

Entropía: conteo, restricciones e irreversibilidad

IDE-003 · Ideas fundamentales

Ensayos conceptuales para El universo y sus observadores

Autor: Juan Segurola

Versión: v0.8 ES · 19 de septiembre de 2026

Estado: Versión de publicación

Forma del artículo: Ensayo conceptual

Escala / contexto: Termodinámica, mecánica estadística y teoría de la información

Límite: Se comparan entropía termodinámica, entropía estadística y entropía de Shannon sin tratarlas como intercambiables

Trabajos relacionados: IDE-002, IDE-010, IDE-017

Perfil epistémico: Conocimiento establecido

Licencia en publicación: Todos los derechos reservados

Resumen del artículo

La entropía aparece en termodinámica, mecánica estadística y teoría de la información, pero la misma palabra no designa una única magnitud sin restricciones. En termodinámica de equilibrio es una función de estado que entra en la segunda ley.[4] La mecánica estadística la conecta con distribuciones de probabilidad sobre posibilidades microscópicas compatibles con restricciones declaradas.[1,2] La entropía de Shannon cuantifica la incertidumbre en las probabilidades de los mensajes y comparte la forma $-p \log p$ utilizada en mecánica estadística.[3] Estos usos se solapan matemáticamente pero difieren en variables, unidades y papel operacional. El artículo explica por qué la entropía local puede disminuir, por qué importa el coarse-graining, por qué el desorden visible no es una definición y cómo el borrado de información crea un puente termodinámico específico.[5,6] El resultado es una imagen controlada de la entropía como contabilidad cuantitativa cuya interpretación depende del sistema, ensemble, restricciones y proceso físico considerados.

En 60 segundos

La entropía termodinámica es una variable de estado. Para un sistema macroscópico aislado, la segunda ley establece que la evolución espontánea no reduce la entropía total; el equilibrio corresponde al máximo de entropía compatible con las cantidades conservadas y restricciones impuestas.[4] La mecánica estadística aporta un lenguaje microscópico para esa regla. Un macroestado puede ser compatible con muchos microestados, y las distribuciones de probabilidad sobre estados microscópicos conducen a la entropía de Gibbs.[1,2] Shannon introdujo después una entropía para la incertidumbre en conjuntos de mensajes; matemáticamente presenta la misma forma $-p \log p$, pero las variables y la interpretación son distintas.[3] Por eso «entropía es desorden» es una mala definición: una baraja mezclada, un cristal, un gas y un mensaje codificado requieren espacios de estados y restricciones diferentes, y el aspecto visual no dice qué entropía se calcula.[5] La entropía local puede disminuir

cuando se exporta entropía a otra parte: los frigoríficos enfrían compartimentos, los cristales forman estructuras ordenadas y los seres vivos mantienen organización mientras producen entropía en su entorno.[4] El borrado irreversible de información ofrece un puente concreto entre distinciones lógicas y producción de entropía termodinámica, pero no una licencia para identificar toda entropía informacional con calor.[6]

Por qué importa esta pregunta

La entropía aparece en física, química, computación, cosmología y explicaciones populares del tiempo. Esa amplitud vuelve especialmente costosos los traslados descuidados. Si se trata como una medida mística del caos, la organización local puede parecer una violación de la segunda ley; si la entropía de Shannon se vuelve automáticamente termodinámica, un cálculo de probabilidad puede confundirse con un balance de calor. La disciplina científica consiste en nombrar sistema, variables de estado, ensemble, frontera e intercambios permitidos antes de concluir. Con esas piezas explícitas, la entropía se vuelve una herramienta potente para irreversibilidad e incertidumbre en lugar de un eslogan que pretende explicarlo todo.

1. La entropía termodinámica es una función de estado

La termodinámica clásica define la entropía mediante relaciones entre estados de equilibrio, transferencia de calor y temperatura, no mediante una imagen de desorden molecular. Para una transferencia reversible de calor, la relación diferencial $dS = \delta Q_{rev}/T$ permite calcular diferencias de entropía, mientras la segunda ley limita los procesos reales al exigir que el cambio total de entropía de un sistema aislado sea no negativo.[4] La entropía queda así ligada a un sistema especificado y a sus variables de estado.

