



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÁRCIO VENÍCIO RAMOS LIMAVERDE

**GERADOR TERMOELÉTRICO SEM PARTES MÓVEIS BASEADO NO EFEITO
MAGNETOCALÓRICO**

FORTALEZA

2021

MÁRCIO VENÍCIO RAMOS LIMAVERDE

GERADOR TERMOELÉTRICO SEM PARTES MÓVEIS BASEADO NO EFEITO
MAGNETOCALÓRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Domenico Sgró

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L696g Limaverde, Marcio Venício Ramos.
Gerador termoelétrico sem partes móveis baseado no efeito magnetocalórico / Marcio Venício Ramos
Limaverde. – 2022.
66 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Domenico Sgró.
1. Efeito magnetocalórico. 2. Efeito termomagnético. 3. Gerador estático. 4. Gadolínio. 5. Efeito
termomagnético. I. Título.

CDD 621.3

MÁRCIO VENÍCIO RAMOS LIMAVERDE

GERADOR TERMOELÉTRICO SEM PARTES MÓVEIS BASEADO NO EFEITO
MAGNETOCALÓRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 8 de Abril de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Domenico Sgró (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. PhD. Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Engenheiro Gabriel Freitas Machado
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram
ao longo de minha formação, em especial aos
meus pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Marcus e Marta e aos meus irmãos, pelo apoio ao longo de toda minha formação.

A minha noiva Tamires Silva, pelo apoio e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Domenico Sgró por me orientar em meu trabalho de conclusão de curso e em minha pesquisa.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, René Pereira, pela parceria e pela grande amizade.

Aos meus amigos de graduação da Universidade Federal do Ceará, pelo companheirismo ao longo dos anos formação.

"A sabedoria serve de freio à juventude, de consolo aos velhos, de riqueza aos pobres e de ornamento aos ricos."

(Diógenes)

RESUMO

Os materiais magnetocalóricos estão sendo extensivamente estudados pois permitem o uso de uma nova tecnologia de refrigeração. De maneira semelhante a um gás comprimido, quando um material ferromagnético é magnetizado em condições adiabáticas, quando não há trocas de calor do sistema com o meio externo, a temperatura do material aumenta rapidamente. Por outro lado, quando o material sofre uma desmagnetização sua temperatura diminui, semelhante a um gás em expansão adiabática. Para os materiais magnetocalóricos a mudança na temperatura pode ser elevada. O ciclo termodinâmico descrito pode ser invertido, assim, por meio do efeito magnetocalórico, pode-se alterar a temperatura do material para se obter uma variação de fluxo magnético. Em um circuito magnético, esta variação de fluxo magnético pode ser usada para induzir uma força eletromotriz em uma bobina permitindo a conversão da energia térmica em energia elétrica. Portanto, o objetivo deste trabalho é descrever e analisar o funcionamento de um gerador elétrico sem partes móveis que funciona utilizando o efeito magnetocalórico no Gadolínio. Resultados de simulações também são apresentados para avaliar as especificidades do fenômeno aplicado.

Palavras-chave: Efeito magnetocalórico. Efeito termomagnético. Gerador estático. Gadolínio. Circuitos magnéticos. Efeito termomagnético.

ABSTRACT

Magnetocaloric materials are being extensively studied as they allow the use of a new refrigeration technology. Similar to a compressed gas, when a ferromagnetic material is magnetized under adiabatic conditions, when there is no heat exchange between the system and the external environment, the temperature of the material increases rapidly. On the other hand, when the material undergoes demagnetization, its temperature decreases, similar to a gas in adiabatic expansion. For magnetocaloric materials the change in temperature can be high. The thermodynamic cycle described can be inverted, thus, through the magnetocaloric effect, the temperature of the material can be changed to obtain a variation of magnetic flux. In a magnetic circuit, this variation of magnetic flux can be used to induce an electromotive force in a coil allowing the conversion of thermal energy into electrical energy. Therefore, the objective of this work is to describe and analyze the operation of an electrical generator without moving parts that works using the magnetocaloric effect on Gadolinium. Simulation results are also presented to assess the specifics of the applied phenomenon.

Keywords: Thermomagnetic effect. Static generator. Gadolinium. Magnetic circuits. Magnetocaloric effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da lei circuital de Ampère em um condutor.	21
Figura 2 – Circuito magnético em um núcleo ferromagnético retangular	22
Figura 3 – Circuito utilizado no experimento de Faraday.	23
Figura 4 – Regra da mão direita usada para determinar o sentido da corrente induzida. .	24
Figura 5 – Momento magnético orbital de um elétron.	25
Figura 6 – Circuito magnético.	28
Figura 7 – Demonstração dos momentos magnéticos associados ao: (a) movimento orbital (b) spin.	30
Figura 8 – Esboço do comportamento de magnetização em função da temperatura e campo magnético constante. (a) Material de segunda ordem . (b) Material de primeira ordem. Linhas de mesma cor representam mesmo campo aplicado.	31
Figura 9 – Domínios de um material se alinhando com campo externo.	32
Figura 10 – Esboço do calor específico aparente a campo magnético e pressão constantes ao redor de T_c : (a) Material de segunda ordem (b) Material de primeira ordem. Linhas de mesma cor representam mesmo valor de campo aplicado.	33
Figura 11 – Esboço do comportamento da temperatura do material em função da entropia para diferentes campos aplicados ao redor de T_c : (a) Material de segunda ordem (b) Material de primeira ordem. Linhas de mesma cor representam mesmo valor de campo aplicado.	33
Figura 12 – Analogia entre a refrigeração magnética e ciclo de vapor.	35
Figura 13 – Amostra de Gadolínio ultrapura, 12 gramas.	36
Figura 14 – Célula contendo materiais semicondutores onde pode ser avistado um gradiente de calor gerado pelo efeito Peltier.	37
Figura 15 – Gerador proposto.	39
Figura 16 – Curvas de magnetização do gadolínio com ciclo de magnetização.	40
Figura 17 – Corrente controlada e ciclo de magnetização do gadolínio controlando a corrente de excitação.	41
Figura 18 – Bloco Constante.	45
Figura 19 – Bloco Ganho.	46
Figura 20 – Bloco Chaveamento.	46
Figura 21 – Bloco Relógio.	46

Figura 22 – Bloco Função de Transferência.	47
Figura 23 – Bloco Produto.	47
Figura 24 – Bloco Derivada.	47
Figura 25 – Bloco Tabela de Pesquisa 1-D.	48
Figura 26 – Bloco Gráfico XY Gravável.	48
Figura 27 – Bloco Conversor Simulink-PS.	48
Figura 28 – Bloco Conversor PS-Simulink.	49
Figura 29 – Bloco Entrada de.	49
Figura 30 – Bloco Saída Vai Para.	49
Figura 31 – Bloco Tensão PWM Controlada.	50
Figura 32 – Bloco Resistor.	50
Figura 33 – Referência Elétrica.	50
Figura 34 – Bloco Fonte de Corrente Controlada por Corrente.	51
Figura 35 – Bloco Sensor de Corrente.	51
Figura 36 – Bloco Dispositivo Peltier.	52
Figura 37 – Bloco Fonte de Temperatura.	52
Figura 38 – Bloco Sensor de Taxa de Fluxo de Calor.	52
Figura 39 – Bloco Sensor de Temperatura.	53
Figura 40 – Bloco Referência Térmica.	53
Figura 41 – Bloco Resistência Térmica Variável.	53
Figura 42 – Bloco Massa Térmica.	54
Figura 43 – Bloco Configuração do Solucionador.	54
Figura 44 – Modelo no Simulink [®] do sistema de transferência de calor.	55
Figura 45 – Subsistema do modelo do gadolínio no Simulink [®]	56
Figura 46 – Modelo no Simulink [®] para obtenção dos resultados.	58
Figura 47 – PWMs de corrente dos Dispositivos Peltier.	59
Figura 48 – Magnetização e temperatura do gadolínio.	60
Figura 49 – Tensão gerada na bobina do gerador.	61
Figura 50 – Fluxo médio de calor no gadolínio.	62
Figura 51 – Potência média gerada.	63
Figura 52 – Ciclo de magnetização.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do modelo no Simulink [®] do sistema de transferência de calor. .	55
Tabela 2 – Parâmetros do subsistema do modelo do gadolínio no Simulink [®]	57
Tabela 3 – Parâmetros das Tabelas de Pesquisa do ciclo de magnetização do gadolínio.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FF Fonte Fria

FQ Fonte Quente

PWM do inglês *pulse width modulation*

LISTA DE SÍMBOLOS

Gd	Gadolínio
Al	Alumínio
Ni	Níquel
Pr	Praseodímio
Dy	Diprócio
Er	Érbio
Nd	Neodímio
T_c	Temperatura de Cúrie
\vec{H}	Intensidade de campo magnético
l	Comprimento de um caminho fechado
$\vec{d}(\cdot)$	Vetor diferencial de \cdot
I	Corrente elétrica
ln	Comprimento de caminho médio
I_T	Corrente elétrica total
N	Número de enrolamentos
Φ	Fluxo magnético
t	tempo
F_{em}	Força eletromotriz
S	Área
\vec{B}	Campo indução magnética
R	Raio
A	Ampere
m	Momento magnético
I_b	Corrente ligada
m_{total}	Momento magnético total
ΔV	Volume

L	Comprimento
\vec{M}	Vetor magnetização
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
χ_m	Susceptibilidade magnética
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
μ	Permeabilidade magnética
V	Tensão elétrica
R	Resistência elétrica
F_{mm}	Força magnetomotriz
\mathfrak{R}	Relutância magnética
S_{total}	Entropia total
S_e	Entropia dos elétrons relacionada aos spins
S_r	Entropia de rede cristalina referente as suas vibrações
S_m	Entropia magnética
T	Temperatura
S_i	Silício
G_e	Germânio
c_H	Calor específico aparente a campo magnético e pressão constante
q	Quantidade de calor
π_{ab}	Coefficiente de Peltier
B_i	Bismuto
T_e	Telúrio
M_L	Magnetização mínima
M_H	Magnetização máxima
ρ	Densidade do gadolínio
ΔT	Varição de temperatura
T_L^+	Temperatura ponto d
T_L^-	Temperatura ponto a

T_H^-	Temperatura ponto b
T_H^+	Temperatura ponto c
P	Potência elétrica
W	Energia
Q	Fluxo de calor
c	Calor específico
m	massa
$F(s)[M]$	Filtro passa baixa para calcular o valor médio da magnetização
$F(s)[P]$	Filtro passa baixa para calcular o valor médio da potência gerada
$F(s)[FLCL]$	Filtro passa baixa para calcular o valor médio do fluxo de calor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Estado da arte	18
1.2	Justificativa	18
1.3	Objetivos	18
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivos gerais</i>	19
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	19
1.4	Contribuições do trabalho	19
1.5	Organização do texto	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Lei de Ampère	21
2.2	Lei de Faraday	22
2.3	Lei de Lenz	24
2.4	Circuitos magnéticos	25
2.5	Comportamento térmico dos materiais magnéticos	29
2.6	Efeito magnetocalórico	31
2.7	O gadolínio	35
2.8	O efeito Peltier	36
3	GERADOR ELÉTRICO SEM PARTES MÓVEIS PROPOSTO	38
3.1	O circuito magnético	38
3.2	Ciclo termodinâmico de operação do gerador proposto.	39
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	45
4.1	Descrição dos blocos do Simulink®	45
<i>4.1.1</i>	<i>Blocos comumente usados</i>	45
<i>4.1.1.1</i>	<i>Constante</i>	45
<i>4.1.1.2</i>	<i>Ganho</i>	46
<i>4.1.1.3</i>	<i>Chaveamento</i>	46
<i>4.1.1.4</i>	<i>Relógio</i>	46
<i>4.1.1.5</i>	<i>Função de Transferência</i>	47
<i>4.1.1.6</i>	<i>Produto</i>	47
<i>4.1.1.7</i>	<i>Derivada</i>	47

