

MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE PERFORMANCE DE REFRIGERADORES ELASTOCALÓRICOS DE LIGAS METÁLICAS COM MEMÓRIA DE FORMA: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Raiene Almeida de Lima, raiene.almeida@ufvjm.edu.br¹

Bernardo Miguel Moreira Ramiro, bernardo.miguel@ufvjm.edu.br¹

Yasmim Luiz Tavares, yasmim.tavares@ufvjm.edu.br¹

Cláudia Soares Moreira, claudia.moreira@ufvjm.edu.br¹

José Ricardo Ferreira Oliveira, jose.ricardo@ufvjm.edu.br¹

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto de Ciência e Tecnologia, Rodovia MGT 367 – Km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina/MG, CEP 39100-000.

Resumo. A tecnologia de resfriamento elastocalórico baseada em ligas com memória de forma (SMAs) aproveita o efeito calórico gerado pela transformação de fase induzida por tensão nos materiais elastocalóricos para realizar a refrigeração. Essa tecnologia se destaca por ser ecologicamente correta, altamente eficiente e economizar energia, sendo considerada uma das alternativas mais promissoras para substituir a refrigeração convencional por compressão de vapor. Em comparação com as tecnologias de refrigeração magnetocalórica, eletrocalórica e barocalórica, o resfriamento elastocalórico equilibra custo, capacidade de refrigeração, eficiência e viabilidade. A estimativa da eficiência energética constitui uma etapa fundamental do desenvolvimento de um refrigerador elastocalórico. Neste sentido, o presente trabalho visa apresentar uma revisão da literatura de técnicas experimentais para medição do Coeficiente de Performance de refrigeradores elastocalóricos de SMA. O estudo compreende a análise da eficiência de refrigeradores de estado sólido em formato de fios e fitas metálicas.

Palavras-chave: Resfriamento Elastocalórico. Refrigeradores de Estado Sólido. Ligas com Memória de Forma. Coeficiente de Performance.

Abstract. Elastocaloric cooling technology based on shape memory alloys (SMAs) harnesses the caloric effect generated by stress-induced phase transformation in elastocaloric materials to achieve refrigeration. This technology stands out for being environmentally friendly, highly efficient, and energy-saving, and is considered one of the most promising alternatives to conventional vapor-compression cooling. Compared to magnetocaloric, electrocaloric, and barocaloric cooling technologies, elastocaloric cooling offers a balanced combination of cost, cooling capacity, efficiency, and feasibility. Estimating energy efficiency is a fundamental step in the development of an elastocaloric refrigerator. In this context, the present work aims to present a literature review of experimental techniques for measuring the Coefficient of Performance of SMA-based elastocaloric refrigerators. The study involves analyzing the efficiency of solid-state refrigerators in the form of metallic wires and ribbons.

Keywords: Elastocaloric Cooling. Solid-State Refrigerators. Shape Memory Alloys. Coefficient of Performance.

1. INTRODUÇÃO

A refrigeração tornou-se uma tecnologia essencial na vida moderna para a preservação de alimentos e medicamentos, o transporte em cadeia do frio e o resfriamento de ambientes em residências e empresas. O método de resfriamento predominante atualmente é a antiga tecnologia de compressão de vapor, que aproveita o calor latente das transformações gás-líquido de refrigerantes químicos para gerar resfriamento. No entanto, o uso excessivo de refrigerantes químicos tem causado sérias consequências ambientais, como a destruição da camada de ozônio e o aquecimento global. Ademais, o sistema de refrigeração por compressão de vapor alcança eficiências exergéticas de até 50 %, mostrando que há ainda espaço para melhorias. Para enfrentar esses desafios e mitigar a crise energética, métodos de resfriamento em estado sólido, que não utilizam refrigerantes convencionais, surgiram como uma solução promissora, especialmente para aplicações específicas. Os efeitos calóricos dos materiais são ativados por estímulos externos para realizar o resfriamento. A tecnologia de resfriamento calórico inclui os efeitos Elastocalórico, Magnetocalórico, Barocalórico e Eletrocalórico,

que são ativados por forças externas, como campos magnéticos, tensão mecânica, pressão hidrostática e campos elétricos, respectivamente.

