

O FUTURO DA REFRIGERAÇÃO MAGNETOCALÓRICA: SISTEMAS BASEADOS EM SUSPENSÕES DE NANOPARTÍCULAS DE MnFePSi

Felipe Santos da Silva Flores Lopes¹

Resumo: Sistemas convencionais de Refrigeração Magnetocalórica (RMC) baseados no ciclo AMR enfrentam limitações de engenharia, como perdas de pressão e transferência de calor ineficiente, dificultando o resfriamento rápido. Este trabalho objetiva analisar o potencial disruptivo de uma arquitetura de vanguarda que substitui o regenerador sólido por uma suspensão fluida de nanopartículas de MnFePSi. A metodologia é uma revisão bibliográfica focada, onde, da análise de 6 trabalhos-chave "catalogados" da literatura recente, sintetizam-se dados experimentais e teóricos. Os resultados quantitativos, extraídos de um protótipo de vanguarda para "destacar os valores" da inovação, demonstram a superioridade da nova abordagem, com ganhos reportados de 14,6% em eficiência (COP), 33,4% em densidade de potência e uma resposta térmica 56,3% mais rápida, permitindo operação em alta frequência (7.6 Hz). A discussão revela que este desempenho deriva do paradigma "tudo-em-um" e de vantagens teóricas da heterogeneidade nanométrica, que amplia a faixa de temperatura operacional. Apesar dos desafios de engenharia, como estabilidade e viscosidade, conclui-se que esta tecnologia representa uma mudança de paradigma e a rota mais viável para materializar o resfriamento sob demanda, ou "micro-ondas reverso".

Palavras-chave: Efeito magnetocalórico. Materiais inteligentes. Nanofluidos. Refrigeração magnética. Transferência de calor.

¹F. S.S. F. Lopes() Universidade Federal de Goiás (UFG). Campus Colemar Natal e Silva-CAE, GO, Brasil.
e-mail: felipeflores1913@gmail.com

INTRODUÇÃO

A Refrigeração Magnetocalórica (RMC) convencional, baseada no ciclo do Regenerador Magnético Ativo (AMR), enfrenta limitações de engenharia, como perdas de pressão em leitos fixos que reduzem a eficiência do sistema. Para superar esses desafios, uma inovação de vanguarda propõe a substituição do regenerador sólido por uma suspensão fluida (*slurry*) de nanopartículas magnetocalóricas. Nesta abordagem, as nanopartículas atuam simultaneamente como o refrigerante e o fluido de transferência de calor, simplificando a arquitetura do sistema e mitigando as perdas de pressão.

A viabilidade desta tecnologia foi validada por um protótipo com nanopartículas de MnFePSi, que demonstrou ganhos de eficiência, potência e uma resposta térmica 56,3% mais rápida, permitindo a operação em altas frequências de até 7.6 Hz (Serroune et al., 2024). Essa capacidade de operar em ciclos ultrarrápidos é o fator chave para materializar o conceito de "micro-ondas reverso". Diante disso, o objetivo deste trabalho é analisar o potencial disruptivo desta abordagem, avaliando os ganhos de desempenho reportados e discutindo suas implicações para o futuro da refrigeração rápida. Esta análise aprofunda um tópico apresentado em uma revisão bibliográfica mais ampla do autor sobre o estado da arte da RMC (Lopes, 2025).

METODOLOGIA

Este trabalho adota como procedimento uma revisão bibliográfica focada. A análise fundamenta-se em 6 trabalhos-chave recentes catalogados (Bohra et al., 2024; Engelbrecht et al., 2005; Lopes, 2025; Mirahmad et al., 2025; Rajamani et al., 2023; Serroune et al., 2024) que cumprem papéis distintos. Dentro deste universo, o estudo de Serroune et al. (2024) é a fonte primária dos dados quantitativos por ser o protótipo experimental de vanguarda. Os outros 5 trabalhos catalogados são usados para contextualizar a inovação, estabelecendo os benchmarks convencionais (Engelbrecht et al., 2005), os desafios de engenharia (Rajamani et al., 2023), os modelos teóricos (Bohra et al., 2024), as propriedades dos fluidos (Mirahmad et al., 2025) e o panorama geral (Lopes, 2025), que permitem "destacar os valores" do novo protótipo. A técnica de análise consistiu na síntese e discussão crítica dos resultados reportados, comparando as métricas de desempenho (COP, densidade de potência, etc.) com benchmarks tradicionais para avaliar o potencial disruptivo da nova abordagem.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O paradigma “tudo-em-um”

O ciclo do AMR convencional sofre com perdas de eficiência devido à queda de pressão gerada ao bombear um fluido através de um regenerador sólido poroso (Engelbrecht et al., 2005). A abordagem de suspensão de nanopartículas resolve este problema ao introduzir um paradigma “tudo-em-um”, integrando o material refrigerante (nanopartículas de MnFePSi) e o fluido de transferência de calor em um único meio de trabalho (*slurry*). Essa inovação elimina o regenerador sólido, simplificando a engenharia do sistema e removendo a principal causa das perdas de bombeamento. A melhoria na transferência de calor é atribuída a mecanismos como o movimento Browniano e a formação de uma camada molecular ordenada na interface partícula-líquido, que criam caminhos de baixa resistência térmica (Mirahmad et al., 2025).

