



Cuando se plantea la pregunta "¿por qué ocurren los sucesos en la Naturaleza de la manera que ocurren y no al revés?" se busca una respuesta que indique cuál es el sentido de los sucesos. Por ejemplo, si se ponen en contacto dos trozos de metal con distinta temperatura, se anticipa que finalmente el trozo caliente se enfriará, y el trozo frío se calentará, finalizando en [equilibrio térmico](#). Sin embargo, el proceso inverso, el trozo caliente calentándose y el trozo frío enfriándose, es muy improbable a pesar de conservar la energía. El universo tiende a distribuir la energía uniformemente; es decir, a maximizar la entropía.

La función termodinámica entropía es central para la [segunda Ley de la Termodinámica](#). La entropía puede interpretarse como una medida de la distribución [aleatoria](#) de un sistema. Se dice que un sistema altamente distribuido al azar tiene alta entropía. Puesto que un sistema en una condición improbable tendrá una tendencia natural a reorganizarse a una condición más probable (similar a una distribución al azar), esta reorganización resultará en un aumento de la entropía. La entropía alcanzará un máximo cuando el sistema se acerque al equilibrio, alcanzándose la configuración de mayor probabilidad.

La entropía, coloquialmente, puede considerarse como el desorden de un sistema, es decir, cuán homogéneo está el sistema. Un ejemplo doméstico, sería el de lanzar un vaso de cristal al suelo, este tenderá a romperse y esparcirse mientras que jamás conseguiremos que lanzando trozos de cristal se forme un vaso.

Otro ejemplo domestico: Tenemos dos envases de un litro de capacidad que contienen, respectivamente, pintura blanca y pintura negra. Con una cucharita, tomamos pintura blanca, la vertemos en el recipiente de pintura negra y mezclamos. Luego tomamos con la misma cucharita pintura negra, la vertemos en el recipiente de pintura blanca y mezclamos. Repetimos el proceso hasta que tenemos dos litros de pintura gris, que no podremos reconvertir en un litro de pintura blanca y otro de pintura negra. La entropía del conjunto ha ido en aumento hasta llegar a un máximo cuando los colores de ambos recipientes son sensiblemente iguales ([sistema homogéneo](#)).

La variación de entropía nos muestra la variación del orden molecular ocurrido en una [reacción química](#). Si el incremento de entropía es positivo, los [productos](#) presentan un mayor desorden molecular (mayor entropía) que los [reactivos](#). En cambio, cuando el incremento es negativo, los productos son más ordenados. Hay una relación entre la entropía y la espontaneidad de una reacción química, que viene dada por la [energía de Gibbs](#).

Esta idea de desorden termodinámico fue plasmada mediante una [función](#) ideada por [Rudolf Clausius](#) a partir de un proceso cíclico reversible. En todo proceso [reversible](#) la [integral curvilínea](#) de $\frac{\delta Q}{T}$ sólo depende de los estados inicial y final, con independencia del camino seguido (δQ es la cantidad de calor absorbida en el proceso en cuestión y T es la [temperatura absoluta](#)). Por tanto ha de existir una [f\(x\)](#) del estado del sistema, $S=f(P,V,T)$, denominada entropía, cuya variación en un proceso reversible entre los estados 1 y 2 es:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Téngase en cuenta que como el [calor](#) no es una función de estado se usa δQ en lugar de dQ .

La entropía física, en su forma clásica, está definida por la ecuación

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

o más simplemente, cuando no se produce variación de [temperatura](#) ([proceso isotérmico](#)):

$$S_2 - S_1 = \frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{T}$$

donde S es la entropía, $Q_{1 \rightarrow 2}$ la cantidad de [calor](#) intercambiado entre el sistema y el entorno y T la temperatura absoluta en [kelvin](#)). Los números 1 y 2 se refieren a los estados iniciales y finales de un sistema termodinámico.