Embora o resfriamento elastocalórico esteja em fase de desenvolvimento, ele já demonstra desempenho adequado para algumas aplicações. Contudo, para que sua comercialização seja viável, é necessário encontrar um equilíbrio entre confiabilidade, custo e facilidade de manutenção. O desenvolvimento de materiais inteligentes, como as ligas com memória de forma (SMA), tem grande importância para tornar essa tecnologia acessível. Esta classe de materiais avançados possui propriedades únicas, como o efeito de memória de forma e a superelasticidade, ambas associadas à transformação martensítica termoelástica, o que as torna adequadas para aplicações em refrigeração.

Quando a SMA é submetida a uma carga mecânica além de sua tensão de saturação, a fase austenítica sofre uma transformação exotérmica, convertendo-se em martensita e liberando calor latente para o ambiente. Por outro lado, durante o alívio da carga, ocorre a transformação reversa de martensita para austenita quando a tensão diminui abaixo de sua tensão de saturação, resultando em uma transformação endotérmica que absorve calor latente e promove o resfriamento da SMA. O carregamento e descarregamento cíclicos da SMA permitem a operação do sistema de resfriamento elastocalórico, aproveitando o calor latente do material elastocalórico ao trocar calor com um fluido de transferência de calor ou um reservatório térmico.

A estimativa da eficiência energética constitui uma etapa fundamental do desenvolvimento de um refrigerador elastocalórico. Neste contexto, o presente trabalho visa apresentar uma revisão da literatura de técnicas experimentais para medição do coeficiente de performance (COP) de refrigeradores de estado sólido fabricados com SMA. Especificamente, o estudo compreende a análise da eficiência de refrigeradores de estado sólido em formato de fios e fitas metálicas.

2. MÉTODOS

O método utilizado neste trabalho foi a revisão sistemática da literatura, realizada para fornecer um levantamento abrangente e consistente da tecnologia de resfriamento elastocalórico. Essa revisão tem como objetivo descrever detalhadamente a tecnologia, evidenciar seus benefícios e compará-la com a tecnologia de compressão de vapor. O método baseia-se na análise de literatura científica para coletar e interpretar informações sobre essa nova alternativa de refrigeração, a fim de responder a perguntas de pesquisa específicas. Com base nos argumentos da introdução, foram levantadas as seguintes questões: Quais são os benefícios do novo sistema de resfriamento? Quais são os obstáculos para sua implementação? Quais materiais são adequados para o resfriamento calórico? A escolha desses materiais depende de algum fator específico?

A revisão sistemática da literatura busca responder a essas questões, assim como a outras que possam surgir. A pesquisa foi conduzida em bases de dados renomadas, utilizando a palavra-chave "efeito elastocalórico". Embora muitos artigos científicos tenham sido encontrados, 14 foram selecionados para este estudo, com base na relevância para os objetivos do trabalho. Apesar da grande importância, foram desprezados para este trabalho quaisquer equacionamentos matemáticos, dando enfoque apenas aos conceitos.

Os artigos selecionados foram organizados em uma planilha no Excel, apresentada na Figura 1, contendo informações essenciais, como título, autores, palavras-chave e referências. A planilha também inclui resumos elaborados pelos autores do trabalho, destacando os principais pontos de cada artigo. As perguntas levantadas foram plenamente respondidas pelos resumos que foram obtidos por meio dos artigos e são discutidas em detalhe na seção de resultados e discussão. Através dos artigos revisados, foi possível também observar o breve estudo de outros tipos de resfriamento calórico, realizando uma comparação com o resfriamento elastocalórico. Esses outros tipos foram organizados em um gráfico, conforme Figura 2, a fim de apresentar ideias para projeções futuras de trabalho.

