

MODELO DE SIMULAÇÃO DE DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM LEITO FIXO DE MATERIAL TERMOMAGNÉTICO

Nathalia Wisniewski Siqueira¹, Cleber Santiago Alves², Monica Ronobo Coutinho³,
Wagner André dos Santos Conceição⁴

¹Mestranda do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica com ênfase em Ciências Térmicas, Universidade Estadual de Maringá. Maringá/PR. Bolsista CAPES. nwsiqueira@gmail.com

²Docente do curso de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Doutor, Universidade Estadual de Maringá. Maringá/PR. csalves@uem.br

³Docente do curso de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Doutor, Universidade Estadual de Maringá. Maringá/PR. mrcoutinho@uem.br

⁴Docente do curso de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Doutor, Universidade Estadual de Maringá. Maringá/PR. wasconceicao@gmail.com

RESUMO

Com a demanda atual de energia e a crescente procura por energias renováveis no mundo, buscam-se meios alternativos para recursos de fontes geradoras de energia, como os motores termomagnéticos. Tais motores funcionam por meio da conversão da energia cinética em energia térmica utilizando material sensível a magnetização quando alterada sua temperatura. Para que esse tipo de motor tenha desempenho adequado é importante que se alcance a melhor frequência de funcionamento, sendo necessário otimizar o desempenho do leito fixo do motor termomagnético, peça fundamental, por conter o material sensível a magnetização. Assim, é preciso determinar um modelo que represente o sistema de magnetização para o funcionamento do motor. Para isso, usando uma bancada de ensaio realizou-se experimentos coletando dados de densidade de fluxo magnético e temperatura, considerando o modelo “caixa-preta” com base nos dados de entrada e saída obtidos do processo, posteriormente ajustou a um modelo de transferência experimental utilizando o MATLAB e, por fim, com o *Simulink* simulou a variação de campo magnético com alteração de temperatura. Os modelos obtidos apresentam um comportamento próximo ao experimental.

PALAVRAS-CHAVE: Magnetização; Gadolínio; Modelagem.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Internacional de Energia – IEA, a demanda de energia renovável é crescente, estima-se que pode chegar a 80% da demanda global de eletricidade até 2030. O consumo de energia também tem um aumento considerável devido à quantidade populacional e fatores econômicos, ocasionando uma alta demanda por energia. Tais pontos incentivam a criação, a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias alternativas para produção de energia menos poluentes e mais eficiente (KANEKO, 2019). Nesse contexto, os motores termomagnéticos são uma possibilidade de fontes geradoras de energia, pela utilização de fonte de calor como um sistema de reaproveitamento de rejeitos térmicos e função de converter energia térmica diretamente em energia cinética usando material magnético sensível à temperatura, que altera suas características magnéticas com uma mudança de temperatura (KANEKO, 2019) (MURAKAMI; NEMOTO, 1972).

Para a construção do motor termomagnético em estudo, a peça fundamental para o seu funcionamento adequado é o leito fixo magnético, em que trocas térmicas ocasionam a magnetização e desmagnetização do sistema, gerando o mecanismo de funcionamento do motor. Dessa forma, este trabalho tem por objetivo a simulação do sistema de leitos fixos magnéticos para otimização de seu funcionamento em um motor termomagnético.

2 METODOLOGIA

2.1 MONTAGEM DO LEITO FIXO MAGNÉTICO

O leito fixo projetado está definido por um cilindro de fibra de vidro G10 contendo o

material termomagnético em meio poroso, com esferas de gadolínio (Gd) com diâmetro entre $500 \mu\text{m}$ e $850 \mu\text{m}$. Para montar o leito fixo foi necessário encontrar o volume do cilindro e do gadolínio, o qual foi obtido a partir da pesagem da massa, considerando $\rho_{Gd} = 7901 \text{ kg/m}$. A partir dos dados, é calculada a porosidade, dada pela Equação 1.

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{V_{Gd}}{V_{cil}} \right) \quad (1)$$

Tal que V_{Gd} se refere ao volume de gadolínio e V_{cil} o volume do cilindro. Para o desenvolvimento do trabalho, atingiu-se um valor de aproximadamente 37% de porosidade. A montagem final está apresentada na Figura 1.



