



2023
XXIX **CREEM**

Congresso Nacional de Estudantes de
Engenharia Mecânica

Goiânia - GO



XXIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
12 a 16 de Junho de 2023, Goiânia, Goiás, Brasil

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TEÓRICO DE MOTORES TERMOMAGNÉTICOS COM MATERIAIS MAGNETOCALÓRICOS COM TRANSIÇÃO DE PRIMEIRA E SEGUNDA ORDEM

Vinícius Souza de Jesus, viniciussj3011@ufmg.br
Paulo V. Trevizoli, trevizoli@demec.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica - DEMEC. Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo. A alta demanda por energia motiva a procura por fontes mais limpas, renováveis e eficientes. Nesse cenário, os motores termomagnéticos apresentam-se como uma tecnologia alternativa para a conversão de rejeitos térmicos de baixo nível em energia útil. Os materiais magnéticos utilizados nesses motores podem ser classificados por meio de sua transição de fases, sendo de primeira ou segunda ordem. Assim, o presente trabalho propõe um estudo teórico desses motores empregando ambos os tipos de materiais. Por meio de um modelo termodinâmico para o ciclo de Brayton, serão implementadas as propriedades de materiais de primeira ordem, e seus resultados para trabalho específico serão comparados com o gadolínio (material de segunda ordem), sendo este último já verificado com resultados da literatura. Além disso, será incluída na simulação a histerese magnética, sendo esta uma irreversibilidade inerente aos materiais com transição de primeira ordem, permitindo, assim, avaliar seu impacto sobre o desempenho de motores termomagnéticos. Os resultados obtidos apontam que a histerese magnética representa um pequeno impacto sobre o desempenho do motor, especialmente quando comparada com as perdas por campo desmagnetizante interno, indicando que materiais com transição de primeira ordem são promissores para futuras aplicações.

Palavras chave: Motores termomagnéticos. Transição de Fases Magnéticas. Materiais de Primeira Ordem. Histerese Magnética. Ciclo de Brayton.

Abstract. The high demand for energy motivates the research for cleaner, renewable and efficient sources. In this scenario, thermomagnetic motors are an alternative technology for converting low-grade thermal waste into useful energy. The magnetic materials used in these motors can be classified in accordance with their magnetic phase transition of first or second-order. This way, the present work proposes a theoretical study of these motors employing both types of materials. Through a thermodynamic model for the Brayton cycle, the properties of first-order materials are implemented, and its results for specific work are compared with gadolinium (second-order material), in which the latter is already verified with data from the literature. Also, magnetic hysteresis is included in the simulation, which is an irreversibility intrinsic to first-order materials, allowing the evaluation of its impact on the performance of thermomagnetic motors. The results show that magnetic hysteresis represents a small impact on the motor performance, especially when compared with internal demagnetizing field losses, pointing that first-order materials are promising to future applications.

Keywords: Thermomagnetic motors. Magnetic Phase Transition. First Order Materials. Magnetic Hysteresis. Brayton cycle.

1. INTRODUÇÃO

Energia é um insumo fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de uma país. Com a tendência mundial de crescimento econômico, aumento populacional e melhoria na qualidade de vida, a demanda por energia aumentou nos últimos anos (WORLD ENERGY COUNCIL (2019), INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2021)). Para suprir a demanda, torna-se trivial a opção por fontes de energia maduras, baratas e de fácil acesso. Em contrapartida, a busca por fontes renováveis e a eliminação de combustíveis fósseis na produção de energia primária é fundamental, uma vez que esses combustíveis acarretam no aumento das emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes. Esse cenário impulsiona a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para produção de energia que podem ser mais eficientes e menos poluentes.

Grande parte da energia térmica produzida pela queima de qualquer combustível é desperdiçada, pelas indústrias, quando liberada para a atmosfera. Cerca de 63% desses resíduos térmicos apresentam temperaturas abaixo de 100°C, os quais podem ser armazenados ou utilizados em sistemas de cogeração (Forman *et al.* (2016)). Os resíduos térmicos podem ser divididos em três níveis principais: baixo, para temperaturas abaixo a 230°C; médio, para aquelas entre 230°C

e 650°C; e alto, para aquelas acima de 650°C. À medida que a temperatura do rejeito térmico é reduzida, a recuperação do calor torna-se mais complexa devido à redução do rendimento de Carnot e, por isso, os rejeitos de baixo nível, apesar de abundantes, são frequentemente descartados (Forman *et al.* (2016), Kishore and Priya (2018)). Para recuperá-lo, pode-se empregar diversos dispositivos conhecidos como *energy harvesters*. Dentre eles estão os motores termomagnéticos (MTM), que são capazes de converter calor em trabalho mecânico (Kishore and Priya (2018), Kitanovski (2020)).

Os MTM empregam um material magnético (MM) e seu ciclo térmico opera com temperaturas ao redor da temperatura de transição de fases magnéticas do material. Quando a sua temperatura é menor do que a temperatura de Curie (T_C , ou temperatura de transição de fases T_t), o MM é ferromagnético, ao passo que quando a temperatura é maior, uma fase não-magnética é verificada. Assim, de maneira cíclica, ao resfriar e aquecer o MM (este último utilizando o calor proveniente de um rejeito térmico), pode-se alterar a fase magnética do material, produzindo movimento como resultado da atração magnética estabelecida (Kitanovski (2020)).

