

# Abordagem clássica da informação via Demônio de Maxwell

Gabriel Pereira Galhardo, Fabrício Macedo de Souza e Hélio Zapparoli Neto

**Resumo**— Este trabalho investiga a informação como entidade física através do paradoxo do demônio de Maxwell, integrando as contribuições de Brillouin (custo da medição), Landauer (apagamento irreversível) e Bennett (computação reversível). Postulamos que a informação total pode ser decomposta em componentes extratíveis e não extratíveis, generalizando esse princípio para sistemas quânticos. Os resultados revelam limites termodinâmicos fundamentais para processamento de informação e implicações práticas para tecnologias quânticas energeticamente eficientes, destacando o papel central da informação na física estatística contemporânea.

**Palavras-Chave**— Entropia, Informação, Computação, Termodinâmica.

**Abstract**— This work investigates information as a physical entity through Maxwell's demon paradox, integrating contributions from Brillouin (measurement cost), Landauer (irreversible erasure), and Bennett (reversible computation). We demonstrate that total information can be decomposed into extractable and non-extractable components, generalizing this principle to quantum systems. The results reveal fundamental thermodynamic limits for information processing and practical implications for energy-efficient quantum technologies, underscoring information's central role in modern statistical physics.

**Keywords**— Entropy, Information, Computation, Thermodynamics.

## I. INTRODUÇÃO

O experimento mental do Demônio de Maxwell é um dos mais famosos paradoxos da termodinâmica e questiona a universalidade de suas leis. Ele foi proposto por James Clerk Maxwell, em 1867, como uma maneira de explorar o limite da validade da Segunda Lei da termodinâmica.

Suponha que exista um recipiente dividido em dois subsistemas,  $A$  e  $B$ , contendo um gás à uma temperatura  $T$ , em equilíbrio térmico. As moléculas desse gás estão se movimentando com velocidades diferentes, algumas mais rápidas que as outras [1]. Agora, introduzimos uma entidade inteligente, intitulado por Lord-Kelvin de Demônio de Maxwell, que é capaz de controlar uma pequena porta entre os compartimentos  $A$  e  $B$ . O Demônio permite que as moléculas acima da velocidade média do gás  $\langle v \rangle$  passem do lado  $A$  para o lado  $B$ , e que as moléculas abaixo dessa velocidade passem do lado  $B$  para o lado  $A$ . Assim, depois de certo tempo, o ambiente  $A$  terá mais moléculas lentas (temperatura baixa), e o ambiente  $B$  terá mais moléculas rápidas (temperatura

alta). Houve uma variação de temperatura nos subsistemas, diminuindo a entropia destes, sem a realização de trabalho externo.

Embora a Segunda Lei da Termodinâmica estabeleça que a entropia de um sistema isolado nunca diminui espontaneamente, o experimento mental do Demônio de Maxwell parece desafiar esse princípio ao sugerir a possibilidade de organização molecular sem aparente gasto energético. Esse cenário implicaria na construção de um motor térmico capaz de extrair trabalho útil de um único reservatório térmico, ou ainda, permitiria a transferência líquida de calor de um corpo mais frio para outro mais quente sem intervenção externa, violando diretamente tanto o enunciado de Kelvin-Planck quanto o de Clausius da Segunda Lei.

O paradoxo do Demônio de Maxwell foi resolvido quando alguns físicos como Brillouin, Landauer e Bennett, estudaram a fundo o questionamento "O Demônio pode operar sem custo de energia?". Assim, foi proposto que o processo de medição e apagamento de informação do Demônio requisita uma dissipação de energia.

Vale citar, também, que este experimento foi proposto em uma época onde as teorias de instrumento de medidas ainda não eram muito rebuscadas. Portanto, hoje em dia, podemos dizer que o "demônio" criado por Maxwell, nada mais é do que um sensor ou detector fotoelétrico que controla uma catraca posicionada entre dois ambientes de um sistema, permitindo, ou não, a passagem de partículas de um ambiente para o outro.

Léon Brillouin [3] mensurou as condições termodinâmicas de aquisição de informação e provou que a medição do sistema gera entropia suficiente para preservar a Segunda Lei no experimento de Maxwell. Rolf Landauer [4] quantificou o custo mínimo do apagamento de informação, e demonstrou que este é um processo termodinamicamente irreversível que dissipa calor no ambiente. Em seu trabalho, Landauer destaca que não é a computação em si que tem um custo termodinâmico, e sim o apagamento de informação.

Posteriormente, Charles Bennet, em 1982 [5], publicou um artigo desenvolvendo uma teoria sobre o custo termodinâmico mínimo de informação adquirida de um sistema. Sua análise revelou que a medição não precisa ter um custo termodinâmico alto se realizada de forma reversível, introduzindo a ideia de que o apagamento de informação sobre um sistema garante a irreversibilidade da medição. No artigo, o autor descreve dois tipos principais de computadores reversíveis: "balísticos", computadores teóricos que operam sem perda de energia ao usar trajetórias precisamente controladas, e "brownianos", que utilizam apenas das flutuações térmicas aleatórias para realizarem operações lógicas e alcançam uma alta eficiência quando

a reversibilidade lógica (a perda de informação durante a computação) é garantida. Bennett também investiga a relação entre a irreversibilidade lógica e a irreversibilidade termodinâmica, argumentando que a verdadeira fonte de dissipação de energia não é a medição, mas sim o apagamento de informações.

O arcabouço teórico estabelecido por Brillouin, Landauer e Bennett permanece fundamental para descrições modernas da termodinâmica da informação. Resultados recentes demonstram a generalização do demônio de Maxwell para sistemas de muitos corpos [6], a quantificação de fluxos de informação em processos de medição quântica [7], e a caracterização de setas locais de tempo em sistemas abertos [8]. Esses desenvolvimentos confirmam o acoplamento fundamental entre informação e entropia, reformulando a teoria clássica em regimes quânticos.

