

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE UM MOTOR TERMOMAGNÉTICO LINEAR

Clara Estillac Leal Silva, claraestillacls@gmail.com¹
Paulo Vinicius Trevizoli, trevizoli@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica - DEMEC. Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo. Motores termomagnéticos são dispositivos capazes de converter energia térmica de baixo nível em energia mecânica. O presente trabalho propõe um modelo matemático para simular a movimentação de um motor termomagnético linear puramente magnético projetado e construído por pesquisadores da Universidade Estadual de Maringá (UEM). O motor consiste em dois trocadores de calor magnéticos preenchidos com esferas do material magnético gadolínio (Gd), empacotadas como meio poroso. O modelo, resolvido numericamente pelo método dos volumes finitos, acopla a transferência de calor em meio poroso aos efeitos termomagnéticos do Gd. Comparou-se os resultados obtidos na simulação aos resultados experimentais disponíveis e avaliou-se a influência da vazão de escoamento na potência mecânica produzida pelo motor, na potência de bombeamento consumida e no back work ratio (BWR) do sistema. O modelo não foi plenamente validado devido às particularidades que distanciaram o modelo do aparato real, contudo, os resultados obtidos estão na mesma ordem de grandeza e são relativamente próximos. O melhor ponto de operação encontrado foi a uma vazão de 50 kg/h, combinando a maior potência líquida (≈ 2 W) com o menor BWR ($\approx 0,35$).

Palavras chave: Reaproveitamento de energia. Motores Termomagnéticos. Transferência de calor em meio poroso. Análise numérica. BWR.

Abstract. Thermomagnetic motors are devices able to convert low-grade thermal energy into mechanical energy. The present work proposes a mathematical model to simulate the movement of a linear and purely magnetic thermomagnetic motor, designed and built by researchers at the Universidade Estadual de Maringá (UEM). The motor consists of two heat exchangers filled with the spherical particles of the magnetocaloric material gadolinium (Gd) in a packed-bed porous media. The model, solved numerically by the finite volumes method, couples the heat transfer in a porous media with the thermomagnetic properties of Gd. The results have been compared with the available experimental data, and the influence of the flow rate on the produced and pumping power, as well on the system's back work ratio (BWR) has been evaluated. The model has not been fully validated because of some differences in comparison with the real apparatus, however the results are at the same order of magnitude and are relatively close. The best operation point was found at a flow rate of 50 kg/h, combining the largest net power (≈ 2 W) and the lowest BWR ($\approx 0,35$).

Keywords: Energy harvesting. Thermomagnetic motors. Heat transfer in porous media. Numerical solution. BWR.

1. INTRODUÇÃO

A atual demanda por energia, associada às previsões de aumento do consumo deste insumo reportadas pelo WORLD ENERGY COUNCIL (2019) e INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2021) para as próximas décadas, coloca em pauta a relação entre demanda e produção de energia no mundo. Aumentar a eficiência dos sistemas de conversão convencionais é uma possível solução para contornar o aumento deste consumo em diversas aplicações, desde residencial até industrial.

Sabe-se que os sistemas de conversão de energia convencionais produzem, em abundância, rejeitos térmicos com temperaturas inferiores a 100°C (tipo *low-grade*, ou baixo nível)(Forman *et al.* (2016); Kapil *et al.* (2012)). Para recuperar a energia térmica a partir deste tipo de rejeito são propostos o uso dos chamados *energy harvesters* que, ao serem associados em cogeração aos sistemas de conversão convencionais, podem torná-los mais eficientes(Kishore and Priya (2018)). Dentre os diferentes conceitos de *energy harvesters* destacam-se os motores termomagnéticos (MTM).

Os MTM são dispositivos capazes de converter energia térmica em energia mecânica por meio da alternância de fases magnéticas de um material magnético (MM), que ocorre ao redor da temperatura de transição de fases magnéticas, ou Temperatura de Curie (T_{Curie}). Abaixo de T_{Curie} se caracteriza a fase ferromagnética e acima a paramagnética. Desta maneira, ao resfriar e posteriormente aquecer o MM produz-se, por meio da interação com um campo magnético externo, movimento alternativo ou rotativo, resultante da atração magnética. Nas últimas décadas, a pesquisa por novos conceitos de MTM foi impulsionada devido à disponibilidade de ímãs permanentes de alto desempenho, ao desenvolvimento de cir-

cuitos magnéticos (CM) com campos magnéticos mais intensos (Bjørk *et al.* (2010); Trevizoli *et al.* (2015)) e à utilização de novos materiais magnéticos com transição de fase magnética de primeira ordem (Gutfleisch *et al.* (2016); Smith *et al.* (2012)).