Os MM utilizados em MTM podem ser classificados de acordo como tipo de transição de fases magnéticas: de primeira ou de segunda ordem, as quais possuem características diferentes e que impactam diretamente tanto na sua modelagem como no desempenho do MTM. Como pode ser visto na Fig. 1(a), os materiais com transição de segunda ordem são caracterizados por uma mudança mais suave em seu ordenamento magnético, representado nessa figura pela propriedade conhecida como magnetização. Em contrapartida, os materiais de primeira ordem representados na Fig. 1(c), exibem uma mudança mais abrupta, em uma estreita faixa de temperatura (Lyubina (2017)). Além disso, os dois tipos de materiais possuem diagramas temperatura-entropia distintos, conforme mostra as Fig. 1(b) e (d), o que influencia, primeiramente, nas características do seu Efeito Magnetocalórico (ΔS_m e ΔT_{ad}) (Pecharsky and Gschneidner Jr (1999)), bem como no trabalho específico que um MTM poderia produzir ao empregar um determinado tipo de MM. Comparativamente, materiais de primeira ordem apresentam maiores valores de magnetização específica do que materiais de segunda ordem, que associado à abrupta mudança de fases, garantiria uma maior potência mecânica.

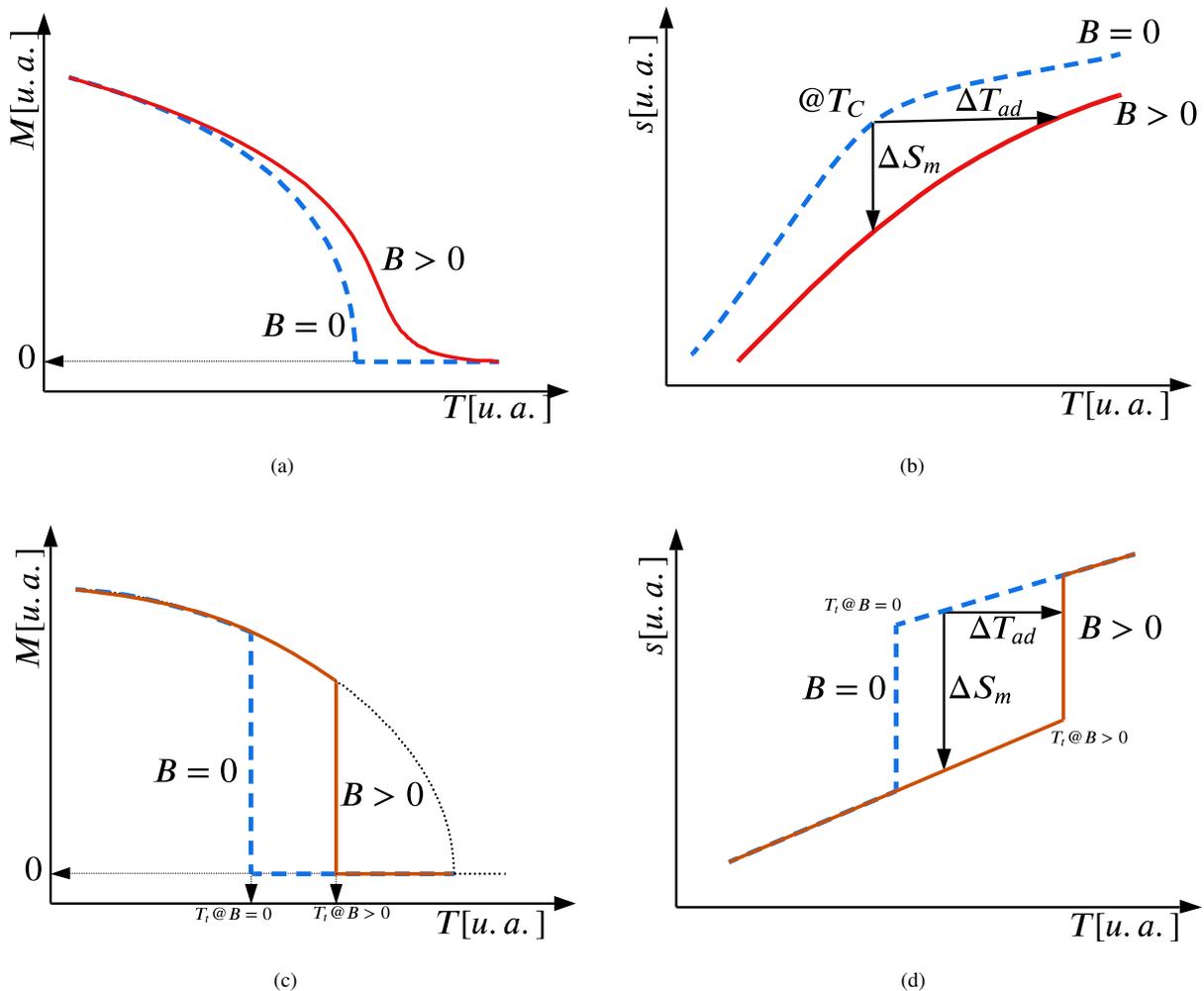


Figura 1. Características de materiais com transição de segunda ordem: (a) curva de magnetização em função da temperatura; (b) diagrama entropia-temperatura; e com transição de primeira ordem: (c) curva de magnetização em função da temperatura; (d) diagrama entropia-temperatura. Fonte: Adaptado de Gutfleisch *et al.* (2016).