4.1.1.8	<i>Tabela de Pesquisa 1-D</i>	48
4.1.1.9	<i>Gráfico XY Gravável</i>	48
4.1.1.10	<i>Conversor Simulink-PS</i>	48
4.1.1.11	<i>Conversor PS-Simulink</i>	49
4.1.1.12	<i>Entrada de</i>	49
4.1.1.13	<i>Saída Vai Para</i>	49
4.1.2	<i>Blocos do Simscape™</i>	50
4.1.2.1	<i>Tensão PWM Controlada</i>	50
4.1.2.2	<i>Resistor</i>	50
4.1.2.3	<i>Referência Elétrica</i>	50
4.1.2.4	<i>Fonte de Corrente Controlada por Corrente</i>	51
4.1.2.5	<i>Sensor de Corrente</i>	51
4.1.2.6	<i>Dispositivo Peltier</i>	51
4.1.2.7	<i>Fonte de Temperatura</i>	52
4.1.2.8	<i>Sensor de Taxa de Fluxo de Calor</i>	52
4.1.2.9	<i>Sensor de Temperatura</i>	52
4.1.2.10	<i>Referência Térmica</i>	53
4.1.2.11	<i>Resistência Térmica Variável</i>	53
4.1.2.12	<i>Massa Térmica</i>	54
4.1.2.13	<i>Configuração do Solucionador</i>	54
4.2	Modelo no Simulink® do gerador proposto	54
5	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

No mundo, a maior parte da energia elétrica produzida utiliza a energia térmica como fonte primária. Segundo (Eletrobrás-PROCEL EDUCAÇÃO; Universidade Federal de Itajubá, 2006), fica clara a predominância da geração por centrais termoelétricas, sendo cerca de 65% da energia mundial produzida em usinas termoelétricas e 12% em usinas termonucleares. Estas utilizam o calor proveniente da queima de algum combustível ou a energia térmica proveniente da fissão nuclear de elementos radioativos para esquentar água. Por sua vez, a água no estado de vapor é mantida em alta pressão até ser liberada por uma válvula direcionada a uma turbina que ganha energia mecânica e a transmite a um gerador de energia elétrica. Estes processos de geração de energia elétrica envolvem, portanto, um ciclo termodinâmico.

Outro tipo de utilização da energia térmica ocorre através de motores térmicos a combustão interna. Estes utilizam ciclos termodinâmicos como o Otto, para motores de combustão por centelhamento, e o ciclo Diesel, para motores de combustão por compressão (GANESAN, 2012). Nesta forma de geração, os motores queimam algum tipo de combustível, como gasolina e diesel, para transformar a energia térmica proveniente da queima em energia mecânica. Acoplando-se ao eixo do motor um gerador elétrico, pode-se transformar a energia mecânica do motor em energia elétrica. A diferença das operações dos ciclos está apenas na forma com que a queima do combustível acontece. No ciclo Otto, a queima acontece por compressão do combustível e um centelhamento inicial que causa a combustão. Já no ciclo Diesel, a queima se dá apenas pela compressão do combustível juntamente com o ar.

Existem também diversos sistemas que utilizam calor, convertendo-o em trabalho para aplicações diretas, como por exemplo o motor Stirling. Ele realiza trabalho a partir da contração e expansão de um gás que utiliza calor proveniente de uma fonte externa. Isso traz grande flexibilidade ao motor, tendo em vista que qualquer combustível pode ser utilizado.

Outra forma de se aproveitar a energia térmica são as usinas de ciclo combinado. Elas reutilizam o calor restante de um gás, que já foi utilizado na movimentação de uma turbina, para produzir vapor d'água para movimentar outra turbina. Isso caracteriza um ciclo Brayton combinado a um ciclo Rankine.

São inúmeras as aplicações da energia térmica no que diz respeito à geração de energia elétrica. Portanto, existe uma demanda crescente por sistemas mais eficientes de conversão de energia térmica em eletricidade. Entre eles, podemos destacar os sistemas de conversão de energia que se baseiam no efeito magnetocalórico.

Logo, pode-se dizer que o gerador abordado nesse trabalho possui relevante importância, visto que é uma contribuição para novas pesquisas que visam a conversão de energia térmica em energia elétrica.

1.1 Estado da arte

Em comparação com outros métodos de conversão de energia térmica em energia elétrica, são poucos os trabalhos na literatura que se baseiam no efeito magnetocalórico. Porém, muitas aplicações utilizam este efeito para realização de trabalho.

Em (BESSA, 2018), é realizada uma análise de desempenho de motores tipo Tesla que utilizam o efeito termomagnético como princípio de funcionamento. Outro trabalho encontrado sobre o assunto é a dissertação (DE SOUSA, 2007), que aborda o assunto Efeito Magnetocalórico Nos Sistemas $Gd(Al_{(-x)}Ni_x)_2$ e RMg_2 (R=Pr, Dy, Er, Nd).

Outra utilização do efeito magnetocalórico é no resfriamento magnético. Esta aplicação está muito visada na atualidade, haja vista que é um processo com alto potencial de eficiência e não engloba substâncias nocivas como é o caso da refrigeração convencional. Uma das contribuições encontradas é o artigo (DANTE, 2008). O trabalho aborda a construção de um protótipo de refrigerador à base de gadolínio para dispositivos de dimensões reduzidas. Segundo esse trabalho, a refrigeração magnética é teoricamente 20% a 30% mais eficiente que a refrigeração a compressão.

1.2 Justificativa

A geração de energia através do efeito magnetocalórico visa utilizar o calor que pode por exemplo ser rejeitado dos mais variados processos, como por exemplo o calor proveniente de gases de exaustão de caldeiras. Isso mostra-se importante já que atualmente busca-se cada vez mais, novas formas de geração. Além de ser uma forma de geração de energia limpa, o modelo inclui uma perspectiva nova e promissora a respeito do fenômeno. Logo, os dados obtidos nesse trabalho são importantes para auxiliar novas pesquisas referentes ao tema.

1.3 Objetivos

Simular através do software SIMULINK um modelo de gerador termoelétrico sem partes móveis baseado no efeito magnetocalórico. Com a simulação pode-se realizar o levanta-

mento de dados referentes a tensão induzida e potência gerada pelo equipamento. Dessa forma, comprovando que o princípio de funcionamento aplicado funciona.

1.3.1 Objetivos gerais

Tendo em vista a grande variedade de utilizações da energia térmica e sua importância para a geração de energia, é esperado que pesquisas sejam feitas na área com o intuito de ampliar e inovar as formas de sua utilização, desta forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar tecnicamente um gerador termoelétrico sem partes móveis que utiliza o efeito magnetocalórico para a produção de energia elétrica. Este efeito se apresenta em alguns materiais a baixas temperaturas e de forma abrupta ou suave, fazendo com que estes materiais oscilem entre paramagnéticos e ferromagnético quando a sua variação de temperatura está em torno da temperatura de Curie (T_c), inserindo estes materiais em um circuito magnético, podemos a partir da variação de sua temperatura, obter um efeito similar a um entreferro variável que por sua vez pode variar o fluxo magnético estabelecido no núcleo do circuito magnético.

1.3.2 Objetivos específicos

Especificamente, o trabalho tem o objetivo de:

- Simular um gerador termoelétrico sem parte móveis;
- Colher informações a respeito dos seus sinais de saída;
- Validar o princípio de funcionamento aplicado.

1.4 Contribuições do trabalho

O presente trabalho visa a aplicação do ciclo inverso, já que o ciclo do resfriamento magnético é reversível. Associado ao ciclo termomagnético em questão, é feito o controle da corrente induzida na bobina para controlar o campo que passa no material magnetocalórico. Isso possibilita o controle do ciclo termomagnético. Dessa forma, o trabalho oferece contribuições ao campo de conhecimento em questão, visto que trás uma análise do funcionamento do gerador a ser estudado.

1.5 Organização do texto

O trabalho está organizado em cinco capítulos, com a seguinte estrutura: Capítulo 1: Esse capítulo contém a introdução do trabalho, bem como as justificativas e objetivos inerentes. Visa também determinar as contribuições ao campo de conhecimento alcançadas. Capítulo 2: Apresenta os fundamentos teóricos envolvidos, para auxiliar a explicação do princípio de funcionamento do equipamento. Capítulo 3: Aborda de forma detalhada a estrutura do gerador proposto e o princípio de funcionamento do mesmo. Capítulo 4: Trás os resultados da simulação e o diagrama de blocos utilizado para simular o gerador. Apresenta também todos os parâmetros utilizados na simulação. Capítulo 5: Apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo trata de conceitos e fundamentos básicos mas necessários para o melhor entendimento do funcionamento do gerador proposto. No entanto, é importante ressaltar que o tratamento de algumas noções fundamentais de eletromagnetismo apresentadas neste capítulo não pretende ser um resumo completo das leis do eletromagnetismo, mas sim um auxílio para permitir uma melhor explicação do funcionamento do gerador proposto, que será realizada no próximo capítulo.

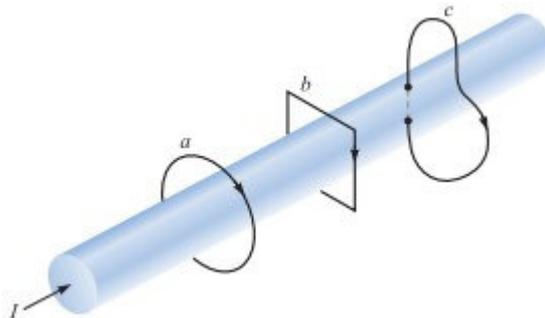
2.1 Lei de Ampère

A lei circuital de Ampère relaciona a integral de linha de caminho fechado do campo magnético com a corrente que atravessa o circuito de integração escolhido. Esta lei pode ser derivada da lei de Biot-Savart e é dada por (HAYT; BUCK, 2013):

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (2.1)$$

Onde \vec{H} representa a intensidade de campo magnético I é a corrente elétrica. Como mostrado na Figura 1, se um condutor possui uma corrente total I , a integral de linha de H ao longo dos caminhos fechados a e b é igual a I e a integral ao longo do caminho c é menor que I , uma vez que a corrente inteira não é envolvida pelo caminho. O sentido da corrente pode ser determinado utilizando a regra da mão direita.

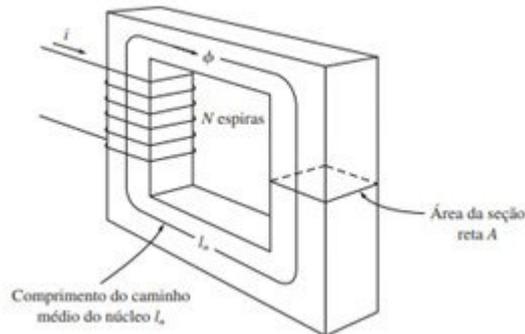
Figura 1 – Ilustração da lei circuital de Ampère em um condutor.