Gabrielyan *et al.* (2013) simulou, utilizando um modelo tridimensional implementado em ANSYS, a transferência de calor entre a água e o MM de um MTM em disco, composto por dois anéis de Gd. O perfil de temperatura, desenvolvido graças à condução de calor permite que as placas de MM, que se encontram nas regiões de gradiente de campo magnético, induzam o movimento do MTM. Alves *et al.* (2013) modelou um MTM do tipo Roda de Curie que utiliza de energia solar. Os processos de troca de calor da conversão da energia solar e da convecção natural foram implementados através do método de diferenças finitas. A operação deste motor foi simulada para três diferentes MM: Gd, liga de FeNi e MnAs, sendo o último um MM que apresenta transição de fase magnética de primeira ordem e ciclos com períodos mais curtos. Kishore *et al.* (2020) implementaram numericamente um modelo tridimensional de um MTM linear e simularam diferentes condições de operação para obter os valores ótimos para as temperaturas dos reservatórios térmicos do sistema. O MM utilizado no trabalho foi o Gd. Também foi fabricado um MTM em escala reduzida para avaliar o desempenho do motor. O resultado obtido foi um trabalho específico de 0,6 J/kg por ciclo. Evaristo *et al.* (2022) implementou a operação de um MTM linear com retorno por gravidade. A geometria proposta consistia em canais circulares para o escoamento interno dos fluidos responsáveis pela troca de calor. O autor avaliou ainda a influência da desmagnetização, do Efeito Magnetocalórico (EMC) e dos parâmetros geométricos do TCM no desempenho do MTM. A potência máxima atingida pelo sistema foi de 0,3 W para um período de ciclo superior a 20 s. Correa *et al.* (2023) simulou o funcionamento de um MTM linear com retorno por mola, empregando o método de volumes finitos. O trabalho propôs uma metodologia inédita para obter valores otimizados para os seguintes parâmetros: comprimento do TCM, rigidez da mola, vazão do fluido de trabalho e temperatura do reservatório térmico quente. Para otimização utilizou-se como função objetivo a minimização da entropia gerada total e a minimização da razão de trabalho reverso (*BWR*). Operando com os parâmetros otimizados o MTM apresentou uma potência líquida de, aproximadamente, 5 W e um *BWR* de 12%. Hey *et al.* (2022b) desenvolveu um modelo que acopla a transferência de calor, os fenômenos termomagnéticos e a dinâmica do rotor de um MTM rotativo. Foi realizado também um processo de otimização que utilizou como função objetivo a maior potência produzida. Como resultado o motor apresentou uma potência máxima de 88W. Já em Hey *et al.* (2022a) foram simulados dois MTM, um rotativo e um linear. Concluiu-se que, para as mesmas condições de operação, os motores lineares apresentam maiores eficiências, entretanto, os motores rotativos operam com menores diferenças entre as temperaturas dos reservatórios térmicos. Assim, cada conceito de MTM deve operar sob as condições que lhes favorecem.

Recentemente, pesquisadores da Universidade Estadual de Maringá (UEM) propuseram um novo conceito de MTM conforme apresentado por Kaneko *et al.* (2021). Este é composto por um CM capaz de produzir dois volumes de campo magnético elevado (ao redor de 0,8 T) e por dois trocadores de calor magnéticos (TCM) estabelecidos por meios porosos com esferas de Gd com diâmetro médio de 0,8 mm. Enquanto um TCM é ferromagnético (motriz) o oposto é paramagnético (movido), estabelecendo um desequilíbrio entre as suas forças magnéticas, de modo que ambos, ao longo do ciclo térmico, alternam suas fases magnéticas, produzindo movimento linear alternativo. Devido a esta característica operacional, este conceito foi nomeado como motor tipo Tesla linear puramente magnético.

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho consiste em simular a transferência de calor e a movimentação do MTM linear puramente magnético proposto por Kaneko *et al.* (2021). Para isso foi desenvolvido um modelo matemático 1D e transiente, que acopla os fenômenos termomagnéticos às equações de conservação da energia que regem a transferência de calor em um meio poroso. As equações modeladas são implementadas numericamente e de forma acoplada utilizando o Método dos Volumes Finitos (Maliska (2004)). Foram consideradas as perdas por desmagnetização, bem como o EMC. As propriedades do fluido e do sólido são funções da temperatura e do campo magnético interno resultante (apenas sólido) atuando sobre os TCM. O material magnético utilizado são esferas de Gd com diâmetro de 0,8 mm, ao passo que o fluido de trabalho é uma mistura de água com etileno-glicol (80/20%v). Conhecidos os dados para distribuição de campo magnético e as características geométricas e operacionais do MTM, foi possível obter numericamente o deslocamento linear total, o tempo de ciclo e a potência do motor, permitindo a comparação entre os resultados experimentais e numéricos. Na sequência, são avaliadas a potência líquida do sistema e a razão de trabalho reverso em função da vazão de escoamento.

2. METODOLOGIA

2.1 Aparato experimental

O MTM proposto por Kaneko *et al.* (2021) possui um CM, apresentado na Fig. 1a, com a configuração de duplo C, como pode ser observado na Fig. 1b. Informações específicas sobre o projeto e caracterização desse circuito magnético podem ser encontradas em Kaneko *et al.* (2019). O fluxo magnético do CM é gerado por ímãs permanentes de NdFeB (regiões vermelhas com setas), ao passo que estruturas de material ferromagnético mole (aço 1020) de elevada permeabilidade (regiões cinzas escuras) têm o objetivo de guiar as linhas de campo magnético e as concentrar na região de interesse, chamada de entreferro, onde o TCM opera ao longo do gradiente de campo magnético estabelecido (eixo x). Os círculos verdes estão localizados no entreferro, região de maior intensidade do campo magnético, enquanto o círculo azul está na

região de campo menos intenso, de modo que o gradiente de campo é estabelecido nesta direção.