No entanto, os materiais de primeira ordem possuem irreversibilidades devido a ocorrência de histereses térmicas e magnéticas, as quais não ocorrem em materiais de segunda ordem. Elas são resultado da mudança magneto-estrutural característica da primeira ordem (Lyubina (2017), Gutfleisch *et al.* (2016), Pecharsky and Gschneidner Jr (1997)). Especificamente, a histerese magnética resulta em materiais ferromagnéticos quando estes são expostos a campos magnéticos variáveis (Brey (2011)). Eles tendem a conservar uma magnetização, chamada de magnetização remanescente, mesmo após a retirada de todo o campo magnético. Essa remanência faz com que o material tenha valores diferentes de magnetização quando o campo é aplicado e removido.

Em pesquisas recentes, Kishore and Priya (2017); Bessa *et al.* (2018); Lima *et al.* (2020); Santos *et al.* (2021) propuseram um modelo termodinâmico capaz de simular um MTM operando segundo o ciclo de Ericsson ou Brayton. No artigo de Santos *et al.* (2021) foram apresentados resultados para o trabalho específico e os rendimentos termodinâmicos de primeira e segunda lei para o ciclo de Brayton, utilizando o gadolínio (Gd) como MM, o qual apresenta transição de segunda ordem, e é amplamente estudado em motores e refrigeradores magnéticos. Além disso, os autores implementaram perdas por campo desmagnetizante interno, a qual representou um significativo impacto sobre o desempenho do motor, podendo reduzir em até 30% o trabalho específico máximo.

Em contrapartida, apesar de possuírem propriedades muito interessantes para aplicações em MTM, pouco estudou-se sobre a aplicação de materiais com transição de primeira ordem, em que destaca-se o trabalho de Bessa *et al.* (2017). Neste, por meio de um modelo termodinâmico, os autores concluem que a histerese térmica pode impactar positivamente sobre o desempenho de um MTM, aumentando o trabalho específico. Nesse contexto, a presente pesquisa visa, em um primeiro momento, expandir o modelo de Santos *et al.* (2021) ao implementar as propriedades do material de primeira ordem a base de $\text{La}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})_{13}\text{H}_y$ (Vieira *et al.* (2021)). Na sequência, a histerese magnética é modelada conforme proposto por Brey (2011) e incorporada aos cálculos, com o objetivo de avaliar o impacto dessa irreversibilidade sobre o desempenho térmico de um MTM. Os resultados obtidos neste trabalho serão comparados com os apresentados por Santos *et al.* (2021) para o Gd, operando sob as mesmas intensidades de campo magnético aplicado, e em faixas de temperaturas similares.

2. METODOLOGIA

2.1 Ciclo de Brayton

O ciclo de Brayton, apresentado na Figura 2, é utilizado nas análises termodinâmicas deste trabalho, possui os seguintes processos:

- 1. Aplicação de campo magnético (magnetização) adiabática: o material magnético é magnetizado da menor intensidade de campo H_l para o campo máximo H_h por meio de um processo adiabático;
- 2. Aquecimento à campo constante: o material magnético recebe calor a partir de um reservatório quente ou de um rejeito térmico, ao passo que o campo magnético aplicado se mantém fixo em H_h ;
- 3. Remoção de campo magnético (desmagnetização) adiabática: o material magnético é removido da região de campo, retornando para o seu valor mínimo H_l , por meio de um processo adiabático;
- 4. Resfriamento à campo constante: o material magnético rejeita calor para um reservatório frio, ao passo que o campo magnético permanece fixo em H_l .

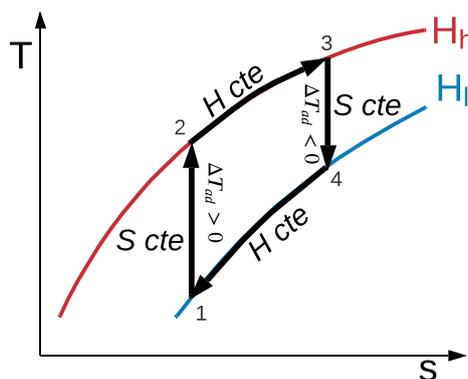


Figura 2. Ciclo de Brayton para um motor termomagnético. Fonte: Santos *et al.* (2021)

É importante notar que durante os processos de variação de campo, 1-2 e 3-4, verifica-se o efeito magnetocalórico (Pecharsky and Gschneidner Jr (1999), Smith (2013)). Neste caso, como o campo é alterado mantendo-se o MM perfeitamente isolado, o efeito magnetocalórico manifesta-se por meio da variação adiabática da temperatura (ΔT_{ad}).