El significado de esta ecuación es el siguiente:

Cuando un sistema termodinámico pasa, en un proceso reversible e isotérmico, del estado 1 al estado 2, el cambio en su entropía es igual a la cantidad de [calor](#) intercambiado entre el sistema y el medio dividido por su [temperatura](#) absoluta.

De acuerdo con la ecuación, si el calor se transfiere al sistema, también lo hará la entropía, en la misma dirección. Cuando la temperatura es más alta, el flujo de calor que entra produce un aumento de entropía menor. Y viceversa.

Las unidades de la entropía, en el Sistema Internacional, son el J/K (o Clausius) definido como la variación de entropía que experimenta un sistema cuando absorbe el calor de 1 [Julio \(unidad\)](#) a la temperatura de 1 [Kelvin](#).

Cuando el sistema evoluciona irreversiblemente, la ecuación de Clausius se convierte en una inecuación:

$$dS \geq \sum_{i=1}^n \frac{\delta Q_{TF_i}}{T_{FT_i}}$$

Siendo el sumatorio de las i fuentes de calor de las que recibe o transfiere calor el sistema y la temperatura de las fuentes. No obstante, sumando un término positivo al segundo miembro, podemos transformar de nuevo la expresión en una ecuación:

$$dS = \delta\sigma_p + \sum_{i=1}^n \frac{\delta Q_{TF_i}}{T_{FT_i}}$$

Al término σ_p , siempre positivo, se le denomina producción de entropía y es nulo cuando el proceso es reversible salvo irreversibilidades fruto de transferencias de calor con fuentes externas al sistema. En el caso de darse un proceso reversible y adiabático, según la ecuación, $dS=0$, es decir, el valor de la Entropía es constante y además constituye un proceso isoentrópico.

Cero absoluto

Sólo se pueden calcular variaciones de entropía. Para calcular la entropía de un sistema es necesario fijar la entropía del mismo en un estado determinado. La [Tercera ley de la termodinámica](#) fija un estado estándar: *para sistemas químicamente puros, sin defectos estructurales en la red cristalina, de densidad finita, la entropía es nula en el [cero absoluto](#) (0 K).*

Esta magnitud permite definir la [Segunda ley de la termodinámica](#), de la cual se deduce que un proceso tiende a darse de forma espontánea en un cierto sentido solamente. Por ejemplo: un vaso de agua no empieza a hervir por un extremo y a congelarse por el otro de forma espontánea, aun cuando siga cumpliéndose la condición de [conservación de la energía](#) del sistema ([Primera ley de la termodinámica](#)).

Entropía y reversibilidad

La entropía global del sistema es la entropía del sistema considerado más la entropía de los alrededores. También se puede decir que la variación de entropía del universo, para un proceso dado, es igual a su variación en el sistema más la de los alrededores:

$$\Delta S_{universo} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{entorno}$$

Si se trata de un [proceso reversible](#), ΔS (universo) es cero pues el calor que el sistema absorbe o desprende es igual al [trabajo](#) realizado. Pero esto es una situación ideal, ya que para que esto ocurra los procesos han de ser extraordinariamente lentos y esta circunstancia no se da en la naturaleza. Por ejemplo, en la expansión isotérmica ([proceso isotérmico](#)) de un gas, considerando el proceso como reversible, todo el calor absorbido del medio se transforma en trabajo y $Q=W$. Pero en la práctica real el trabajo es menor ya que hay pérdidas por rozamientos, por lo tanto, los procesos son irreversibles.

Para llevar al sistema, de nuevo, a su estado original hay que aplicarle un trabajo mayor que el producido por el gas, dando como resultado una transferencia de calor hacia el entorno, con un aumento de la entropía global.

Como los procesos reales son siempre irreversibles, siempre aumentará la entropía. Así como *"la energía no puede crearse ni destruirse"*, **la entropía puede crearse pero no destruirse**. Podemos decir

entonces que *"como el Universo es un sistema aislado, su entropía crece constantemente con el tiempo"*. Esto marca un sentido a la evolución del mundo físico, que llamamos "**Principio de evolución**".