Figura 1: Montagem final do leito fixo magnético

2.2 AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DO SISTEMA E APARATO EXPERIMENTAL.

Para que seja realizado as trocas térmicas do sistema, é necessário aquecê-lo e resfriá-lo. Dessa forma, em um sistema de bombeamento foi integrado mangueiras com isolamento térmico de borracha elastomérica, conexões de engate rápido e as válvulas solenoides. Então, ligou-se o banho quente com temperatura em 50°C e o banho frio em 0°C . Além disso, usou-se um ímã permanente de classe N50 para gerar densidade de fluxo magnético no leito fixo posicionado com auxílio de um suporte 4,5 cm acima do leito fixo, para que possibilitasse a aquisição de dados.

2.3 AQUISIÇÃO, ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE DADOS

Para a aquisição dos dados experimentais utilizou-se sensores modelo DS18B20 para medir as temperaturas de entrada e saída do leito fixo magnético, sendo conectados a um microcontrolador ATMEGA2560; e para dos dados da densidade de fluxo magnético foi utilizado um gaussímetro da MagTek acoplado a uma sonda Hall do tipo TLMP-T2. A partir dos valores da temperatura de entrada do leito fixo (dados de entrada) e da densidade de fluxo magnético (dados de saída), conforme o tempo, é realizado um estudo do comportamento dinâmico e da resposta do processo, que é complexo, sendo fenômenos físicos de difícil observação e verificação. Diante disso, a modelagem matemática torna-se inviável perante a consistência de seus modelos. Por esta razão, uma abordagem que utiliza os dados de entrada e saída, conhecida por “caixa preta” é aplicada (APREA; RENNO, 2001). O software MATLAB foi utilizado para identificar os parâmetros da função transferência, utilizando as curvas características dos processos de aquecimento e resfriamento experimentais, aplicando o *toolbox* “Curve Fitting”, que ajustou interativamente uma curva. De acordo com Ogunnaike e Ray (1994), a resposta teórica para modelos empíricos, nessa situação, é dada pela Equação 2.

$$B(t) = B_\infty (1 - e^{-(t-\alpha)/\tau}) \quad (2)$$

sendo $B(t)$ a variação de densidade do fluxo magnético com o tempo, com B_∞ a densidade

do fluxo magnético no estado estacionário, t o tempo, α o tempo de atraso do processo e τ o tempo constante.

Em seguida, com a caracterização da curva de fluxo magnético realizada, definiu-se uma função transferência de primeira ordem, como apresentada na Equação 3.

$$g(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\alpha s} \quad (3)$$

com $K = B_{\infty}/\Delta T$, em que ΔT é a variação de temperatura no tempo, de acordo com a variação da densidade do fluxo magnético; e s a variável de domínio laplaciana (OGUNNAIKE; RAY, 1994).

Por fim, no ambiente *Simulink* do MATLAB foi implementado uma malha aberta e realizada a simulação dentro das mesmas condições do ensaio experimental, obtendo o gráfico de densidade de fluxo magnético com relação ao tempo e, desta forma, observado o comportamento durante o resfriamento e aquecimento do leito fixo. Diferentemente de outros tipos de processo, devido ao comportamento termomagnético do gadolínio presente no leito, são duas funções diferentes de transferência no leito: uma para quando é aquecido e outra, quando resfriado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados de temperatura de entrada do aquecimento e resfriamento e da densidade do fluxo magnético, os valores encontrados para a Equação 2 estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Respostas processos de aquecimento e resfriamento.

Processo	$B_{\infty}(10^{-2}T)$	$\tau(s)$	$\alpha(s)$	$\Delta T(K)$	$K (T/K)$
Aquecimento	-1,088	2,736	0,030	13,100	-0,083
Resfriamento	1,125	1,027	0,041	-9,240	-0,122

Dessa forma, o tempo de atraso de ambos processos devem ser desconsiderados por estarem bem próximos a zero e, assim, $\frac{\alpha}{\tau} \approx 0$. Logo, a Equação 3 se aproxima de $B(t) = B_{\infty}(1 - e^{-t/\tau})$. Com os valores obtidos, elaborou-se a malha aberta do sistema utilizando a ferramenta Simulink do MATLAB, Figura 2, para obter a resposta de funcionamento de ambos os processos. Essa ferramenta minimiza os resultados para encontrar os parâmetros que mais se ajustam para representar o sistema leito fixo termomagnético. Assim em cada um dos processos foi selecionado um período de 120s para o pulso, com atraso de 60s no pulso de aquecimento, uma vez que enquanto um processo é ligado, o outro encontra-se em espera para ser acionado.

