



**XVIII CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR**  
São Paulo Expo – 13 à 15 de setembro de 2023

## **OPORTUNIDADES E DESAFIOS NA REFRIGERAÇÃO MAGNETOCALÓRICA**

### **PAPER 75**

#### **RESUMO**

O presente artigo discute as oportunidades e desafios da refrigeração magnetocalórica, uma tecnologia emergente alternativa a compressão mecânica de vapor, que utiliza o efeito magnetocalórico para refrigeração sem uso de gases nocivos ao meio ambiente. Os princípios básicos do funcionamento de refrigeradores magnéticos são apresentados, bem como os componentes fundamentais para a operação de tais sistemas. Para a melhor compreensão dos sistemas e contextualização do nível de maturidade tecnológica atual da tecnologia são apresentados dois protótipos desenvolvidos no grupo de pesquisa: uma adega de vinhos e um condicionador de ar magnéticos. Os resultados encontrados mostram que a adega de vinhos é capaz de operar dentro das especificações da aplicação, enquanto o condicionador de ar não foi capaz de atingir a capacidade de refrigeração pretendida devido à falta de refrigerante. Apesar disso, o consumo energético, custo e volume de ambos os protótipos ainda é um impedimento para a sua produção em larga escala e comercialização. Dentre os desafios e oportunidades identificados para o desenvolvimento de sistemas de refrigeração, é destacada a necessidade de explorar nichos alternativos na cadeia de refrigeração, bem como desenvolver uma cadeia de fornecedores de materiais e componentes. Além disso, é preciso desenvolver componentes capazes de superar as restrições atuais na operação do sistema e acoplar metodologias de modelagem e otimização. Esses desafios destacados para o aumento da maturidade tecnológica e comercialização de sistemas de refrigeração demonstram que há uma ampla gama de oportunidades no desenvolvimento desses sistemas.

**Palavras-chave:** Tecnologias inovadoras de refrigeração. Sistemas magnetocalóricos. Regenerador magnético-ativo.

#### **ABSTRACT**

This article discusses the opportunities and challenges of magnetocaloric refrigeration, an emerging technology that offers an alternative to the mechanical compression of vapor technology, that employs the magnetocaloric effect without the use of environmentally harmful gases. The basic principles of how magnetic refrigerators work are presented, along with the fundamental components necessary for the operation of such systems. To better understand the systems and contextualize the current level of technological maturity of the technology, two prototypes developed by the research group are presented: a magnetic wine cooler and an air conditioner. The findings show that the wine cooler can operate within the specifications of the application, while the air conditioner was not able to achieve the intended cooling capacity due to the lack of refrigerant. Nonetheless, the energy consumption, cost, and volume of both prototypes remain a challenge to their large-scale production and commercialization. Among the challenges and opportunities identified for the development of magnetocaloric refrigeration systems, the need to explore alternative niches in the refrigeration chain, as well as to develop a supply chain for materials and components,

is highlighted. Additionally, it is necessary to develop components capable of overcoming current operational restrictions in the system and to couple modeling and optimization methodologies. These challenges highlighted for the increase in maturity and commercialization of refrigeration systems demonstrate that there is a wide range of opportunities in the development of such systems.

**Keywords:** Innovative Refrigeration Technologies. Magnetocaloric Refrigeration. Active Magnetic Regenerator.

## 1 INTRODUÇÃO

A compressão mecânica de vapor é atualmente a técnica mais difundida em aplicações de refrigeração ao redor do mundo. Após mais de um século de desenvolvimento, é uma tecnologia eficiente, confiável, com alto nível de maturidade tecnológica e uma cadeia de fornecedores e distribuição altamente desenvolvida. Apesar disso, a restrição e banimento de muitos dos fluidos refrigerantes atualmente utilizados em tais sistemas, bem como a pressão da sociedade e de órgãos reguladores por equipamentos energeticamente mais eficientes provém os estímulos para que tanto indústrias como universidades e institutos de pesquisa busquem por tecnologias alternativas à tecnologia baseada no ciclo de compressão de vapor (GAUß et al., 2017). Dentre as diferentes opções exploradas atualmente (como sistemas termoelétricos, eletrocalóricos, barocalóricos, termoacústicos entre outros), sistemas de refrigeração magnetocalóricos representam uma das mais promissoras tecnologias para aplicações em temperatura ambiente, como refrigeradores e condicionadores de ar domésticos.

