

REFRIGERAÇÃO DE ESTADO SÓLIDO EM DATA CENTERS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA FÍSICA MULTICALÓRICA E O CONCEITO DE "AR-CONDICIONADO ATÔMICO"

Felipe Santos da Silva Flores Lopes¹

¹Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Brasil felipeflores1913@gmail.com

Resumo: Esta revisão avalia a refrigeração eletrocalórica para mitigar pontos quentes em centros de dados. Analisaram-se estudos de materiais cerâmicos avançados e a sua integração em microeletrônica. Estratégias de condução térmica e recuperação de energia otimizam o desempenho global, viabilizando o ar-condicionado atômico como alternativa sustentável à compressão de vapor.

Palavras-chave: Refrigeração de estado sólido; Efeito eletrocalórico; Gerenciamento térmico; Integração de *chiplets*; Termodinâmica de materiais.

INTRODUÇÃO

A miniaturização exponencial dos componentes eletrônicos, historicamente guiada pela Lei de Moore e pela escala de Dennard, tem sido o pilar do avanço na tecnologia da informação (Shalf, 2020). No entanto, à medida que a indústria de semicondutores avança para além do nó tecnológico de 2 nm, essa trajetória depara-se com barreiras físicas e econômicas intransponíveis. A transição para a escala atômica impõe desafios severos, como o vazamento de corrente por tunelamento quântico e o aumento drástico nos custos de fabricação (Morsy et al., 2025). Para contornar esse esgotamento, a indústria adotou a integração heterogênea baseada em *chiplets* — o empacotamento denso de múltiplos núcleos em um único substrato tridimensional (Li et al., 2020).

Embora essa nova arquitetura garanta a continuidade do aumento de desempenho computacional exigido pelas atuais infraestruturas de Inteligência Artificial (IA), ela cria um subproduto crítico: a geração de *hotspots* (pontos quentes) com altíssima densidade de potência térmica. Em data centers modernos, o gerenciamento desse calor deixou de ser um problema secundário de engenharia para se tornar o principal gargalo de desempenho e sustentabilidade (Li et al., 2024). Atualmente, os sistemas tradicionais de refrigeração baseados em compressores de vapor — que dependem de fluidos refrigerantes nocivos ao meio ambiente (gases de efeito estufa) e de peças mecânicas volumosas — são incapazes de extrair o calor diretamente da interface microscópica dos *chiplets*, além de consumirem uma parcela exorbitante da energia global.

Diante desse cenário, a comunidade científica tem voltado seus esforços para a refrigeração de estado

sólido através da física multicalórica, emergindo como uma alternativa disruptiva, silenciosa, compacta e ecologicamente sustentável (Hou et al., 2022). O destaque absoluto dessa vertente é o efeito eletrocalórico, um fenômeno termodinâmico no qual a aplicação e a remoção de um campo elétrico em materiais dielétricos específicos forçam o alinhamento e o desalinhamento de dipolos atômicos. Essa manipulação induz variações reversíveis de entropia e temperatura na rede cristalina do material, permitindo que ele atue como uma bomba de calor em escala nanométrica — um verdadeiro "ar-condicionado atômico" (Wang et al., 2020).

Apesar das provas de conceito demonstrarem que materiais cerâmicos, como o Tantalato de Escândio e Chumbo (PST), possuem uma eficiência energética comparável ou superior aos compressores mecânicos tradicionais (Nouchokgwe et al., 2021), a transição dessa tecnologia da bancada de laboratório para a prateleira dos data centers exige a superação de desafios complexos. É necessário otimizar não apenas a química dos materiais para atuarem em amplas faixas de temperatura ambiente, mas também projetar arquiteturas de integração que reduzam a resistência térmica do chip e garantam a viabilidade econômica do sistema em larga escala.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura para avaliar o estado da arte e a viabilidade da refrigeração eletrocalórica de estado sólido. Através de uma análise crítica das métricas termodinâmicas, inovações arquitetônicas e modelos físico-matemáticos recentes, este estudo busca elucidar como a engenharia de materiais avançados e as estratégias de recuperação de energia podem consolidar essa tecnologia como a



espinha dorsal do gerenciamento térmico sustentável para a próxima geração de microeletrônica.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL), de natureza exploratória e descritiva. Para garantir o rigor metodológico e a reprodutibilidade da pesquisa, adotou-se o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), estruturando a investigação em fases de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão de estudos.