Autores	Título	Resumo	Palavras-chave	DOI
Stefano Dall'Olio Ziga Ahčin Anđelko Jovanović Farham Kabirifar Miha Brojan Jana Tudek	Desenvolvimento de um regenerador elastocalórico baseado em compressão: uma revisão	Por muito tempo, a tecnologia de compressão de vapor é usada no dia a dia por toda a população, com os materiais com memória de forma são reconhecidos por suas propriedades únicas: o efeito de memória. A diferença mais importante entre tensão e compressão está na resistência à fadiga. Na compressão, a maioria dos dispositivos elastocalóricos são baseados em carga de tração ou compressão. Boa parte. Dentro as geometrias disponíveis no mercado, como placas, fios e tubos, estes últimos apresentam mais assim melhor resistência à fadiga e propriedades de transferência de calor. No entanto, este O grande debate do artigo no desenvolvimento do regenerador elastocalórico é em relação à tensão. O estudo dos ciclos é de extrema importância para o desenvolvimento do regenerador. Um ciclo termo	Efeito elastocalórico, ligas com memória	https://doi.org/10.1007/978-3-319-04483-2_4
Jun Cui	Esforços iniciais em resfriamento elastocalórico (2002 a 2004)	O sistema de refrigeração convencional, compressão a vapor, é comumente usado no cotidiano. Nesse A refrigeração usando ligas com memória de forma recebe o nome de refrigeração termoelástica ou e A liga de memória de forma mais conhecida (liga de Nitinol), trilha em baixa intensidade de Do ponto de vista dos materiais, o NiTi é caro e requer uma carga elevada para induzir a trans Para fazer sobre o elastocalórico, é necessário de maneira geral apresentar os magnetocalóricos, vort	Memória de forma, Superelasticidade, Te	https://doi.org/10.1007/978-3-319-04483-2_4
Yao Wang Ye Liu Shiqin Xu Guoqin Zhou Jianlin Yu Sunan Qian	Rumo ao resfriamento elastocalórico prático	O resfriamento elastocalórico é uma tecnologia de resfriamento em desenvolvimento e sustentável com potencial para aplicações em diversas escalas. Apesar do seu desempenho já ser adequado para certas aplicações, é preciso encontrar um equilíbrio entre confiabilidade, custo e facilidade de manutenção para viabilizar a comercialização em um futuro próximo. O artigo tem como objetivo apresentar e discutir diversos métodos de melhoria da transferência de calor, do mesmo modo que possíveis esquemas de recuperação de trabalho. É para que esse objetivo seja alcançado, são necessárias técnicas de fabricação, caracterização, modelagem e simulação. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04483-2_4	Refratamento elastocalórico, Nitinol, Tran	https://doi.org/10.1007/978-3-319-04483-2_4
Jingyuan Yu Florian Brueckner Lars Bunka Hermann Ossmer Eckhard Quandt Shuichi Miyazaki Masafumi Kishi Farzahn Kordizadeh	Dispositivos de resfriamento elastocalóricos baseados em R	O sistema de refrigeração convencional, compressão a vapor, é comumente usado no cotidiano. Nesse A refrigeração usando ligas com memória de forma recebe o nome de refrigeração termoelástica ou e A liga de memória de forma mais conhecida (liga de Nitinol), trilha em baixa intensidade de Do ponto de vista dos materiais, o NiTi é caro e requer uma carga elevada para induzir a trans Para fazer sobre o elastocalórico, é necessário de maneira geral apresentar os magnetocalóricos, vort	Refratamento elastocalórico, Fitas de te	https://doi.org/10.1007/978-3-319-04483-2_4

Figura 1. Planilha dos artigos.

