

Entropía, Información y Termodinámica

Juan Montoya

Universidad de Antioquia

1 de octubre de 2025

La Revolución de Shannon: Información como Concepto Físico

Teoría de la Información (1948)

- **Entropía de Shannon:** $H = - \sum_i p_i \log_2 p_i$
- Información = Sorpresa promedio
- Un bit = respuesta a una pregunta sí/no

Conexión Fundamental

- Entropía termodinámica \leftrightarrow Entropía informacional
- $S = k \ln W$ (Boltzmann) vs. $H = \sum p_i \log p_i$ (Shannon)
- **Información es física** (Landauer)

Imagen:
Claude Shannon
trabajando en Bell Labs

Entropía: Muy distinta a "desorden"

¿Qué NO es la entropía?

- No es simplemente "desorden"
- No depende de percepciones subjetivas
- No siempre aumenta localmente

¿Qué SÍ es la entropía?

- Número de microestados: $S = k \ln \Omega$
- Información faltante sobre el sistema
- Medida de incertidumbre cuantificable

Imagen:

Dados mostrando probabilidades
(más formas de obtener 7 que 2)

Gráfico:

Distribución de Boltzmann
en sistemas térmicos

La Segunda Ley: Estadística, No Determinismo

Interpretación Moderna (Boltzmann)

- Los sistemas evolucionan hacia estados **más probables**
- $\Delta S \geq 0$ por pura **combinatoria**
- Ejemplo: gas expandiéndose en una caja

Ejemplo Cuantitativo

- Gas de $N = 10^{23}$ partículas
- Probabilidad de concentrarse en un lado:
 $P = 2^{-10^{23}}$
- Tiempo de espera: $> 10^{10^{20}}$ veces la edad del universo

Imagen:

Expansión libre de gas
(de ordenado a disperso)

Gráfico:

Microestados vs
Macroestados

El Demonio de Maxwell: Información, Trabajo y Borrado

La Paradoja (1867)

- Demonio inteligente separa moléculas
- Aparentemente viola la segunda ley

Resolución Moderna

- **Principio de Landauer:** Borrar 1 bit cuesta $kT \ln 2$ de trabajo
- El demonio debe borrar información

Aplicaciones Actuales

- Límites en computación cuántica
- Motores de información nanoscópicos

Imagen:

Demonio de Maxwell
clasificando moléculas

Diagrama:

Motor de Szilard
(información \rightarrow trabajo)

Temperatura Negativa: Más Caliente que Infinito

¿Qué son las temperaturas negativas?

- Sistemas con **energía máxima** finita
- Inversión de población: más partículas en estados de alta energía

Ejemplos Reales

- Espines nucleares en campos magnéticos
- Láseres (inversión de población)
- Gases cuánticos ultrafríos (experimento alemán 2013)

Gráfico:

Entropía vs Energía
(máximo donde $T \rightarrow \pm\infty$)

Imagen:

Átomos ultrafríos
(temperatura negativa)

Termodinámica Cuántica y Gravedad Entrópica

Termodinámica Cuántica

- Máquinas térmicas cuánticas
- Baterías cuánticas
- Entrelazamiento como recurso termodinámico

Imagen:

Computadora cuántica
(nuevos límites termodinámicos)

Gravedad Entrópica

- ¿Es la gravedad una fuerza emergente?
- Conexión con entropía de agujeros negros
- Propuestas de Verlinde y otros

Concepto:

Gravedad emergente
(¿entropía \rightarrow espacio-tiempo?)

Conclusiones

Unificación Conceptual

- Información conecta termodinámica, mecánica cuántica y computación
- Entropía: de concepto térmico a medida universal de información

Implicaciones Filosóficas

- La realidad física podría ser informacional
- "It from Bit" (Wheeler)

Aplicaciones Futuras

- Computación cuántica eficiente
- Nuevas tecnologías de refrigeración

Concepto:

¿Información como
fundamento de la realidad?

Redes:

Información conectando
del bit al cosmos