Na prática, a adoção deste protocolo atua como um "funil de conhecimento", permitindo que uma vasta quantidade de informações dispersas na literatura seja filtrada de forma objetiva e transparente. Esse processo garante que o leitor tenha acesso apenas aos dados cientificamente validados e de maior relevância sobre a física multicalórica, mitigando vieses de seleção e garantindo que as conclusões do estudo sejam baseadas na melhor evidência disponível.

A estratégia de busca foi desenhada para capturar os avanços no estado da arte da refrigeração de estado sólido, com ênfase no efeito multicalórico aplicado ao gerenciamento térmico de dispositivos semicondutores. O levantamento de dados foi conduzido em março de 2026, utilizando as bases de dados acadêmicas Google Scholar, Portal de Periódicos CAPES e Scopus.

As *strings* de busca foram estruturadas em inglês e agrupadas em três eixos temáticos principais. Essa divisão tripartida foi estrategicamente escolhida para refletir os três pilares que definem a viabilidade de qualquer nova tecnologia de hardware: a eficiência fundamental da matéria-prima (a física), a engenharia de integração no chip (a arquitetura) e o custo comercial (o mercado). O primeiro eixo, focado na Análise Econômica e Viabilidade, utilizou combinações como: ("electrocaloric*" OR "multicaloric*" OR "solid-state cooling") AND ("techno-economic analysis" OR "economic feasibility" OR "cost analysis"), além de buscas por métricas de mercado (TCO) e custos de fabricação de materiais cerâmicos como o PST ("lead scandium tantalate" OR "PST"). O segundo eixo direcionou-se à Eficiência e Termodinâmica dos Materiais, empregando ("Lead scandium tantalate" OR "PST" OR "Pb(Sc,Ta)O₃") AND ("electrocaloric") AND ("material efficiency" OR "thermodynamic*" OR "Carnot"). O terceiro eixo focou no Gerenciamento Térmico em Microeletrônica, utilizando ("electrocaloric*" OR "multicaloric*" OR "caloric solid-state cooling") AND ("thermal management" OR "hotspot*" OR "data center*").

Para a seleção do portfólio bibliográfico, estabeleceram-se critérios de inclusão rigorosos: (a) artigos primários e de revisão publicados em periódicos de alto impacto científico (ex: *Science*, *Nature*, *Energy*, *Physical Review Applied*); (b) estudos focados em materiais eletrocalóricos, integração heterogênea e métricas termodinâmicas; e (c) publicações de vanguarda, com ênfase no período de 2024 a 2026. Foram priorizados estudos de prova de conceito empírica, como sistemas de refrigeração eletrocalórica de alto desempenho e o uso de redes tridimensionais de condução térmica para dissipação de *hotspots*.

Em contrapartida, para manter o foco estrito na inovação para data centers, estabeleceram-se critérios de exclusão: foram descartados estudos baseados exclusivamente em compressão de vapor tradicional, pesquisas sobre efeitos magnetocalóricos que não envolvessem a aplicação de campos elétricos, e modelos puramente teóricos sem perspectiva de aplicação em protótipos (baixo Nível de Maturidade Tecnológica - TRL). Para a etapa de síntese e extração de dados, os artigos selecionados na filtragem final foram analisados na íntegra. As variáveis termodinâmicas exatas — como a Variação Adiabática de Temperatura (ΔT_{ad}), o Fluxo de Calor dissipado (q) e o Coeficiente de Performance (COP) — foram extraídas e tabuladas para permitir uma comparação quantitativa direta entre os diferentes materiais e protótipos.

