

La ropa desordenada sobre la silla de tu habitación o la entropía

Pablo Fernández Hernández

Manuel Malavé Pérez

Diego Casas Vega

Resumen— Este trabajo utiliza el ejemplo cotidiano de la ropa desordenada sobre una silla para introducir de forma intuitiva algunos de los conceptos fundamentales de la termodinámica y la entropía. A través de analogías sencillas, se explica cómo la materia tiende naturalmente al desorden a menos que se realice un trabajo externo para mantener el orden.

Palabras Clave— Entropía, termodinámica, equilibrio, procesos reversibles, procesos irreversibles, conservación de la energía, desorden, sistema aislado, segundo principio de la termodinámica.

1. Introducción

Te levantas temprano, sobre las tantas de la mañana para ir a tu primera clase y, en ese momento y en caso de no ser una persona que organice su vida para cada instante, surge la pregunta: “¿Qué me pongo hoy?”.

Así, te decides a abrir el ropero y caes en que te falta ropa; la mitad está apilada desordenadamente sobre tu silla, dispuesta a ser recogida algún día.

Más tarde, ya casi que la hora de acostarte, te vistes con el pijama y la ropa que llevabas ese mismo día la dejas, de nuevo, sobre la silla. Y te das cuenta de una cosa: en algún momento del mes deberás pararte y tomar el esfuerzo a recoger la ropa.

Es decir, si quieres mantener al habitación como la tenías hace dos semanas, debes de hacer un *trabajo extra* que posiblemente no contemplabas con anterioridad para tener los mismos resultado que en antaño. Y todo por culpa del *desorden*.



Figura 1: Ropa desordenada sobre la silla.

2. Una interpretación del equilibrio

A la materia le sucede este mismo fenómeno: tienden al desorden todo lo posible a menos que se le realice un trabajo (aportación de energía) que los haga reordenarse de nuevo.

Un ejemplo directo de esto sucede en los gases. Desde pequeños nos enseñan en el colegio que los gases tienden a ocupar el volumen de todo el recipiente donde están contenidos. Esto es consecuencia directa de la tendencia de la materia al desorden. Es decir, los gases, a nivel atómico, tienen energía suficiente para desordenarse todo lo posible, así que lo hacen.

Para entender esto, vamos a volver a la ropa desordenada sobre la silla de la habitación. Está bien que tengas toda la ropa desordenada sobre la silla. Pero, ¿sabes qué sería más desordenado que tener toda la ropa sobre la silla? Tener toda la ropa desordenada por toda la habitación.



Figura 2: Ropa desordenada por toda la habitación.

De hecho, posiblemente, algunas personas pensarían incluso que tener el desorden localizado en un único sitio, como es la silla, podría considerarse un tipo de orden y tendrían razón.

Por ello, los gases tienden al desorden global de todo el recipiente donde son contenidos y la única forma de organizarlos en una localización concreta de dicho recipiente es aplicando trabajo (variando la presión, por ejemplo).

En física no existen postulados que hablen directamente sobre la necesidad de la materia de estar en equilibrio, sin embargo, se puede considerar, en algunos casos, consecuencia directa de la entropía.

Es decir, con respecto a la habitación, que haya ropa más desordenada en unos puntos frente a otros condiciona a que haya, contrariamente, ropa más ordenada en unos puntos que en otros.

Por lo tanto, es inviable desde la perspectiva de un gas que el desorden no sea por igual en cada punto del espacio, de forma que se comporta de manera homogénea bajo condiciones similares (leyes de gases ideales).

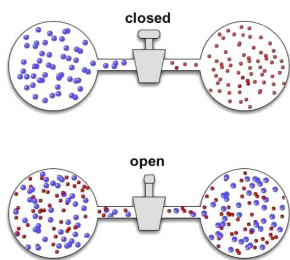


Figura 3: Concepto de equilibrio en gases.