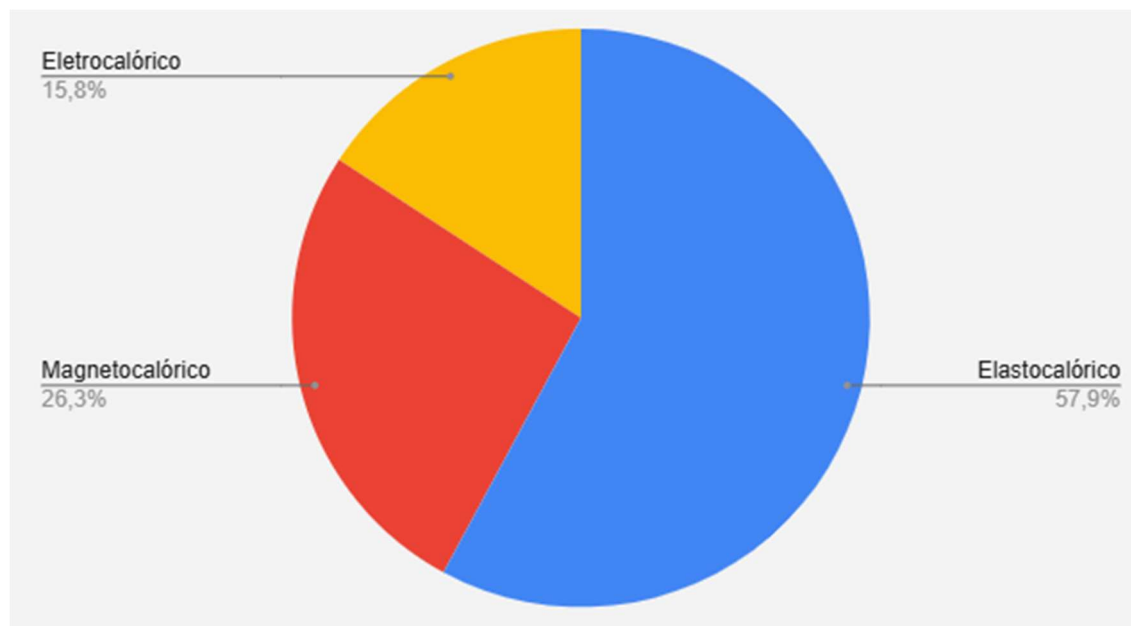


Figura 2. Gráfico dos Tipos de Resfriamento Calórico

3. REVISÃO DA LITERATURA

Chen et al (2021), em seu trabalho de revisão, apresentaram uma visão geral do resfriamento elastocalórico, desde os fundamentos até o design dos dispositivos. Primeiramente, foram descritos os fundamentos termodinâmicos e os métodos de caracterização do efeito elastocalórico. Em seguida, foram resumidos os avanços da pesquisa e os desafios relacionados aos materiais com memória de forma (SMAs) à base de NiTi, Cu, Fe e ferromagnéticos como refrigerantes elastocalóricos. Além disso, foram propostas perspectivas de desenvolvimento e aplicação de materiais elastocalóricos de alto desempenho. Por fim, o progresso dos protótipos de resfriamento elastocalórico também foi analisado e discutido pelos autores.

Wang et al. (2023) revisaram os principais métodos de preparação e os avanços recentes em refrigerantes de estado sólido à base de ligas com memória de forma (SMAs), incluindo os métodos mais estudados, como fusão e fundição, laminação e trefilação, e os métodos menos explorados, como deposição por sputtering e manufatura aditiva. As principais propriedades dos materiais elastocalóricos (eCM) utilizados como refrigerantes de estado sólido foram analisadas, incluindo o efeito elastocalórico (eCE), a faixa de temperatura operacional, a histerese de tensão e a estabilidade ciclável. Os desafios para a comercialização da tecnologia de refrigeração em estado sólido, incluindo os eCMs à base de SMAs e suas propriedades essenciais, foram discutidos. As características e a aplicabilidade dos diferentes métodos de preparação são comparadas, e suas vantagens e limitações foram resumidas. Além disso, os autores discutiram as conquistas mais recentes da pesquisa e as direções de desenvolvimento dos eCMs à base de SMAs, com o objetivo de inspirar a exploração de novas tecnologias para eCMs com excelente eCE e propriedades de fadiga aprimoradas, pois essas propriedades são fundamentais para a tecnologia de resfriamento em estado sólido.

Mevada et al. (2024) revisam de forma abrangente os fundamentos dos sistemas de resfriamento elastocalórico, incluindo o ciclo termodinâmico e os diversos materiais utilizados. Além disso, foram apresentados os avanços mais recentes em sistemas elastocalóricos, com foco na melhoria da transferência de calor, no desenvolvimento de atuadores e no resumo de protótipos. Adicionalmente, os autores introduzem um novo parâmetro de desempenho adimensional para avaliar diferentes protótipos elastocalóricos e discute aspectos-chave necessários para alcançar dispositivos elastocalóricos potencialmente de alto desempenho. Por fim, foi proposta uma abordagem para o desenvolvimento futuro de dispositivos elastocalóricos.

Cirillo et al. (2024) apresentaram um estudo numérico do efeito elastocalórico em um fio de NiTi utilizando duas configurações diferentes, analisadas por meio de um modelo 2D resolvido pelo método dos elementos finitos. O foco do trabalho foi o design dos canais frio e quente do dispositivo, comparando duas configurações: a configuração com obstáculos e a configuração cruzada. A configuração com obstáculos incluiu barreiras na área de transição para evitar a mistura indesejada entre o ar de entrada e saída dos regeneradores frio e quente, enquanto a configuração cruzada apresentou um arranjo equidistante entre as seções de entrada e saída para evitar fenômenos de sucção nas seções de saída.