O delineamento temporal capturou modelagens termodinâmicas recentes de auto-acionamento, resfriamento controlado por interruptores térmicos passivos, e o estado da arte em sistemas eletrocalóricos. A gestão das referências e a eliminação de duplicatas foram realizadas no *software* Zotero. Após a aplicação rigorosa dos critérios de elegibilidade para adequação ao escopo de integração em microeletrônica, consolidou-se um *corpus* final de 23 estudos para a extração de dados e síntese qualitativa. Destaca-se a inclusão dirigida de pesquisas seminais sobre a eficiência gigante do Tantalato de Escândio e Chumbo e a otimização do Coeficiente de Performance (COP) através da recuperação de energia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Fundamentos Termodinâmicos do Ciclo Eletrocalórico

Para que a refrigeração de estado sólido seja implementada com sucesso na contenção de *hotspots* em data centers, é imperativo compreender a mecânica do ciclo eletrocalórico. Em termos fundamentais, quando um campo elétrico é aplicado a um material dielétrico específico, os seus dipolos atômicos

(anteriormente orientados de forma aleatória) são forçados a se alinhar (Hou et al., 2022). Essa transição abrupta de um estado desordenado para um ordenado reduz a entropia configuracional do material; para que a entropia total se conserve em condições adiabáticas, a temperatura da rede cristalina aumenta, expulsando calor para o ambiente (a fonte quente) (Hou et al., 2022). Ao remover o campo elétrico, os dipolos retornam ao estado de desordem original, fazendo com que o material absorva calor do entorno (a fonte fria), efetivando o resfriamento.

Para prever, otimizar e integrar esses materiais sob condições de alta densidade de potência no nível do silício, a modelagem termodinâmica baseada nas relações de Maxwell é mandatória. A variação isotérmica de entropia (ΔS) e a variação adiabática de temperatura (ΔT_{ad}) induzidas pela flutuação do campo elétrico são deduzidas indiretamente através da dependência da polarização (P) com a temperatura (T) (Son et al., 2022). Esse comportamento macroscópico é governado pelas Equações 1 e 2:

$$\Delta S = \int_{E_1}^{E_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_E dE \quad (1)$$

$$\Delta T_{ad} = - \int_{E_1}^{E_2} \frac{T}{\rho C_p} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_E dE \quad (2)$$

onde E é o campo elétrico aplicado (E_1 e E_2 representam os estados inicial e final do ciclo, respectivamente), ρ é a densidade do material e C_p é a capacidade térmica específica a pressão constante (Son et al., 2022). As equações revelam uma premissa vital para a engenharia de materiais: dielétricos que exibem uma transição de fase ferroelétrica abrupta — condição onde a derivada parcial da polarização em relação à temperatura $\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)$ atinge seu máximo negativo — oferecem o maior potencial de bombeamento de calor para "ar-condicionados atômicos" (Hou et al., 2022).

Contudo, além da geração de frio no próprio material, a eficiência real do sistema depende intrinsecamente da dinâmica de dissipação desse calor através das interfaces do *chiplet*. Em sistemas eletrônicos de alta frequência e densidade heterogênea, as resistências térmicas de contato e de espalhamento (*spreading resistance*) constituem os principais gargalos físicos para a remoção de fluxos de calor extremos (Garimella et al., 2008). O fluxo de calor dissipado (q'') na interface microscópica de um *hotspot* pode ser modelado em regime estacionário simplificado pela Equação 3:

$$q'' = \frac{T_{chip} - T_{ec}}{R''_{th,int} + R''_{th,bulk}} \quad (3)$$

onde T_{chip} é a temperatura da fonte de calor no núcleo de IA, T_{ec} é a temperatura transiente do material eletrocalórico no estado ativado, $R''_{th,int}$ é a resistência

térmica específica de interface (que inclui as perdas nas camadas de adesão e eletrodos) e $R''_{th,bulk}$ é a resistência térmica condutiva da própria matriz do dispositivo de resfriamento (Garimella et al., 2008).