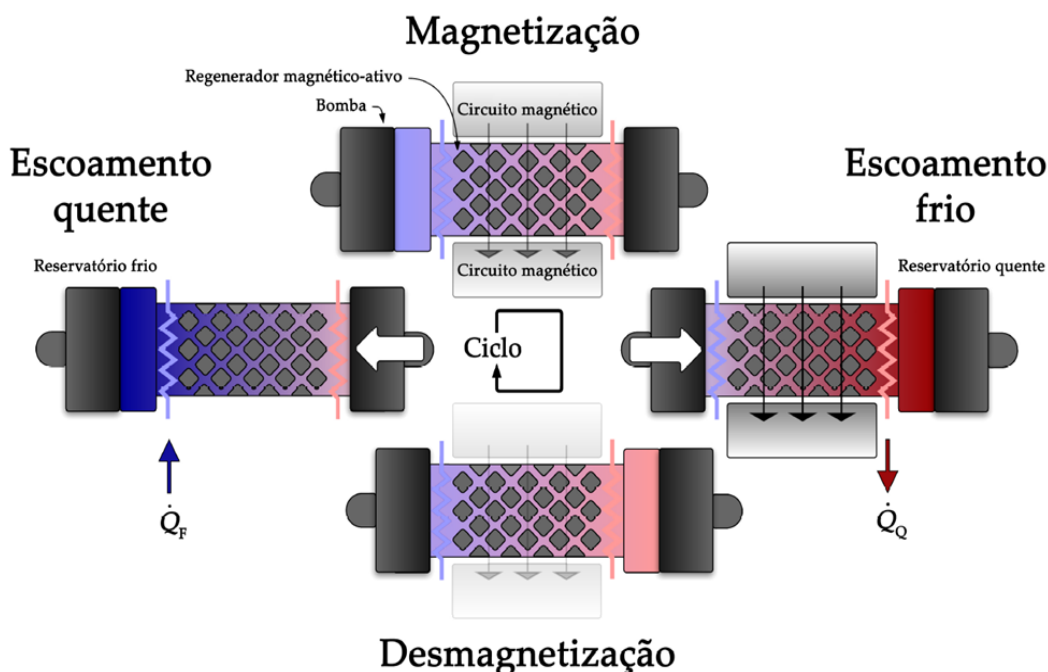
A operação de sistemas magnetocalóricos é baseada no chamado efeito magnetocalórico, a resposta térmica que alguns materiais, denominados magnetocalóricos, apresentam quando submetidos a uma variação no campo magnético aplicado sobre eles. O crescente interesse da indústria e academia por sistemas de refrigeração magnética nos últimos anos é impulsionado por dois fatores principais: (i) a reversibilidade do efeito magnetocalórico em determinadas ligas, que faz com que sistemas operando por essa tecnologia tenham o potencial de operar com altas eficiências, e (ii) o emprego de refrigerantes na fase sólida, o que assegura que não haja risco de vazamento de substâncias nocivas ao meio-ambiente ou a seres humanos decorrente da operação desses sistemas.

Muitos protótipos de refrigeradores magnéticos foram desenvolvidos nos últimos anos (GRECO et al., 2019). A maioria deles opera através do chamado regenerador magnético-ativo. Nesta configuração, utilizada devido à baixa magnitude do efeito magnetocalórico em termos de variação de temperatura, o material magnetocalórico é empregado como sólido refrigerante e matriz regenerativa. O ciclo termodinâmico é composto por quatro etapas, apresentadas em um diagrama esquemático na Figura 1:

1. Magnetização adiabática: Um campo magnético é aplicado sobre o material magnetocalórico, fazendo com que haja um aumento em sua temperatura;

2. Escoamento frio: Fluido vindo do trocador de calor frio atravessa o material magnetocalórico, absorvendo calor dele, e segue até o trocador de calor quente, onde irá rejeitar energia na fonte de calor quente;
3. Desmagnetização adiabática: O campo magnético é removido do material magnetocalórico, fazendo com que haja uma redução em sua temperatura;
4. Escoamento quente: Fluido vindo do trocador de calor quente atravessa o material magnetocalórico, rejeitando calor nele, e segue até o trocador de calor frio, onde irá absorver calor do ambiente a ser refrigerado.

Figura 1 – Ciclo do Regenerador Magnético-Ativo



Fonte: Elaborado pelos autores

Assim, a diferença de temperatura alcançada pelo sistema pode ser potencializada dos valores alcançados pelo efeito magnetocalórico, permitindo que os sistemas possam operar com diferenças na ordem de dezenas de graus Celsius. É importante ressaltar que o fluido de trabalho utilizado para o transporte de calor entre o material magnetocalórico e os trocadores de calor é usualmente água com aditivo anticorrosivo.