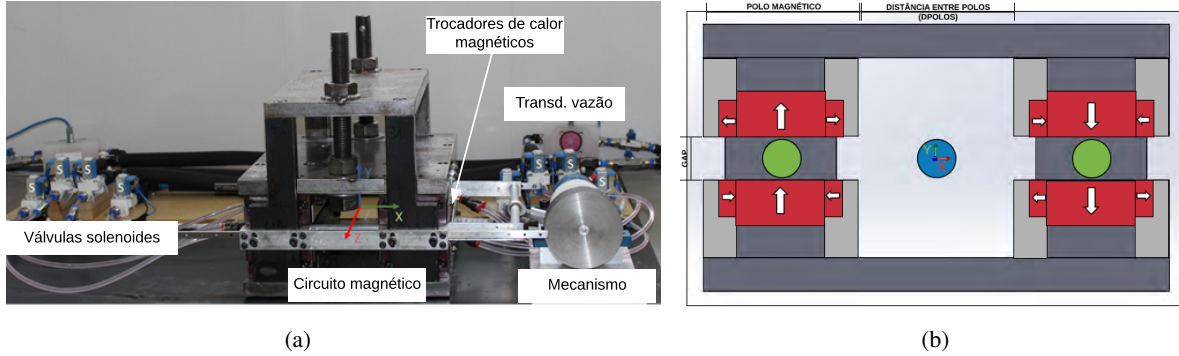


Figura 1: Circuito magnético em estudo. Fonte: Adaptado de Kaneko *et al.* (2021) e Kaneko *et al.* (2019).

Os TCM são compostos por tubos de fibra de vidro (G10) com diâmetro de 16 mm e comprimento de ≈ 81 mm. A carcaça é preenchida por esferas de Gd, com 0,8 mm de diâmetro, compactadas em um meio poroso, estabelecendo uma porosidade de, aproximadamente, 37%. Cada TCM possui um total de $\approx 114,5$ g de Gd. Pelo leito de esferas escoam os fluidos quente e frio, durante seus respectivos períodos do ciclo, promovendo a mudança de fase magnética. O fluido utilizado no experimento foi uma mistura de água com etilenoglicol na proporção de 80/20% em volume.

2.2 Modelo matemático

Para avaliar o referido MTM desenvolveu-se um modelo matemático que acopla a transferência de calor em meio poroso e os fenômenos termomagnéticos do Gd. Conforme pode ser visualizado na Fig. 1a, o aparato experimental é complexo, sendo composto por diversos componentes como: dois reservatórios (banhos) térmicos, um quente e um frio, duas bombas, tubulações para o escoamento dos fluidos, válvulas solenoides para o controle dos escoamentos, instrumentos de medição de vazão e temperatura para avaliação dos parâmetros de operação, além dos dois TCM. Neste sentido, algumas hipóteses simplificativas são aplicadas para delimitar o domínio de análise: (i) as temperaturas dos fluidos nos banhos térmicos são consideradas uniformes; (ii) não são consideradas as eficiências das bombas nem as potências consumidas pelas válvulas solenoides; (iii) não é considerada a perda de carga ao longo das tubulações ou nas válvulas; (iv) não são consideradas perdas ou ganhos de calor ao longo das tubulações e componentes.

Após aplicá-las, entende-se que a transferência de calor passa a ter o domínio unidimensional ao longo do eixo z (longitudinal), ao passo que o gradiente de campo magnético e , conseqüentemente, o movimento do TCM são estabelecidos ao longo do eixo x . Assim, ainda considera-se que: (v) as temperaturas (T) dos escoamentos quente e frio na entrada do TCM são prescritas e iguais às temperaturas dos banhos térmicos; (vi) o escoamento é paralelo ao eixo longitudinal (z) e a vazão (\dot{V}) é prescrita, constante e equivalente à vazão ajustada nas bombas utilizadas; (vii) os escoamentos são instantâneos (onda quadrada), logo, as velocidades dos escoamentos são constantes ao longo do seu respectivo período do ciclo; (viii) o campo magnético (B) é uniforme ao longo de todo o comprimento L do TCM; (viii) o TCM se desloca, unicamente, ao longo do eixo x de acordo com o gradiente de campo magnético ($\frac{\partial B}{\partial x}$) estabelecido pelo CM.

Deste modo, delimita-se o domínio da solução numérica. Na seqüência, são realizadas novas hipóteses simplificativas, porém, aplicadas diretamente nas equações da conservação da energia. A saber: (a) o escoamento é considerado unidimensional; (b) o escoamento é considerado isocórico (incompressível); (c) a condutividade térmica e a densidade do Gd são consideradas constantes; (d) o meio poroso é considerado um leito de esferas com tamanhos uniformes; (e) a porosidade é considerada constante em todo o meio poroso. As demais propriedades do fluido e do sólido, bem como o EMC, dependem da temperatura e do campo magnético interno resultante (apenas o sólido) atuando sobre os TCM. Desta maneira, são consideradas as perdas devido ao campo desmagnetizante interno, cujo a modelagem pode ser encontrada em Trevizoli *et al.* (2012).