A integração dessas formulações demonstra matematicamente que a alta condutividade não é um mero capricho arquitetônico. Se a resistência térmica total ($R''_{th,int} + R''_{th,bulk}$) não for drasticamente reduzida por meio de soluções de empacotamento avançadas, o ΔT_{ad} gerado pela Equação 2 não será capaz de superar a barreira térmica da Equação 3, sufocando o Coeficiente de Performance (COP) e impedindo que o calor seja efetivamente drenado do semicondutor. Esse acoplamento dinâmico exige que os novos dispositivos multicalóricos sejam co-otimizados em domínios elétricos, térmicos e de mecânica dos fluidos simultaneamente (Hou et al., 2022).

2. Desempenho do Tantalato de Escândio e Chumbo (PST)

Entre os candidatos de vanguarda para viabilizar as modelagens físicas descritas, o Tantalato de Escândio e Chumbo (PST) altamente ordenado destaca-se por sua capacidade excepcional de troca térmica. Medições diretas demonstram que o PST em sua forma volumosa (*bulk*) pode trocar uma quantidade de calor eletrocalórico mais de cem vezes superior ao trabalho elétrico estritamente necessário para acioná-lo (Nouchokgwe et al., 2021). Em termos de desempenho absoluto, este material exibe uma ΔT_{ad} de 3,7 K sob a aplicação de um campo elétrico de 40 kV/cm (Nouchokgwe et al., 2021). A integração rigorosa de materiais com essas propriedades comprova a viabilidade física de transferir o efeito eletrocalórico da escala atômica para o dispositivo prático.

3. Engenharia de Materiais e Otimização

Apesar do desempenho superlativo do Tantalato de Escândio e Chumbo (PST) em sua forma volumosa, a sua aplicação em data centers impõe desafios operacionais rigorosos, notadamente a necessidade de operar em uma ampla janela de temperatura ambiente e sob intensa carga térmica. Para contornar as limitações inerentes às transições de fase muito estreitas do material puro, a engenharia composicional tem se consolidado como uma estratégia imprescindível (Lu et al., 2023). Uma síntese comparativa das propriedades termodinâmicas alcançadas por diferentes estratégias de otimização de materiais eletrocalóricos é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo de desempenho eletrocalórico em diferentes arquiteturas e composições de materiais avançados.

Material / Arquitetura	Varição Adiabática Máxima (ΔT_{ad}) [K]	Campo Elétrico Aplicado [kV/cm]
PST Volumoso (Bulk)	3,7	40
PST Dopado com Zr (x=0.05)	2,6	30
PST Filme Fino (Eletrodos interdigitados)	15,7	1330
Óxido de Alta Entropia (HEPO) Filme	14,9	1120

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados adaptados de Nouchokgwe et al. (2021), Lu et al. (2023), Kovacova et al. (2022) e Son et al. (2025).

Conforme evidenciado na Tabela 1, a dopagem do PST com íons de Zircônio (Zr) eleva a temperatura de Curie do material, estabilizando o desempenho eletrocalórico sobre uma faixa térmica mais ampla (Lu et al., 2023). Embora o ΔT_{ad} sofra uma leve redução para 2,6 K em campos moderados de 30 kV/cm, o ganho em estabilidade operacional justifica a modificação química para aplicações contínuas (Lu et al., 2023).

Buscando maximizar o resfriamento absoluto, a transição do material volumoso para a arquitetura de filmes finos permite a aplicação de campos elétricos massivos sem atingir a ruptura dielétrica. Utilizando eletrodos interdigitados, filmes finos de PST já demonstraram uma variação de temperatura colossal de 15,7 K sob um campo extremo de 1330 kV/cm (Kovacova et al., 2022). Contudo, análises rigorosas de eficiência indicam que escalar essa arquitetura de volta para capacitores multicamadas (MLCCs) reduz a eficiência de troca de calor do material para um patamar cerca de quatro vezes menor que o volumoso, embora ainda permaneça altamente competitivo e comparável ao Gadolínio (Gd), o padrão-ouro na refrigeração magnetocalórica (Nouchokgwe et al., 2022). A otimização do ciclo termodinâmico por meio da regeneração verdadeira — variando o campo de forma sincronizada com o fluido ou sólido de transferência — é a estratégia primária para mitigar essas perdas arquitetônicas (Crossley et al., 2019).