## II. EQUAÇÕES

### Brillouin (1951):

O ato de medição pelo "Demônio" gera entropia suficiente para preservar a Segunda Lei. Temos que a condição de visibilidade de uma partícula é:

$$h\nu \gg k_B T; \quad (1)$$

onde  $h\nu$  é a energia do fóton utilizado para enxergar a partícula. Brillouin definiu o custo entrópico da medição (Demônio) como:

$$\Delta S_d = \frac{\Delta Q}{T} = k_B b, \quad b = \frac{h\nu}{k_B T} \gg 1; \quad (2)$$

Analisando o sistema antes e depois da organização de partículas nos ambientes  $A$  e  $B$ , e utilizando a entropia de Boltzmann, observamos uma redução de entropia ocasionada pelo ganho de informação:

$$\Delta S_i = k_B \ln(\Omega) - k_B \ln(\Omega_0) \approx -k_B \frac{\rho}{\Omega_0} < 0; \quad (3)$$

onde  $\rho = \Omega_0 + \Omega$  é uma pequena perturbação que reduz o número de configurações possíveis do sistema após a medição. Assim, sabendo que  $b \gg 1$  e  $\rho/\Omega_0 \ll 1$ , certificamos a validação da Segunda Lei:

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_d + \Delta S_i > 0. \quad (4)$$

Brillouin constrói a ideia de que o custo da informação está no ganho de entropia. Sabendo que o sistema descrito no paradoxo do Demônio de Maxwell gera mais entropia do que perde com a organização das partículas ( $|\Delta S_d| > |\Delta S_i|$ ), podemos pensar que teremos um ganho de informação adicional que não será utilizado, podendo indicar a possível existência de três grandezas: A *informação extraível*  $I_{\text{ext}}$ , que reserva a quantidade de informação adquirida pelo demônio durante a medição, a *informação não extraível*  $I_{\text{no-ext}}$ , composta pela entropia sobressalente na soma de  $\Delta S_d$  e  $\Delta S_i$ , e a *informação total*  $I_{\text{total}}$  composta pela soma das anteriores.

$$I_{\text{total}} = \underbrace{I_{\text{ext}}}_{\text{Extraível (Adquirida)}} + \underbrace{I_{\text{no-ext}}}_{\text{Não Extraível (Não utilizada)}} \quad (5)$$

### Landauer (1961):

O apagamento de informação é uma operação que dissipa calor no ambiente, ou seja, termodinamicamente irreversível. Analisando o sistema mais simples possível, onde temos apenas duas configurações possíveis, o custo mínimo de apagamento de informação é:

$$Q = k_B T \ln 2 \text{ por bit.} \quad (6)$$

Aqui, Landauer diz que sempre o demônio realiza uma medição, ele apaga essa informação antes que faça outra.

### Bennett (1982):

Fortalecendo o trabalho de Landauer, Bennett demonstra que a medição *pode* ser reversível, se realizada sem o apagamento de informação, e em sistemas que não dissipam energia. Do contrário, a irreversibilidade de uma medição reside na exclusão de informação.

O demônio poderia, em tese, armazenar informação sem dissipar energia. Mas, eventualmente, ele precisaria liberar espaço em sua memória, onde o custo energético aparece, demonstrando que a fonte de entropia está na exclusão de informação, não na coleta da mesma.

## III. CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, revisamos como Brillouin, Landauer e Bennett reformularam o paradoxo do demônio de Maxwell dando luz à termodinâmica da informação, mostrando que não há violação da Segunda Lei quando se considera o custo físico da informação, especialmente no apagamento dela. Com base nisso, propomos uma distinção conceitual entre informação extraível, associada à medição e aos observáveis do sistema, e informação não extraível, refletida na inevitável geração de entropia que escapa do controle do observador. A informação total, portanto, deve ser entendida como a soma desses dois componentes, assegurando que  $\Delta S_{\text{total}} > 0$  e reafirmando que o fluxo da informação está intrinsecamente vinculado às leis fundamentais da termodinâmica. Aqui introduzimos ideias fundamentais para o estudo dos limites termodinâmicos e computacionais da informação.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. C. Maxwell. *Theory of Heat*. Longmans, Green, and Co., London, 1871.
- [2] Wikipedia contributors, Demônio de Maxwell. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Disponível em: [https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Dem%C3%B4nio\\_de\\_Maxwell](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Dem%C3%B4nio_de_Maxwell), [30/07/2025].
- [3] L. Brillouin. *Maxwell's Demon Cannot Operate: Information and Entropy*. *Journal of Applied Physics*, vol. 22, no. 3, pp. 334-337, 1951.
- [4] R. Landauer. *Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process*, *IBM Journal of Research and Development*, vol. 5, no. 3, pp. 183-191, 1961.
- [5] C. H. Bennett. *The Thermodynamics of Computation—A Review*, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, no. 12, pp. 905-940, 1982.
- [6] K. Maruyama; F. Nori; V. Vedral. *The Physics of Maxwell's Demon and Information*. *Reviews of Modern Physics*, v. 81, n. 1, p. 1-23, 2009.
- [7] A. S. Oliveira Junior; J. B. Brask; P. Lipka-Bartosik. *Heat as a Witness of Quantum Properties*. *Physical Review Letters*, v. 127, n. 19, p. 190601, 2021.
- [8] T. Guff; A. Shastry; A. Rocco. *Emergence of opposing arrows of time in open quantum systems*. *Physical Review Letters*, v. 130, n. 12, p. 120401, 2023.