Cuando la entropía sea máxima en el universo, esto es, exista un equilibrio entre todas las temperaturas y presiones, llegará *la muerte térmica del Universo* (enunciado por [Clausius](#)).

En el caso de sistemas cuyas dimensiones sean comparables a las dimensiones de las moléculas, la diferencia entre calor y trabajo desaparece, y por tanto, los parámetros termodinámicos como la entropía, temperatura, etc. no tienen significado. Esto conduce a la afirmación de que el Segundo Principio de la Termodinámica no es aplicable a tales microsistemas, porque realmente no son sistemas termodinámicos. Se cree que existe también un límite superior de aplicación del segundo principio, de tal modo que no se puede afirmar su cumplimiento en sistemas infinitos como el Universo, lo que pone en controversia la afirmación de Clausius sobre la muerte térmica del Universo.

Interpretación estadística de la entropía

En los años [1890](#) - [1900](#) el físico austríaco [Ludwig Boltzmann](#) y otros, desarrollaron las ideas de lo que hoy se conoce como [mecánica estadística](#), teoría profundamente influenciada por el concepto de entropía.

Una de las teorías termodinámicas estadísticas (la de Maxwell-Boltzmann), establece la siguiente relación entre la entropía y la probabilidad termodinámica:

$$S = k \cdot \ln \Omega$$

Donde S es la entropía, k la [constante de Boltzmann](#) y Ω el número de microestados posibles para el sistema (Ln es la función [logaritmo neperiano](#)). La ecuación anterior es válida porque se asume que todos los microestados tienen la misma probabilidad de aparecer.

La célebre ecuación se encuentra grabada sobre la lápida de la tumba de [Boltzmann](#) en el Zentralfriedhof de [Viena](#), quien se suicidó en [1906](#), profundamente deprimido por la poca aceptación de sus teorías en el mundo académico de la época.

El significado literal de la ecuación es el siguiente:

La cantidad de entropía de un sistema es proporcional al logaritmo natural de su número de microestados posibles.

Uno de los aspectos más importantes que describe esta ecuación, es la posibilidad de dar una definición absoluta al concepto de la entropía. En la descripción clásica de la termodinámica, carece de sentido hablar del valor de la entropía de un sistema, siendo relevantes sólo los cambios en la misma. En cambio, la teoría estadística, permite definir la entropía absoluta de un sistema.

Relación de la entropía con la teoría de la información

Recientes estudios han podido establecer una relación entre la entropía física y la [entropía](#) de la [teoría de la información](#) gracias a la revisión de la física de los [agujeros negros](#). Según la nueva teoría de [Jacob D. Bekenstein](#) el [bit](#) de información sería equivalente a una superficie de valor 1/4 del área de Planck. De hecho, en presencia de agujeros negros la [segunda ley de la termodinámica](#) sólo puede cumplirse si se introduce la entropía generalizada o suma de la entropía convencional (S_{conv}) más un factor dependiente del área total (A) de agujeros negros existente en el universo, del siguiente modo:

$$S_{tot} = S_{conv} + \frac{kc^3}{4G\hbar}A$$

Donde, k es la [constante de Boltzmann](#), c es la [velocidad de la luz](#), G es la [constante de la gravitación](#) y \hbar es la [constante de Planck](#) racionalizada.

Los agujeros negros almacenarían la entropía de los objetos que engulle en la superficie del [horizonte de sucesos](#). [Stephen Hawking](#) ha tenido que ceder ante las evidencias de la nueva teoría y ha propuesto un mecanismo nuevo para la conservación de la entropía en los agujeros negros.

Simplemente, al realizar un trabajo, se ocupa muy poca energía; la entropía se encarga de medir la energía que no es usada y queda reservada en un cuerpo.