2.2.1 Equações de energia

O modelo de transferência de calor em meio poroso consiste em duas equações da energia, uma para a fase fluida, Eq. 1, e outra para fase sólida, Eq. 2 (Kaviany (1995)). Estas duas equações estão acopladas pelo termo de transferência de calor intersticial e , como consequência, precisam ser resolvidas iterativamente. Nas equações que seguem, os subíndices f e s presentes referem-se a parâmetros ou propriedades do fluido ou do sólido, respectivamente,

$$\varepsilon \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\frac{h\beta}{\rho_f C_{p_f}} (T_f - T_s) - u_D \frac{\partial T_f}{\partial z} + \varepsilon \left(\frac{k_f}{\rho_f C_{p_f}} + D_{II} \right) \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho_f C_{p_f}} \left| \frac{\partial P}{\partial z} u_D \right| \quad (1)$$

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = - \frac{h\beta}{\rho_s C_{p_s}} (T_s - T_f) + (1 - \varepsilon) \frac{k_s}{\rho_s C_{p_s}} \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (2)$$

e tem-se que: ε é a porosidade do leito de esferas, β é a densidade de área superficial, t o tempo, ρ a massa específica, C_p o calor específico, z a posição axial, k a condutividade térmica, μ a viscosidade, e u_D é a velocidade de Darcy. Já as variáveis que necessitam de uma correlação de fechamento, são: $\frac{\partial P}{\partial z}$ o gradiente de pressão longitudinal, obtida pela correlação de Ergun corrigida por Macdonald *et al* (apud Kaviany (1995)); h é o coeficiente de transferência de calor, obtido pela correlação de Pallares and Grau (2010); e D_{II} representa a dispersão longitudinal, determinada pela correlação de Koch e Brady (Koch and Brady (1985)). Este último termo tem por objetivo corrigir a condução axial da fase fluida, visto que a mistura hidrodinâmica do fluido a nível de poro decorrente do escoamento forçado pode apresentar uma dispersão térmica relevante.

O calor específico do Gd, considerado função da temperatura e do campo magnético resultante, é obtido a partir de uma tabela pré-definida obtida da teoria de Weiss-Debye-Sommerfeld (Morrish (2001)). Já os valores de massa específica e condutividade térmica do Gd são considerados constantes, sendo de 7900 kg/m^3 e $10,5 \text{ W/m.K}$, respectivamente.

Para a fase fluida, a condição de contorno para $z = 0$ é de entrada de massa com vazão (\dot{V}) conhecida e com a temperatura do fluido prescrita. Porém, a temperatura irá depender da etapa do ciclo, se corresponde ao escoamento quente (ws) ou frio (cs), ou seja, $T = T_{ws}$ se o escoamento for quente e $T = T_{cs}$ se o escoamento for frio. Já em $z = L$, trata-se de uma condição de contorno de saída de massa. Esta é uma condição parabólica que não requer um valor prescrito, sendo a temperatura da fronteira aproximada para o valor do último volume ($\frac{\partial T}{\partial z} = 0$). Para o modelo da fase sólida, as condições de contorno para $z = 0$ e $z = L$ são as mesmas, de fronteiras adiabáticas ($-k_s \frac{\partial T}{\partial z} = 0$).

Por fim, o EMC foi implementado de maneira discreta, a qual compreende a correção da temperatura do sólido em ΔT_{ad} sempre que o TCM for submetido à variação do campo magnético, conforme a Eq. 3.

$$T_s(t + \Delta t, z) = T_s(t, z) + \Delta T_{ad}(\Delta \mu_0 H_{int,res}(t, z), T_s(t, z)) \quad (3)$$

2.3 Implementação numérica

2.3.1 Implementação do modelo de transferência de calor

Para solucionar as equações de energia apresentadas (Eq.1 e Eq.2) foi utilizado o Método de Volumes Finitos (Maliska (2004)) e o termo transiente foi interpolado seguindo a formulação totalmente implícita. A equação de energia do fluido utiliza a função de interpolação *WUDS* (*Weighted Upstream Differencing Scheme*) para interpolar os seus termos, difusivo e advectivo. Já a equação de energia do sólido tem seu termo difusivo interpolado através da função de interpolação *CDS* (Método das Diferenças Centrais). Para a aplicação das condições de contorno foi utilizada a abordagem de volumes fictícios nas fronteiras do problema.

O método de solução para resolver as equações de energia foi o TDMA (*TriDiagonal Matrix Algorithm*), também conhecido como Algoritmo de Thomas. O acoplamento entre as equações de energia do fluido e do sólido tornou necessária a implementação de uma rotina iterativa para a solução do modelo desenvolvido, cujo critério de convergência adotado foi de 10^{-4} . Já o regime periodicamente desenvolvido é estabelecido quando o critério de convergência entre dois ciclos consecutivos atingia um valor menor ou igual a 10^{-8} .