Fonte: (HAYT; BUCK, 2013)

A Figura 2 mostra uma bobina envolta em um núcleo retangular ferromagnético com comprimento de caminho médio l_n , e percorrida por uma corrente I . Aplicando a lei de Ampère

Figura 2 – Circuito magnético em um núcleo ferromagnético retangular



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

podemos tomar o caminho médio como o caminho fechado de integração. Considerando que todo o campo produzido pela corrente estará dentro do núcleo, e que \vec{H} pode ser considerado constante e uniforme ao longo do percurso de integração, a corrente total que passa através do caminho fechado é

$$I_T = NI \quad (2.2)$$

e a integral de Ampère resulta em

$$NI = Hl_n, \quad (2.3)$$

de forma que:

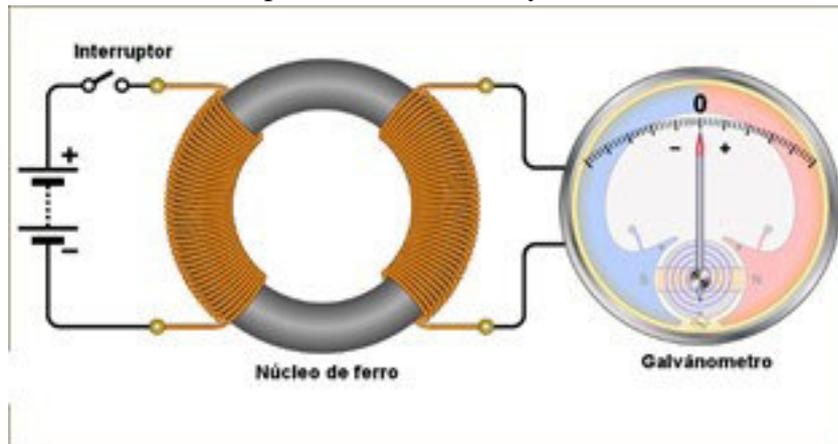
$$H = \frac{NI}{l_n}. \quad (2.4)$$

Podemos notar então que o campo H é diretamente proporcional a I , pois quando I aumenta, H também irá aumentar e se I diminuir H também diminuirá. Mais uma vez o sentido de H pode ser determinado pela regra da mão direita. Também é possível notar que invertendo o sentido da corrente, o campo também tem seu sentido invertido.

2.2 Lei de Faraday

Considere o circuito da Figura 3. Ao enrolar duas bobinas separadas em um núcleo toroidal de aço, conectando um galvanômetro em uma das bobinas e uma bateria na outra, Faraday constatou que quando ele fechava o circuito da bateria, percebia-se uma deflexão momentânea no ponteiro do galvanômetro (HAYT; BUCK, 2013). Ao desconectar a bateria o mesmo acontecia, porém, no sentido oposto.

Figura 3 – Circuito utilizado no experimento de Faraday.



Fonte: (BRASIL ESCOLA, 2021a)

Este fenômeno acontece por conta da variação do campo magnético. Sendo comutada a chave que liga e desliga o circuito da bateria, será gerado na bobina ligada a bateria um transitório de corrente. Como a corrente no momento do transitório irá aumentar ou diminuir, dependendo do caso, ela produzirá um campo também variável que transita através do núcleo toroidal na forma de um fluxo magnético, concatenando-se com a bobina conectada ao galvanômetro. Este fluxo magnético variante no tempo que se concatena com a bobina induz nela uma pequena corrente, indicada pelo galvanômetro.

Segundo o que enuncia a lei de Faraday, existindo um fluxo magnético variante no tempo através de uma superfície fechada induz uma força eletromotriz (fem), que por sua vez pode estabelecer uma corrente em um circuito adequado. A taxa com que esse fluxo varia é igual a fem induzida na superfície:

$$F_{em} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.5)$$

Desta forma, a tensão induzida em uma bobina pode ser calculada utilizando a lei de Faraday. Considerando uma bobina com N espiras e área constante A , através da qual passa um campo indução magnética B variante no tempo, a fem induzida pode ser calculada por

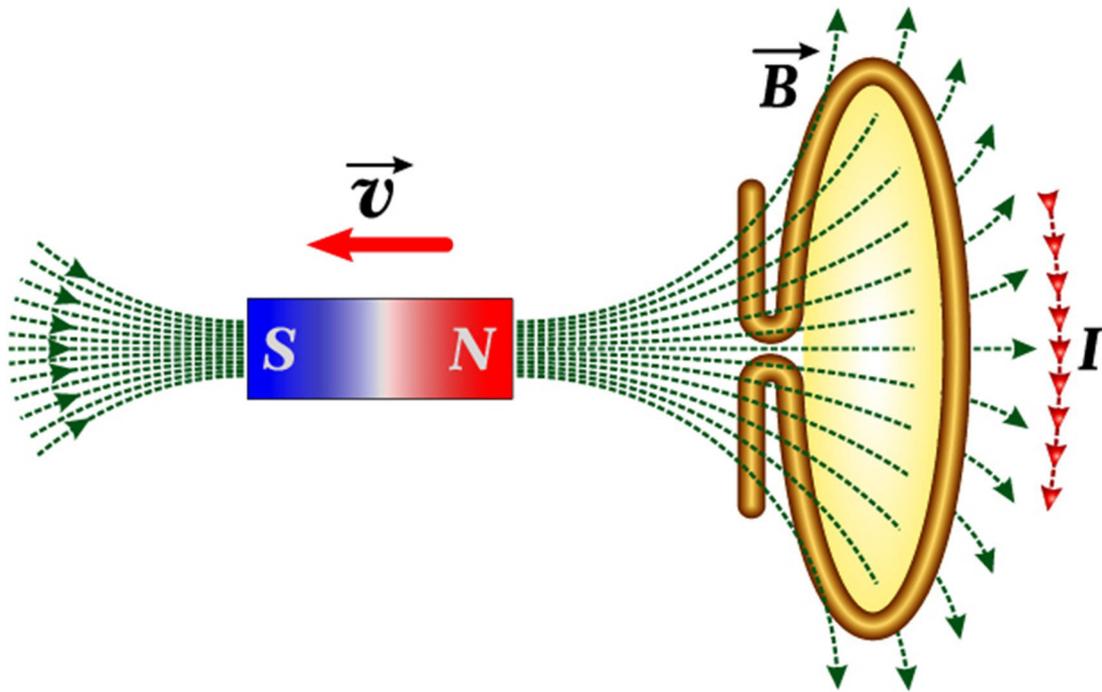
$$F_{em} = -NS\frac{dB}{dt}, \quad (2.6)$$

onde $NBS = \Phi$.

Para calcular a corrente induzida que irá circular por esta bobina, basta dividir a F_{em} pela resistência R da bobina, resultando em

$$I = \frac{-NS\frac{dB}{dt}}{R}. \quad (2.7)$$

Figura 4 – Regra da mão direita usada para determinar o sentido da corrente induzida.



Fonte: (BRASIL ESCOLA, 2021b)

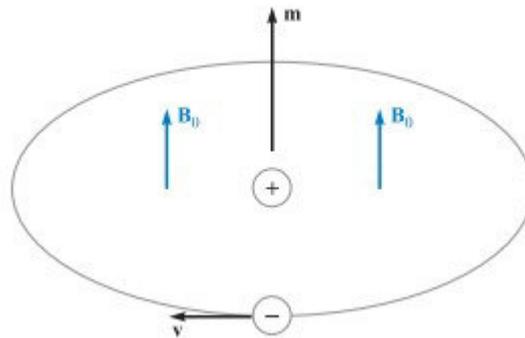
O sinal negativo é uma indicação de que a corrente induzida está num sentido que gera um fluxo oposto à variação que a gerou. Isto pode ser explicado pela lei de Lenz.

2.3 Lei de Lenz

A lei de Lenz é uma complementação à lei de Faraday e indica o sentido da corrente induzida em um condutor. Quando uma corrente é induzida em uma espira por meio de uma variação de fluxo magnético, uma corrente se estabelece na espira, gerando um outro fluxo que se opõe a esta variação. Matematicamente a lei de Lenz é apenas um sinal negativo, porém ela nos permite encontrar o sentido que circulará a corrente induzida.

Para se determinar este sentido, podemos usar a regra da mão direita, como ilustrada na Figura 4. Esta figura mostra que o fluxo está diminuindo na espira, logo, uma corrente é induzida na espira de forma a reforçar o campo. Pela regra da mão direita, esta corrente será no sentido horário. O contrário aconteceria caso o polo norte do ímã estivesse se aproximando da espira ao invés de se afastar.

Figura 5 – Momento magnético orbital de um elétron.



Fonte: (HAYT; BUCK, 2013)

2.4 Circuitos magnéticos

Antes de se discorrer sobre circuitos magnéticos, é importante conhecer o conceito de magnetização e permeabilidade magnética. Um elétron circulando ao redor do núcleo de um átomo pode ser interpretado como uma espira de corrente. Como mostrado na Figura 5, este sistema produz um momento magnético e, ao ser exposto a um campo externo, ele sofrerá uma rotação (devido a um torque magnético) no sentido de alinhamento dos campos.

Existe também o momento magnético relativo ao spin do elétron. No entanto, ele não tem uma aproximação razoável quando se considera um modelo simplificado, como no caso do momento orbital. Portanto, é necessário recorrer à teoria quântica relativística, resultando + ou - $9 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$. Os sinais positivo e negativo indicam a possibilidade de um alinhamento a favor ou contra um campo aplicado externamente. Existe também um momento relativo ao spin do núcleo atômico, porém ele não causa um efeito considerável, podendo ser desprezado (HAYT; BUCK, 2013). Com seus efeitos somados, estes momentos produzem um momento resultante que pode ser nulo ou ter valor considerável. Este momento resultante determina as características magnéticas do material.

Alguns exemplos de classificação de materiais segundo suas características magnéticas são: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

Os vários átomos que compõem um material têm um momento magnético a eles associado. Estes momentos, por uma questão de aleatoriedade de direções, se cancelam fazendo com que o material em si tenha campo magnético resultante nulo. Ao se aplicar um campo externo, os momentos irão se alinhar com este campo e, assim, poderão aumentar o campo interno em relação a ele. Caso o aumento seja sutil, chamamos o material de paramagnético. Se o aumento for expressivo, o material é ferromagnético.

Os materiais ferromagnéticos possuem momentos atômicos fortes e regiões em que os momentos são organizados paralelamente. Estas regiões são chamadas de domínios. Eles têm tamanhos distintos e são aleatoriamente orientados. O resultado disso é um cancelamento de seus efeitos magnéticos, fazendo com que o campo magnético próprio do material seja nulo.

Tendo conhecimento a respeito dos momentos atômicos, como eles se relacionam com campos magnéticos aplicados e sabendo-se que tais momentos contribuem para o aumento do campo dentro do material, pode ser introduzido agora o conceito de magnetização. Consideramos matematicamente um momento magnético como sendo uma corrente ligada circulando ao redor de uma área diferencial, dado por

$$m = I_b dS. \quad (2.8)$$

Somando todos os n momentos contidos em uma unidade de volume que existem em um volume ΔV , temos

$$m_{total} = \sum_{i=1}^{n\Delta V} m_i. \quad (2.9)$$

Desse modo, define-se a magnetização como o momento total por unidade de volume:

$$M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^{n\Delta V} m_i. \quad (2.10)$$

Analisando um volume diferencial de um material e considerando um campo aplicado externamente, os momentos vão se alinhar. Pode-se então estudar o efeito que este alinhamento vai causar no campo interior ao material.

Assim, a quantidade de momentos magnéticos em um volume diferencial

$$ndV = ndSdL, \quad (2.11)$$

ao se alinhar, fará com que a corrente ligada que passa através da superfície envolvida pelo volume considerado seja dada por

$$dI_b = nI_b dSdL, \quad (2.12)$$

onde,

$$M = \frac{nI_b dSdL}{dS}, \quad (2.13)$$

$$di_b = M dL, \quad (2.14)$$

$$I_b = \oint M \cdot dL \quad (2.15)$$

A equação (2.15) demonstra semelhança com a lei de Ampère e isso não é por acaso. Pode-se agora generalizar a relação entre B e H para meios que não sejam o vácuo. Como o campo B detém a informação tanto das correntes livres quanto das correntes ligadas, pode-se verificar que

$$\oint = I + I_b = I_T, \quad (2.16)$$

$$\oint \frac{B}{\mu_0} dL = \oint H dL + \oint M dL, \quad (2.17)$$

$$B = \mu_0(H + M). \quad (2.18)$$

Agora, a lei circuital de Ampère pode ser utilizada tanto para correntes livres quanto para correntes ligadas que passem através de uma superfície de caminho fechado definida. A equação pode ser simplificada para meios isotrópicos utilizando o conceito de susceptibilidade magnética χ_m e, assim, pode ser definido o conceito de permeabilidade magnética relativa:

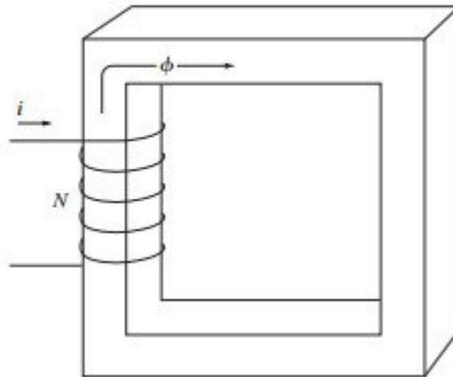
$$M = \chi_m H, \quad (2.19)$$

$$B = \mu_0(H + \chi_m H), \quad (2.20)$$

$$B = \mu_0 H(1 + \chi_m), \quad (2.21)$$

$$1 + \chi_m = \mu_r, \quad (2.22)$$

Figura 6 – Circuito magnético.