Por meio de uma análise de ciclo, visualizado a partir do diagrama temperatura-entropia da Fig. 2, é possível obter expressões simples para calcular as seguintes quantidades: trabalho específico w_{liq} , o calor fornecido pela fonte quente q_{in} e o calor rejeitado para o reservatório frio q_{out} por unidade de massa, bem como, os rendimentos de primeira e segunda Lei da termodinâmica. O calor fornecido pela fonte quente e o calor rejeitado para o reservatório frio são calculados pelas Equações 1 e 2, conforme descrito por Bessa *et al.* (2018).

$$q_{in} = \int_{s_2}^{s_3} T(s) ds|_{H_h} \quad (1)$$

$$q_{out} = \int_{s_2}^{s_3} T(s) ds|_{H_l} \quad (2)$$

de modo que, pela primeira lei da termodinâmica, o trabalho específico líquido, representado pela área do ciclo, é obtido por.

$$w_{liq} = q_{in} - q_{out} \quad (3)$$

Neste trabalho, porém, não serão avaliados os rendimentos de primeira e segunda lei da termodinâmica, uma vez que os dados experimentais utilizados para a liga de $La(Fe,Mn,Si)_{13}H_y$ não possuem um valor coerente para a entropia de referência, fundamental para a construção correta do diagrama temperatura-entropia. Notadamente, como o trabalho é proporcional a área da Fig. 2, o desconhecimento deste parâmetro não interfere na análise e comparação dos resultados que serão apresentados.

2.2 Histerese magnética como fonte de geração de entropia

De acordo com Brey (2011), a histerese magnética pode ser modelada como uma fonte de geração de entropia, sendo ela proporcional a área entre as curvas de magnetização quando o campo magnético é aplicado e removido por meio de um processo isotérmico. Deste modo, a entropia gerada pode ser quantificada teoricamente utilizando equações de estado e relações termodinâmicas, ou experimentalmente por meio da interpolação da magnetização e do calor específico do material. Da segunda lei da termodinâmica, desconsiderando as trocas de calor, chega-se a:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\dot{S}_{gen}}{m} \quad (4)$$

em que s é a entropia, t o tempo, \dot{S}_{gen} a entropia gerada e m a massa. A taxa de variação de entropia no tempo $\frac{ds}{dt}$ pode ser expressa pelas componentes de campo magnético e temperatura da seguinte forma:

$$\frac{ds}{dt} = \left(\frac{\delta s}{\delta T} \right)_{\mu_0 H} \left(\frac{dT}{dt} \right) + \left(\frac{\delta s}{\delta \mu_0 H} \right)_T \left(\frac{\mu_0 H}{dt} \right) \quad (5)$$

sendo T a temperatura, μ_0 a permeabilidade relativa do vácuo, H o campo magnético. Substituindo as derivadas parciais para campo e temperatura constante em termos de calor específico e da relação de Maxwell, respectivamente, têm-se:

$$\left(\frac{\delta s}{\delta T} \right)_{\mu_0 H} = \frac{c_{\mu_0 H}}{T} \quad (6)$$

$$\left(\frac{\delta s}{\delta \mu_0 H} \right)_T = \left(\frac{\delta v M_{an}}{\delta T} \right)_{\mu_0 H} \quad (7)$$

em que $c_{\mu_0 H}$ é o calor específico a campo magnético constante e v o volume específico. As magnetizações reversíveis M_{an} e irreversíveis M_{irr} podem ser modeladas pela lei de Curie e por uma função senoide, respectivamente, como:

$$M_{an}(T, \mu_0 H) = \frac{C}{\mu_0} \frac{\mu_0 H}{T} \quad (8)$$

$$M_{irr}(T, \mu_0 H, \mu_0 H_{min}, \mu_0 H_{max}) = \Delta M \sin \left(\frac{\pi(\mu_0 H - \mu_0 H_{min})}{\mu_0 H_{max} - \mu_0 H_{min}} \right) \quad (9)$$

sendo C a constante de Curie do material, $\mu_0 H_{min}$ o campo mínimo e $\mu_0 H_{max}$ o campo máximo.

Para o computo de \dot{S}_{gen} , necessita-se de um método numérico. No caso, foi implementado o método de Runge-Kutta de segunda ordem para determinar o passo seguinte de temperatura, discretizando os processos de magnetização e desmagnetização a fim de encontrar a entropia final em cada processo. Assim, a taxa de geração de entropia específica, quantificada teoricamente, é expressa em função da magnetização irreversível da seguinte maneira:

$$\frac{\dot{S}_{gen}}{m} = \frac{vM_{irr}}{T} \left| \frac{d\mu_0 H}{dt} \right| \quad (10)$$

