo tanto en la historia de todo sistema finito un período ascendente y otro de desintegración que lo lleva a otras formas de la materia, siendo este proceso cíclico e infinito. Ahora como la negación no quiere decir aniquilación, los resultados obtenidos durante la integración desintegración del sistema no se pierden totalmente al fenecer el sistema como tal, pudiendo esto incorporarse al sistema incluyente siendo ésta la base del desarrollo: la repetición cíclica aunque no idéntica de los diferentes estadios de desarrollo de la materia.

Esta no identidad es una consecuencia de la irreversibilidad estadística presente en toda la naturaleza donde la infinidad de posibilidades provoca que sea imposible estadísticamente hablando, de volver a pasar un mismo camino de desarrollo dos veces, (viéndose aquí de nuevo la importancia

heurística de la concepción termodinámica estadística en el análisis de los problemas filosóficos).

Pasemos a otra cuestión donde veremos manifestarse de nuevo los conceptos de entropía y neguentropía o información.

La experiencia nos señala que la fase progresiva del desarrollo es una etapa solamente de la existencia de todo sistema finito pero una etapa siempre existente, por otra parte los sistemas aislados tienden al desorden, al aumento de la entropía o sea a la muerte, por lo tanto la fase progresiva es sólo concebible si el sistema recibe de otro sistema incluyente neguentropía de tal forma que pueda volver a disminuir su entropía y seguirse desarrollando. Por ejemplo en el sistema solar la tierra es un sistema que progresa pero lo hace a expensas del aumento de entropía del universo provocado por la irradiación solar que es nuestra fuente de neguentropía.

También los sistemas vivos y la sociedad son ejemplos del campo de acción de la entropía y la información, podemos ver así que la ontogenia de cada criatura está codificada en cada embrión lo cual asegura la trasmisión de lo que de bueno o de malo se logra durante el desarrollo pereciendo lo regresivo y continuando el desarrollo (ahora progresivo) lo positivo obtenido en la interacción con el medio, o sea, dado el carácter cibernético del sistema vivo la información y la

neguentropía que extraen del medio es lo que permite seguir vivo y progresar pues ahora existe un medio de fijar el orden y de transmitirlo, la cual es la base del progreso. Algo parecido ocurre con la sociedad humana, donde los logros se acumulan en la cultura material y espiritual, que es la base del desarrollo progresivo de la humanidad. Todos estos procesos son contrarios a la segunda ley de la termodinámica en el sentido de que se desarrollan con la disminución de la entropía, aunque no la niegan, pues sin el sol la sociedad humana perecería (al menos actualmente) y un organismo vivo que no pudiera intercambiar energía y materia con el medio moriría inexorablemente debido a la acción de esta ley.

#### LA ENTROPÍA, LA NEGUENTROPÍA Y LA INFORMACIÓN COMO CATEGORÍAS.

El fundador de la cibernética Norbert Wiener dijo "Que la información es información, no masa ni energía" lo cual no implica que es un tercer principio que liquida la contradicción entre conciencia y materia, ni contradice la concepción materialista de la información, sino que previene contra la identificación de ésta con la masa o la energía (10).

Estas palabras de Wiener tienen una gran importancia pues indican la trascendencia del concepto de información, nosotros vimos como se relaciona el concepto de información con el de entropía o neguentropía de manera formal en la

Teoría estadística de la termodinámica y por otra parte vimos como en los sistemas naturales existe una competencia entre el orden y el desorden, la cual se manifiesta en la naturaleza inorgánica en el crecimiento y decrecimiento de la entropía de acuerdo con las interacciones del sistema con el medio, no conduciendo esta lucha a un progreso en ésta, aunque si a un desarrollo irreversible, donde no son posibles estadísticamente los regresos absolutos debido a la infinidad de los caminos producto de la complicación estructural de los sistemas microscópicos con la multitud de componentes y de nexos estructurales y funcionales entre los componentes y con el medio.

Por otra parte vimos como la naturaleza viva y en la sociedad existe la capacidad de memorizar o sea de almacenar información lo cual está relacionada con el ordenamiento de determinadas estructuras de la materia a expensas de otros sistemas de orden superior con la consiguiente variación de la entropía y la neguentropía. Todo lo cual nos indica que el nexo formal encontrado en la teoría no es particular sino que es una propiedad muy general de la naturaleza y de esta forma nos atrevemos a concluir que entropía e información son propiedades de la materia, o sea categorías pares que están presentes en el devenir siendo su interacción, transformación mutua y cambio condiciones presentes en los procesos, siendo al mismo tiempo necesarias para la comprensión de dichos procesos o sea con CATEGORÍAS GENERA-



LES CIENTÍFICAS, las cuales no se diluyen en ninguna otra categoría sino que son propiedades objetivas de los sistemas materiales, independientes de nuestra conciencia, considerando a la materia en todas sus manifestaciones como SISTEMA con elementos, estructura y función,

#### CONCLUSIONES

1. Se da la definición numérica de entropía e información y se demuestra su relación mutua.
2. Se indicó la relación existente entre la segunda ley de la termodinámica y el sentido irreversible del tiempo por una parte y con el principio de casualidad por otra (6).
3. Relacionamos la irrepetibilidad de los cambios en la naturaleza con la irreversibilidad estadística.
4. Proponemos darle un sentido general a los conceptos de entropía e información como característica del devenir de todo sistema finito natural.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1.] "Las ideas básicas de la física" Academia de Ciencias de la URSS. Ediciones Pueblos Unidos Montevideo (1962) pág. 242-245 y "Statistical Physics" de A. Isihara. Academia Press London (1971) Cap. 1.

- [2.] Curso abreviado de Física Teórica Libro 2 de L. Landau y E. Lifshitz. Editorial MIR Moscú (1974).
- [3.] Statistical Physics de F. Reif (1969) Cap. 3.
- [4.] Statistical Mechanics de R. Feynman W. A. Benjamin Jr. Reading Mass (1972) Cap. 1.
- [5.] Physics Statistique de L. Landau y E. Lifchitz. Editorial MIR (1967) Cap. 1.
- [6.] Física Estadística de Y. P. Terlietskii Editorial Ciencia y Técnica La Habana (1971) Cap. 7 Pág. 50.
- [7.] Problems of Life de I. van Bertalanffy London (1953) P. 199.
- [8.] El enfoque sistemático aplicado al conocimiento social V. Afanasiev. Revista Ciencias Sociales No. 1 (1979) pág. 31.
- [9.] Fundamentos sistemáticos y estructuras en la metodología de Marx V. Kuznien. Revista Ciencias Sociales No. 1 (1979) p. 48.
- [10.] Aspectos filosóficos del concepto de información de A. Ursul y E. Semeniuk, Revista de Ciencias Sociales No. 4 (1978) p. 215.