3. La entropía y el proceso irreversible

Ahora imaginemos un muelle (elástico) enorme, de un diámetro de varios metros. Supongamos que cuatro personas (ni más ni menos) van a empujar, una detrás de otra, dicho muelle, cargándolo durante el proceso.

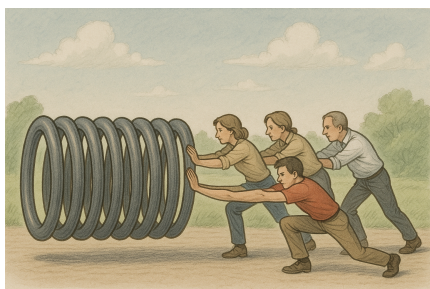


Figura 4: Cuatro personas empujando un resorte.

Esto es, la fuerza aportada de cada persona es F_i de manera que contamos con F_1, F_2, F_3 y F_4 .

El desplazamiento provocado por todo el proceso es Δu de manera que:

$$u_1 = \frac{\sum_i^4 F_i}{K}, \quad (1)$$

siendo K la constante elástica del muelle.

Es razonable que el proceso es reversible si cuando estas personas dejan de empujar el muelle, el muelle los devuelve a cada una de estas en su sitio inicial, aplicando de nuevo la fuerza que realizaron esas cuatro personas en un inicio, pero en sentido contrario.

Sin embargo, una de estas personas va a lo suyo y empuja el muelle en un sentido que no tiene nada que ver con el del resto.

Entonces, el desplazamiento, al momento de la deformación del muelle, se realizará de acorde a tres personas:

$$u_2 = \frac{\sum_i^3 F_i}{K}. \quad (2)$$

Esto significa que el desplazamiento será menor, $u_1 > u_2$, y que, por lo tanto, el desplazamiento de vuelta del muelle no dejará a las cuatro personas en su sitio inicial, puesto que el muelle libera una fuerza $K \cdot u_2$ cuando para mover a las cuatro personas a su posición inicial sería necesaria una fuerza $K \cdot u_1$.

Es decir, *si el desorden* (organizando a dichas personas) *durante el proceso hubiera sido nulo, el proceso hubiera sido reversible*.

Siendo ΔS la magnitud en la cual definimos ese desorden, podríamos haber dicho que:

- Si $\Delta S = 0$, el proceso es reversible.
- Si $\Delta S > 0$, el proceso es irreversible.

Definitivamente, no sería necesario ordenar la forma en la cual trabaja el muelle puesto que, bajo la tercera ley de Newton y al ser la receptora, su función va a ir totalmente condicionada a la forma de organización de las personas, por lo que no podemos suponer que las personas vayan a organizarse mejor que el muelle o más allá de la perfección. Por ello, se dice que:

- Si $\Delta S < 0$, el proceso es imposible.

A efectos de materia, la escala de entropía existe y se le llama entropía cero $S = 0$ a un cristal completamente ordenado a una temperatura de $T = 0$ K. A medida que se reduce la energía del cristal, las vibraciones de los átomos individuales se reducen a nada, y el cristal se vuelve uniforme en todas partes.

Esto último es, una forma simplificada de hacer mención al tercer principio de la termodinámica.

4. Principios de la termodinámica

4.1. Primer principio de la termodinámica

El primer principio de la termodinámica es el gran clásico de: «*La energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma*». O, dicho de una forma más clásica: «*Las gallinas que entran por las que salen*».

Gallinas que entran = Gallinas que salen (3)

$$\sum_{\text{Entran}} \text{Gallinas} = \sum_{\text{Salen}} \text{Gallinas} \quad (4)$$

Sin embargo, como hablamos de energía, el enunciado tiene que adaptarse con otra notación (*i* de *inlet*, *e* de *exit*).