Já para o processo irreversível quantificado experimentalmente, parte-se das curvas de magnetização e desmagnetização experimentais de um determinado material com transição de primeira ordem. Com isso, as magnetizações reversíveis e irreversíveis são calculadas, respectivamente, por:

$$M_{an}(\mu_0 H, T) = \frac{M_{pos}(\mu_0 H, T) + M_{neg}(\mu_0 H, T)}{2} \quad (11)$$

$$M_{irr}(\mu_0 H, T) = \frac{|M_{neg}(\mu_0 H, T) - M_{pos}(\mu_0 H, T)|}{2} \quad (12)$$

em que M_{pos} é magnetização aplicando e M_{neg} é a magnetização removendo o campo magnético a temperatura constante. Assim, a geração de entropia é dada pela área entre as curvas de magnetização M_{pos} e M_{neg} , computadas matematicamente por:

$$s(\mu_0 H, T) - s(\mu_0 H_{ref}, T_{ref}) = \int_{T_{ref}}^T \frac{c_{\mu_0 H_{ref}}}{T} dT + \int_{\mu_0 H_{ref}}^{\mu_0 H} \left(\frac{\delta v M_{an}}{\delta T} \right)_{\mu_0 H, T} d\mu_0 H \quad (13)$$

2.3 Implementação numérica

O modelo termodinâmico para o ciclo de Brayton foi implementado na plataforma Python 3 – Spyder, sendo incorporadas propriedades dos seguintes materiais: Gd (segunda ordem) e La(Fe,Mn,Si)₁₃H_y (primeira ordem). Quando simula-se materiais com transição de primeira ordem, a histerese magnética pode ser incorporada aos cálculos. A Fig. 3 ilustra o algoritmo desenvolvido.

Primeiramente, inserem-se os dados de entrada para campos magnéticos mínimo e máximo ($\mu_0 H_{min}$ e $\mu_0 H_{max}$), bem como as temperaturas dos reservatórios térmicos frio e quente (T_C e T_H), além de selecionar o tipo de material magnético a ser simulado. Os valores de campo foram fixos, sendo o mínimo e máximo, respectivamente, 0,5 T e 1,5 T. Quanto aos valores das temperaturas, T_H e T_C poderiam variar no intervalo de 290 a 310 K, em incrementos pré determinados. Na sequência, de acordo com o material selecionado e os dados de campos e temperaturas, o programa faz o levantamento das propriedades de interesse, sendo posteriormente calculada a entropia gerada pela histerese magnética, caso o material de primeira ordem estivesse sendo simulado. Com todas as propriedades levantadas, constrói-se o diagrama $T - s$, e pelas Eqs. 1-3 calcula-se os principais dados de saída. Dependendo do estudo a ser realizado, faixas de valores para algumas variáveis de interesse, como a magnetização irreversível (ΔM), podem ser prescritas para avaliar o seu impacto sobre o desempenho do MTM simulado.

Por fim, na presente versão do modelo as perdas pelo campo desmagnetizante interno não foram consideradas para avaliar, de forma independente e direta, o impacto das irreversibilidades impostas pela histerese magnética. Porém, a versão mais completa do modelo, apresentado por Santos *et al.* (2021), é capaz de contabilizá-las.

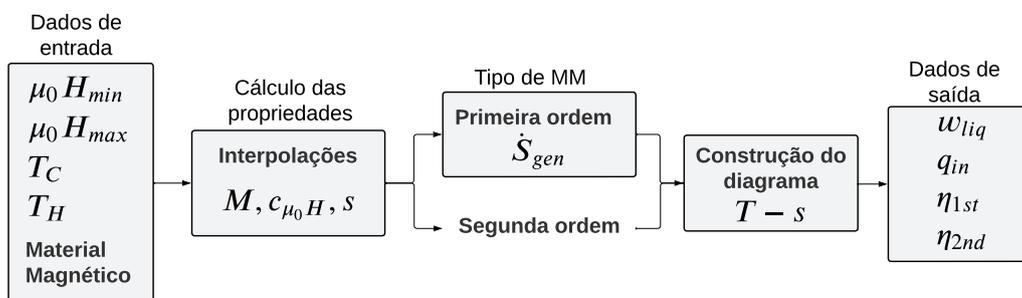


Figura 3. Fluxograma do modelo termodinâmico implementado em Python. Fonte: Autor

3. RESULTADOS

A Fig. 4 apresenta do diagrama $T - s$ considerando as propriedades do La(Fe,Mn,Si)₁₃H_y (primeira ordem), bem como diferentes intensidades de magnetização irreversível (ΔM). Neste caso, o computo da entropia gerada foi realizado pela

metodologia teórica. A temperatura do reservatório quente fixa em 310 K e a temperatura do reservatório frio variando entre 290 e 310 K , o que resulta em diferentes ciclos termodinâmicos. Um primeiro resultado importante é que pode-se garantir, portanto, que a implementação da geração de entropia devido a histerese magnética foi realizada com sucesso, uma vez que a entropia do sistema sempre tende a aumentar (na ausência de perdas de calor) após os processos de variação de campo magnético.