La palabra total es esencial. Un subsistema puede perder entropía mientras su entorno gana más. Un frigorífico reduce la entropía asociada al compartimento frío consumiendo trabajo y expulsando calor a la habitación; el proceso completo dispositivo-entorno respeta la segunda ley.[4] La misma lógica vale cuando crece un cristal desde una disolución o cuando un organismo mantiene organización interna. El orden local no abre un resquicio porque la frontera de contabilidad no puede elegirse después del resultado.

En equilibrio, el principio de entropía puede expresarse como un máximo sujeto a las restricciones relevantes. Esas restricciones pueden incluir energía, volumen, número de partículas o condiciones externas impuestas.[4] Si cambian las restricciones, cambia la comparación. La entropía no ordena todos los estados imaginables en una única escala cósmica; es una función de estado usada dentro de una descripción termodinámica donde variables e intercambios están definidos.

En qué punto estamos

La entropía termodinámica es rigurosa porque la frontera del sistema y sus restricciones forman parte de la afirmación. La segunda ley trata el balance completo, por lo que permite disminuciones locales compensadas en otro lugar. Esa regla macroscópica deja una pregunta más profunda: ¿por qué dominan los estados de equilibrio y cómo puede surgir una magnitud definida sin desorden visible a partir de posibilidades microscópicas? La mecánica estadística construye ese puente.

2. La mecánica estadística cuenta posibilidades bajo restricciones

La mecánica estadística representa un estado macroscópico mediante un ensemble de posibilidades microscópicas. Gibbs formuló una entropía para una distribución de probabilidad sobre el espacio de fases, $S = -k \sum p_i \ln p_i$ en una representación discreta, con versiones continuas que requieren cuidados adicionales.[1] Cuando los microestados accesibles reciben igual probabilidad, la expresión se reduce a la dependencia logarítmica familiar de Boltzmann con el número de microestados compatibles. El logaritmo hace aditivas las multiplicidades de sistemas independientes.

La frase importante es compatibles con las restricciones macroscópicas. Un gas a energía y volumen fijos no explora configuraciones arbitrarias con la misma relevancia; el ensemble queda definido por lo que se mantiene fijo y por los supuestos dinámicos y probabilísticos del modelo.[1,2] Jaynes subrayó que la mecánica estadística puede entenderse como inferencia con información incompleta: maximizar la entropía sujeto a valores esperados conocidos en vez de inventar detalle microscópico no respaldado.[2] Esa interpretación es potente, pero no elimina el contenido físico de las restricciones.

El coarse-graining aparece cuando se ignoran muchas distinciones microscópicas a favor de variables macroscópicas. Particiones diferentes del espacio de fases pueden producir entropías coarse-grained distintas, y la evolución hamiltoniana de grano fino presenta sutilezas que ocultan los eslóganes de «la entropía siempre aumenta microscópicamente».[1,2] La flecha termodinámica observada depende de la preparación, la resolución macroscópica y el peso abrumador de regiones de espacio de fases asociadas a macroestados de equilibrio, no de que las moléculas se vuelvan literalmente más desordenadas.

En qué punto estamos

La entropía estadística conecta la irreversibilidad macroscópica con alternativas microscópicas ponderadas, pero solo después de elegir ensemble y restricciones. El coarse-graining no es un adorno verbal: especifica qué distinciones retiene la descripción macroscópica. La misma matemática de alternativas ponderadas aparece en teoría de la comunicación, aunque allí se cuentan mensajes y no estados moleculares. Esa semejanza exige fijar una frontera cuidadosa.

3. Entropía de Shannon y entropía estadística: forma compartida, condiciones distintas

La entropía de Shannon $H = -\sum p_i \log p_i$ cuantifica incertidumbre en una distribución de probabilidad sobre símbolos o mensajes.[3] Su semejanza formal con la entropía de Gibbs basta para sostener conexiones profundas, y Jaynes utilizó deliberadamente razonamiento de teoría de la información para construir ensembles estadísticos.[2] Pero unidad, variables y tarea operacional difieren. La entropía de Shannon en bits pertenece a un problema de codificación; la entropía termodinámica en julios por kelvin participa en balances de energía y calor. Inferencia: la notación compartida no establece por sí sola identidad termodinámica; esa identificación requiere las restricciones y los supuestos de ensemble pertinentes.

