

Cavity Quântico-Fotônica de Super-Absorção

Modelo conceptual, simulação numérica e enquadramento científico

Hipótese de trabalho: usar engenharia de cavidades, concentração fotónica e absorção colectiva para reduzir perdas e acelerar a transferência de energia. Não se propõe extracção de energia do vazio, nem violação da termodinâmica.

Francisco Gonçalves / Softelabs · Fragmentos do Caos
Abril de 2026

Resumo executivo

Este documento apresenta um modelo conceptual para uma microestrutura de captação e transferência rápida de energia baseada na combinação de três ideias físicas: cavidades ópticas com controlo de modos electromagnéticos, estruturas fotónicas/plasmónicas para concentração de campo e super-absorção colectiva em materiais excitónicos ou moleculares.

A proposta não assume energia gratuita nem extracção líquida do efeito de Casimir. O objectivo é mais modesto e cientificamente defensável: aumentar a eficiência local da interacção luz-matéria e acelerar a transferência de energia para uma camada de transporte eléctrico.

A simulação apresentada é deliberadamente simplificada. Ela pretende funcionar como uma maquete matemática para exploração inicial, permitindo variar o factor de qualidade da cavidade, o número de unidades activas, o expoente de absorção colectiva e a eficiência de transporte.

Resultados sintéticos da simulação

Parâmetro	Valor / interpretação
Comprimento de onda usado	650 nm
Cavidade ressonante principal	325 nm
Factor Q da cavidade	800
Potência incidente	1 mW
Eficiência de transporte	35%
Eficiência clássica para N = 1000	0,0952
Eficiência super-absorvente para N = 1000	0,8934
Ganho relativo estimado	9,39 x

1. Arquitectura conceptual

A arquitectura pode ser vista como uma pilha funcional: a energia luminosa é captada por uma antena fotónica ou metamaterial, confinada numa cavidade óptica, transferida para uma camada activa com comportamento colectivo e finalmente convertida em corrente através de uma camada de transporte de carga.

[luz / laser / radiação ambiente] → [antena fotónica] → [nanocavidade] → [camada super-absorvente] → [transporte de carga] → [micro-condensador]

2. Modelo matemático simplificado

A potência útil estimada foi modelada como produto entre potência incidente, concentração de campo, eficiência de absorção e eficiência de transporte:

$$P_{\text{util}} \approx P_{\text{in}} \times F_{\text{cavidade}} \times \eta_{\text{absorção}} \times \eta_{\text{transporte}}$$

A absorção clássica foi simulada com crescimento aproximadamente linear e saturante. A absorção quântica foi modelada com expoente colectivo superior a 1, representando uma resposta cooperativa. Este expoente não é uma constante universal; é apenas um parâmetro exploratório do modelo.