No geral, sistemas de refrigeração magnética são compostos por 4 componentes principais: (i) regeneradores magnético-ativos, onde é alojado o material refrigerante; (ii) circuito magnético: responsável por fornecer o campo magnético ao refrigerante; (iii) trocadores de calor: responsáveis pela troca térmica entre o fluido de trabalho e os trocadores de calor; (iv): sistema de gerenciamento hidráulico, responsável por assegurar o escoamento do fluido adequado para cada componente do sistema.

Apesar de anos de pesquisa, com dezenas de protótipos desenvolvidos, os

resultados alcançados ainda não foram capazes de demonstrar o potencial de eficiência da tecnologia e sistemas de refrigeração magnética ainda não são comercialmente disponíveis. O presente trabalho tem como objetivo apresentar os resultados alcançados por dois protótipos desenvolvidos de sistemas magnetocalóricos: uma adega de vinhos e um condicionador de ar, e discutir sobre os desafios e oportunidades que a tecnologia apresenta.

## **2 PROTÓTIPOS DE REFRIGERADORES MAGNÉTICOS**

Ao longo de mais de uma década de pesquisa em tecnologias inovadoras de refrigeração, o presente grupo de pesquisa já desenvolveu aparatos experimentais e modelos matemáticos para o projeto e caracterização individual de cada um dos componentes, provas de conceito e protótipos de sistemas de refrigeração magnética. Dentre eles, destacam-se a adega de vinhos e o condicionador de ar magnético, desenvolvidos nos últimos anos.

### **2.1 Adega de Vinhos**

Para o projeto do sistema, uma adega de vinhos comercialmente disponível no Brasil foi adquirida, caracterizada e seu sistema de refrigeração por compressão mecânica de fluidos foi substituído por um magnético. Deste modo, tem-se que ambos os sistemas, por compressão mecânica de fluidos e magnetocalórico, refrigeraram o mesmo gabinete. Pela caracterização experimental dos sistemas comercial e por demandas da aplicação, estabeleceu-se que o sistema magnetocalórico seria projetado para operar entre temperaturas ambiente de 25 °C no lado quente e entre 8 °C e 12 °C no lado frio. Para estas condições, a adega de vinhos comercial apresentou um COP de aproximadamente 0,7 (NAKASHIMA et al., 2021).

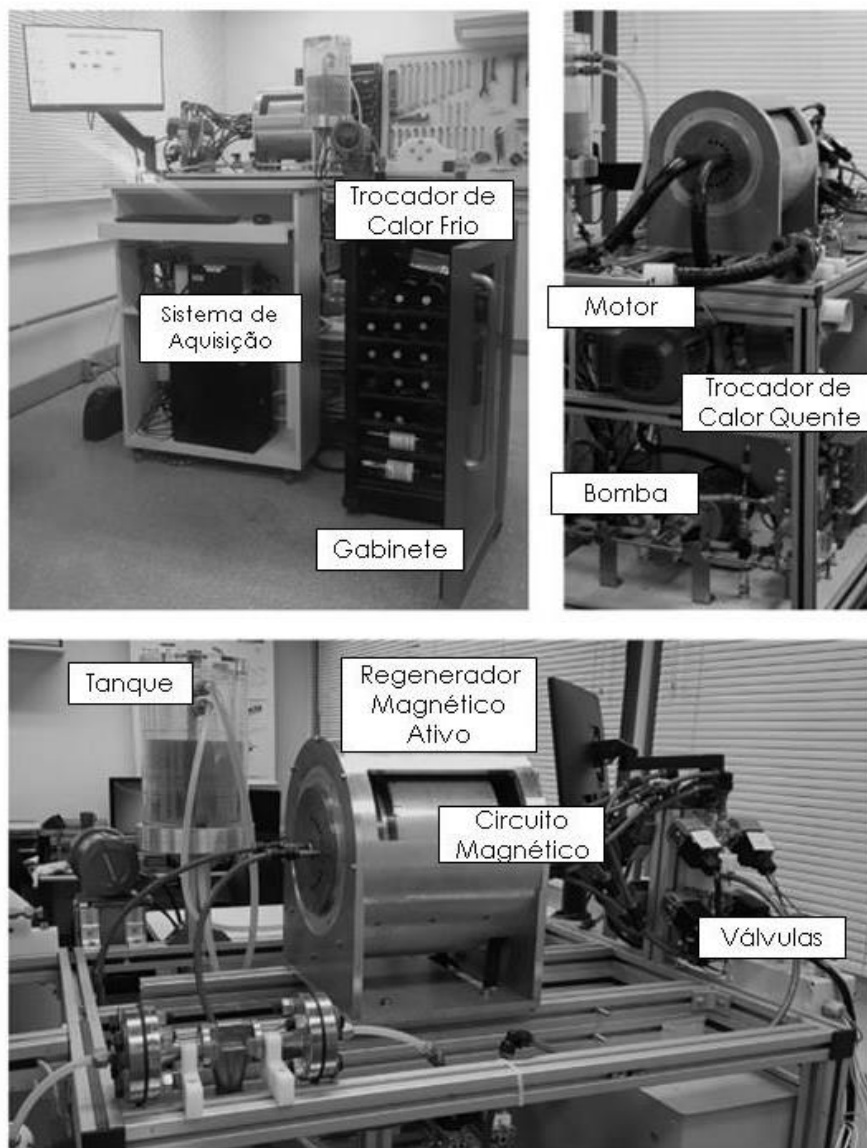
O primeiro passo para o projeto do sistema foi a definição das configurações dos principais componentes do sistema (NAKASHIMA et al., 2022). Para o arranjo dos regeneradores magnético-ativos e circuito magnético, uma configuração de rotor-estator foi selecionada. Trocadores de calor do tipo tubo-aleta assistidos por ventiladores foram empregados para fazer a troca térmica com os ambientes quente e frio, e válvulas solenóide para o gerenciamento hidráulico. Os principais componentes da adega de vinhos magnética são mostrados na Figura 2.