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

$$B = \mu_0\mu_r H = \mu H, \quad (2.23)$$

onde μ_r é a permeabilidade magnética relativa, e o produto $\mu_0\mu_r$ é a permeabilidade.

Um circuito magnético consiste em pelo menos um enrolamento de excitação envolvendo um núcleo de material ferromagnético. Ao ser percorrido por uma corrente elétrica, o enrolamento produzirá um campo magnético. A maior parte do campo produzido fica confinada no interior do núcleo, pois, em geral, este possui alta permeabilidade magnética. Geralmente a parte do campo que se dispersa para fora do núcleo é desconsiderada. Assume-se, portanto, que todo o campo produzido circula pelo circuito magnético, proporcionando maior simplicidade nos cálculos. Isto é mostrado na Figura 6.

Por analogia, circuitos magnéticos podem ser comparados a circuitos elétricos, tornando sua análise mais fácil. Em circuitos elétricos simples, uma fonte de tensão alimenta uma resistência através da circulação de uma corrente, seguindo a lei de Ohm:

$$V = IR. \quad (2.24)$$

A mesma ideia pode ser usada na análise de circuitos magnéticos, seguindo a seguinte equação:

$$F_{mm} = \Phi \mathfrak{R}, \quad (2.25)$$

onde F_{mm} , é a força magnetomotriz, que é análoga a tensão no circuito elétrico, Φ é o fluxo magnético que circula no circuito magnético, sendo análogo à corrente elétrica e \mathfrak{R} é a relutância, análoga a resistência elétrica.

A força magnetomotriz pode ser calculada como

$$F_{mm} = NI, \quad (2.26)$$

onde N é a quantidade de enrolamentos da bobina de excitação e I é a corrente que circula por ela.

No caso do fluxo magnético, sua equação é

$$\Phi = BA, \quad (2.27)$$

onde B representa o vetor indução magnética e A a área pela qual atravessa o fluxo.

A relutância \mathfrak{R} é dada por

$$\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu A}, \quad (2.28)$$

onde L é o caminho médio do circuito magnético, μ é a permeabilidade magnética e A é a área da secção transversal do núcleo.

Dependendo da sua topologia, também podem existir circuitos magnéticos com duas ou mais relutâncias. Relutâncias variáveis causam ainda um efeito interessante no circuito: uma variação de fluxo. Tendo-se também uma bobina de indução, este efeito gera uma tensão induzida, que se deve à lei de Faraday.

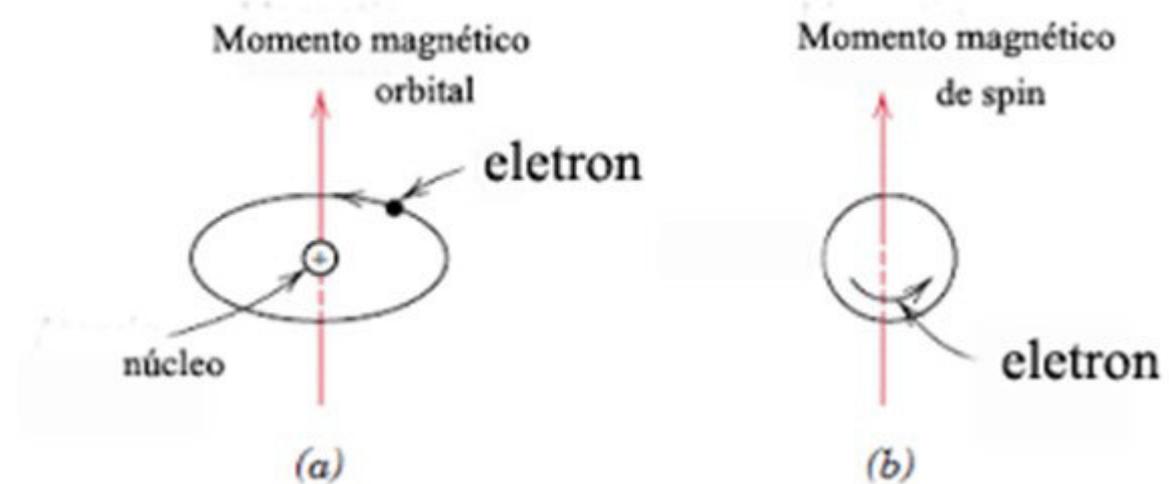
2.5 Comportamento térmico dos materiais magnéticos

Nos materiais magnéticos existe uma relação entre temperatura e magnetização. À medida que o material é aquecido, suas partículas adquirirão cada vez mais energia, vibrando com maior intensidade. Essa vibração dificulta o alinhamento dos domínios magnéticos, diminuindo a interação do material com campos aplicados externamente. Materiais que possuem forte interação com campos magnéticos são chamados de ferromagnéticos. Em contrapartida, materiais que interagem de forma fraca na presença destes campos são chamados de paramagnéticos.

Os materiais magnéticos apresentam uma temperatura associada à transição dos estados ferromagnético e paramagnético. A esta temperatura se dá o nome de temperatura de Curie ou ponto de Curie (T_C), em homenagem ao físico francês Pierre Curie. Logo, se um material em estado ferromagnético se encontra recebendo energia térmica, sua magnetização tenderá a cair até que atinja o ponto de Curie, onde o material transicionará para o estado paramagnético. Da mesma forma, ao ser resfriado até o ponto de Curie, o material volta ao estado ferromagnético.

Para uma melhor compreensão deste fenômeno, pode-se observar a Figura 7. Nesta figura podem ser vistos dois tipos de momentos magnéticos, um relacionado à órbita do elétron ao redor do núcleo e outro referente ao spin do elétron. Nota-se que o núcleo atômico também produz um campo, porém muito pequeno, podendo ser desprezado.

Figura 7 – Demonstração dos momentos magnéticos associados ao: (a) movimento orbital (b) spin.

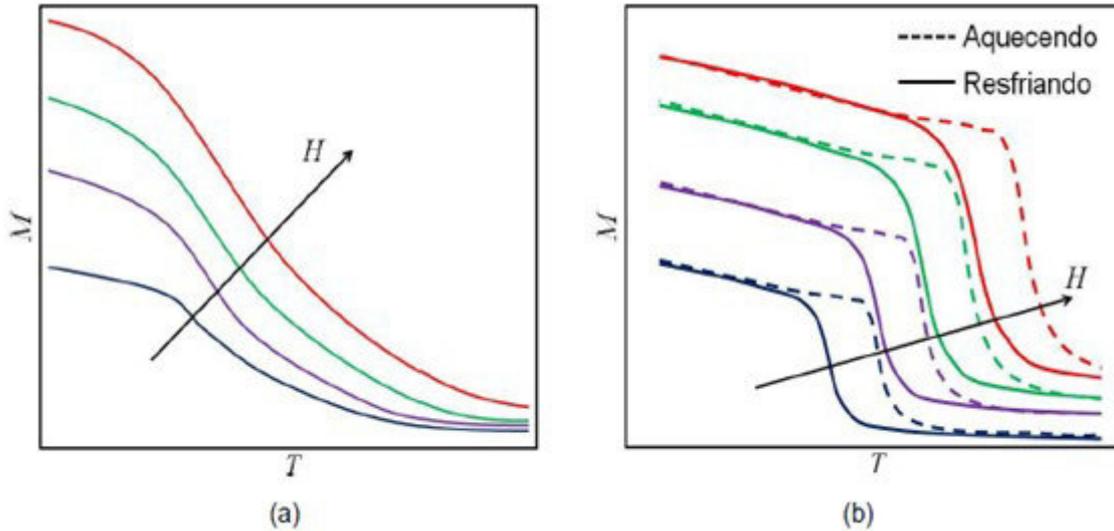


Fonte: (RETHWISCH; CALLISTER, 2016)

Cargas elétricas em movimento produzem campos magnéticos. Logo, estes movimentos dos elétrons produzem pequenos campos que determinam as características magnéticas dos materiais. Os momentos magnéticos se agrupam em regiões de mesma direção e sentido chamadas de domínios magnéticos. Tais domínios têm configuração aleatória e em geral a soma vetorial destes momentos é nula ou muito próxima de zero. Quando um campo magnético é aplicado externamente, estes momentos tendem a sofrer um torque de forma a alinhá-los com o campo aplicado. O resultado da soma dos momentos alinhados é uma elevação do campo interno do material. Caso esta elevação seja considerável, diz-se que o material tem forte magnetização, logo, é um material ferromagnético. Do contrário, nos materiais paramagnéticos, esta interação é fraca.

Como o aumento da temperatura causa um aumento da energia das partículas que compõem o material, fica difícil alinhar seus domínios, o que diminui a magnetização do material. Vale ressaltar que a transição de estado magnético pode se dar de forma suave ou mais abrupta. A Figura 8 apresenta duas curvas características que relacionam a magnetização e a temperatura de um material para diferentes campos aplicados. Nota-se que em um dos casos a transição se dá de forma mais suave, caracterizando uma transição de segunda ordem. Também pode acontecer

Figura 8 – Esboço do comportamento de magnetização em função da temperatura e campo magnético constante. (a) Material de segunda ordem . (b) Material de primeira ordem. Linhas de mesma cor representam mesmo campo aplicado.



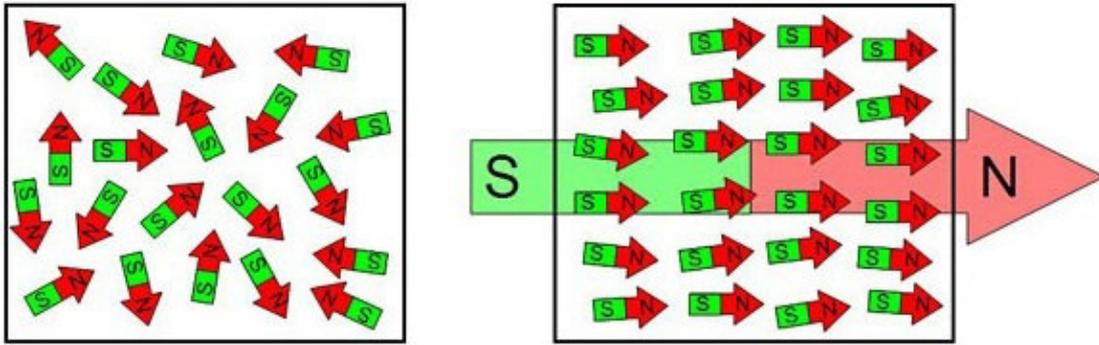
Fonte: (BESSA, 2018)

de o material, durante a transição, mudar sua forma cristalográfica para uma forma que apresenta resposta paramagnética. Isso causará uma transição mais abrupta, caracterizando uma transição de primeira ordem. Esse tipo de transição apresenta uma histerese térmica, fazendo com que a temperatura de Curie apresente valores diferentes para o aquecimento e resfriamento.

2.6 Efeito magnetocalórico

O efeito magneto calórico está relacionado a variação na temperatura de um material quando o mesmo é submetido a uma variação de campo magnético em um processo adiabático. Assim, quando materiais que apresentam o efeito magnetocalórico acentuado estão sujeitos a um campo magnético sem que haja troca de calor, a sua temperatura tende a aumentar consideravelmente, caso o campo seja retirado, sua temperatura tende a baixar. Isso acontece por conta do alinhamento de seus domínios com o campo magnético, como mostrado na Figura 9 e isso interfere na entropia do material.