Análise quantitativa dos ganhos de desempenho

Para "destacar os valores" desta inovação, é crucial entender que os dados quantitativos a seguir, extraídos de Serroune et al. (2024), não existem no vácuo. Eles são impactantes precisamente porque resolvem os entraves dos sistemas convencionais (Engelbrecht et al., 2005). A superioridade deste paradigma “tudo-em-um” não é meramente teórica; ela se traduz em ganhos de desempenho quantificáveis e expressivos. A análise dos dados experimentais reportados por Serroune et al. (2024) permite uma comparação direta entre o protótipo de suspensão de nanopartículas de MnFePSi e um sistema AMR convencional de referência, baseado em Gadolínio.

Os resultados, sintetizados no Quadro 1, demonstram avanços em todas as métricas críticas para uma aplicação comercial.

Quadro 1 – Ganhos de desempenho do sistema de nanopartículas em comparação com o sistema AMR convencional.

Métrica de Desempenho	Ganho Reportado
Coeficiente de Performance (COP)	+14,6%
Densidade de Potência	+33,4%
Velocidade de Resposta Térmica	+56,3%
Massa Total do Sistema	-24,8%

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Serroune et al. (2024).

A análise desses dados revela uma otimização multifacetada. O aumento de 14,6% no Coeficiente de Performance (COP) indica um sistema intrinsecamente mais eficiente do ponto de vista energético. Simultaneamente, o ganho de 33,4% na densidade de potência, aliado a uma redução de quase 25% na massa total, aponta para um dispositivo que é, ao mesmo tempo, mais potente e significativamente mais compacto e leve. Contudo, para a aplicação de resfriamento sob demanda, a métrica mais impactante é a velocidade de resposta térmica 56,3% superior. Este salto quantitativo na capacidade de troca de calor é o que habilita a operação em alta frequência, um fator determinante para alcançar o resfriamento em segundos.

A chave para o resfriamento rápido: Operação em alta frequência

O ganho de desempenho mais significativo para a aplicação de resfriamento sob demanda é, sem dúvida, a resposta térmica 56,3% mais rápida, uma melhoria que está diretamente ligada à capacidade do sistema de suspensão de nanopartículas de operar em frequências de ciclo muito mais elevadas do que os sistemas AMR convencionais. O protótipo de Serroune et al. (2024) demonstrou uma operação estável em frequências de até 7.6 Hz, o que se traduz em um ciclo termomagnético completo — magnetização, escoamento de fluido, desmagnetização e escoamento reverso — sendo executado em aproximadamente 0,13 segundos.

Essa alta frequência operacional é o que viabiliza uma taxa de transferência de calor superior. Em essência, ao completar mais ciclos de bombeamento de calor por segundo, o sistema é capaz de extrair energia térmica do ambiente a ser resfriado de forma muito mais acelerada. É precisamente essa capacidade que aproxima o conceito de "micro-ondas reverso" da realidade técnica. Enquanto sistemas convencionais operam em frequências mais baixas, limitados pela inércia térmica e pelas perdas de fluxo no regenerador sólido, a arquitetura de suspensão fluida remove essas barreiras, permitindo que a velocidade de resfriamento seja drasticamente aumentada e tornando o resfriamento em segundos uma meta tangível.

Modelagem teórica e o impacto da heterogeneidade nanométrica

A complexidade dos sistemas de nanopartículas não se limita aos desafios de engenharia, estendendo-se também à sua modelagem teórica. Conforme demonstrado por Bohra et al. (2024), modelos analíticos tradicionais, como o da tangente hiperbólica, que funcionam bem para materiais em bulk com uma única Temperatura Curie (T_C), falham em descrever adequadamente o comportamento de sistemas densos de nanopartículas.

A razão para essa discrepância reside na natureza intrinsecamente heterogênea dos materiais em nanoescala. A distribuição de tamanho e forma das partículas e a não homogeneidade química fazem com que o sistema exiba uma distribuição de valores de T_C em vez de um ponto de transição único e nítido. Para capturar esse fenômeno, Bohra et al. (2024) propõem o uso de um modelo de distribuição Gaussiana, que se ajusta com muito mais precisão aos dados experimentais.

Uma implicação importante dessa abordagem é que a heterogeneidade, embora complique a modelagem, resulta em um alargamento do pico da variação de entropia magnética (ΔS_M). Esse alargamento, por sua vez, leva a um aumento significativo da Potência de Resfriamento Relativa (RCP), uma métrica que avalia a utilidade do material em uma faixa de temperatura operacional. Portanto, a modelagem teórica confirma que as características inerentes aos sistemas de nanopartículas podem ser vantajosas para a construção de dispositivos com uma janela de operação mais ampla (Bohra et al., 2024).