Para garantir robustez e estabilidade aos resultados obtidos da implementação numérica do modelo desenvolvido é necessário realizar, primeiramente, o estudo da independência do tamanho de malha sobre o resultado. Para isto, variou-se o passo temporal em 10^{-2} s, 5×10^{-3} s, 10^{-4} s, 5×10^{-5} s, 10^{-5} s, bem como a quantidade de volumes (reduzindo o tamanho da malha espacial) em 10, 10^2 , 5×10^2 , 10^3 , e 2×10^3 volumes. Concluiu-se que a malha com 500 volumes e incrementos de tempo de 10^{-3} s foi capaz de obter valores para a potência produzida com erros menores do que 1% associado a menores custos computacionais em relação a malhas mais refinadas.

2.3.2 Movimentação dos trocadores de calor magnéticos

A força magnética que atua no TCM pode ser avaliada pela Eq.4:

$$F_{mag} = - (1 - \varepsilon) \rho_s V M (T, B_{int}) \frac{dB}{dx} \quad (4)$$

sendo $\frac{dB}{dx}$ o gradiente da densidade de fluxo magnético na direção x . Como cada um dos volumes finitos do TCM estão a temperaturas e intensidades de campo interno resultante (B_{int}) distintos, tem-se que os valores da magnetização diferem de um volume para outro. Desta forma, a força magnética deve ser calculada para cada volume sendo, portanto, considerado V o tamanho do volume finito. A força magnética resultante que atua sobre o TCM será o somatório das forças de todos os volumes.

A movimentação linear ao longo do gradiente de campo magnético (eixo x) depende do balanço entre as forças magnéticas atuantes em cada um dos TCM, em que sempre um será ferro- e o outro não-magnético. A posição em

um dado instante de tempo é definida de acordo com o equilíbrio entre estas forças, avaliada por meio de um processo iterativo. Este inicia-se pelo cálculo das forças magnéticas nos dois TCM (F_{TCM_1} e F_{TCM_2}), dada uma posição e instante de tempo. Em seguida, o módulo das forças são comparados e tem-se que se $F_{TCM_1} > F_{TCM_2}$, então o sistema se desloca em $-\Delta x$, e se $F_{TCM_1} < F_{TCM_2}$, então o sistema se desloca em $+\Delta x$. As forças são então recalculadas nas novas posições e o processo se repete até que o equilíbrio seja atingido, considerando um resíduo de 10^{-6} N.

2.4 Dados de saída e parâmetros de desempenho

Após a convergência do código, são determinados os seguintes dados de saída: tempo de ciclo de operação, amplitude do deslocamento, potência total produzida pelo motor, potência líquida e razão de trabalho reversa (BWR).

A potência total produzida pelo motor pode ser calculada por meio da Eq. 5, sendo \bar{F}_{res} a força magnética resultante média que atua sobre um dos TCM, X o deslocamento total do sistema durante um ciclo e t_{ciclo} o período de operação do sistema.

$$\dot{W}_p = \frac{\bar{F}_{res} X}{t_{ciclo}} \quad (5)$$

Para avaliar a potência líquida e o BWR é preciso, primeiramente, calcular a potência de bombeamento, por:

$$\dot{W}_{bomb.} = \frac{\dot{m}}{\rho_f} \Delta P \quad (6)$$

em que a perda de carga foi obtida pela correlação de Ergun, corrigida por Macdonald *et al* (apud Kaviany (1995)), conforme descrito anteriormente. Por fim, obtém-se a potência líquida (Eq. 7) e o BWR (Eq. 8).

$$\dot{W}_{liq.} = \dot{W}_p - \dot{W}_{bomb.} \quad (7)$$

$$BWR = \frac{\dot{W}_{bomb.}}{\dot{W}_m} \quad (8)$$

3. RESULTADOS

3.1 Comparação com os resultados experimentais

A Tabela 1 compara os resultados para o tempo de ciclo, a amplitude de deslocamento dos TCM e a potência total produzida pelo sistema obtidos neste trabalho com os experimentais de Kaneko *et al.* (2021). Foram utilizados os parâmetros operacionais reportados por aqueles autores: temperatura dos reservatórios térmicos de 0°C e 50°C , e vazões de 39,4 L/h para o escoamento frio e 82,4 L/h para o escoamento quente.

Tabela 1: Comparação entre os resultados experimentais e os resultados da simulação.

Grandeza Avaliada	Resultado Obtido	Resultados Kaneko <i>et al.</i> (2021)
Tempo de Ciclo (s)	2,822	2,000
Amplitude de deslocamento (mm)	37,8	40,0
Potência produzida (W)	1,018	0,410

É importante ressaltar que a amplitude de deslocamento do TCM apresentada por Kaneko *et al.* (2021) é um valor teórico de deslocamento máximo do trocador e não foi medido experimentalmente. Desta forma, não é possível avaliar sua diferença para o resultado obtido numericamente. Além disso, no trabalho experimental, os autores reportam que o tempo de ciclo é imposto ao motor, realizado por meio de um controle eletrônico de abertura/fechamento das válvulas solenoides. Isso difere da forma como o MTM foi simulado, uma vez que o tempo de ciclo é um resultado de saída. Logo, o valor de tempo de ciclo obtido pela simulação é, aproximadamente, 41% superior ao resultado experimental.