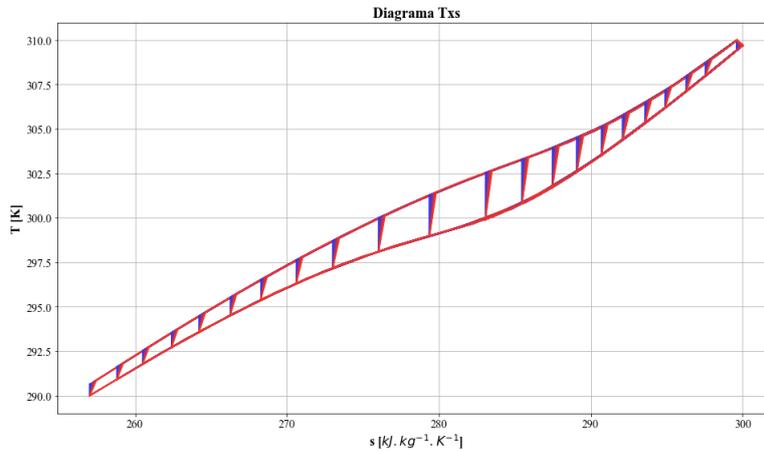


Figura 4. Diagrama $T - s$ para um motor termomagnético segundo o ciclo de Brayton, contabilizando diferentes intensidades de magnetização irreversível e considerando as propriedades da liga de $\text{La}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})_{13}\text{H}_y$.
 . Fonte: Autor

Nítidamente, a medida que ΔM aumenta, o trabalho disponível diminui, uma vez que observa-se uma leve redução da área interna do diagrama $T - s$. Esse resultado é confirmado pela Fig. 5, que traz o valor do trabalho específico do ciclo em função de ΔM . Apesar de aumentar demasiadamente o valor de ΔM , chegando a valores que não correspondem com observações experimentais para os materiais com transição de primeira ordem, o trabalho específico sofre pouco impacto da entropia gerada em decorrência da histerese magnética.

Comparativamente, utilizando os resultados apresentados por Santos *et al.* (2021), avalia-se que o impacto da histerese magnética é quase insignificante quando comparado àquele provocado pelo campo desmagnetizante interno. Segundo aqueles autores, o trabalho específico pode ser reduzido em até 30% devido as perdas magnéticas. Logo, pode-se concluir que a modelagem da histerese magnética, apesar de fazer parte da física do problema, ela pouco agrega aos resultados, podendo ser desprezada em estudos futuros ao levar em consideração a sua dificuldade de modelagem e implementação associado ao custo computacional dispendido para o seu cálculo.

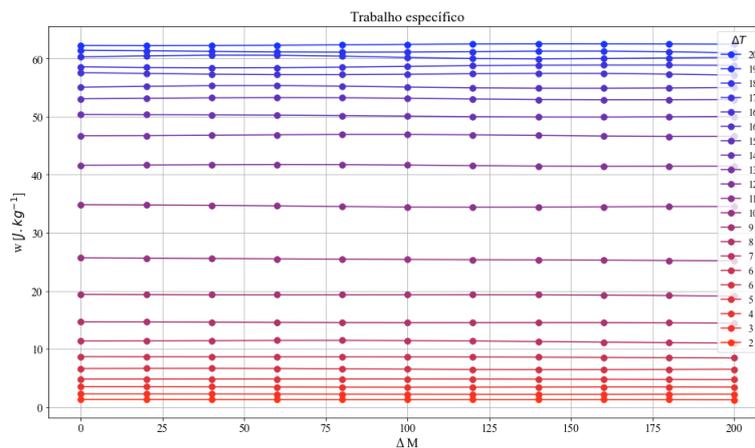


Figura 5. Trabalho específico produzido pelo ciclo de Brayton em função da intensidade da magnetização irreversível (ΔM), considerando as propriedades da liga de $\text{La}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})_{13}\text{H}_y$.
 . Fonte: Autor

A Fig. 6 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos com o Gd (segunda ordem), obtidos de Santos *et al.* (2021), e com o $\text{La}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})_{13}\text{H}_y$. Alguns pontos a se destacar: i) em ambos os casos, a temperatura do reservatório quente (T_H) e frio (T_C) podem variar na faixa de 290 K e 310 K ; ii) as perdas por campo desmagnetizante interno não são consideradas; iii) para o $\text{La}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})_{13}\text{H}_y$ a taxa de geração de entropia é calculada pelo metodologia experimental,

avaliadas a partir das propriedades disponibilizadas por Vieira *et al.* (2021). As Fig. 6(a) e (b) apresentam os diagramas $T - s$, e as Fig. 6(c) e (d) as curvas de trabalho específico em função de T_H e T_C .