Desafios e perspectivas

Apesar do potencial transformador, a transição para um produto comercialmente viável depende da superação de desafios de durabilidade e estabilidade. É crucial garantir a estabilidade coloidal da suspensão, evitando fenômenos como aglomeração e sedimentação que degradam o desempenho. Contudo, a estabilidade não é o único desafio. Um inconveniente comum em nanofluidos é o aumento da viscosidade, que eleva a potência de bombeamento necessária. Adicionalmente, existe um complexo compromisso de propriedades: a adição de nanopartículas aumenta a condutividade térmica (TC), mas pode reduzir a capacidade térmica específica (SHC) do fluido, dificultando a otimização do gerenciamento térmico (Mirahmad et al., 2025). Este desafio de integridade em ambientes fluidicos não é exclusivo desta tecnologia, sendo análogo aos problemas de degradação observados em sistemas com metais líquidos (Rajamani et al., 2023). Portanto, a perspectiva futura reside em estudos de envelhecimento acelerado e na engenharia de surfactantes ou revestimentos para as nanopartículas que garantam sua funcionalidade a longo prazo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho atingiu seu objetivo ao demonstrar que a abordagem de suspensão de nanopartículas representa uma potencial mudança de paradigma na RMC, e não apenas um avanço incremental. A análise dos resultados quantitativos da literatura corrobora que esta tecnologia resolve, de forma simultânea, múltiplos gargalos dos sistemas convencionais: a complexidade de engenharia, ao eliminar o regenerador sólido; a eficiência energética, com um COP superior; e, de forma mais crítica, a velocidade de resfriamento, ao viabilizar a operação em altas frequências. Conclui-se, portanto, que esta arquitetura é, atualmente, a rota tecnológica mais promissora para materializar o conceito de resfriamento sob demanda, ou "micro-ondas reverso".

Apesar do panorama otimista, a análise também identificou que a viabilidade comercial a longo prazo depende da superação de desafios relacionados à estabilidade da suspensão fluida. Diante disso, sugere-se que trabalhos futuros se concentrem em duas frentes complementares. A primeira, de caráter experimental, deve investigar a engenharia de superfícies das

nanopartículas, com o desenvolvimento de revestimentos ou surfactantes que garantam a estabilidade coloidal por toda a vida útil de um dispositivo. A segunda, de caráter computacional, pode empregar técnicas de *machine learning* para acelerar a descoberta de novas composições de nanopartículas, otimizadas não apenas para o efeito magnetocalórico, mas também para a estabilidade em ambientes fluídicos, representando um passo decisivo para o avanço final da tecnologia, e cujas propriedades possam ser previstas com maior acurácia por modelos analíticos avançados (Bohra et al., 2024).

REFERÊNCIAS

- Bohra, M., Alman, V., Khan, M. A., Singh, V., Toulkeridou, E., & Grammatikopoulos, P. (2024). Analytical modeling of magnetocaloric effect in dense nanoparticle systems. *Nano Select*, 5(6), 2300196. <https://doi.org/10.1002/nano.202300196>
- Engelbrecht, K. L., Nellis, G. F., & Klein, S. A. (2005). A numerical model of an active magnetic regenerator refrigeration system. In R. G. Ross (Ed.), *Cryocoolers 13* (pp. 471–480). Springer US. https://doi.org/10.1007/0-387-27533-9_60
- Lopes, F. S. S. F. (2025). *Refrigeração magnetocalórica: A física e os materiais por trás do conceito de "micro-ondas reverso"* [Artigo submetido para publicação]. Congresso Internacional Conexões Globais.
- Mirahmad, A., Shankar Kumar, R., Pato Doldán, B., Prieto Rios, C., & Díez-Sierra, J. (2025). Beyond thermal conductivity: A review of nanofluids for enhanced energy storage and heat transfer. *Nanomaterials*, 15(4), 302. <https://doi.org/10.3390/nano15040302>
- Rajamani, K., Toprak, M. S., Zhang, F., Dugulan, A. I., Brück, E., van der Meer, T., & Shahi, M. (2023). Unlocking the potential of magnetic refrigeration: Investigating the compatibility of the Ga-based liquid metal with a La(Fe,Mn,Si)13Hz magnetocaloric material for enhanced long-term stability. *ACS Omega*, 8(51), 49027–49036. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06724>
- Serroune, S. A., Khasani, I., Merrier, S., Devilliers, S., & Ryushi, T. (2024). Next-gen magnetocaloric cooling: MnFePSi nanoparticles for compact and sustainable MCHP systems. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, 20(2), 1065–1092. <https://doi.org/10.30574/wjbphs.2024.20.2.0908>