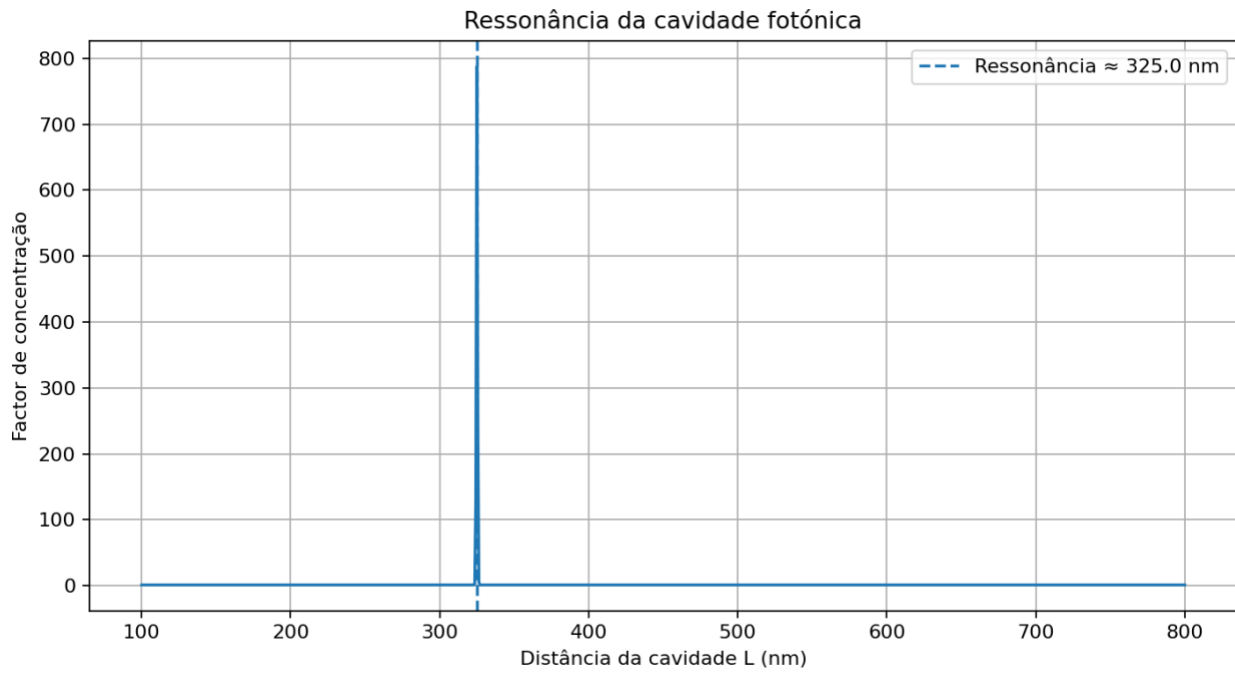


Figura 1 — Ressonância da cavidade fotónica. O pico estreito representa a condição de ressonância em torno de $L = \lambda/2$.