Entropía y su relación con las termociencias

Ya que tenemos estos conocimientos previos de lo que es la entropía debemos aplicarlos a las termociencias, supongamos que tenemos un sistema termodinámico, es decir, algo donde se propague el calor, digamos un comal para hacer tortillas de harina, cuando el calor o la energía calorífica se propaga al comal, podemos decir que el comal está calentado por completo, pero estaríamos cayendo en un error monumental debido a que nunca habrá un equilibrio térmico perfecto, porque el comal está en contacto con el aire, y el comal está calentando al aire y el aire le roba calor al comal.

En realidad si pudiéramos de alguna forma observar con unas gafas especiales este sistema enclavado o ubicado que se está llevando acabo en ese momento podríamos observar un desorden a nivel molecular o de partícula, podríamos ver u observar las partículas que componen al comal de un color encarnado mientras que las partículas del aire se van colorando a razón de que pasen por el comal.

Podremos ver también a nivel molecular un gran desorden de partículas del aire chocando unas con otras debido a la cantidad de calor que están ganando, es cuando se dice que la entropía aumenta en el sistema, alguna vez podría estar en equilibrio ese sistema, la respuesta sencillamente es no debido a que

se necesitaría calentar el aire de todo el planeta para que estuviera en equilibrio con el comal, y aún en esas condiciones no estarían en equilibrio debido a que habría que calentar el sistema circundante es decir todo el sistema solar para que el sistema en realidad estuviera en equilibrio y aun así no lo estaría porque habría que calentar todo el universo y hay que recordar que el universo está en continua expansión.

Historia de la entropía

El concepto de [entropía](#) desarrollado en respuesta a la observación de que una cierta cantidad de energía liberada de funcionales [reacciones de combustión](#) Siempre se pierde debido a la disipación o la fricción y por lo tanto no se transforma en trabajo útil. Los primeros motores de calor como [Thomas Savery](#) (1698), el [Newcomen motor](#) (1712) y el Cugnot de vapor de tres ruedas (1769) eran ineficientes, la conversión de menos de dos por ciento de la energía de entrada en producción de trabajo útil; una gran cantidad de energía útil se disipa o se pierde en lo que parecía un estado de aleatoriedad incommensurable. Durante los próximos dos siglos, los físicos investigaron este enigma de la energía perdida, el resultado fue el concepto de entropía.

En la década de 1850, [Rudolf Clausius](#) establecido el concepto de la [sistema termodinámico](#) y postula la tesis de que en cualquier proceso irreversible una pequeña cantidad de energía térmica δQ se disipa gradualmente a través de la frontera del sistema. Clausius siguió desarrollando sus ideas de la energía perdida, y acuñó el término "entropía". Durante el próximo medio siglo se llevó a cabo un mayor desarrollo, y más recientemente el concepto de entropía ha encontrado aplicación en el campo análogo de pérdida de datos en los sistemas de transmisión de información.

Entropía y economía

Podríamos considerar las crisis económicas como un reflejo de la entropía de los sistemas tendentes al desorden, tal y como se expresa en la segunda ley de la termodinámica. Según [Hyman Minsky](#) "Una característica fundamental de nuestra economía es que el sistema financiero oscila entre la robustez y la fragilidad, y esa oscilación es parte integrante del proceso que genera los ciclos económicos.". Ciclos que se mueven en una playa de la entropía en cuyos extremos se encuentran el orden más estricto y el caos más absoluto, o dicho en otras palabras, sin una adecuada regulación que evite la tendencia al desorden de un sistema económico este entrará en crisis, ya que estos como cualquier otro sistema dentro de la naturaleza, tienden a una creciente entropía, y según la [Teoría de sistemas](#), el desorden lleva a la muerte o desintegración del sistema ya que sin mecanismos eficaces de retroalimentación, el sistema va degenerándose y consumiéndose, hasta que muere.