Figura 9 – Domínios de um material se alinhando com campo externo.



Fonte: (RO CARNEVAL, 2022)

A entropia dos materiais é função de 2 variáveis, temperatura e campo magnético e consiste em 3 componentes: entropia dos elétrons relacionada aos spins (S_e), entropia de rede cristalina referente as suas vibrações (S_r) e entropia magnética (S_m) de modo que:

$$S_{total}(H, T) = S_m(H, T) + S_r(T) + S_e(T) \quad (2.29)$$

Em um processo adiabático reversível sabe-se que S_{total} é constante, logo, se S_m é reduzido devido a aplicação de um campo magnético ao material, S_r ou S_e devem aumentar para garantir a igualdade mostrada acima, esse aumento acarreta um aumento de temperatura do material, caracterizando assim o efeito magneto calórico, da mesma forma a diminuição da entropia de rede (S_r) por exemplo, representa uma distribuição randômica dos domínios do material, sendo esse processo também adiabático, a entropia magnética (S_m) tende a aumentar diminuindo assim a temperatura. Os melhores exemplos de materiais magnetocalóricos são o elemento gadolínio e algumas de suas ligas, como por exemplo o ($Gd_5Si_2Ge_2$).

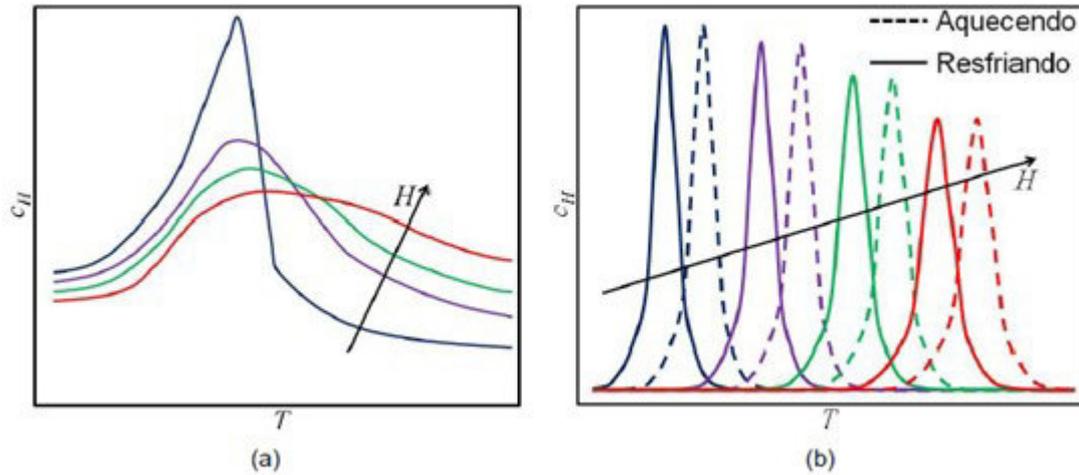
Para o cálculo da entropia específica (s) em um material magnético sendo o campo constante pode ser utilizado seu calor específico, como pode ser visto na equação (2.30). Pode ser notado então que o efeito magnetocalórico tem relação com o calor específico do material, sendo este influenciado fortemente pelo campo magnético aplicado ao material estando o material em torno da temperatura de Curie (T_c).

$$s(T, H) = \int \frac{c_H}{T} dT | H \quad (2.30)$$

Na Figura 10 é mostrado o comportamento do calor específico aparente a campo magnético e pressão constantes (c_H) para diferentes temperaturas em materiais de primeira e

segunda ordem.

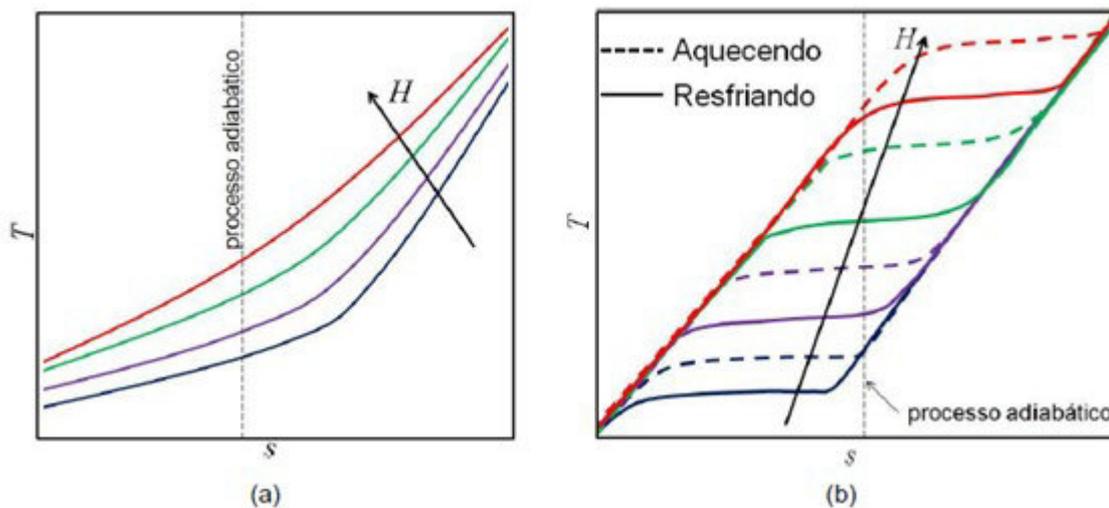
Figura 10 – Esboço do calor específico aparente a campo magnético e pressão constantes ao redor de T_c : (a) Material de segunda ordem (b) Material de primeira ordem. Linhas de mesma cor representam mesmo valor de campo aplicado.



Fonte: (BESSA, 2018)

Ao ser aplicada a equação (2.30) nas curvas da Figura 4, tem-se a dinâmica entre a temperatura do material em função da entropia. Esta dinâmica pode ser visualizada na Figura 11.

Figura 11 – Esboço do comportamento da temperatura do material em função da entropia para diferentes campos aplicados ao redor de T_c : (a) Material de segunda ordem (b) Material de primeira ordem. Linhas de mesma cor representam mesmo valor de campo aplicado.



Fonte: (BESSA, 2018)

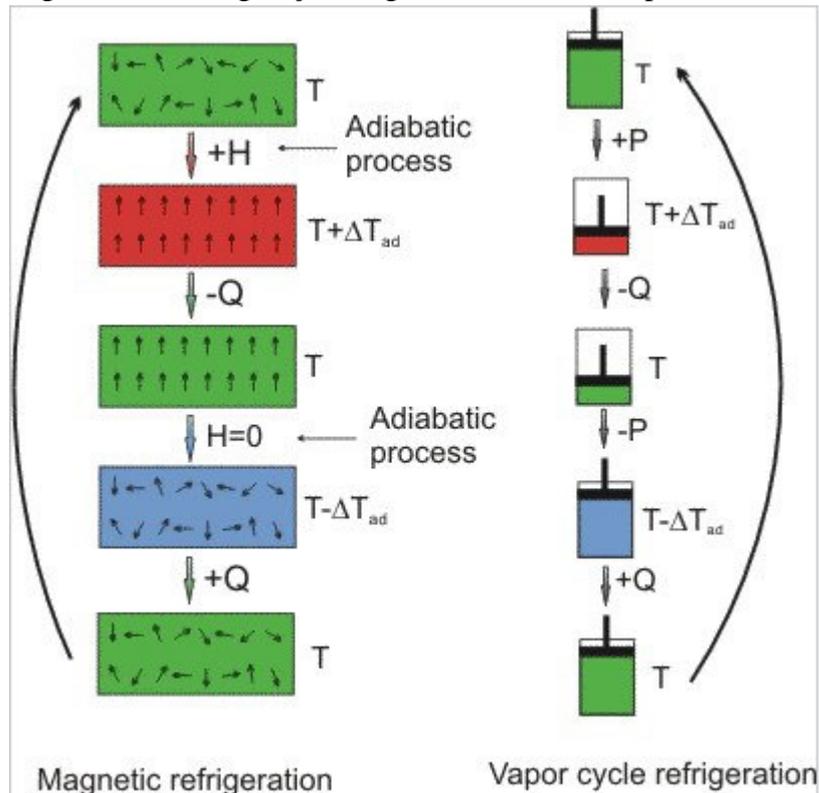
Uma analogia do efeito magnetocalórico pode ser feita comparando o efeito de resfriamento magnético a um ciclo de refrigeração de vapor.

Na Figura 12 pode ser visualizada esta analogia onde, para cada transformação sofrida pelo gás, temos um análogo no sistema de refrigeração magnética. O primeiro processo é a magnetização adiabática. Ao ser aplicado um campo magnético em uma substância, estando ela em um ambiente isolado que não permita trocas de calor com o meio, os seus dipolos magnéticos irão se alinhar com o campo externo gerando uma densidade de fluxo maior. Sendo assim, a entropia magnética do material irá diminuir junto com sua capacidade de calor. A energia total se conserva de forma que a entropia total do material permanece constante. O efeito disso é um aumento da temperatura do material.

Logo após, tem-se um processo denominado transferência entálpica isomagnética, onde o calor pode ser removido deixando a magnetização constante, para que os domínios magnéticos não reabsorvam o calor. Posteriormente, tem-se a desmagnetização adiabática. O material agora será desmagnetizado novamente em meio isolado. Por não haver troca térmica com o meio, os domínios absorverão o calor do próprio material e assumirão uma configuração randomizada, causando a diminuição da temperatura. Isso acontece porque a entropia de rede irá diminuir e a entropia magnética aumenta, mantendo a entropia total constante.

Por fim, tem-se outra transferência entrópica isomagnética. Desta vez o material magnetocalórico com campo magnético constante irá receber calor do meio, configurando o fim do ciclo. Pode ser visto, então, que o ciclo termomagnético é reversível, podendo ser usado em forma direta e reversa. Ressalta-se ainda que o campo magnético é análogo à pressão do vapor no esquema mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Analogia entre a refrigeração magnética e ciclo de vapor.



Fonte: (WIKIPEDIA CONTRIBUTORS, 2022)

2.7 O gadolínio

Pelo fato de ter características magnéticas favoráveis e temperatura de Curie por volta de 19 °C para pequenos campos magnéticos, o gadolínio é um material que é bastante usado em protótipos e pesquisas referentes a sistemas magnéticos. Este material apresenta magnetização e desmagnetização de segunda ordem, logo a transição de ferromagnético para paramagnético se dá de forma mais suave. O gadolínio (Gd) é um terra rara pertencente ao grupo dos actinídeos, possui número atômico 64, e possui massa atômica de 157,25 u (IUPAC). Na Figura 13 pode ser vista uma amostra de gadolínio.

Figura 13 – Amostra de Gadolínio ultrapura, 12 gramas.



Fonte: (CHEMICAL ELEMENTS, 2022)

2.8 O efeito Peltier

O efeito a ser discutido neste tópico possui diversas aplicações. Uma aplicação importante é nas células termo elétricas ou módulos termoeletrônicos. Estes módulos servirão para controlar o fluxo de calor que será injetado e retirado do sistema a ser abordado por este trabalho.

Os efeitos termoeletrônicos são aqueles em que as energias térmica e elétrica podem ser convertidas entre si, a exemplo deste efeito temos o efeito Peltier e o efeito Seebeck. O efeito Peltier, descoberto em 1834 pelo físico francês Jean-Charles-Athanase Peltier, pode ser visto com a passagem de uma corrente elétrica por uma junção metálica onde esta ficará aquecida ou resfriada dependendo do sentido da corrente. A equação $q = \pi_{ab}I$, representa esse fenômeno, onde, q é a quantidade de calor bombeada pela junção quando percorrida por uma corrente I e π_{ab} é o coeficiente de Peltier. O efeito Peltier é mais pronunciado em materiais semicondutores como o telureto de bismuto - Bi_2Te_3 dopados tipo N e tipo P.