O circuito magnético é composto por dois cilindros concêntricos separados por um vão de ar. O cilindro externo é denominado rotor, é composto por segmentos de ímã permanente e materiais magnéticos moles e é rotativo. O cilindro interno é denominado estator, é composto por chapas de aço elétrico laminado e permanece estático. A densidade de fluxo magnético alcança valores de 1.07 T no patamar de campo alto e 0 T no de campo baixo (FORTKAMP et al., 2023).

No vão de ar entre o rotor e o estator são posicionados 8 regeneradores magnético-ativos. As carcaças dos componentes são feitas de aço inoxidável, e possuem o formato de setores de coroa circular. Cada

regenerador magnético-ativo é composto por Gadolínio e ligas de Gadolínio-Ítrio como materiais magnetocalóricos em um arranjo denominado multicamadas, empregado para a maximização do efeito magnetocalórico. Aproximadamente 1,7 kg de material magnetocalórico são empregados no sistema.

Figura 2 – Adega de vinhos magnetocalórica



Fonte: Nakashima et al (2023)

No lado frio, isto é, na parte interna do gabinete da adega de vinhos, um trocador de calor do tipo tubo aleta é utilizado, enquanto no lado quente, isto é, o ambiente externo, três trocadores de calor do tipo tubo aleta são utilizados em um arranjo em paralelo (PEIXER et al., 2022). As entradas e saídas do lado frio dos 8 regeneradores magnético-ativos são conectadas hidráulicamente às saídas e entradas do trocador de calor frio, respectivamente. Analogamente, as entradas e saídas do lado quente dos 8 regeneradores magnético-ativos são conectadas hidráulicamente às saídas

e entradas dos trocadores de calor quente, respectivamente. Ressalta-se que a adega de vinhos desenvolvida pelo grupo de pesquisa foi o primeiro protótipo reportado na literatura a operar com trocadores de calor adequados para a aplicação prática e a refrigerar propriamente um gabinete.

Um motor de indução é responsável pelo giro do rotor do circuito magnético, enquanto uma bomba hidráulica é responsável pelo bombeamento de fluido do sistema. A sincronização dos perfis hidráulico e magnético é feita por sensores hall. O sistema foi operado em frequências de 0,5 a 1 Hz e em vazões mássicas fluido de 125 a 225 l/h.