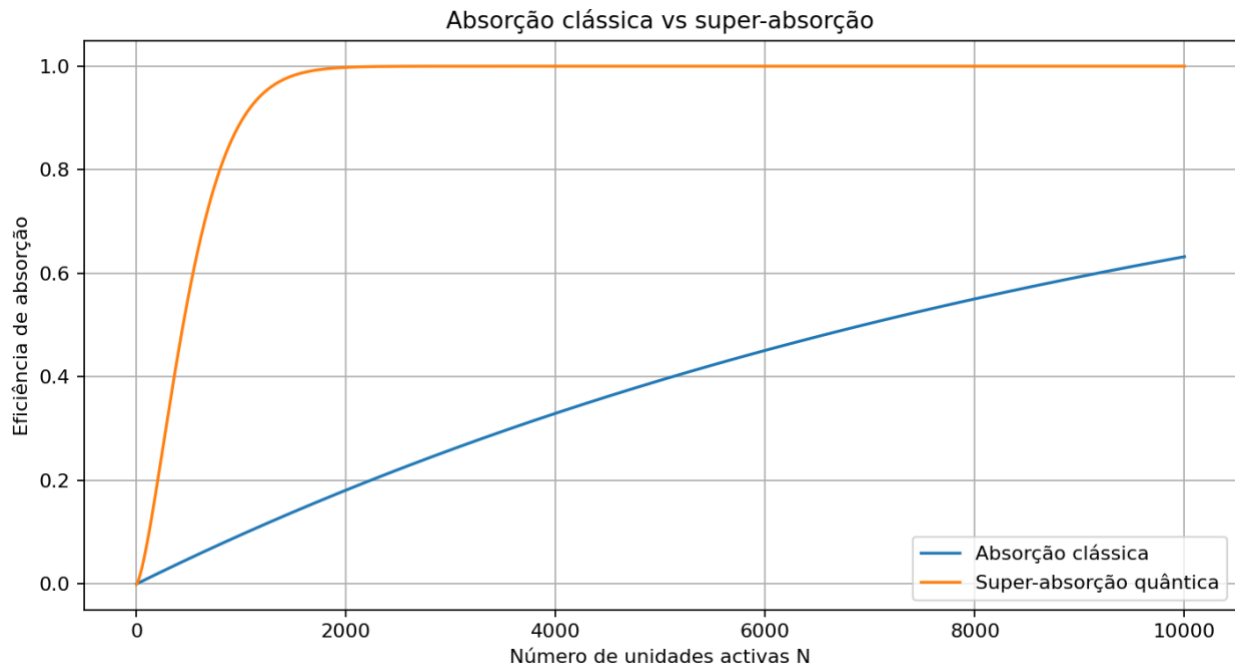


Figura 2 — Comparação entre absorção clássica e super-absorção. O modelo mostra a vantagem inicial do regime cooperativo.

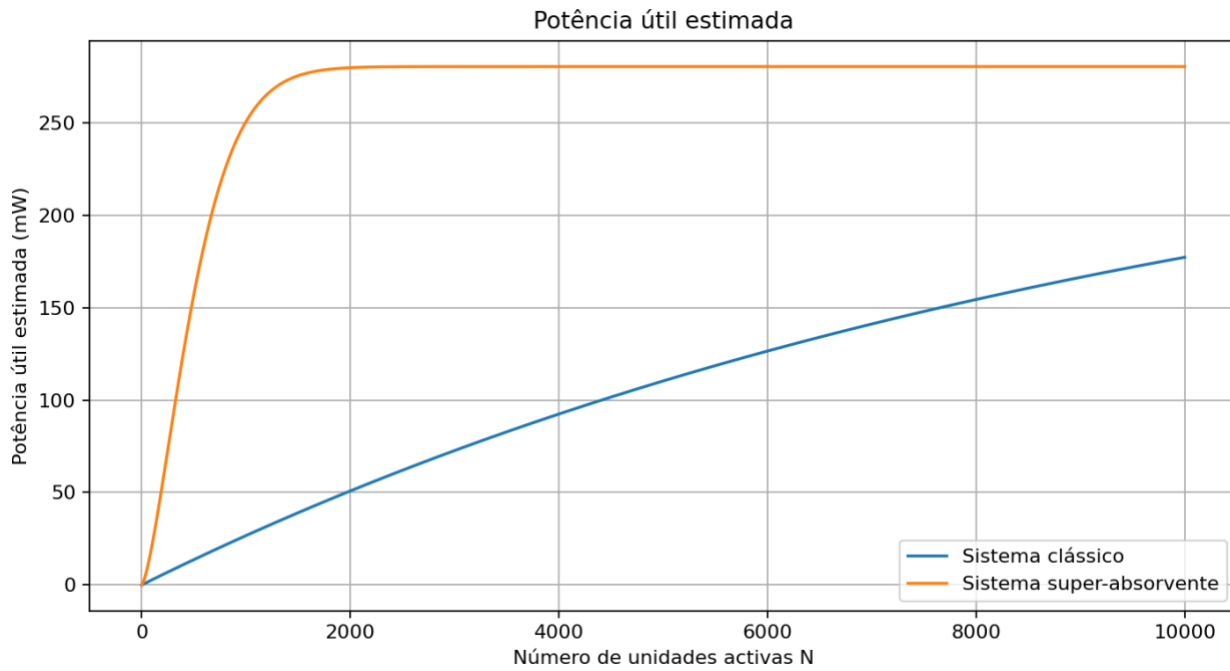


Figura 3 — Potência útil estimada. A curva super-absorvente atinge rapidamente a saturação no modelo escolhido.