Podemos notar na Figura 14 que ao passar uma corrente elétrica no sistema um gradiente de calor irá se formar, onde os próprios elétrons são responsáveis pela transmissão de

H
 Figura 14 – Célula contendo materiais semicondutores onde pode ser avistado um gradiente de calor gerado pelo efeito Peltier.



Fonte: (WIKIPÉDIA, 2019)

calor de um lado para o outro retirando calor de uma junção e jogando para a outra, o arranjo alterna materiais do tipo N e do tipo P para que se tenha todos os elementos bombeando calor em um mesmo sentido aumentando assim a eficiência, em materiais tipo N o calor é absorvido próximo ao terminal negativo e rejeitado próximo ao terminal positivo o inverso acontece com o material do tipo P.

3 GERADOR ELÉTRICO SEM PARTES MÓVEIS PROPOSTO

O sistema proposto consiste em um gerador de energia elétrica sem partes móveis baseado no efeito magnetocalórico. Este gerador utiliza calor como fonte primária de energia que é diretamente convertida em energia elétrica, e dois módulos termoelétricos para controlar o fluxo de calor.

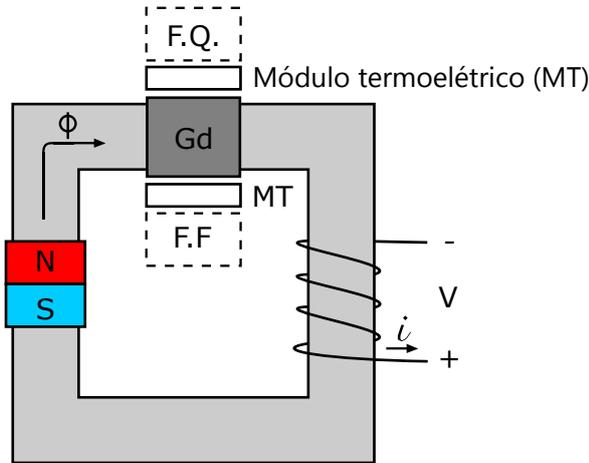
3.1 O circuito magnético

O gerador proposto é mostrado na Figura 15. É composto por um núcleo de material magnético envolvida por uma bobina onde será induzida a tensão de saída. Apresenta também dois entreferros. Um dos entreferros é preenchido com gadolínio e o outro com um material imã permanente. O imã produz o campo magnético necessário para a excitação da máquina e a bobina mostrada no circuito atua como o circuito de armadura. O fluxo de calor é controlado por meio de dois módulos termoelétricos que funcionam como válvulas deixando o calor passar da fonte quente Fonte Quente (FQ) para o elemento gadolínio e retirando a energia térmica do gadolínio e encaminhando para a fonte fria Fonte Fria (FF), como mostrados na figura. Controlando as correntes dos dois módulos é possível obter um controle rápido e acurado da energia térmica injetada no gadolínio. É importante ressaltar que cada módulo termoelétrico atua com variação de temperatura negativa, ou seja a dissipação de calor acontece no lado frio e a absorção no lado quente. Assim, a eficiência de cada módulo será sempre elevada.

Como explicado anteriormente, em determinadas condições, a variação de temperatura do gadolínio pode comportar uma transição de fase magnética e portanto, uma variação do fluxo magnético acoplado com à bobina do circuito. Como consequência da variação de fluxo uma tensão será induzida na bobina propiciando a conversão de energia térmica em energia elétrica. É possível perceber que o mecanismo de magnetização e desmagnetização do elemento de gadolínio inserido no circuito magnético opera de forma análoga a um entreferro variável. A grande vantagem em relação a um atuador convencional está na falta de partes em movimento. Também é importante ressaltar que o caso de magnetização completa do gadolínio corresponde a um caso de entreferro de comprimento nulo, resultado que é impossível obter em um atuador convencional, pois um pequeno "gap" entre estator e rotor será sempre necessário.

O núcleo possui alta permeabilidade magnética, fazendo com que o fluxo magnético fique confinado a ele e dando assim um caminho pré-determinado para o campo. O fluxo disperso

Figura 15 – Gerador proposto.



Fonte: O autor.

pode então ser desprezado.

3.2 Ciclo termodinâmico de operação do gerador proposto.

Para explicar o ciclo termodinâmico escolhido, considera-se a característica magnetização/temperatura para o gadolínio mostrada na Figura 16. Esta figura mostra a característica de magnetização do gadolínio ao se variar a temperatura para diferentes campos de indução magnética aplicados externamente.

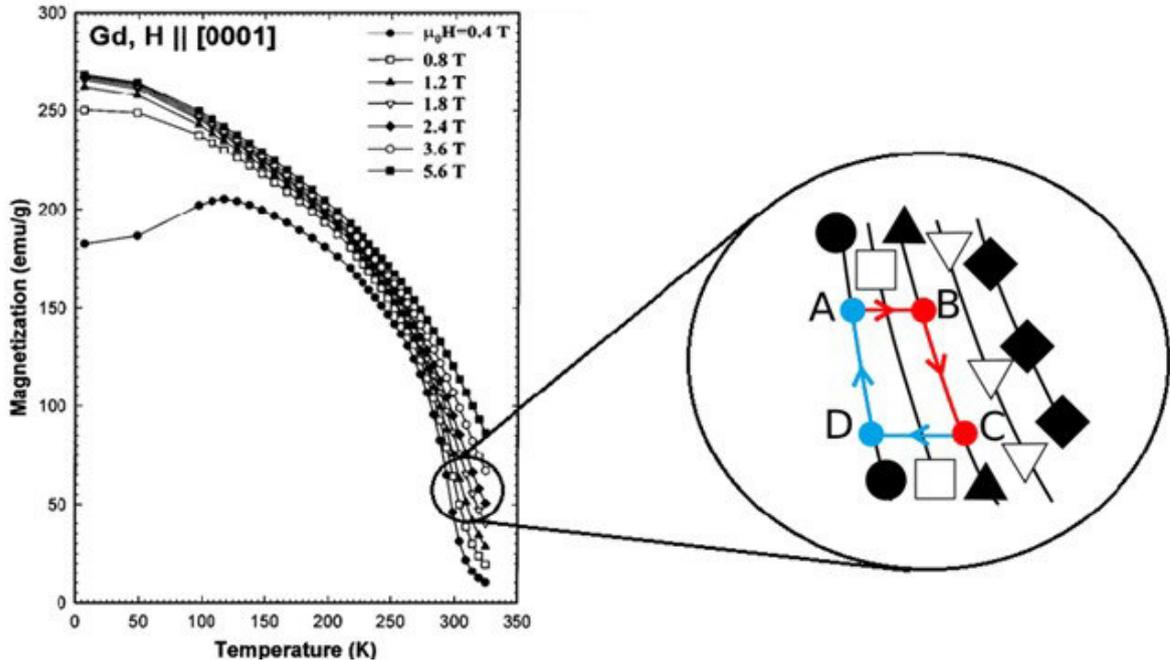
Considerando que a máxima intensidade de campo magnético H que é possível gerar com ímãs comerciais seja em torno de 950 kA/m, o valor máximo do campo de indução do ciclo de trabalho será

$$B_0 = \mu_0 \cdot H = 1,19\text{T.} \quad (3.1)$$

Por esse motivo a máxima curva de campo da Figura 16 escolhida será a de valor 1,2 T.

Desse modo, o ciclo termodinâmico de trabalho escolhido, ressaltado na Figura 16, é composto por quatro transformações: duas transformações isentrópicas \vec{ab} e \vec{cd} , e duas isomagnéticas \vec{bc} e \vec{da} . Como mostrado na figura, as transformações isomagnéticas do ciclo serão desenvolvidas para campos de indução de 1,2 T (como já explicado) e de 0,4 T, que equivale a uma intensidade de campo magnético H de aproximadamente 318 kA/m. As transformações isentrópicas terão suas magnetizações com valores entre $M_L^{cgs} = 55 \text{ emu/g}$ e $M_H^{cgs} = 95 \text{ emu/g}$.

Figura 16 – Curvas de magnetização do gadolínio com ciclo de magnetização.



Fonte: (DAN'KOV *et al.*, 1998).

Considerando a densidade do gadolínio $\rho = 7,9 \text{ g/cc}$, os valores de magnetização máxima e mínima em kA/m podem ser obtidos da seguinte forma:

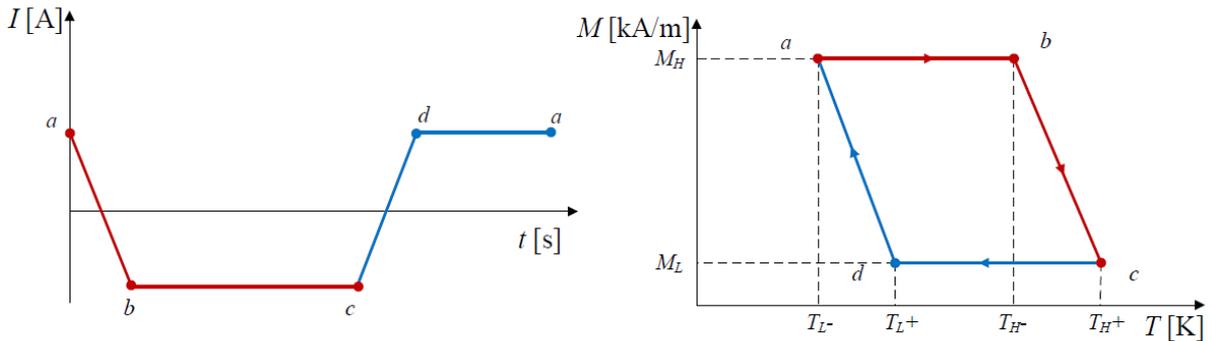
$$M_H = M_H^{cgs} \cdot \rho = 95 \cdot 7,9 = 750,5 \text{ kA/m} \quad (3.2)$$

$$M_L = M_L^{cgs} \cdot \rho = 434,5 \text{ kA/m} \quad (3.3)$$

Com base nas curvas mostradas na Figura 16 e no ciclo de operação escolhido, estimou-se que a variação de temperatura entre a máxima magnetização (M_H) e a mínima magnetização (M_L) nas transformações isomagnéticas será $\Delta T_1 = T_L^+ - T_L^- = T_H^+ - T_H^- = 1 \text{ K}$. Estimou-se também que para as transformações isentrópicas tem-se uma variação de temperatura $\Delta T_2 = T_H^- - T_L^- = T_H^+ - T_L^+ = 0,235 \text{ K}$.

Tendo em mente o que foi apresentado anteriormente, pode-se iniciar a explicação do ciclo observando a Figura 17, que contém a forma de onda da corrente de bobina e o diagrama do ciclo termodinâmico no plano MT.

Figura 17 – Corrente controlada e ciclo de magnetização do gadolínio controlando a corrente de excitação.



Fonte: O autor.

Para estimar os valores de temperatura absolutas dos pontos de trabalho a, b, c e d , sempre com base nos dados da Figura 16, foi estimada uma temperatura do ponto médio de \vec{cd} $T_o = 301$ K. Como resultado, os pontos de operação do ciclo possuem as seguintes coordenadas de magnetização e temperatura:

$$(T_L^-, M_H)_a \equiv (299.8825, 750.5);$$

$$(T_H^-, M_H)_b \equiv (300.1175, 750.5);$$

$$(T_H^+, M_L)_c \equiv (301.1175, 434.5);$$

$$(T_L^+, M_L)_d \equiv (300.8825, 434.5).$$

Vale ressaltar ainda que a figura mostra em vermelho as transformações que apresentam aumento da temperatura. Isso quer dizer que o fluxo de calor está entrando no material. As curvas em azul apresentam transformações que têm diminuição da temperatura do material, sendo o fluxo de calor saindo do material. Outro ponto importante é que com a corrente na bobina de indução, gerada de forma adequada, pode ser obtido o ciclo desejado. O sistema de controle mencionado não será apresentado neste trabalho, pois foge de seu escopo.