## **2.2 Condicionador de ar**

Para o projeto do condicionador de ar, estabeleceu-se que o sistema magnetocalórico seria projetado para operar com capacidade de refrigeração de 9000 Btu/h (2636,1 W) entre temperaturas de fontes de 35 °C no lado quente e entre 27 °C e 22 °C no lado frio (PEIXER et al., 2023a), esta última abaixo das usualmente utilizadas para caracterização e exigida por normas devido às particularidades do sistema magnetocalórico e demandas da aplicação. Para a caracterização do sistema, um calorímetro calibrado foi projetado e construído nas instalações do laboratório. O calorímetro é composto por duas câmaras: uma interna, para simular o ambiente frio, e uma externa, para simular o ambiente quente. Temperatura e umidade podem ser controladas na câmara fria e temperatura na câmara quente e medições de pressão, temperatura e umidade são realizadas.

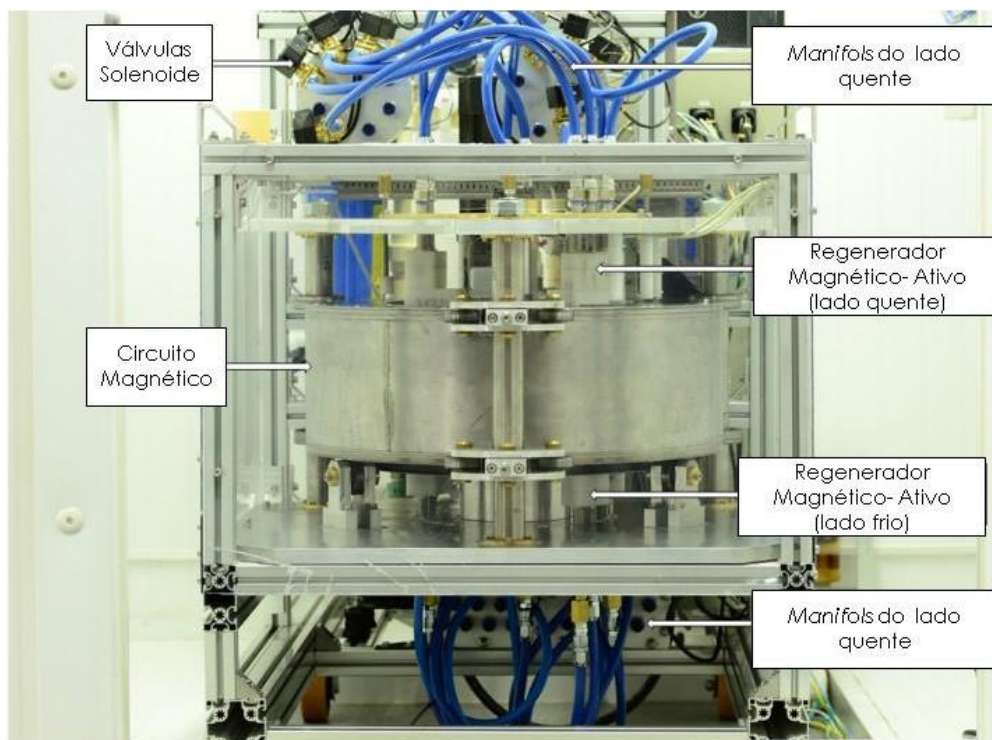
A configuração dos componentes do condicionador de ar magnético é análoga a da adega de vinhos. Para o arranjo entre os regeneradores magnético-ativos e circuito magnético, foi selecionada a configuração do tipo rotor-estator. Os trocadores de calor projetados são do tipo tubo-aletas, assistidos por ventiladores e com tubos em arranjos de múltiplos circuitos (PEIXER et al., 2022). O sistema de gerenciamento hidráulico é feito através de válvulas solenóides. Os principais componentes do condicionador de ar magnético são apresentados na Figura 3 (PEIXER et al., 2023b).

O circuito magnético do condicionador de ar magnetocalórico é composto por dois cilindros concêntricos, um rotor e um estator, com características construtivas e operacionais semelhantes aos da adega magnética. A densidade de fluxo magnético alcança valores de 1.17 T no patamar de campo alto e 0 T nos de campo baixo.

O sistema foi projetado para operar com 16 regeneradores magnético-ativos, mas por questões relacionadas à disponibilidade de material magnetocalórico foi testado com apenas 8. Isto significa que os experimentos realizados contaram com apenas metade da carga de refrigerante adequada ao sistema. As carcaças dos componentes são feitas de aço inoxidável, e possuem o formato de setores de coroa circular, em configuração semelhante às da adega de vinhos magnética. Por outro lado,

cada regenerador magnético-ativo do condicionador de ar magnético é composto por Gadolínio e ligas de Lantânio-Ferro-Silício como materiais magnetocalóricos no arranjo de multicamadas. Ao todo, aproximadamente 10,3 kg de material magnetocalórico são empregados no condicionador de ar magnético.

