

## 1. Origen Histórico y Definición Conceptual

El término **entropía** fue introducido por primera vez por el físico alemán **Rudolf Julius Emmanuel Clausius** alrededor de 1860, en sus estudios que formalizaron la Termodinámica. Clausius eligió intencionalmente el nombre "entropía", derivado de la palabra griega *e tropé* (transformación), para que fuera similar a "energía", dada la estrecha relación de ambas magnitudes. Clausius postuló la Segunda Ley de la Termodinámica, que establece la existencia de la entropía como una **función de estado** para los cuerpos macroscópicos. La ley fenomenológica nos dice que en los procesos de transformación de la energía existe un sentido privilegiado: la energía tiende a transformarse espontáneamente de formas más valiosas a formas menos valiosas.

Años después, el austriaco **Ludwig Boltzmann** (1844-1906) dio una explicación cuantitativa de la entropía a partir de la existencia de átomos y moléculas. Boltzmann relacionó la entropía con el mundo microscópico, demostrando que esta magnitud es una medida del **desorden potencial** de un sistema.

## 2. Entropía y la Disposición de la Energía

La entropía cuantifica el **desorden** de un sistema y su tendencia a alcanzar estados más probables. Esta ley es la base para comprender por qué la energía se **degrada**. Mientras que la **Primera Ley** de la Termodinámica afirma que la cantidad total de energía se conserva (no se crea ni se destruye), la **Segunda Ley** establece que la **calidad** de la energía empeora constantemente. Con el paso del tiempo, la energía tiende a asumir formas cada vez menos preciosas:

1. La **energía noble** (como la energía mecánica, eléctrica o química) es la máspreciada por su versatilidad.
2. La energía noble tiende a transformarse espontáneamente en **energía térmica** (calor). La energía térmica es menos preciosa porque solo una parte puede transformarse de nuevo en energía noble.
3. El envejecimiento energético significa **degradarse**, pasando, por ejemplo, de energía de movimiento a energía térmica, o de energía térmica caliente a energía térmica fría.
4. La explicación microscópica es que los sistemas complejos evolucionan espontáneamente hacia las **configuraciones de máxima entropía** porque estas son las más probables.

### 3. Ecuación General de la Entropía

La entropía (**S**) puede expresarse de dos formas fundamentales:

#### 3.1. Formulación Termodinámica (Clausius)

La entropía es una propiedad cuyo cambio ( $\Delta S$ ) solo depende de los estados inicial y final, no del camino recorrido. Para un proceso internamente **reversible** entre un estado 1 y un estado 2, el cambio de entropía se define por la igualdad de Clausius:

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

Donde  $\delta Q$  es el calor intercambiado y (**T**) es la temperatura absoluta.

De manera más general, la **Desigualdad de Clausius** afirma que, para cualquier proceso (reversible o irreversible):

$$\Delta S \geq \frac{\delta Q}{T}$$

Cuando el sistema es aislado (sin intercambio de calor ni trabajo), la ley se reduce al **Principio de Aumento de Entropía**:  $\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{entorno}} \geq 0$

#### 3.2. Formulación Estadística (Boltzmann)

Décadas más tarde, la entropía recibió una interpretación estadística fundamental. Entre 1890 y 1900, el físico austriaco **Ludwig Boltzmann** desarrolló ideas que hoy forman parte de la física estadística. En 1877, Boltzmann encontró la manera de expresar matemáticamente el concepto de la entropía desde el punto de vista de la probabilidad. Su trabajo se resume en la famosa fórmula: ( $S = k \cdot \ln \Omega$ ) donde (**S**) es la entropía, (**k**) es la constante de Boltzmann, y  $\Omega$  (Omega) es el número de microestados posibles para el sistema. Boltzmann se convenció de que la entropía aumentaba porque el desorden es inconmensurablemente más probable que el orden, y los sistemas complejos evolucionan hacia sus configuraciones más probables.

El concepto se extendió posteriormente a otras disciplinas: **John Willard Gibbs** proporcionó la formulación definitiva de los principios de la mecánica estadística. La entropía de **Claude Shannon** mide la incertidumbre o cantidad de información en un mensaje, lo cual es fundamental en la teoría de la información. Más tarde, la entropía de **John von Neumann** se convirtió en la extensión completamente cuántica, incorporando tanto las incertidumbres termodinámicas como las cuánticas.

## 4. Referencias

### 4.1. Definición Formal y Terminología

- Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888): Fue quien introdujo la palabra y el concepto de entropía alrededor de 1860, formalizando la disciplina de la Termodinámica.
  - Clausius dedujo la existencia de la entropía como una función de estado a partir de los estudios de procesos cíclicos, y la formuló en la Desigualdad de Clausius.
  - Él formó el término "entropía" (partiendo de la palabra griega *e tropé*, que significa transformación) buscando una analogía con el término "energía", debido a la estrecha ligación física entre ambas.
  - Junto con Kelvin, formuló el Segundo Principio de la Termodinámica, estableciendo que es imposible que el calor fluya espontáneamente de un cuerpo frío a uno caliente como único efecto.