Sendo definidos os pontos de operação bem como o ciclo de magnetização, pode-se então analisar o funcionamento do ciclo por partes. Consideramos, primeiramente, a transformação $a \rightarrow b$. Inicialmente o gadolínio está com baixa temperatura e alta magnetização. O objetivo é aumentar a temperatura do gadolínio sem deixar que este se desmagnetize. Para isso,

faz-se com que a corrente controlada diminua linearmente deixando que o campo gerado pelo ímã aumente. Isso porque aplicando a regra da mão direita no circuito da figura 15, no caso de corrente positiva, a bobina estará gerando um fluxo que se opõe ao do ímã. Como mostrado na Figura 17, durante a transição $a \rightarrow b$, a corrente diminuirá até inverter seu sentido. Como consequência, o campo gerado pela bobina irá se somar com o campo do ímã, propiciando o aumento do campo H aplicado no entreferro de material magnetocalórico. Isso fará com que o campo de indução magnética aumente ainda mais até chegar no ponto desejado, ou seja, no ponto onde a indução magnética vale 1,2 T. Neste ponto, conseguiu-se elevar a temperatura do material magnetocalórico sem variar sua magnetização. Observa-se que nesta transformação não há conversão de energia elétrica em energia magnética armazenada nos domínios magnéticos do material, pois a variação de M foi nula.

Na transformação $b \rightarrow c$ do ciclo, a corrente i da bobina é mantida constante. Como consequência o gadolínio iniciará a transição de fase magnética, ou seja, irá desmagnetizar. Como o campo magnetizante está variando, como consequência, na bobina será induzida uma tensão V que pode ser calculada de acordo com a equação seguinte:

$$V = -NA\mu_0 \frac{dM}{dt}. \quad (3.4)$$

Então, supondo que a variação de M seja linear, a potencia elétrica transferida durante a transformação pode ser considerada constante e igual a:

$$P = V \cdot I = -NA\mu_0 \frac{dM}{dt} I. \quad (3.5)$$

Sabendo que a corrente é negativa e a taxa de variação da magnetização também é negativa, a potência gerada possui fluxo saindo do sistema.

Considerando agora a transformação $c \rightarrow d$, tem-se que o gadolínio está com alta temperatura e baixa magnetização. O processo agora consistirá em reduzir sua temperatura sem variar a magnetização. Isso servirá para preparar a próxima transformação isomagnética, de onde se extrai energia elétrica do sistema. Para isso basta inverter a polaridade das células de Peltier. Com isso, a temperatura do gadolínio tende a diminuir. Para manter a magnetização constante a corrente controlada aumenta linearmente. Como explicado anteriormente, o aumento da corrente faz com que o campo gerado pelo ímã seja reduzido. Isso ocorrerá até que a temperatura do material magnetocalórico chegue a 300.8825 K. Mais uma vez é possível notar que não houve variação de M .

Na transformação $d \rightarrow a$, mantém-se a corrente constante novamente, porém, agora com valor positivo. Dessa forma, o campo magnético estabelecido no núcleo será constante. Pelo fato da temperatura estar diminuindo, tem-se uma variação positiva da magnetização M do gadolínio, ocorrendo novamente uma indução de tensão na bobina. A equação que determina o valor desta tensão é:

$$V = -NA\mu_0 \frac{dM}{dt}. \quad (3.6)$$

Supondo novamente uma variação linear de M , a potência elétrica transferida será:

$$P = V \cdot I = -NA\mu_0 \frac{dM}{dt} I. \quad (3.7)$$

Como a variação da magnetização e a corrente são valores positivos, o fluxo de potência se dá no sentido de saída do sistema. Vale ressaltar também que nas transformações isomagnéticas temos variação do campo H . Mesmo tendo variação do campo, não teremos potência líquida drenada do sistema.

Analisando a transformação $a \rightarrow b$, tem-se uma potência P_{ab} que é dada por

$$P_{ab} = -NA\mu_0 \frac{dH_{ab}}{dt} I. \quad (3.8)$$

Sabe-se que o campo H é dado em função do campo gerado pela bobina e do campo gerado pelo imã, sendo este de neodímio, o que nos permite considerar um campo constante. Logo, H_{ab} é dado por

$$H_{ab} = H_{imã} + H_i. \quad (3.9)$$

A energia associada a essa transformação pode ser encontrada resolvendo a seguinte integral

$$W_{ab} = \int_0^{t_{ab}} P_{ab} dt. \quad (3.10)$$

Substituindo (3.8) em (3.10), obtém-se

$$W_{ab} = - \int_{H_a}^{H_b} NA\mu_0 dH_{ab} I. \quad (3.11)$$

Como H_i é

$$H_i = \frac{NI}{l_n}, \quad (3.12)$$

a energia é dada por

$$W_{ab} = -NA\mu_0 \int_{i_a}^{i_b} Id(H_{im\tilde{a}} + \frac{NI}{l_n}). \quad (3.13)$$

Sabe-se que $H_{im\tilde{a}}$ é constante, logo a solução da integral resulta no seguinte valor de energia:

$$W_{ab} = \frac{-N^2A\mu_0}{2l_n}(i_b^2 - i_a^2). \quad (3.14)$$

Como i_a e i_b são iguais em módulo, o valor da energia líquida é nulo. Nota-se então que não há energia convertida nessa transformação. A mesma análise pode ser feita para a transformação $c \rightarrow d$, onde o mesmo resultado pode ser obtido.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A análise quantitativa do ciclo termodinâmico mostrado no capítulo 3 pode ser extremamente complicada pois as variações de estado magnético do circuito dependem das variações de capacitância térmica do gadolínio e da eficácia de transferência térmico dos módulos de Peltier que são controladas eletricamente. A potência elétrica gerada então dependerá principalmente da constante de tempo térmica do sistema, pois a constante de tempo dos atuadores elétricos são muito mais rápidas. Pode ser então eficaz extrair os dados quantitativos previstos por meio de simulações numéricas que permitem de emular ambos os comportamentos elétrico e térmico do sistema.

Com o objetivo de verificar os sinais de tensão induzida e potência elétrica gerados pelo sistema proposto, usou-se o Simulink[®], uma ferramenta do Matlab[®] que permite de modelar através de diagramas de blocos programáveis varias tipologias de sistemas. A seção proposta neste paragrafo contempla desde o sistema termodinâmico até o sistema elétrico. Com isso, temos a possibilidade de verificar os sinais de corrente, temperatura, fluxo de calor, tensão e potência elétrica. Podendo assim ter uma estimativa do rendimento do sistema.

A seguir, cada bloco utilizado na modelagem no Simulink[®] é descrito em detalhes.

4.1 Descrição dos blocos do Simulink[®]

4.1.1 Blocos comumente usados

4.1.1.1 Constante

O bloco Constante gera um sinal de valor constante real ou complexo. Usa-se este bloco para fornecer uma entrada de sinal constante (MathWorks, 2022).

Figura 18 – Bloco Constante.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.2 Ganho

O bloco Ganho multiplica a entrada por um valor constante (ganho). A entrada e o ganho podem ser escalares, vetoriais ou matrizes (MathWorks, 2022).

Figura 19 – Bloco Ganho.

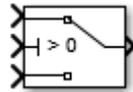


Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.3 Chaveamento

O bloco Chaveamento passa pela primeira entrada ou pelo terceiro sinal de entrada com base no valor da segunda entrada. A primeira e a terceira entradas são entradas de dados. A segunda entrada é uma entrada de controle. Especifica-se a condição sob a qual o bloco passa a primeira entrada usando os Critérios para passar a primeira entrada e os parâmetros Limite (MathWorks, 2022).

Figura 20 – Bloco Chaveamento.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.4 Relógio

O bloco Relógio gera o tempo de simulação atual em cada etapa da simulação. Este bloco é útil para outros blocos que necessitam do tempo de simulação (MathWorks, 2022).

Figura 21 – Bloco Relógio.

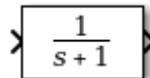


Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.5 Função de Transferência

O bloco Função de Transferência modela um sistema linear por uma função de transferência da variável s do domínio de Laplace. O bloco pode modelar sistemas uma entrada e uma saída (SISO, do inglês *single-input single-output*) e uma entrada e múltiplas saídas (SIMO, do inglês *single-input multiple-output*) (MathWorks, 2022).

Figura 22 – Bloco Função de Transferência.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.6 Produto

O bloco Produto gera o resultado da multiplicação de duas entradas: dois escalares, um escalar e um não escalar, ou dois não escalares com as mesmas dimensões (MathWorks, 2022).

Figura 23 – Bloco Produto.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.7 Derivada

O bloco Derivada aproxima a derivada do sinal de entrada u em relação ao tempo de simulação t . Obtém-se a aproximação de du/dt , calculando uma diferença numérica $\Delta u/\Delta t$, onde Δu é a mudança no valor de entrada e Δt é a mudança no tempo desde o passo de tempo da simulação anterior (principal) (MathWorks, 2022).

Figura 24 – Bloco Derivada.

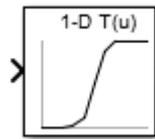


Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.8 Tabela de Pesquisa 1-D

O bloco Tabela de Pesquisa 1-D avalia uma representação amostrada de uma função em N variáveis $y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ onde a função F pode ser empírica. O bloco mapeia as entradas para um valor de saída procurando ou interpolando uma tabela de valores que você define com os parâmetros do bloco (MathWorks, 2022).

Figura 25 – Bloco Tabela de Pesquisa 1-D.

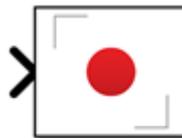


Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.9 Gráfico XY Gravável

Pode-se usar o bloco Gráfico XY Gravável para gravar dados na área de trabalho, em um arquivo ou na área de trabalho e em um arquivo. Ao registrar dados em um arquivo, você pode optar por registrar em um arquivo MAT, um arquivo MLDATX ou um arquivo Excel® (MathWorks, 2022).

Figura 26 – Bloco Gráfico XY Gravável.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.10 Conversor Simulink-PS

O bloco Conversor Simulink-PS converte o sinal Simulink® de entrada em um sinal físico. Usa-se este bloco para conectar fontes Simulink ou outros blocos Simulink às entradas de uma rede física Simscape™ (MathWorks, 2022).

Figura 27 – Bloco Conversor Simulink-PS.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.11 Conversor PS-Simulink

O bloco Conversor PS-Simulink converte um sinal físico em um sinal de saída Simulink®. Usa-se este bloco para conectar saídas de uma rede física Simscape™ aos osciloscópios Simulink ou outros blocos Simulink (MathWorks, 2022).

Figura 28 – Bloco Conversor PS-Simulink.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.12 Entrada de

O bloco Entrada de aceita um sinal de um bloco Saída Vai Para correspondente e o passa como saída. O tipo de dados da saída é o mesmo da entrada do bloco Saída Vai Para. Os blocos Entrada de e Saída Vai Para permitem que você passe um sinal de um bloco para outro sem realmente conectá-los (MathWorks, 2022).

Figura 29 – Bloco Entrada de.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.1.13 Saída Vai Para

O bloco Saída Vai Para passa sua entrada para seus blocos Entrada de correspondentes. A entrada pode ser um sinal ou vetor de valor real ou complexo de qualquer tipo de dados. Os blocos Entrada de e Saída Vai Para permitem que se passe um sinal de um bloco para outro sem realmente conectá-los (MathWorks, 2022).

Figura 30 – Bloco Saída Vai Para.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2 Blocos do Simscape™

O Simscape™ permite que se crie rapidamente modelos de sistemas físicos dentro do ambiente Simulink®. Com o Simscape se constrói modelos de componentes físicos baseados em conexões físicas que se integram diretamente com diagramas de blocos e outros paradigmas de modelagem. Com ele é possível modelar sistemas como motores elétricos, retificadores de ponte, atuadores hidráulicos e sistemas de refrigeração montando componentes fundamentais em um esquema (MathWorks, 2022).