Para superar o compromisso termodinâmico entre a aplicação de altos campos e a eficiência de materiais convencionais, a nova fronteira da ciência propõe o

uso de Óxidos Perovskitas de Alta Entropia (HEPOs). Essa classe de materiais explora a entropia configuracional inerente à sua estrutura cristalina para promover e estabilizar a entropia polar (Son et al., 2025). A modulação da desordem no sítio B das perovskitas permite o controle preciso da estabilidade da polarização remanescente (Son et al., 2025). Modelagens e medições em filmes finos de HEPO preveem efeitos eletrocalóricos gigantes, alcançando um ΔT_{ad} de até 14,9 K e variações de entropia de 11,5 J/kg·K (Son et al., 2025), abrindo um novo paradigma para a concepção de "ar-condicionados atômicos" altamente eficientes e adaptáveis.

4. Arquiteturas de Integração: Do Chiplet à Microfluídica

A transição da indústria de semicondutores para tecnologias de integração heterogênea, notadamente baseadas em *chiplets*, tem se consolidado como a via mais promissora para contornar o esgotamento prático da Lei de Moore e o aumento exponencial dos custos de fabricação (Li et al., 2020). Contudo, o empacotamento denso de múltiplos *dies* (núcleos heterogêneos) em um único substrato condensa a dissipação térmica em volumes extremamente confinados, gerando *hotspots* de altíssima densidade de potência (Li et al., 2020). A eficiência da refrigeração eletrocalórica depende, portanto, de como o calor é extraído dessas minúsculas interfaces tridimensionais.

Embora polímeros eletroativos ofereçam flexibilidade e alta suportabilidade a campos elétricos para o resfriamento de *hotspots*, sua inata e baixa condutividade térmica sempre representou um gargalo tecnológico. Para solucionar esse estrangulamento na dispersão fonônica e reduzir a resistência térmica macroscópica da matriz ($R''_{th,bulk}$) conforme modelado previamente na Equação 3, inovações recentes demonstraram a viabilidade de uma arquitetura interpenetrante, na qual uma rede condutiva térmica tridimensional (3-D) contínua é incorporada ao polímero eletrocalórico (Li et al., 2020). Esta matriz atua não apenas coletando rapidamente a energia térmica oriunda das variações de entropia dipolar impulsionadas pelo campo elétrico, mas também provê ganhos superlativos: um aumento de 300% na condutividade térmica do polímero e de 240% no seu desempenho eletrocalórico global, demonstrando eficácia na escala de protótipo para o resfriamento pontual de chips de alta frequência (Li et al., 2022).

Do ponto de vista mecânico e do transporte de massa térmica em dimensões reduzidas, sistemas baseados em tubos capilares eletrocalóricos microfluídicos flexíveis emergem como uma ponte entre a capacidade do material e a extração ativa do calor. Esses dispositivos aliam a conformidade geométrica

necessária para o acoplamento em eletrônica densa com uma densidade específica de potência de refrigeração considerada gigante (ultrapassando os 700 mW/cm^3), permitindo a evacuação rápida do calor absorvido pelo efeito eletrocalórico (Cui et al., 2022).

Apesar da eficiência dos arranjos microfluídicos, o limite máximo da confiabilidade em data centers repousa em sistemas operantes sem qualquer fluxo de fluido ou movimentação mecânica, o que previne desgastes e permite a elevação drástica na frequência de comutação. Dispositivos eletrocalóricos puramente em estado sólido controlados por chaves térmicas (*thermal switches*) resolvem essa restrição (Resende et al., 2024). Tais chaves utilizam princípios termoelétricos para modular ativamente o caminho de fluxo de calor, permitindo uma absorção térmica passiva com perdas minimizadas. Simulações operando em regime de estado estacionário constataram que, ao acoplar materiais eletrocalóricos a esses *switches*, é possível obter um Coeficiente de Performance (COP) superior a 1 operando sob *spans* de temperatura de até 6 K, o que estabelece diretrizes robustas para a viabilidade topológica de refrigeradores sólidos (Resende et al., 2024).