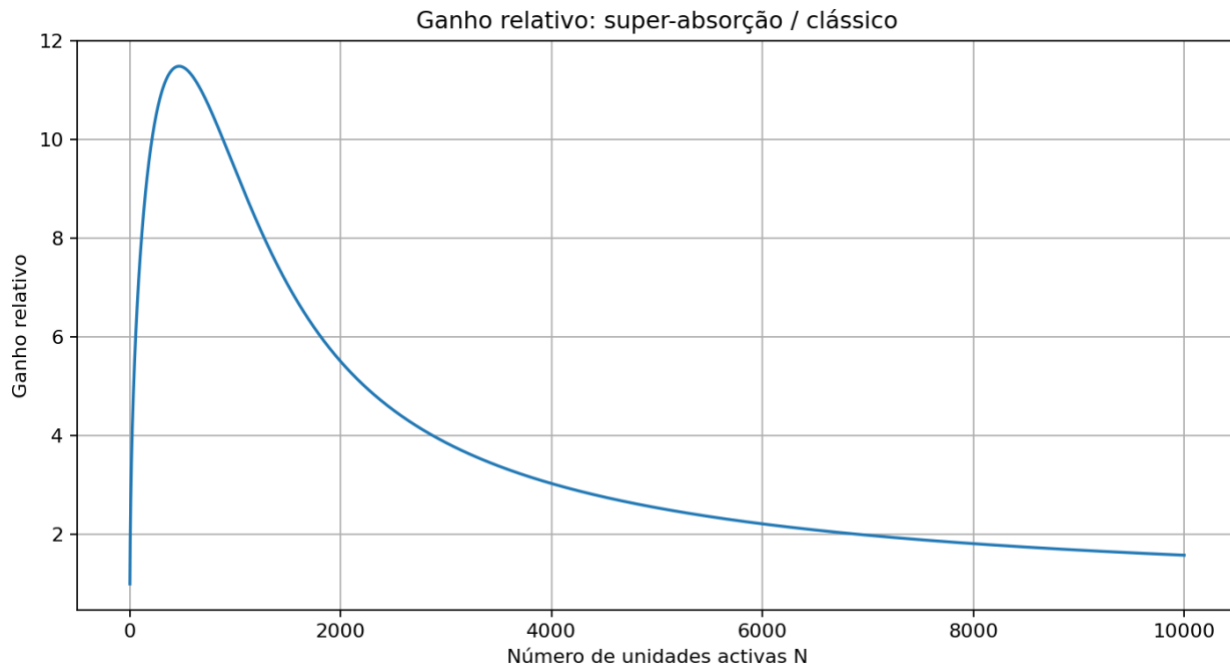


Figura 4 — Ganho relativo. O ganho é máximo numa zona intermédia, antes de ambos os regimes se aproximarem da saturação.

3. Interpretação técnica dos gráficos

O primeiro gráfico mostra que a cavidade é altamente selectiva. Um Q elevado aumenta o pico de concentração, mas também torna o sistema muito sensível a desvios geométricos, temperatura, imperfeições de fabrico e desalinhamento espectral.

O segundo gráfico ilustra a diferença conceptual entre absorção independente e absorção colectiva. No regime super-absorvente, a resposta cresce de forma não-linear com o número de unidades activas, até atingir saturação.

O terceiro gráfico traduz essa diferença em potência útil estimada. Como se trata de uma maquete matemática, os valores absolutos não devem ser lidos como previsão laboratorial. O valor real dependeria de perdas ópticas, dispersão, aquecimento, estabilidade dos estados excitados e eficiência da extracção eléctrica.

O quarto gráfico é talvez o mais instrutivo: o ganho relativo não cresce indefinidamente. Existe uma região útil de vantagem, seguida de saturação. Isto é importante porque impede interpretações fantasiosas: mesmo a física quântica tem contabilidade.

4. Limites e riscos científicos

- Não há extracção líquida de energia do vácuo: o efeito de Casimir pode alterar modos e forças, mas não fornece uma fonte contínua de energia útil.
- O efeito Casimir dinâmico pode gerar fótons reais, mas exige modulação externa; a energia vem dessa modulação.
- A super-absorção é promissora, mas a passagem de femtossegundos/nanosegundos para armazenamento prático é um salto tecnológico ainda enorme.
- A integração entre cavidades, materiais orgânicos, eléctrodos e transporte de carga é o ponto crítico de engenharia.
- Os resultados simulados são qualitativos e servem para orientar hipóteses, não para validar um dispositivo real.