La distinción evita dos errores opuestos. Primero, a un sistema físico pueden asignársele entropías de Shannon para muchas variables elegidas, ninguna de las cuales tiene por qué coincidir con su

entropía termodinámica. Segundo, puede usarse entropía termodinámica sin afirmar que la naturaleza esté literalmente procesando mensajes. La matemática compartida suele revelar una estructura común - probabilidad sobre alternativas y aditividad logarítmica - mientras la interpretación procede del problema físico o informacional en el que se inserta la fórmula.[2,3]

El principio de Landauer muestra un puente genuino pero específico. Reiniciar un bit lógicamente desconocido a un estado estándar es una operación lógica muchos-a-uno. Cuando se implementa físicamente en un entorno térmico, la distinción lógica perdida debe acompañarse de producción de entropía en otra parte, dando la escala ideal $kT \ln 2$ para borrar un bit imparcial.[6] Esto conecta tratamiento de información y termodinámica mediante una operación y una implementación física; no convierte cada bit de Shannon en un paquete fijo de calor.

En qué punto estamos

Las entropías de Shannon y termodinámica pertenecen a una familia matemática común, pero su igualdad nunca queda garantizada por la notación. Un puente válido requiere codificación física, distribución de probabilidad y proceso definidos, como ilustra el borrado de Landauer. Una vez asegurada esa distinción, puede examinarse directamente el atajo popular más persistente: por qué el desorden visual no es ni definición ni medición fiable de la entropía.

4. Por qué «entropía significa desorden» falla

La metáfora del desorden atrae porque los gases se expanden, el hielo se funde y las mezclas suelen parecer menos estructuradas cuando aumenta la entropía. Pero la apariencia no es la variable de las ecuaciones. Lambert argumentó que «desorden» es una mala muleta docente porque anima a inferir entropía desde el aspecto de desorganización en vez de desde dispersión de energía, multiplicidad y el proceso termodinámico especificado.[5] Una baraja mezclada parece aleatoria, pero barajar cartas no constituye una medida de entropía termodinámica.

Ejemplos visualmente ordenados pueden poseer entropía alta bajo una descripción, mientras estados visualmente irregulares pueden estar fuertemente restringidos bajo otra. Un cristal a temperatura no nula contiene grados vibracionales; un vidrio puede tener complejidad configuracional; una distribución de probabilidad sobre una secuencia de símbolos perfectamente regular puede tener baja entropía de Shannon aunque el soporte físico esté caliente. La pregunta correcta no es «¿parece ordenado?», sino «¿qué estados, probabilidades y restricciones definen la entropía discutida?»[1-5]

La metáfora también oculta la escala. Mezclar dos gases ideales, dejar fluir calor a través de una diferencia de temperatura o borrar un bit son procesos distintos con balances de entropía diferentes. Llamarlos a todos «más desorden» esconde el mecanismo y puede volver circular la segunda ley. La entropía solo adquiere poder explicativo cuando se vincula a un modelo cuantitativo que predice un cambio o restringe un proceso permitido.

En qué punto estamos

El desorden visible puede acompañar algunos aumentos de entropía, pero no puede definirla porque no especifica espacio de estados, distribución de probabilidad ni frontera termodinámica. Sustituir el eslogan por variables explícitas también aclara cómo la entropía puede sostener una flecha temporal sin

ser un reloj universal. El último paso separa la asimetría estadística de los procesos macroscópicos irreversibles de las leyes microscópicas usadas para modelarlos.

5. Entropía, irreversibilidad y flecha del tiempo

Muchas leyes dinámicas microscópicas son aproximadamente simétricas bajo inversión temporal, mientras procesos macroscópicos como difusión, fricción y flujo de calor muestran una dirección fuerte en condiciones ordinarias. La mecánica estadística reconcilia ambos hechos combinando dinámica con preparaciones especiales de baja entropía, descripciones macroscópicas coarse-grained y el peso enorme de los macroestados cercanos al equilibrio en el espacio de fases.[1,2] La segunda ley es estadística en su interpretación microscópica y, a la vez, extraordinariamente fiable para sistemas macroscópicos.

Esa fiabilidad no equivale a imposibilidad lógica de toda fluctuación. Sistemas pequeños pueden mostrar fluctuaciones transitorias que reducen entropía bajo descripciones estocásticas cuidadosamente definidas, y las relaciones de fluctuación cuantifican esos sucesos. Para la termodinámica ordinaria importa la escala: fluctuaciones capaces de deshacer un aumento macroscópico de entropía son extraordinariamente improbables. La flecha macroscópica surge de probabilidad, restricciones y condiciones iniciales, no de una nueva fuerza microscópica que empuje el tiempo hacia delante.