5. Protótipos, Desempenho de Sistemas e Viabilidade Econômica

A transição das arquiteturas de acoplamento local (como as redes 3-D e a microfluídica) para a engenharia de sistemas e protótipos em escala macroscópica evidencia métricas promissoras para a substituição das tecnologias convencionais de compressão de vapor. A Tabela 2 compila o desempenho e as estratégias de otimização de diferentes arquiteturas de resfriamento eletrocalórico, demonstrando a evolução da tecnologia em direção a sistemas completos.

Tabela 2 - Parâmetros de desempenho e limites termodinâmicos em arquiteturas e protótipos de sistemas eletrocalóricos.

Arquitetura / Dispositivo	Métrica de Desempenho Térmico	Observações e Ganhos
Limite Teórico em Sistemas de Resfriamento	Perfeição termodinâmica de 40% a 60%	Varição limite do material de 40 a 50 K; perdas < 10%
Sistema com Recuperação de Energia	Aumento de 2,9x no COP	Recuperação de 65% do trabalho elétrico via indutores
Sistema Integrado com Dissipador Radiativo	Dissipação de 240 W/m^2	Supera dissipadores metálicos em ambientes de alta temperatura
Módulo de Bomba de Calor de Estado Sólido	ΔT de $8,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ar ambiente)	Demonstração em escala de módulo (TRL 2/3) com polímeros

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados adaptados de Zichao Li et al. (2025), Defay et al. (2018), Seo et al. (2026) e Annapragada et al. (2018).

O estabelecimento de limites teóricos indica que os sistemas eletrocalóricos podem atingir uma perfeição termodinâmica de 40% a 60%, operando com perdas cíclicas irreversíveis inferiores a 10% e variações extremas de temperatura no material na ordem dos 40 a 50 K (Zichao et al., 2025). O sucesso para se aproximar desses limites teóricos na integração de arquiteturas densas como os *chipllets* depende criticamente da minimização das resistências térmicas de contato. Modelos termodinâmicos recentes para sistemas de resfriamento auto-acionados confirmam que o acoplamento de processos elétricos, mecânicos e térmicos — aliado a baixas resistências de interface — é vital para a otimização simultânea do diferencial de temperatura ΔT e do Coeficiente de Performance (COP) (Liu et al., 2026).

Adicionalmente, quando os dispositivos eletrocalóricos são acoplados a inovações em dissipação macroscópica, como estruturas radiativas não metálicas de alta condutividade, é possível alcançar fluxos de dissipação térmica de até 240 W/m^2 mesmo sob condições parasitas de alta temperatura, superando o desempenho dos tradicionais



dissipadores metálicos em data centers (Seo et al., 2026). A viabilidade térmica e energética destes sistemas consolida-se através da recuperação ativa de energia. A implementação de circuitos baseados em indutores e diodos para reaproveitar a energia capacitiva pode aumentar o COP do sistema em um fator de 2,9 (Defay et al., 2018).

Para que o conceito do "ar-condicionado atômico" transacione da escala de laboratório para a comercialização, é indispensável superar as barreiras financeiras. Historicamente, dispositivos térmicos de estado sólido, como as tecnologias termoeletrônicas baseadas no efeito de Seebeck, enfrentaram severos obstáculos de mercado; análises técnico-econômicas recentes demonstram que o custo por watt das implementações termoeletrônicas permanece cerca de 3,5 vezes superior ao de painéis fotovoltaicos equivalentes (A. Marzouk, 2024). Em contrapartida, módulos de bombas de calor eletrocalóricas já demonstraram empiricamente reduções de temperatura do ar ambiente na ordem de 8,4 °C utilizando matrizes poliméricas flexíveis e de baixo custo, viabilizando economicamente o ciclo de vida útil do sistema para a sustentabilidade das infraestruturas de Inteligência Artificial (Annapragada et al., 2018).

CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática evidencia que o esgotamento dos modelos clássicos de escalonamento dos semicondutores — materializado na transição para arquiteturas tridimensionais de *chipllets* — elevou a densidade térmica a patamares que exigem uma ruptura tecnológica imediata no gerenciamento de data centers. A refrigeração de estado sólido através da física multicalórica demonstra ser não apenas uma alternativa, mas a via mais robusta para substituir os obsoletos sistemas de compressão de vapor, mitigando a emissão de gases de efeito estufa e eliminando perdas mecânicas.

Os dados extraídos da modelagem termodinâmica e da engenharia de materiais confirmam a viabilidade física desta transição. Dielétricos avançados, destacando-se o Tantalato de Escândio e Chumbo (PST) e a nova fronteira dos Óxidos Perovskitas de Alta Entropia (HEPOs), provaram a capacidade de gerar variações adiabáticas de temperatura (ΔT_{ad}) na ordem de 15 K. Quando acoplados a circuitos de recuperação de energia capacitiva, esses materiais atingem limites de perfeição termodinâmica e multiplicam o Coeficiente de Performance (COP) do sistema em até 2,9 vezes, superando o desempenho das tecnologias termoeletrônicas convencionais.

Paralelamente, o gargalo histórico da extração do calor através das resistências de interface foi

contornado por inovações arquitetônicas macroscópicas. A integração de compostos poliméricos com redes de condução térmicas 3-D interpenetrantes e a modulação via interruptores térmicos passivos permitem o arrefecimento ativo e instantâneo direcionado aos *hotspots* na escala do encapsulamento. Economicamente, a implementação desses polímeros flexíveis de baixo custo reduz o Custo Total de Propriedade (TCO), sustentando a exequibilidade do sistema a nível industrial.

Embora os protótipos de módulos eletrocalóricos operem atualmente em Níveis de Maturidade Tecnológica (TRL) intermediários, o seu desenvolvimento contínuo é imperativo. O salto dessa tecnologia para a prontidão comercial dependerá do investimento contínuo na co-otimização das propriedades elétricas e mecânicas dos materiais, além da promoção da cooperação científica internacional. O amadurecimento do "ar-condicionado atômico" revela-se, portanto, uma estratégia fundamental para o avanço da nanotecnologia, desenhando a infraestrutura física de Inteligência Artificial ambientalmente sustentável da próxima década.

REFERÊNCIAS

- A. Marzouk, O. Thermoelectric generators versus photovoltaic solar panels: Power and cost analysis. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 8, 406–428, 2024.
<https://doi.org/10.55214/25768484.v8i5.1697>
- Annapragada, S. R., Verma, P., Sur, A., e Xie, W. *High-Efficiency Solid State Heat Pump Module* (DOE-UTRC--EE0007044). United Technologies Research Center (UTRC), Hartford, CT (United States). 2018. <https://doi.org/10.2172/1456857>
- Crossley, S., Nair, B., Whatmore, R. W., Moya, X., e Mathur, N. D. Electrocaloric Cooling Cycles in Lead Scandium Tantalate with True Regeneration via Field Variation. *Physical Review X*, 9, 041002, 2019.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.041002>
- Cui, H., Zhang, Q., Bo, Y., Bai, P., Wang, M., Zhang, C., Qian, X., e Ma, R. Flexible microfluidic electrocaloric cooling capillary tube with giant specific device cooling power density. *Joule*, 6, 258–268, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.12.010>
- Defay, E., Faye, R., Despesse, G., Strozyk, H., Sette, D., Crossley, S., Moya, X., e Mathur, N. D. Enhanced electrocaloric efficiency via energy recovery. *Nature Communications*, 9, 1827, 2018.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04027-9>



Garimella, S. V., Fleischer, A. S., Murthy, J. Y., Keshavarzi, A., e Et., A. Thermal Challenges in Next-Generation Electronic Systems. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2008. <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2008.2001197>

Hou, H., Qian, S., e Takeuchi, I. Materials, physics and systems for multicaloric cooling. *Nature Reviews Materials*, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00428-x>

Kovacova, V., Glinsek, S., Girod, S., e Defay, E. High Electrocaloric Effect in Lead Scandium Tantalate Thin Films with Interdigitated Electrodes. *Sensors*, 22, 4049, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22114049>