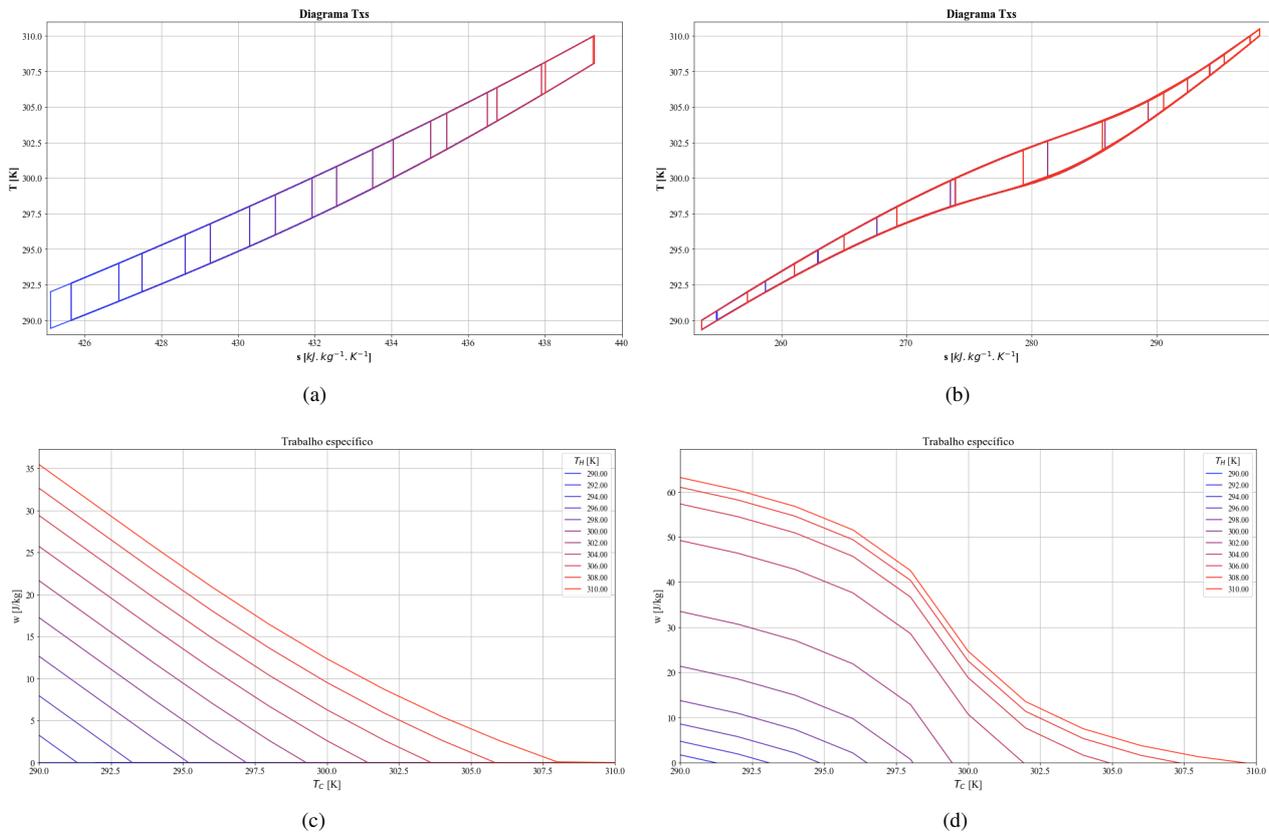


Figura 6. Comparação dos resultados entre Gd e $\text{La(Fe,Mn,Si)}_{13}\text{H}_y$: (a) diagrama $T - s$ do Gd; (b) diagrama $T - s$ do $\text{La(Fe,Mn,Si)}_{13}\text{H}_y$; (c) trabalho específico do Gd em função de T_H e T_C ; (d) trabalho específico do $\text{La(Fe,Mn,Si)}_{13}\text{H}_y$ em função de T_H e T_C . Fonte: Autor

Analisando os resultados, é possível chegar nas seguintes conclusões:

- Nota-se as diferenças nos diagramas $T - s$ e nas curvas de trabalho específico. As curvas de w_{liq} do Gd são quase lineares e, aproximadamente, equidistantes; para o $\text{La(Fe,Mn,Si)}_{13}\text{H}_y$, em contrapartida, nota-se que há uma maior distanciamento quando as temperaturas T_H e T_C estão ao redor da região de transição de fases;
- O valor máximo de trabalho específico do $\text{La(Fe,Mn,Si)}_{13}\text{H}_y$ é, aproximadamente, duas vezes maior do que o valor máximo do Gadolínio para a faixa de temperatura analisada. Nos dois casos, o valor máximo é observado em $T_H = 310 \text{ K}$ e $T_C = 290 \text{ K}$;
- A histerese magnética, calculada a partir de dados experimentais, é muito pequena, o que torna essa irreversibilidade desprezível para o $\text{La(Fe,Mn,Si)}_{13}\text{H}_y$, não impactando sobre o trabalho específico;
- O $\text{La(Fe,Mn,Si)}_{13}\text{H}_y$, portanto, se apresenta como uma material de primeira ordem promissor para ser empregado em MTM, potencializando a geração de trabalho útil a partir de rejeitos térmicos do tipo *low grade* ($T_H \approx 310 \text{ K}$).