Mañosa e Planes (2024) desenvolveram as bases termodinâmicas e revisaram os avanços recentes do efeito elastocalórico em ligas com memória de forma não magnéticas e magnéticas. Os autores demonstraram que, nesta última

família de ligas, podem ocorrer efeitos multicalóricos induzidos pela combinação de campos mecânicos e magnéticos, o que pode abrir novas possibilidades de aplicação para esta classe de materiais.

Xu et al. (2024) apresentaram o estado da arte do resfriamento elastocalórico (eC) baseado em filmes de ligas com memória de forma (SMA). Os autores focaram nos seguintes filmes à base de TiNi: filmes binários de TiNi depositados por *magnetron sputtering*, filmes de TiNiCuCo ricos em Ti e lâminas de TiNiFe laminadas a frio. Dispositivos elastocalóricos de estágio único, contendo um único filme de SMA, serviram como referência para avaliar o desempenho do resfriamento elastocalórico. Esse desempenho foi comparado com arquiteturas avançadas de sistemas elastocalóricos, incluindo sistemas paralelizados e em cascata, para destacar possíveis caminhos para superar suas limitações em capacidade de resfriamento e faixa de temperatura do dispositivo.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou a importância da inserção desta nova alternativa de resfriamento no mundo. A adição da refrigeração elastocalórica à sociedade não apenas oferece soluções inovadoras e eficientes para problemas de resfriamento, mas também contribui para um futuro mais sustentável, alinhando-se com as metas globais de redução de emissões e uso eficiente de recursos. O custo é a principal preocupação para qualquer potencial cliente da tecnologia de resfriamento elastocalórico, que aumenta principalmente conforme o peso do sistema. Apesar das exigências de potência de refrigeração e amplitude de temperatura, a eficiência, junto ao custo, é o fator mais crucial para que a tecnologia elastocalórica possa competir com a tecnologia de compressão de vapor em pequenos equipamentos de refrigeração. Para o uso dessa tecnologia, é necessário atentar-se nos materiais que serão utilizados, no ciclo de vida e durabilidade, na eficiência energética do processo de resfriamento, no custo dos materiais e da tecnologia de fabricação, no desenvolvimento de aplicações, na sustentabilidade e impacto ambiental. O principal desafio é encontrar a composição e microestrutura ideais que maximizem as energias de transformação sem comprometer a funcionalidade. Além disso, um calor latente maior geralmente resulta em maior histerese, limitando ainda mais suas aplicações devido ao dano funcional após ciclos térmicos ou de estresse. A superação desses desafios pode levar à adoção mais ampla do resfriamento elastocalórico e a implementação dele.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas pela concessão de Bolsa de Iniciação Científica à autora Yasmim Luiz Tavares através do PABIC- Programa ABCM de Bolsas de Iniciação Científica. Os autores também gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, pela concessão de bolsa de Iniciação Científica à autora Cláudia Soares Moreira através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/FAPEMIG.

6. REFERÊNCIAS

- Chen, J., Lei, L. & Fang, G. Elastocaloric cooling of shape memory alloys: A review, *Materials Today Communications* 28, 102706 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102706>.
- Wang, S., Shi, Y., Li, Y., Lin, H., Fan, K. & Teng, X. Solid-state refrigeration of shape memory alloy-based elastocaloric materials: A review focusing on preparation methods, properties and development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 187, 113762 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113762>.
- Mevada, H., Liu, B., Gao, L., Hwang, Y., Takeuchi, I. & Radermacher, R. Elastocaloric cooling: A pathway towards future cooling technology, *International Journal of Refrigeration* 162, 86-98 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.03.014>.
- Mañosa, L., Planes, A. Elastocaloric Effect in Shape-Memory Alloys. *Shap. Mem. Superelasticity* 10, 89–98 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40830-024-00477-x>
- Cirillo, L., Greco, A. & Masselli, C. Comparison Between Two Different Rotary Configurations of an Elastocaloric Cooling Device. *Shap. Mem. Superelasticity* 10, 422–434 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40830-024-00508-7>
- Xu, J., Bruederlin, F., Bumke, L. et al. SMA Film-Based Elastocaloric Cooling Devices. *Shap. Mem. Superelasticity* 10, 119–133 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40830-024-00484-y>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.