5. Roteiro de desenvolvimento

Fase 1 — Simulação exploratória

Variar Q , α , N , $\eta_{\text{transporte}}$ e λ para mapear regiões promissoras. Acrescentar perdas ópticas e térmicas.

Fase 2 — Modelo físico mais rigoroso

Introduzir modelos de cavidade Fabry-Pérot, Tavis-Cummings/Jaynes-Cummings e dinâmica de população excitónica.

Fase 3 — Materiais e geometrias

Comparar microcavidades orgânicas, filmes finos, eléctrodos transparentes e metamateriais plasmónicos.

Fase 4 — Validação experimental

Testar resposta óptica ultrarrápida, corrente transiente, estabilidade temporal e eficiência de extracção.

6. Conclusão

A hipótese central deste white paper é que a próxima fronteira não está em “criar energia do nada”, mas em dominar a arquitectura microscópica da transferência energética. Cavidades, metamateriais e estados colectivos podem permitir dispositivos que carregam e descarregam em escalas temporais radicalmente inferiores às da electroquímica clássica.

O caminho mais plausível não é substituir baterias de lítio em automóveis ou casas num horizonte curto. É criar dispositivos especializados: sensores autónomos, fotodetectores, electrónica espacial, componentes de

computação quântica e micro-sistemas onde eficiência, velocidade e baixo ruído são mais importantes do que capacidade energética bruta.

O vazio quântico não é uma mina de energia; é uma gramática invisível. O futuro pertencerá a quem aprender a escrevê-la sem violar a sintaxe da Natureza.

Referências e fontes de investigação

1. CSIRO — “Australian scientists achieve energy storage and quantum battery breakthrough”, 2026. <https://www.csiro.au/en/news/All/News/2026/March/Quantum-battery-full-cycle>
2. RMIT University — “Scientists take major step towards a working quantum battery”, 2026. <https://www.rmit.edu.au/news/all-news/2026/mar/quantum-battery-prototype>
3. University of Melbourne — “First quantum battery developed and tested by Australian researchers”, 2026. <https://www.unimelb.edu.au/newsroom/news/2026/march/first-quantum-battery-developed-and-tested-by-australian-researchers>
4. Light: Science & Applications / Nature Portfolio — artigo sobre bateria quântica em microcavidade orgânica e super-absorção, 2026. <https://www.nature.com/articles/s41377-026-02240-6>
5. Quach et al. — “Superabsorption in an organic microcavity: toward a quantum battery”, arXiv. <https://arxiv.org/abs/2012.06026>
6. Alicki & Fannes — “Entanglement boost for extractable work from ensembles of quantum batteries”, Physical Review E, 2013. <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.87.042123>
7. Campaioli et al. — “Enhancing the charging power of quantum batteries”, Physical Review Letters, 2017. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.118.150601>
8. Wilson et al. — “Observation of the dynamical Casimir effect in a superconducting circuit”, Nature, 2011. <https://www.nature.com/articles/nature10561>
9. Lambrecht, Reynaud & Genet — revisões sobre forças de Casimir e flutuações do vácuo. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0302071>
10. SPIE Photonics Insights — revisão sobre interacção luz-matéria em nanocavidades plasmónicas, 2026. <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/photonics-insights/volume-5/issue-1/R01/Enhanced-lightmatter-interaction-in-plasmonic-nanocavities--principle-challenge-and/10.3788/PI.2026.R01.full>

Anexo — ficheiro de simulação

O código Python usado para gerar os gráficos acompanha o pacote anterior da simulação. Recomenda-se evoluir este primeiro modelo com perdas ópticas, ruído, alargamento espectral, dinâmica temporal dos estados excitados e transporte eléctrico não ideal.