La pregunta sería: ¿*La energía que entra por la que sale? ¿Con respecto a qué?* Y la respuesta sería: *Con respecto al tiempo*. Es decir, es necesario decir que al tiempo que entra energía, está saliendo energía.

$$\frac{d}{dt} \sum_i E_i = \frac{d}{dt} \sum_e E_e \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_i E_i - \sum_e E_e \right) = 0 \quad (6)$$

Sin embargo, esto debería darse en un sistema o volumen que controlemos. Es lógico que esto no siempre será así, entonces será necesario guardar un «*valor comodín*» que en casos donde estemos hablando de sistemas aislados (que no interacciona en absoluto con el exterior), será cero.

Este valor comodín será la *energía total del sistema* o \mathcal{E} :

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_i E_i - \sum_e E_e \right) = \frac{d\mathcal{E}}{dt} \quad (7)$$

La idea sería ahora descomponer el concepto de energía por unidad de tiempo que entra y energía por unidad de tiempo que sale. Vamos a definir dos funciones de estado para hablar de estas energías de forma lo más genérica posible:

- La energía cinética (\mathcal{T}) ó la energía apreciable.
- La energía interna (\mathcal{U}) ó la energía no apreciable.

De esta forma:

$$\sum_i E_i - \sum_e E_e = \mathcal{T} + \mathcal{U} = \mathcal{E} \quad (8)$$

Y reescribimos el principio como:¹

¹ Existe la forma de escribir el primer principio de la termodinámica con la potencia mecánica y la potencial calorífica entrante al sistema, pero estas dos no son las estrictas derivadas temporales del calor y del trabajo ya que ninguna de las dos son funciones de estado. Sin embargo, $d\mathcal{E}/dt$, que es la suma de ambas potencias, sí se considera una función de estado.

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = \frac{d\mathcal{T}}{dt} + \frac{d\mathcal{U}}{dt} \quad (9)$$

4.2. Segundo principio de la termodinámica

El segundo principio de la termodinámica nace a partir del proceso del primero como una necesidad de estructurar el balance de energía.

En palabras menos técnicas, el primer principio ocupa la parte en la cual se preocupa del balance de energía, pero no si en este tiene sentido físico. El segundo principio plantea directamente: «¿*Tiene sentido el balance tal cual se plantea?*».

Porque, si el sistema es aislado, el primer principio puede satisfacerse diciendo, con igual de probabilidades de éxito, ambas opciones:

$$\frac{d\mathcal{T}}{dt} = -\frac{d\mathcal{U}}{dt} \geq 0 \quad \cup \quad \frac{d\mathcal{T}}{dt} = -\frac{d\mathcal{U}}{dt} \leq 0 \quad (10)$$

Así, no es necesario entrar en los detalles matemáticos de la formulación del segundo principio, pues el mismo ya ha sido descrito anteriormente mediante explicaciones del día a día.

Sencillamente nos basaremos en dos hechos:

1. Existe una función de estado denominada temperatura absoluta $T(\vec{x}, t)$ que es intensiva (el valor de la temperatura del todo no es la suma del valor de la temperatura en cada una de sus partes y, por lo tanto, el valor de la temperatura no depende de la masa) y estrictamente positiva $T > 0$.
2. Existe una función de estado denominada entropía S que es extensiva (esto es, el valor de la entropía del todo es la suma del valor de la entropía en cada una de sus partes y, por lo tanto, el valor de la entropía depende de la masa).

Que la entropía sea una magnitud extensiva nos ayuda a poder diferenciar entre dos formas de entropía: la generada internamente del sistema $S^{(i)}$ y la generada por interactuar con el exterior al sistema $S^{(e)}$.

$$\Delta S = \Delta S^{(i)} + \Delta S^{(e)} \quad (11)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS^{(i)}}{dt} + \frac{dS^{(e)}}{dt} \quad (12)$$

Recuérdese que en procesos posibles, $\Delta S \geq 0$, por lo que $\Delta S^{(i)} + \Delta S^{(e)} \geq 0$. Es decir, la ropa desordenada sobre la silla de tu habitación bien puede venir desde tu habitación o bien puede venir desde fuera de ella, ya sea porque recién la has lavado, la has comprado o cualquier otra causa.