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho expandiu um modelo termodinâmico desenvolvido para simular motores termomagnéticos operando segundo o ciclo de Brayton. Esse modelo, proposto por Santos *et al.* (2021), implementou inicialmente as propriedades de materiais com transição de segunda ordem e, atualmente, é capaz também de simular materiais com transição de primeira ordem, bem como avaliar o impacto das irreversibilidades devido à ocorrência de histerese magnética sobre o desempenho do motor. A metodologia envolveu a modelagem da geração de entropia associada à histerese por meio de equações de estado e através da área varrida pela curva de histerese em um campo aplicado, ou curva de magnetização $\mu_0 H - M$, sendo esta dividida em magnetização reversível e magnetização irreversível. Em seguida, por meio de integração numérica do diagrama $T - s$, foram obtidos os trabalhos específicos tanto para o gadolínio (material de

segunda ordem) como para o $\text{La}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})_{13}\text{H}_y$ (material de primeira ordem), em função das temperaturas dos reservatórios térmicos quente e frio. Os resultados obtidos para o $\text{La}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})_{13}\text{H}_y$ mostraram que o impacto da histerese magnética é praticamente irrelevante para o desempenho do motor, mesmo quando o valor da magnetização irreversível foi sobrestimado. Na sequência, ao comparar os resultados para o Gd, obtidos por Santos *et al.* (2021), com os resultados para o $\text{La}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})_{13}\text{H}_y$, incluindo a histerese magnética, porém desprezando as perdas pelo campo desmagnetizante interno, observou-se diversas diferenças nos diagramas $T - s$, bem como nas faixas de valores para o trabalho específico, em que o material de primeira ordem apresentou resultados para w_{liq} até duas vezes maiores do que o Gd. Portanto, materiais de primeira ordem como o $\text{La}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})_{13}\text{H}_y$, são promissores para a aplicações em motores termomagnéticos. Os próximos passos dessa pesquisa envolvem avaliar o impacto da histerese térmica sobre o desempenho do motor, bem como validar experimentalmente o modelo proposto.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM, que possibilitou esse projeto por meio do Programa ABCM de Bolsas de Iniciação Científica – PABIC. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (CNPq 404023/2019-3, e Demanda Universal No. 405970/2021-8) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG (Demanda Universal No. APQ-00877-21), pelo fomento à pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Bessa, C., Ferreira, L., Horikawa, O. and Gama, S., 2018. “On the relevance of temperature, applied magnetic field and demagnetizing factor on the performance of thermomagnetic motors”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 145, pp. 245–250.
- Bessa, C., Ferreira, L., Horikawa, O., Monteiro, J., Gandra, F. and Gama, S., 2017. “On the influence of thermal hysteresis on the performance of thermomagnetic motors”. *Journal of Applied Physics*, Vol. 122, No. 24, p. 244502.
- Brey, W.D., 2011. *A Thermodynamic Model of Magnetic Hysteresis in Active Magnetic Regenerative Refrigeration (AMRR) Cycles*. Ph.D. thesis, University of Wisconsin–Madison.
- Forman, C., Muritala, I.K., Pardemann, R. and Meyer, B., 2016. “Estimating the global waste heat potential”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 1568–1579.
- Gutfleisch, O., Gottschall, T., Fries, M., Benke, D., Radulov, I., Skokov, K.P., Wende, H., Gruner, M., Acet, M., Entel, P. *et al.*, 2016. “Mastering hysteresis in magnetocaloric materials”. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 374, No. 2074, p. 20150308.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021. “World energy outlook 2021”. Disponível em: www.iea.org/.
- Kishore, R.A. and Priya, S., 2017. “Low-grade waste heat recovery using the reverse magnetocaloric effect”. *Sustainable Energy & Fuels*, Vol. 1, No. 9, pp. 1899–1908.
- Kishore, R.A. and Priya, S., 2018. “A review on low-grade thermal energy harvesting: Materials, methods and devices”. *Materials*, Vol. 11, No. 8, p. 1433.
- Kitanovski, A., 2020. “Energy applications of magnetocaloric materials”. *Advanced Energy Materials*, Vol. 10, No. 10, p. 1903741.
- Lima, L.F.A., Santos, M.U.L., dos Santos Correa, L. and Trevizoli, P.V., 2020. “Thermodynamic analysis of thermomagnetic motors”.
- Lyubina, J., 2017. “Magnetocaloric materials for energy efficient cooling”. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 50, No. 5, p. 053002.
- Pecharsky, V.K. and Gschneidner Jr, K.A., 1997. “Giant magnetocaloric effect in $\text{Gd}_5(\text{Si}_2\text{Ge}_2)$ ”. *Physical review letters*, Vol. 78, No. 23, p. 4494.
- Pecharsky, V.K. and Gschneidner Jr, K.A., 1999. “Magnetocaloric effect and magnetic refrigeration”. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Vol. 200, No. 1-3, pp. 44–56.
- Santos, M.U.L., dos Santos Corrêa, L. and Trevizoli, P.V., 2021. “Análise termodinâmica de motores termomagnéticos operando segundo o ciclo brayton”.
- Smith, A., 2013. “Who discovered the magnetocaloric effect?” *The European Physical Journal H*, Vol. 38, No. 4, pp. 507–517.
- Vieira, B.P., Bez, H.N., Kuepferling, M., Rosa, M.A., Schafer, D., Cid, C.C.P., Vieyra, H.A., Basso, V., Lozano, J.A. and Barbosa Jr, J.R., 2021. “Magnetocaloric properties of spheroidal $\text{La}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Si})_{13}\text{H}_y$ granules and their performance in epoxy-bonded active magnetic regenerators”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 183, p. 116185.
- WORLD ENERGY COUNCIL, 2019. “World energy scenarios 2019”. Disponível em: www.worldenergy.org/.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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