A diferença entre os valores de potência apresentados também é significativa, sendo que o resultado experimental apresenta um valor menor do que o simulado mesmo possuindo um período de ciclo mais curto. Esta divergência pode ser explicada: (i) pelas incertezas quanto ao real descolamento dos TCM desenvolvido no experimento; (ii) por o aparato utilizar um mecanismo para converter o movimento linear em rotacional, inserindo perdas mecânicas no sistema e não foram contabilizadas na simulação; (iii) pelo uso de propriedades idealizadas para o Gd; (iv) pela forma como o trabalho magnético é calculado no modelo matemático. Esta última, depende de mais resultados experimentais, obtidos para diferentes condições de temperaturas e vazões, para ser finalmente validado. Assim, a forma implementada para o cálculo da potência ainda é um tema em aberto.

Apesar das diferenças observadas, entende-se que os resultados numéricos e experimentais estão na mesma ordem de magnitude e suas diferenças podem ser interpretadas e explicadas baseando-se em conhecimentos de engenharia. Assim, conclui-se que o modelo matemático, apesar de não ser validado experimentalmente, apresenta resultados consistentes, o que permite explorá-lo para obter novos resultados e traçar comparações.

3.2 Perfil de temperaturas ao longo do trocador de calor magnético

A Fig. 2 apresenta os perfis de temperaturas do sólido ao longo do comprimento do TCM para o último instante de tempo do escoamento quente, representado pelas linhas vermelhas, e para o último instante de tempo do escoamento frio, representado pelas linhas azuis, para as vazões de 10 kg/h e 100 kg/h.

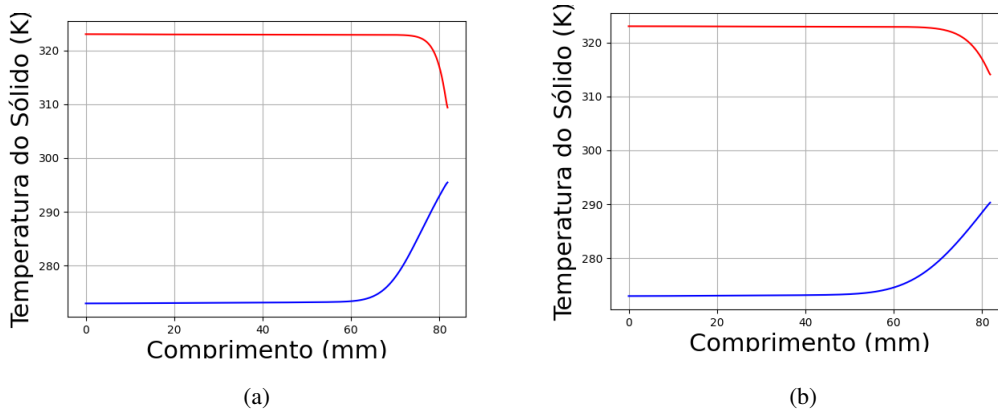


Figura 2: Perfis de temperaturas no sólido para vazão de: (a) 10 kg/h; (b) 100 kg/h.

É possível constatar que a porção final do comprimento do TCM não atinge equilíbrio térmico com os reservatórios, seja ao final do escoamento quente ou do frio. Além disso, observa-se também que a diferença entre a temperatura da extremidade final do TCM e o reservatório térmico é maior para o escoamento frio do que para o escoamento quente. Esse resultado deve-se ao comportamento do calor específico do Gd, que é mais elevado para temperaturas inferiores a T_{Curie} .

Comparando os resultados para diferentes vazões, observa-se que: (i) para a vazão de 10 kg/h a diferença entre a temperatura da extremidade final do TCM e o reservatório térmico é maior do que para a vazão de 100 kg/h; (ii) em ambos, aproximadamente 75% (após o escoamento frio) e 90% (após o escoamento quente) do comprimento do TCM deve estar em equilíbrio térmico com o respectivo reservatório para que o desequilíbrio de forças seja desfeito; (iii) o escoamento frio é quem limita o tempo de ciclo.

Explicando o item (iii), devido a maior inércia térmica do Gd ser resultado de valores mais altos de calor específico para temperaturas menores, o equilíbrio de forças só será desfeito quando, aproximadamente, 75% do TCM estiver em uma temperatura baixa o suficiente para caracterizar a fase ferromagnética. Sendo igual o tempo de escoamento quente, como a inércia do Gd é menor a maiores temperaturas (valores de calor específico mais baixos), a temperatura do sólido tende a variar mais facilmente, fazendo com que quase todo o TCM esteja em equilíbrio térmico com o reservatório a 323K ao término do escoamento quente.