Definición de algunos conceptos

La termodinámica, por definirla de una manera muy simple, fija su atención en el interior de los *sistemas físicos*, en los intercambios de energía en forma de calor que se llevan a cabo entre un sistema y otro. A las magnitudes *macroscópicas* que se relacionan con estado interno de un sistema se les llama *coordenadas termodinámicas*; éstas nos van a ayudar a determinar la energía interna del sistema. En resumen, el fin último de la termodinámica es encontrar entre las coordenadas termodinámicas relaciones generales coherentes con los principios básicos de la física (recuérdese el principio de la conservación de la energía que tratamos en el número 3 de "Horizonte Social).

La termodinámica basa sus análisis en algunas leyes: La Ley "cero", referente al concepto de temperatura, la Primera Ley de la termodinámica, que nos habla de el principio de conservación de la energía, la Segunda Ley de la termodinámica, que nos define a la entropía. A continuación vamos a hablar de cada una de estas leyes, haciendo hincapié en la segunda ley y el concepto de entropía.

La Ley cero

La Ley cero de la termodinámica nos dice que si tenemos dos cuerpos llamados A y B, con diferente temperatura uno de otro, y los ponemos en contacto, en un tiempo determinado t, estos alcanzarán la misma temperatura, es decir, tendrán ambos la misma temperatura. Si luego un tercer cuerpo, que llamaremos C se pone en contacto con A y B, también alcanzará la misma temperatura y, por lo tanto, A, B y C tendrán la misma temperatura mientras estén en contacto.

De este principio podemos inducir el de *temperatura*, la cual es una condición que cada cuerpo tiene y que el hombre ha aprendido a medir mediante sistemas arbitrarios y escalas de referencia (escalas termométricas).

La Primera Ley

La Primera ley de la termodinámica se refiere al concepto de *energía interna, trabajo y calor*. Nos dice que si sobre un sistema con una determinada energía interna, se realiza un trabajo mediante un proceso, la energía interna del sistema variará. A la diferencia de la energía interna del sistema y a la cantidad de trabajo le denominamos calor. El calor es la energía transferida al sistema por medios no mecánicos. Pensemos que nuestro sistema es un recipiente metálico con agua; podemos elevar la temperatura del agua por fricción con una cuchara o por calentamiento directo en un mechero; en el primer caso, estamos haciendo un trabajo sobre el sistema y en el segundo le transmitimos calor.

Cabe aclarar que la energía interna de un sistema, el trabajo y el calor no son más que diferentes manifestaciones de energía. Es por eso que la energía no se crea ni se destruye, sino que, durante un proceso solamente se transforma en sus diversas manifestaciones.

La Segunda Ley

Por último, vamos a ver el contenido de la segunda ley de la termodinámica. En términos más o menos sencillos diría lo siguiente: "**No existe un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor de una fuente y la conversión íntegra de este calor en trabajo**". Este principio (Principio de Kelvin-Planck) nació del estudio del rendimiento de máquinas mejoramiento tecnológico de las mismas. Si este principio no fuera cierto, se podría hacer funcionar

una central térmica tomando el calor del medio ambiente; aparentemente no habría ninguna contradicción, pues el ambiente contiene una cierta cantidad de energía interna, pero debemos señalar dos cosas: primero, la segunda ley de la termodinámica no es una consecuencia de la primera, sino una ley

independiente; segundo, la segunda ley nos habla de las **restricciones** que existen al utilizar la energía en diferentes procesos, en nuestro caso, en una central térmica. No existe una máquina que utilice energía interna de una sola fuente de calor.

El concepto de entropía fue introducido por primera vez por R. J. Clausius a mediados del siglo XIX. Clausius, ingeniero francés, también formuló un principio para la Segunda ley: "**No es posible proceso alguno cuyo único resultado sea la transferencia de calor desde un cuerpo frío a otro más caliente**". En base a este principio, Clausius introdujo el concepto de entropía, la cual es una medición de la cantidad de restricciones que existen para que un proceso se lleve a cabo y nos determina también la dirección de dicho proceso. Vamos ahora a hablar de las tres acepciones más importantes de la palabra entropía.