Figura 3 – Condicionador de ar magnetocalórico



Fonte: Peixer et al. (2023b)

O arranjo do circuito magnético e regeneradores magnético-ativos, juntamente com o trocador de calor quente, o sistema de gerenciamento hidráulico, bomba, motores e sistema de aquisição de dados compõem a chamada unidade de refrigeração magnética, semelhante a uma unidade condensadora em um sistema de compressão mecânica, e são posicionados na câmara externa do calorímetro. Na câmara fria, apenas o trocador de calor frio é posicionado. A sincronização dos perfis hidráulico e magnético é feita por sensores hall. O sistema foi operado em frequências de 0.6 Hz e em vazões mássicas fluido entre 600 e 1400 l/h.

### 3 RESULTADOS

Uma caracterização experimental detalhada envolvendo diferentes pontos de operação foi realizada tanto para a adega de vinhos quanto para o condicionador de ar magnéticos. Dado o objetivo do presente trabalho, foram selecionadas condições de operação representativas para cada um dos sistemas que possam ilustrar sua performance e possibilitem a determinação dos desafios e oportunidades da tecnologia. Tais condições são mostradas no Quadro 1.

Quadro 1 – Resultados da operação dos sistemas em condições selecionadas

<b>Métrica</b>	<b>Adega de vinhos</b>	<b>Condicionador de ar</b>
Frequência [Hz]	1	0,6
Vazão mássica [kg/s]	0,04861	0.333
Temperatura da fonte quente [°C]	25	35
Temperatura da fonte fria [°C]	11	27
Capacidade de refrigeração [W]	28	480
Potência Consumida [W]	140	1600
COP [-]	0,2	0,3

Fonte: Elaborado pelos autores

Do ponto de vista da operação, percebe-se que a adega de vinhos magnetocalórica foi capaz de operar de acordo com as demandas da aplicação, alcançando uma temperatura de 11 °C e uma capacidade de refrigeração adequada para tal.

Por outro lado, verificou-se que o condicionador de ar magnético pode alcançar uma diferença de temperatura entre as fontes compatível com as demandas da aplicação, mas que sua capacidade de refrigeração ficou abaixo dos valores requeridos. Ressalta-se que tal condição foi alcançada dada a operação do calorímetro, que permite que capacidade de refrigeração seja estabelecida por meio de resistências elétricas. As principais causas dos baixos valores de capacidade de refrigeração estão relacionados ao uso de metade da carga de material magnetocalórico no sistema. Primeiramente, o uso do dobro de material permitiria que o sistema operasse com o número original de regeneradores, 16, e faria com que a capacidade de refrigeração dobrasse. Além disso, dado o arranjo em que os regeneradores magnético-ativos foram posicionados, o acoplamento entre eles e o rotor do circuito magnético criou posições de alta atração magnética, o que não aconteceria em um arranjo contínuo com os 16 regeneradores. Tal fenômeno aumentou consideravelmente o torque para a movimentação do rotor, limitando assim a frequência de operação a 25 % do valor a que o sistema foi projetado. Com as duas alterações e otimizações propostas à primeira operacionalização do sistema, acredita-se que a capacidade de refrigeração do protótipo aumentaria substancialmente a ponto de se aproximar da condição estabelecida.

Por fim, ressalta-se o alto consumo energético e baixo COP alcançado tanto pela adega de vinhos quanto pelo condicionador de ar magnéticos. Tais resultados corroboram com as afirmações previamente destacadas neste artigo de que o potencial para operação com altas eficiências de sistemas de refrigeração magnética ainda não foi traduzido em resultados experimentais concretos nos sistemas. Uma série de fatores pode ser utilizada para justificar tais resultados. Primeiramente, tem-se que os protótipos em questão são alguns dos únicos reportados na literatura a considerar o



consumo energético global dos sistemas, com transdutores de potência acoplados diretamente aos atuadores, considerando todas as perdas dos sistemas. Além disso, ambos os sistemas possuem uma robusta estrutura de instrumentação, composta por sensores de temperatura, pressão e vazão mássica, além de componentes e conexões específicas para o seu acoplamento no sistema. Tais adaptações acarretam não apenas em um aumento considerável do volume do sistema, mas também no aumento do comprimento de tubulações e uso de componentes cognitivos que geram aumento da perda de carga e da troca de calor com o ambiente. Por fim, tem-se que ambos os sistemas foram projetados para permitir uma ampla variação nas condições de operação, com atuadores superdimensionados. Através da definição de um ponto específico de operação os componentes podem ser dimensionados propriamente para a otimização da eficiência.