3.3 Resultados para diferentes vazões

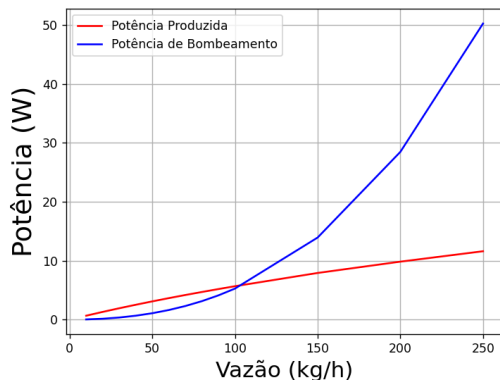
Partindo agora para a avaliação dos parâmetros de desempenho de um MTM em função da vazão de escoamento. Note que, em todos os casos as vazões para os escoamentos frio e quente são iguais. Os parâmetros avaliados são: o tempo de ciclo, a potência total produzida, a perda de carga ocorrida ao longo do TCM, a potência de bombeamento consumida, a potência líquida produzida pelo sistema e o *BWR* (*Back Work Ratio*) do motor. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 2, ao passo que as Fig. 3a e 3b apresentam, respectivamente, a variação da potência total produzida pelo motor e da potência de bombeamento em função da vazão e a variação da potência líquida do sistema em função do *BWR*.

A partir dos resultados apresentados é possível observar que a potência de bombeamento supera a potência produzida pelo motor para uma vazão de, aproximadamente, 100 kg/h. Logo, não faz sentido, do ponto de vista da geração de energia, operar este MTM para vazões maiores que esta, uma vez que a potência líquida torna-se negativa. Nota-se, porém, que a potência líquida apresenta os maiores valores operando-se o motor com vazões entre 50 e 60 kg/h, sendo o valor máximo ao redor de 2 W.

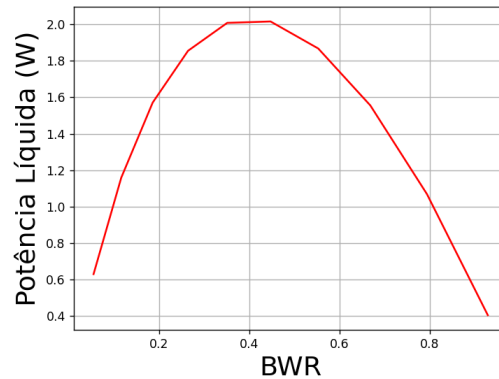
Além disso, a Eq. 8 permite concluir que quanto menor o valor do *BWR* mais vantajosa é a relação entre potência produzida e potência consumida pelo motor. No limite de *BWR* tendendo a zero seria o melhor ponto de operação do MTM. Entretanto, não é coerente afirmar que o melhor ponto de operação do motor em estudo é o de menor *BWR*, visto que a potência líquida correspondente seria ao redor de 0,6 W. Analisando a Fig. 3b, entende-se que melhor ponto de operação do sistema (porém, não otimizado) seria na vazão de 50 kg/h, combinando a maior potência líquida (≈ 2 W) com o menor *BWR* ($\approx 0,35$). Neste sentido, para otimizar um MTM o *BWR* pode ser proposto como função objetivo a ser minimizada, desde que o mesmo seja avaliado considerando uma potência líquida fixa, conforme proposto por Correa *et al.* (2023).

Tabela 2: Resultados para os parâmetros de desempenho de um MTM em função da vazão dos escoamentos

Vazão [kg/h]	Tempo de Ciclo [s]	Potência Produzida [W]	Potência de Bombeamento [W]	Potência Líquida [W]	BWR
10	11,212	0,664	0,036	0,628	0,054
20	5,636	1,310	0,152	1,158	0,116
30	3,784	1,929	0,358	1,571	0,185
40	2,860	2,521	0,665	1,856	0,264
50	2,304	3,095	1,086	2,009	0,351
60	1,934	3,647	1,629	2,017	0,447
70	1,670	4,177	2,309	1,868	0,553
80	1,472	4,689	3,134	1,555	0,668
90	1,318	5,184	4,116	1,068	0,794
100	1,194	5,669	5,266	0,403	0,929
150	0,820	7,915	13,925	-	1,759
200	0,634	9,833	28,447	-	2,893
250	0,520	11,599	50,217	-	4,329



(a)



(b)

Figura 3: Comparação dos resultados obtidos para diferentes vazões: (a) potência total produzida pelo motor e a potência de bombeamento em função da vazão; (b) variação da potência líquida do sistema em função de seu BWR .

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a análise numérica de um MTM linear puramente magnético previamente projetado e construído por Kaneko *et al.* (2019, 2021). O modelo matemático para a transferência de calor em meios porosos, considera o não-equilíbrio térmico entre as fases fluida e sólida e é resolvido acoplado aos fenômenos termomagnéticos do Gd. A implementação do modelo foi realizada pelo método de volumes finitos, com solução das equações a partir do método linha a linha TDMA.