Es de pensar que, si el proceso fuera reversible, serías capaz como mínimo, de poner una lavadora a la vez que usas ropa de tal forma que no se acumule.

Es decir, que en caso de generarse algo de ropa sobre la silla, vendría desde la propia habitación como mínimo.

Esto matemáticamente se traduce como:

$$\frac{dS^{(e)}}{dt} = \frac{dS}{dt} \Big|_{\text{reversible}} \quad (13)$$

Como $dS/dt \geq 0$, (todo movimiento de ropa favorece, en menor o mayor medida, al desorden de tu habitación, pero nunca a su orden) entonces podemos asumir despejando que:

$$\frac{dS^{(i)}}{dt} = \frac{dS}{dt} - \frac{dS^{(e)}}{dt} = \frac{dS}{dt} - \frac{dS}{dt} \Big|_{\text{rev}} \geq 0 \quad (14)$$

Así se cumple, generalmente como ley, que:

$$\frac{dS^{(i)}}{dt} \geq 0 \quad (15)$$

4.3. La entropía en el universo de tu habitación

Nótese que si el sistema a estudiar está completamente aislado, entonces no existe entropía que se genere debido a la interacción con el exterior, y, por lo tanto:

$$\frac{dS^{(i)}}{dt} = \frac{dS}{dt} \geq 0 \quad (16)$$

O sea, que como la entropía interna siempre debe de ser creciente y no hay entropía generada por el exterior, la entropía total de un sistema perfectamente aislado siempre aumenta.

El universo como tal puede considerarse como un sistema aislado al no considerarse que exista exterior a él.

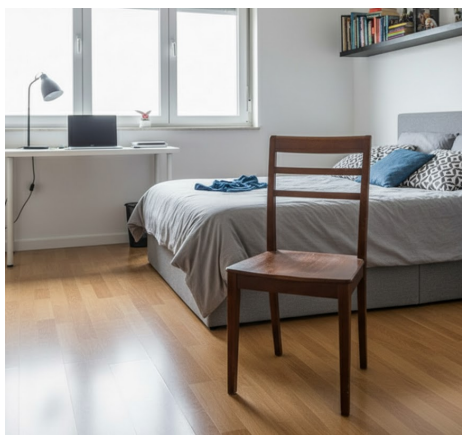


Figura 5: Ropa ordenada en la habitación.

5. Conclusiones

Si tu habitación es la única de la casa, no hay forma de que la ropa desordenada de la silla desaparezca por arte de magia: tendrás que recogerla tú mismo.

Esto es, al tratarse del universo como un sistema aislado, la entropía del mismo siempre aumentará.

Agradecimientos

Especial agradecimiento a todas aquellas personas que dedican su vida a hacer posible que otras personas dediquen su vida a la investigación.

Con igual emotividad, especial agradecimiento a Pilar Orihuela, profesora de Termotecnia en diversos grados de Ingeniería de la Universidad de Huelva.

Referencias

- [1]. Oliver, X., & Agelet, C. (2017). *Continuum Mechanics for Engineers. Theory and Problems*.
- [2]. De Hoff, R. T. (2006). *Thermodynamics in Materials Science* (2nd ed.). CRC Press.
- [3]. Criado Sancho, M. (2009). *Herramientas y modelos de la termodinámica de sistemas continuos*. UNED Ediciones.



Pablo Fernández Hernández

- Doble Grado en Ingeniería Mecánica e Ingeniería de Explotación de Minas y Recursos Energéticos, 5º curso, UHU.
- Grado en Matemáticas, 2º curso, UNED.



Manuel Malavé Pérez

- Grado en Ingeniería Mecánica, 4º curso, UHU.



Diego Casas Vega

- Grado en Ingeniería Mecánica, 4º curso, UHU.