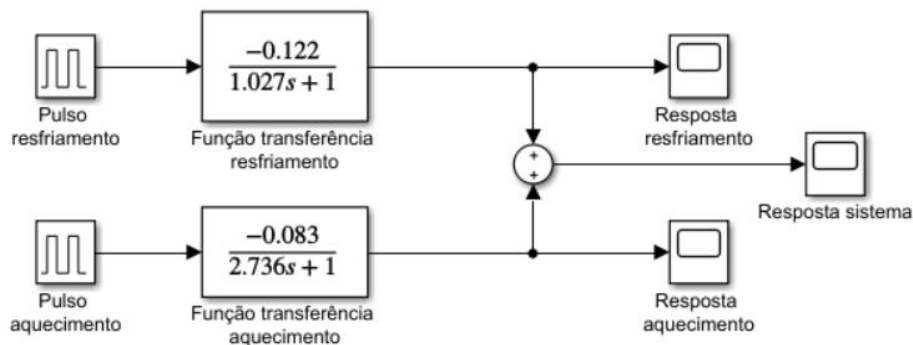


Figura 2: Malha de simulação do sistema.

Com base na resposta do sistema na malha de simulação, pode-se comparar com os dados experimentais obtidos. Os resultados são mostrados na Figura 3, no eixo y é representado o desvio da densidade do fluxo magnético ($B(t) - B(\text{estado estacionário})$).

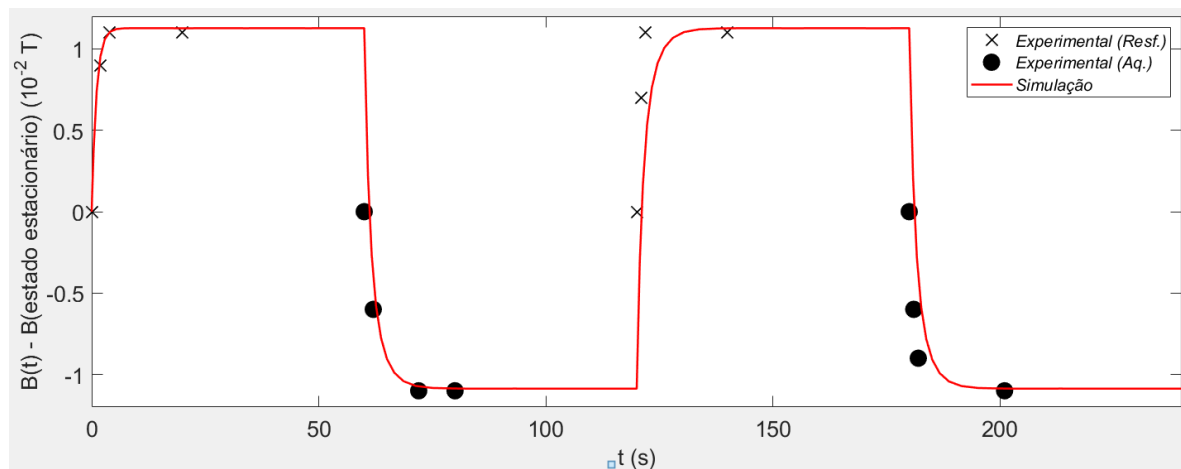


Figura 3: Variação da densidade do fluxo magnético experimental e simulada por tempo.

Nota-se que o processo se identifica como modelo da função transferência de primeira ordem, Equação 3, uma vez que o comportamento dos dados reais está próximo cerca de 12% da simulação, podendo considerar adequada ao sistema.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As modelagens dos processos de magnetização e desmagnetização de um sistema são muito complexas de serem obtidas, por isso a aproximação com um modelo de função transferência de primeira ordem por meio do método de modelo “caixa preta” é uma alternativa viável para compreensão do comportamento, como pode ser observado nos resultados e discussões. Sendo esse um dos próximos passos para o processo de otimização do sistema.

REFERÊNCIAS

APREA, C.; RENNO, C. Experimental analysis of a transfer function for an air cooled evaporator. **Applied Thermal Engineering**, v. 21, n. 4, p. 481-493, 2001.

IEA. World Energy Outlook 2020, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>. Acesso em: 28 nov.2020.

KANEKO, G. H. **Projeto e construção de um motor termomagnético tipo Tesla**. 2019. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Maringá, 2019.

MURAKAMI, K.; NEMOTO, M. Some experiments and considerations on the behavior of thermomagnetic motors. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 8, n. 3, p. 387-389, 1972.

OGUNNAIKE, B. A.; RAY, W. H. **Process dynamics, modeling, and control**. New York: Oxford University Press, 1994.