Li, M.-D., Shen, X.-Q., Chen, X., Gan, J.-M., Wang, F., Li, J., Wang, X.-L., e Shen, Q.-D. Thermal management of chips by a device prototype using synergistic effects of 3-D heat-conductive network and electrocaloric refrigeration. *Nature Communications*, 13, 5849, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33596-z>

Li, T., Hou, J., Yan, J., Liu, R., Yang, H., e Sun, Z. Chiplet Heterogeneous Integration Technology—Status and Challenges. *Electronics*, 9, 670, 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9040670>

Li, Z., Luo, H., Jiang, Y., Liu, Haichao, Xu, L., Cao, K., Wu, H., Gao, P., e Liu, Hong. Comprehensive review and future prospects on chip-scale thermal management: Core of data center's thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 251, 123612, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123612>

Liu, D., Yang, M., Bie, Q., Yin, X., Xu, P., Song, X., Dong, L., Zhang, Y., Li, B., Wu, H., Xu, Y., e Li, C. Thermodynamic model for self-actuated electrocaloric cooling thermal management. *Energy*, 342, 139678, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139678>

Lu, Y., Sun, X., Zhao, M., Jiao, S., Li, D., Chen, P., Zhang, W., Ye, K., Xu, L., You, Q., Cai, H.-L., e Wu, X. Enhanced Electrocaloric Effect of Lead Scandium Tantalate by Zirconium Doping. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15, 51252–51261, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c12412>

Morsy, M., Znid, F., e Farraj, A. A critical review on improving and moving beyond the 2 nm horizon: Future directions and impacts in next-generation integrated circuit technologies. *Materials Science in*

Semiconductor Processing, 190, 109376, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.109376>

Nouchokgwe, Y., Lheritier, P., Hong, C.-H., Torelló, A., Faye, R., Jo, W., Bahl, C. R. H., e Defay, E. Giant electrocaloric materials energy efficiency in highly ordered lead scandium tantalate. *Nature Communications*, 12, 3298, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23354-y>

Nouchokgwe, Y., Lheritier, P., Usui, T., Torello, A., Moul, A. E., Kovacova, V., Granzow, T., Hirose, S., e Defay, E. Materials efficiency of electrocaloric lead scandium tantalate multilayer capacitors. *Scripta Materialia*, 219, 114873, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114873>

Resende, P. M., Le Goupil, F., Fleury, G., e Hadzioannou, G. Solid-state electrocaloric cooler controlled by a thermal switch. *Physical Review Applied*, 21, 054021, 2024. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.054021>

Seo, D. H., Kim, H. R., Yun, J. H., Kwak, H., Kim, D. H., Heo, S.-Y., Ma, R., Lee, G. J., e Song, Y. M. Harnessing Outer Space for Improved Electrocaloric Cooling. *Advanced Functional Materials*, 36, 2419891, 2026. <https://doi.org/10.1002/adfm.202419891>

Shalf, J. The future of computing beyond Moore's Law. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378, 20190061, 2020. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0061>

Son, Y., Udovenko, S., Ayyagari, S. V. G., Barber, J. P., Nakamura, K., Rost, C. M., Alem, N., e Trolier-McKinstry, S. Polarization stability and its influence on electrocaloric effects of high entropy perovskite oxide films. *Acta Materialia*, 283, 120576, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120576>

Son, Y., Zhu, W., e Trolier-McKinstry, S. E. Electrocaloric Effect of Perovskite High Entropy Oxide Films. *Advanced Electronic Materials*, 8, 2200352, 2022. <https://doi.org/10.1002/aelm.202200352>

Wang, Y., Zhang, Z., Usui, T., Benedict, M., e Et., A. A high-performance solid-state electrocaloric cooling system. *Science*, 2020. <https://doi.org/10.1126/science.aba2648>

Zichao, L., Junye, S., Jiangping, C., e Xiaoshi, Q. Electrocaloric Cooling Materials and Systems: A Review and Perspective. *Journal of Refrigeration*,



42, 1–13, 2025. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4339.2021.01.001>