#### **4 DESAFIOS E OPORTUNIDADES**

Apesar de toda a expectativa direcionada para sistemas de refrigeração magnética, a tecnologia ainda está em seus estágios iniciais de desenvolvimento. Os resultados de performance apresentados pela adega de vinhos e condicionador de ar magnéticos, mostram que diversos desafios ainda precisam ser superados para possibilitar a comercialização em larga escala e a geração do impacto esperado em termos ambientais e de redução de consumo energético. No entanto, tais desafios devem ser considerados como oportunidades pela academia e indústria de refrigeração, uma vez que uma ampla gama de desenvolvimentos ainda existem, as quais podem acarretar em impactos significativos na performance e custo dos sistemas.

Primeiramente, tem-se que a maioria dos protótipos desenvolvidos até o momento consiste em provas de conceito (GRECO et al., 2019), sem aplicações particulares na cadeia de refrigeração. Através de análises de viabilidades em nichos específicos, pode-se prospectar aplicações mais adequadas para a aplicação de sistemas magnetocalóricos. Um exemplo disso são a aplicação de refrigeradores magnetocalóricos em sistemas criogênicos, em especial sistemas de liquefação de hidrogênio (FENG et al., 2020), em que o uso de ímãs supercondutores e de materiais com altos efeitos magnetocalóricos e a necessidade por sistemas mais eficientes têm atraído cada vez mais o interesse, especialmente nos últimos anos.

Além disso, o fornecimento de materiais e componentes para o sistemas são atualmente um grande gargalo. Em termos dos circuitos magnéticos, não há componentes padronizados nem fornecedores específicos para aplicações em refrigeração magnética, sendo que cada circuito é ordenado por fornecedores altamente especializados que montam os componentes sob demanda. Já para os materiais magnetocalóricos, há poucos fornecedores no mundo, com baixa capacidade de fornecer as ligas em altas escalas, dentro das condições de performance e confiabilidade demandadas pelas aplicações. A ausência de padronização e confiabilidade dos componentes e baixa disponibilidade e alta especialização dos fornecedores faz com que

o custo de aquisição de circuitos magnéticos e regeneradores magnético-ativos seja um dos maiores gargalos de sistemas de refrigeração magnéticos na atualidade. Apesar disso, novos materiais magnetocalóricos são desenvolvidos e sua performance e potencial de aplicação explorados regularmente. Com o interesse e atenção na tecnologia aumentando cada vez mais cresce também a possibilidade do desenvolvimento de uma liga que se adeque às necessidades dos sistemas, em especial a alta confiabilidade estrutural, estabilidade química e magnitude do efeito magnetocalórico. Novas possibilidades de circuitos magnéticos que operem com bobinas supercondutoras ou eletroímãs (KLINAR et al., 2019) também geram novas oportunidades para o desenvolvimento de sistemas que operem com altas frequências e campos magnéticos.

Tem-se que além do custo, as características atuais dos materiais e componentes impõem severas restrições sobre a operação dos sistemas. Dentre elas, destacam-se duas principais. Primeiro, tem-se a limitação na frequência de operação sistema, que pode ser observada no Quadro 1. Tanto a adega de vinhos quanto o condicionador de ar magnético operam em frequências baixas em comparação com tecnologias baseadas no ciclo de compressão de vapor, o que é usual para sistemas de refrigeração magnética (GRECO et al., 2019). Atualmente a frequência é restringida especialmente pelo sistema de gerenciamento hidráulico, e permitir que maiores valores desse parâmetro sejam alcançados é fundamental para a compactação dos sistemas. Uma segunda característica importante imposta pelos materiais é dada pela geometria do meio poroso que compõe o material magnetocalórico. Diversas geometrias foram exploradas na literatura, apesar disso questões de desempenho termo-hidráulico, processamento dos materiais e aspectos econômicos do processo de fabricação geram grandes oportunidades para a definição dessa configuração.

Por fim, o projeto dos componentes ainda traz oportunidades para a otimização dos sistemas. O acoplamento de modelos numéricos, empíricos e por *machine learning*, com técnicas avançadas de otimização, como algoritmos genéticos, cria uma nova gama de possibilidades para o projeto de sistemas de refrigeração magnética.