### 4.2. Fundamento Microscópico y Probabilidad

- Ludwig Edward Boltzmann (1844-1906): Dio la explicación cuantitativa y microscópica de la entropía pocos años después de Clausius.
  - Boltzmann asoció la entropía con el concepto de desorden o probabilidad.
  - La relación más célebre de Boltzmann es la que vincula la entropía ( $S$ ) con el número de maneras posibles en que una configuración puede realizarse ( $\Omega$ ), conocida como la Fórmula de Boltzmann ( $S = k_B \ln \Omega$ ).
  - Según esta interpretación, los sistemas tienden a evolucionar espontáneamente hacia situaciones de máxima entropía porque estas son las configuraciones más probables.
  - Su trabajo sentó las bases de la mecánica estadística.
- Albert Einstein (1879-1955): Contribuyó a la comprensión de la entropía desde la perspectiva microscópica al proporcionar una Fórmula de Einstein que relaciona la entropía de un sistema con el número de sus posibles estados microscópicos, validando el enfoque de Boltzmann.

#### **4.3. Contexto Termodinámico y Universalidad**

- Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832): Aunque su trabajo es anterior, su descripción del Ciclo de Carnot y el Teorema de Carnot (que establece la máxima eficiencia teórica de un motor térmico) fue fundamental, proporcionando la base macroscópica y la limitación de la eficiencia que llevó a la deducción del Segundo Principio.
- William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907): Su enunciado del Segundo Principio (Enunciado de Kelvin-Planck) afirma que es imposible extraer calor de una fuente térmica y convertirlo íntegramente en trabajo en un ciclo.
- Walther Hermann Nernst (1864-1941): Su postulado, conocido como la Tercera Ley de la Termodinámica (Principio de Nernst), establece que la entropía de una sustancia cristalina pura es cero en el cero absoluto de temperatura (0 K).

#### **4.4. Conexiones Modernas y Conceptuales**

- James Clerk Maxwell (1831-1879): Introdujo el concepto del Demonio de Maxwell, un ser imaginario utilizado para debatir la naturaleza probabilística de la Segunda Ley y la relación entre entropía e información.
- Claude Elwood Shannon (1916-2001): En la teoría de la información, definió la Entropía de Shannon, que, desde un punto de vista moderno, se considera una aplicación de la teoría de la información a la termodinámica estadística.
- Ilya Prigogine (1917-2003): Destacó en el estudio de sistemas alejados del equilibrio, argumentando que estos sistemas (como los seres vivos) pueden generar orden internamente (estructuras disipativas) a expensas de un aumento en el desorden total del sistema y el ambiente.

En esencia, la entropía es la medida del desorden potencial de un sistema y un parámetro de estado que, para sistemas aislados, tiende a evolucionar hacia un valor máximo (Principio de Aumento de Entropía)

## 5. Ejemplo Práctico: Irreversibilidad y Degradación de Energía

Un ejemplo observable de la degradación energética es el efecto del **roce**:

- Cuando un vehículo se mueve y se detiene (sin la acción continua del motor), la energía de movimiento (ordenado) se transforma espontáneamente en **energía térmica** (movimiento desordenado de moléculas) debido al roce, calentando el aire y las partes con fricción.
- Este proceso es irreversible; si intentamos calentar el vehículo, no se pondrá en movimiento, ya que el calor espontáneamente no se transforma en energía de movimiento (ordenado).
- La degradación es la tendencia de la energía a pasar de las formas de mayor orden (movimiento colectivo de moléculas) a formas de desorden creciente (agitación molecular).

## 6. Bibliografía

### Libros y Publicaciones Técnicas

#### Capítulo del libro de Calzetta (2009)

Calzetta, E. (2009). *Entropía* (pp. 69–82; 99–108). En J. M. Kirschenbaum (Dir.), Ministerio de Educación de la Nación, Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Buenos Aires.

#### Capítulos del libro de Espinosa Paredes et al. (2021)

Espinosa Paredes, G., Vázquez Rodríguez, A., Quezada García, S., & Espinosa Martínez, É. G. (2021). *Termodinámica con enfoque a la ingeniería en energía* (pp. 39–49; 60–68). Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L.

#### Capítulo del libro de Silvestrini (1998)

Silvestrini, V. (1998). *Qué es la entropía* (J. C. Anduckia, Trad.) (pp. 6–48). Grupo Editorial Norma. (Obra original publicada en 1985).