Inicialmente, simulações foram realizadas utilizando as condições de operação conforme Kaneko *et al.* (2021), permitindo a comparação dos resultados numéricos e experimentais. Se, de um lado, o modelo não pôde ser plenamente validado em vista das particularidades que distanciaram a modelagem do sistema real; por outro lado, os resultados obtidos estão na mesma ordem de grandeza e estão relativamente próximos. Assim, pode-se afirmar que após melhorias no modelo e/ou a realização de novos testes experimentais a validação poderá ser finalizada futuramente.

Em um segundo momento, novas simulações foram realizadas variando as vazões dos escoamentos, permitindo avaliar o seu impacto sobre o tempo de ciclo, a potência produzida pelo motor, a potência de bombeamento necessária para gerar o escoamento, a potência líquida e a razão de trabalho reverso (BWR). A maior potência líquida obtida foi de 2,017 W para uma vazão de 60 kg/h, com um BWR correspondente de 0,447. Entretanto, interpretou-se que o melhor ponto de operação do motor seria a 50 kg/h, com uma potência líquida de 2,009 W e BWR de 0,351, uma vez que apresenta menor consumo de potência de bombeamento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo fomento no projeto APQ-00877-21 (Demanda Universal); e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

(CNPq) pelo fomento nos projetos N° 405970/2021-8 (Demanda Universal) e CNPq 404023/2019-3.

6. REFERÊNCIAS

- Alves, C., Colman, F., Foleiss, G., Vieira, G. and Szpak, W., 2013. “Numerical simulation and design of a thermomagnetic motor”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 61.
- Bjørk, R., Bahl, C., Smith, A. and Pryds, N., 2010. “Review and comparison of magnet designs for magnetic refrigeration”. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, No. 3, pp. 437–448. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.12.012>.
- Correa, L.S., Roew, A. and Trevizoli, P.V., 2023. “Thermodynamic optimization of a linear thermomagnetic motor”. *Applied Thermal Engineering*.
- Evaristo, E., Colman, F., Alves, C. and Trevizoli, P., 2022. “Mathematical modelling and simulation results of a linear thermomagnetic motor with gravity return”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 544.
- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>.
- Gabrielyan, D.A., Semenov, V.V. and Martirosov, D.S., 2013. “Analysis of nonstationary heating and cooling of a thermomagnetic engine gadolinium working element”. *Russian aeronautics*.
- 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.
- Hey, J., Tan, J.L. and Tan, Z.H., 2022a. “An evaluation of thermomagnetic motors for heat energy harvesting”. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*.
- Hey, J., Repaka, M., Li, T. and Tan, J.L., 2022b. “Design optimization of a rotary thermomagnetic motor for more efficient heat energy harvesting”. *Energies*, Vol. 15.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021. “World energy outlook 2021”. Disponível em: www.iea.org/.
- Kaneko, G., Conceição, W., Colman, F., Cocci, A., Alves, C., Pupim, G., Kubota, G., Oliveira, V. and Trevizoli, P., 2021. “Design and experimental evaluation of a linear thermomagnetic motor using gadolinium: Preliminary results”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 186, p. 116472.
- Kaneko, G., Souza, A., Moro, F., Colman, F., Conceição, W., Alves, C. and Trevizoli, P., 2019. “Design and assembling of a magnetic circuit for a thermomagnetic motor apparatus”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, No. 10, pp. 1–11.
- Kapil, A., Bulatov, I., Smith, R. and Kim, J.K., 2012. “Site-wide low-grade heat recovery with a new cogeneration targeting method”. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 90, No. 5, pp. 677–689. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.09.001>.
- Kaviany, M., 1995. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*.
- Kishore, R.A. and Priya, S., 2018. “A review on low-grade thermal energy harvesting: Materials, methods and devices”. *Materials*, Vol. 11. doi:10.3390/ma11081433.
- Kishore, R.A., Singh, D., Sriramdas, R., Garcia, A.J., Sanghadasa, M. and Priya, S., 2020. “Linear thermomagnetic energy harvester for low-grade thermal energy harvesting”. *Journal of Applied Physics*, Vol. 127, No. 4.
- Koch, D.L. and Brady, J.F., 1985. “Dispersion in fixed beds”. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 154, p. 399–427.
- Maliska, C., 2004. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Livros Técnicos e Científicos.
- Morrish, A.H., 2001. *The physical principles of magnetism*.
- Pallares, J. and Grau, F., 2010. “A modification of a nusselt number correlation for forced convection in porous media”. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37.
- Smith, A., Bahl, C.R., Bjørk, R., Engelbrecht, K., Nielsen, K.K. and Pryds, N., 2012. “Materials challenges for high performance magnetocaloric refrigeration devices”. *Advanced Energy Materials*, Vol. 2, No. 11, pp. 1288–1318.
- Trevizoli, P.V., Barbosa Jr, J.R., Oliveira, P.A., Canesin, F.C. and Ferreira, R.T., 2012. “Assessment of demagnetization phenomena in the performance of an active magnetic regenerator”. *international journal of refrigeration*, Vol. 35, No. 4, pp. 1043–1054.
- Trevizoli, P.V., Lozano, J.A., Peixer, G.F. and Barbosa Jr, J.R., 2015. “Design of nested halfbach cylinder arrays for magnetic refrigeration applications”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 395, pp. 109–122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.07.023>.
- 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.