La entropía, el desorden y el grado de organización.

Vamos a imaginar que tenemos una caja con tres divisiones; dentro de la caja y en cada división se encuentran tres tipos diferentes de canicas: azules, amarillas y rojas, respectivamente. Las divisiones son movibles así que me decido a quitar la primera de ellas, la que separa a las canicas azules de las amarillas. Lo que estoy haciendo dentro del punto de vista de la entropía es quitar un grado o índice de restricción a mi sistema; antes de que yo quitara la primera división, las canicas se encontraban separadas y ordenadas en colores: en la primera división las azules, en la segunda las amarillas y en la tercera las rojas, estaban restringidas a un cierto orden.

Al quitar la segunda división, estoy quitando también otro grado de restricción. Las canicas se han mezclados unas con otras de tal manera que ahora no las puedo tener ordenadas pues las barreras que les restringían han sido quitadas.

La entropía de este sistema ha aumentado al ir quitando las restricciones pues inicialmente había un orden establecido y al final del proceso (el proceso es en este caso el quitar las divisiones de la caja) no existe orden alguno dentro de la caja.

La entropía es en este caso una medida del orden (o desorden) de un sistema o de la falta de grados de restricción; la manera de utilizarla es medirla en nuestro sistema inicial, es decir, antes de remover alguna restricción, y volverla a medir al final del proceso que sufrió el sistema.

Es importante señalar que la entropía no está definida como una cantidad absoluta S (símbolo de la entropía), sino lo que se puede medir es la diferencia entre la entropía inicial de un sistema S_i y la entropía final del mismo S_f . No tiene sentido hablar de entropía sino en términos de un cambio en las condiciones de un sistema.

Entropía, procesos reversibles y procesos irreversibles.

Volviendo al ejemplo anterior de la caja con separaciones y canicas, vamos a explicar qué es un proceso reversible y qué un proceso no reversible.

Llamamos proceso reversible al que se puede invertir y dejar a nuestro sistema en las mismas condiciones iniciales. Teniendo en cuenta

nuestra caja ya sin las separaciones, tenemos a las canicas revueltas unas con otras, es decir, sin un orden. Si el proceso que efectuamos de quitar las divisiones fuera reversible, las canicas tendrían que ordenarse espontáneamente en azules, amarillas y rojas, según el orden de las divisiones. Esto no ocurrirá.

El proceso que efectuamos con nuestra caja de canicas fue un proceso no reversible, en donde una vez terminado, el orden que había en las condiciones iniciales del sistema ya nunca volverá a establecerse. El estudio de este tipo de procesos es importante porque en la naturaleza todos los procesos son irreversibles.

La entropía y la energía "gastada".

En el principio enunciado por Clausius que anteriormente citamos, podemos encontrar la relación con la entropía y la energía liberada en un proceso. Pensemos en un motor. El motor necesita de una fuente de energía para **poder convertirla** en trabajo. Si pensamos en un coche, la gasolina, junto con el sistema de chispa del motor, proporciona la energía (química) de combustión, capaz de hacer que el auto se mueva. ¿qué tiene que ver la entropía aquí?

La energía que el coche "utilizó" para realizar trabajo y moverse, se "gastó", es decir, es energía liberada mediante un proceso químico que ya no es utilizable para que un motor produzca trabajo.

Este es uno de los conceptos más difíciles de entender de la entropía, pues requiere un conocimiento un poco menos trivial del funcionamiento de motores, frigoríficos y el ciclo de *Carnot*. Pero para nuestros fines con esta explicación es suficiente.

¿Para qué sirve la entropía?

La entropía, como medida del grado de restricción o como medida del desorden de un sistema, o bien en ingeniería, como concepto auxiliar en los problemas del rendimiento energético de las máquinas, es una de las variables termodinámicas más importantes. Su relación con la **teoría del caos** le abre un nuevo campo de estudio e investigación a este tan "manoseado" concepto.