## **5 CONCLUSÕES**

Sistemas magnetocalóricos são uma tecnologia promissora para a redução do impacto ambiental e aumento da eficiência de sistemas de refrigeração. Apesar disso, através da análise dos protótipos, uma adega de vinhos e um condicionador de ar, percebe-se que uma série de desafios ainda devem ser superados para permitir que tais sistemas gerem os impactos esperados por eles. Dentre eles, destacam-se a exploração de nichos alternativos na cadeia de refrigeração, o desenvolvimento da cadeia de fornecedores de materiais e componentes, o desenvolvimento de componentes que removam as restrições atualmente impostas na operação do sistema e o acoplamento de metodologias de modelagem e otimização. Logo, os desafios apresentados para o aumento da maturidade e comercialização de sistemas de

refrigeração mostram que há uma ampla gama de oportunidades no desenvolvimento de tais sistemas.

### AGRADECIMENTOS

O suporte financeiro fornecido pelas empresas CODEMGE, NIDEC Global Appliances e EMBRAPPII e pelo Programa Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (CNPq concessão número 404023/2019-3; FAPESC concessão número 2018TR0846) é devidamente agradecido.

### REFERÊNCIAS

GAUB, R.; HOMM, G.; GUTFLEISCH, O. The resource basis of magnetic refrigeration. *Journal of Industrial Ecology*, 21, 1291-1300, 2017. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12488>>.

QIAN, S.; NASUTA, D.; RHOADS, A.; WANG, Y.; GENG, Y.; HWANG, Y.; RADERMACHER, R.; TAKEUCHI, I. Not-in-kind cooling technologies: A quantitative comparison of refrigerants and system performance. *International Journal of Refrigeration*, 62, 177-192, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014070071500314X>>.

NAKASHIMA, A. T. D., FORTKAMP, F. P., de SÁ, N. M., DOS SANTOS, V. M. A., HOFFMANN, G., PEIXER, G. F., DUTRA, S. L., RIBEIRO, M. C., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R. A magnetic wine cooler prototype. *International Journal of Refrigeration*, 122, 110–121, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.11.015>>.

NAKASHIMA, A. T. D., PEIXER, G. F., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R. A lumped-element magnetic refrigerator model. *Applied Thermal Engineering*, 204, 117918, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117918>>.

FORTKAMP, F. P., NAKASHIMA, A. T. D., DOS SANTOS, V. M. A., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R. Computationally-efficient optimization of the remanence angles of permanent magnet circuits for magnetic refrigeration. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 569, 170429, 2023. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170429>>.

PEIXER, G. F., DUTRA, S. L., CALOMENO, R. S., SÁ, N. M. D., LANG, G. B., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr, J. R. Influence of Heat Exchanger Design on the Thermal Performance of a Domestic Wine Cooler Driven by a Magnetic Refrigeration System. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 94, e20200563, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/0001-3765202220200563>>.

PEIXER, G. F., NAKASHIMA, A. T. D., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R. System-level multi-objective optimization of a magnetic air conditioner through coupling of artificial neural networks and genetic algorithms. *Applied Thermal Engineering*, 227, 120368, 2023a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120368>>.

PEIXER, G. F., SILVA, M. C. R., LORENZONI, A., HOFFMANN, G., DOS SANTOS, D., do ROSÁRIO, G. M., PAGNAN, E., TEZA, H. F., SILVA, P. M., DUTRA, S. L., RIBEIRO, M. C., ROSA, M. A. A., DÖRING, A., VIEIRA, B. P., NAKASHIMA, A. T. D., WENDHAUSEN, P. A. P.,

CONBRAVA 2023 – São Paulo Expo, 13 à 15 de setembro de 2023 - São Paulo, Brasil

TEIXEIRA, C. S., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R. A magnetocaloric air-conditioning system prototype. *International Journal of Refrigeration*, 2023b. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.03.014>>.

GRECO, A.; APREA, C.; MAIORINO, A.; MASSELI, C. A review of the state of the art of solid-state caloric cooling processes at room-temperature before 2019. *International Journal of Refrigeration*, 106, 66-88, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014070071930297X>>.

FENG, T.; CHEN, R.; IHNFELDT, R. V. Modeling of hydrogen liquefaction using magnetocaloric cycles with permanent magnets. *International Journal of Refrigeration*, 119, 238-246, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700720302875>>.

KLINAR, K; TOMC, U; JELENC, B; NOSAN, S; KITANOSVSKI, A. New frontiers in magnetic refrigeration with high oscillation energy-efficient electromagnets. *Applied Energy*, 236, 1062-1077, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918318749>>.