La entropía tampoco explica por sí sola por qué el universo comenzó en una condición de baja entropía ni resuelve todas las preguntas sobre flechas cosmológicas del tiempo. Esos son problemas más profundos de condiciones de frontera. Dentro de su dominio establecido, sin embargo, la entropía ofrece un lenguaje preciso para separar idealizaciones reversibles de procesos irreversibles y rastrear dónde debe ir la entropía compensatoria. IDE-010 tratará la retroalimentación e IDE-017 la incertidumbre; ninguno sustituye esta contabilidad termodinámica.

En qué punto estamos

La entropía enlaza dirección termodinámica, multiplicidad estadística e incertidumbre informacional sin reducirlas a un único significado. Su fuerza explicativa procede de restricciones, ensembles y fronteras explícitas. El concepto sobrevive así tanto al orden local como a la reversibilidad microscópica: la irreversibilidad pertenece al comportamiento estadístico de procesos físicos bajo condiciones especificadas, no a una tendencia visual hacia el desorden. Ese es el significado controlado que continúa en la serie.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Para un sistema macroscópico aislado, la segunda ley exige producción total de entropía no negativa; disminuciones locales son compatibles cuando quedan compensadas por cambios mayores en otra parte.[4]
- La entropía de Gibbs y otras entropías estadísticas cuantifican alternativas microscópicas ponderadas bajo ensembles y restricciones especificados.[1,2]
- La entropía de Shannon cuantifica la incertidumbre en las probabilidades de los mensajes y comparte la forma $-p \log p$ utilizada en mecánica estadística.[2,3]

- La metáfora del desorden no define la entropía y puede clasificar mal procesos cuando se omiten variables de estado, fronteras o distribuciones de probabilidad.[5]
- El límite de Landauer conecta el borrado lógicamente irreversible con producción de entropía termodinámica para una implementación física en un entorno térmico.[6]

Lo que todavía no sabemos

- Cómo explicar en última instancia la condición de baja entropía del universo temprano, en vez de limitarse a usarla como condición inicial en las explicaciones estadísticas de la flecha termodinámica.
- Cómo definir y medir mejor la producción de entropía en sistemas fuertemente fuera del equilibrio cuando no existe una descripción termodinámica simple del estado.
- Qué variables coarse-grained ofrecen la descripción macroscópica más informativa y robusta en sistemas complejos cuyos grados de libertad relevantes cambian con el tiempo.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un experimento reproducible con un sistema macroscópico aislado que mostrara producción total de entropía negativa sostenida después de cerrar cuantitativamente todos los reservorios de calor, trabajo, materia e información contradiría la formulación estándar de la segunda ley. [4]
- Un experimento de codificación que violara sistemáticamente los teoremas de fuente o canal de Shannon bajo sus supuestos probabilísticos declarados obligaría a revisar el marco de entropía informacional y no solo su interpretación física.[3]
- Un experimento controlado de borrado de un bit en régimen térmico cuasiestático que, tras contabilizar completamente los reservorios, disipara repetidamente por debajo del límite de Landauer cuestionaría el vínculo estándar entre irreversibilidad lógica y producción de entropía termodinámica.[6]

Si solo recuerdas una cosa

La entropía cuantifica alternativas restringidas o cambios de estado termodinámicos bajo una descripción especificada; no es una medida universal del desorden visible.

Artículos relacionados

- IDE-002 — Información
- IDE-010 — Retroalimentación
- IDE-017 — Incertidumbre

Referencias

[1] Josiah Willard Gibbs. Elementary Principles in Statistical Mechanics. Charles Scribner's Sons (1902).

[2] E. T. Jaynes. Information Theory and Statistical Mechanics. Physical Review 106, 620-630 (1957). DOI 10.1103/PhysRev.106.620.

[3] Claude E. Shannon. A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal 27, 379-423 and 623-656 (1948). DOI 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x; 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x.

[4] Herbert B. Callen. Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics, 2nd ed. Wiley (1985).

[5] Frank L. Lambert. Disorder - A Cracked Crutch for Supporting Entropy Discussions. Journal of Chemical Education 79(2), 187 (2002). DOI 10.1021/ed079p187.

[6] Rolf Landauer. Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process. IBM Journal of Research and Development 5(3), 183-191 (1961). DOI 10.1147/rd.53.0183.