4.1.2.1 Tensão PWM Controlada

O bloco Tensão PWM Controlada representa uma fonte de tensão modulada por largura de pulso (PWM, do inglês *pulse width modulation*) (MathWorks, 2022).

Figura 31 – Bloco Tensão PWM Controlada.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.2 Resistor

O bloco Resistor modela um resistor linear, descrito pela lei de Ohm (MathWorks, 2022).

Figura 32 – Bloco Resistor.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.3 Referência Elétrica

O bloco de referência elétrica representa um aterramento elétrico (MathWorks, 2022).

Figura 33 – Referência Elétrica.

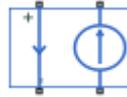


Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.4 Fonte de Corrente Controlada por Corrente

O bloco Fonte de Corrente Controlada por Corrente modela uma fonte de corrente controlada por corrente linear, descrita por $I_2 = K \cdot I_1$, onde I_2 é a corrente de saída, K é o ganho de corrente e I_1 é a corrente fluindo da porta de controle + para a – (MathWorks, 2022).

Figura 34 – Bloco Fonte de Corrente Controlada por Corrente.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.5 Sensor de Corrente

O bloco Sensor de Corrente representa um sensor de corrente ideal, ou seja, um dispositivo que converte a corrente medida em qualquer ramo elétrico em um sinal físico proporcional à corrente (MathWorks, 2022).

Figura 35 – Bloco Sensor de Corrente.



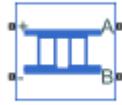
Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.6 Dispositivo Peltier

O bloco Peltier Device representa um conversor entre a energia elétrica e térmica, onde (MathWorks, 2022):

- sem corrente fluindo, se a temperatura apresentada na porta térmica B for maior que a temperatura apresentada na porta térmica A, então há uma diferença de potencial positiva medida da porta elétrica positiva para a negativa;
- quando o bloco atua como um dispositivo de resfriamento, uma corrente positiva faz com que o calor flua da porta A para a porta B, porta de resfriamento A em relação à porta B.

Figura 36 – Bloco Dispositivo Peltier.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.7 Fonte de Temperatura

O bloco Fonte de Temperatura representa uma fonte ideal de energia térmica que é poderosa o suficiente para manter a temperatura especificada em sua saída, independentemente do fluxo de calor consumido pelo sistema (MathWorks, 2022).

Figura 37 – Bloco Fonte de Temperatura.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.8 Sensor de Taxa de Fluxo de Calor

O bloco Sensor de Taxa de Fluxo de Calor representa um medidor de fluxo de calor ideal, ou seja, um dispositivo que converte um fluxo de calor que passa pelo medidor em um sinal de controle proporcional a este fluxo. O medidor deve ser conectado em série com o componente cujo fluxo de calor está sendo monitorado. As conexões A e B são portas de conservação térmica. A porta H é uma porta de sinal físico que emite o valor do fluxo de calor. A direção positiva do bloco é da porta A para a porta B (MathWorks, 2022).

Figura 38 – Bloco Sensor de Taxa de Fluxo de Calor.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.9 Sensor de Temperatura

O bloco Sensor de Temperatura representa um sensor de temperatura ideal, ou seja, um dispositivo que determina o diferencial de temperatura medido entre dois pontos sem extrair nenhum calor. As conexões A e B são portas de conservação térmica que se conectam aos dois

pontos onde a temperatura está sendo monitorada. A porta T é uma porta de sinal físico que emite o valor diferencial de temperatura. A direção positiva do bloco é da porta A para a porta B. A temperatura medida é determinada como $T = T_A - T_B$ (MathWorks, 2022).

Figura 39 – Bloco Sensor de Temperatura.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.10 Referência Térmica

O bloco de referência térmica representa um ponto de referência térmica, ou seja, um ponto com temperatura zero absoluto, em relação ao qual são determinadas todas as temperaturas do sistema (MathWorks, 2022).

Figura 40 – Bloco Referência Térmica.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.11 Resistência Térmica Variável

O bloco de resistência térmica variável permite modelar um processo de transferência de calor variável em termos generalizados, independentemente de ser por condução, convecção, radiação ou uma combinação destes. A resistência térmica é uma grandeza abstrata que relaciona a condutividade térmica, o coeficiente de transferência de calor e o coeficiente de radiação. A resistência térmica deste bloco pode variar com o tempo, de acordo com o sinal físico de entrada na porta R. (MathWorks, 2022).

Figura 41 – Bloco Resistência Térmica Variável.



Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.12 Massa Térmica

O bloco de Massa Térmica representa uma massa térmica, que reflete a capacidade de um material ou combinação de materiais de armazenar energia interna. A propriedade é caracterizada pela massa do material e seu calor específico. A massa térmica é descrita pela seguinte equação:

$$Q = c \cdot m \frac{dT}{dt}, \quad (4.1)$$

onde Q é o fluxo de calor, c é o calor específico do material, m é a massa do material, T é a temperatura e t é o tempo (MathWorks, 2022).

Figura 42 – Bloco Massa Térmica.

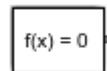


Fonte: (MathWorks, 2022)

4.1.2.13 Configuração do Solucionador

Cada rede física representada por um diagrama de blocos Simscape™ conectado requer informações de configurações do solucionador para simulação. O bloco Configuração do Solucionador especifica os parâmetros do solucionador que o modelo precisa antes que se possa iniciar a simulação (MathWorks, 2022).

Figura 43 – Bloco Configuração do Solucionador.

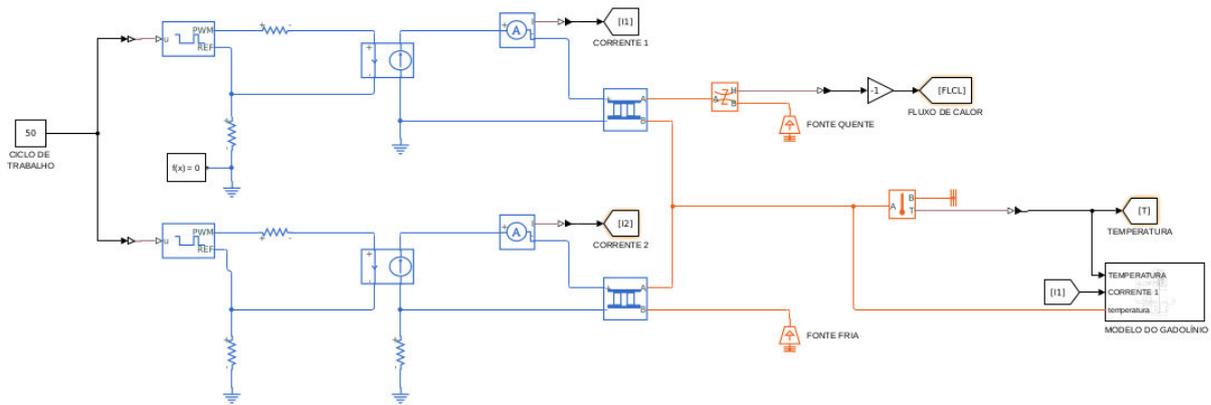


Fonte: (MathWorks, 2022)

4.2 Modelo no Simulink® do gerador proposto

Com o intuito de mostrar a eficácia do princípio de funcionamento do gerador proposto, foi realizada uma simulação em Simulink®. A Figura 44 mostra o diagrama de blocos do modelo no Simulink® do sistema de transferência de calor e a Tabela 1 mostra os parâmetros de cada bloco na simulação.

Figura 44 – Modelo no Simulink[®] do sistema de transferência de calor.



Fonte: O autor.

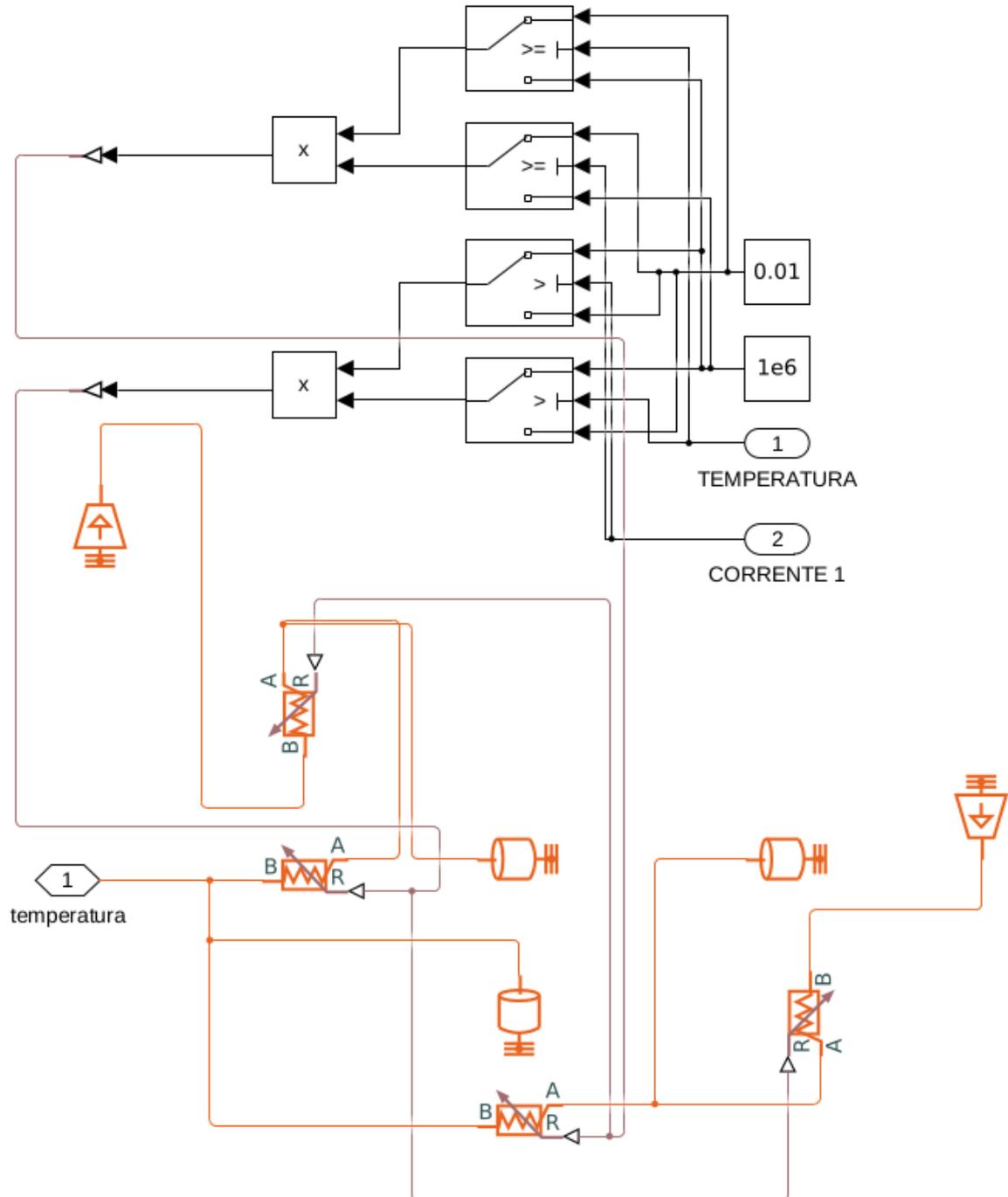
Tensão PWM Controlada 1	
Frequência	4,2 Hz
Tensão de saída	0,3 V
Tempo de atraso do pulso	0 s
Tensão PWM Controlada 2	
Frequência	4,2 Hz
Tensão de saída	0,3 V
Tempo de atraso do pulso	0,5/4,2 s
Resistência Elétrica 1	
Resistência	1 mΩ
Resistência Elétrica 2	
Resistência	1 mΩ
Fonte de Corrente Controlada por Corrente 1	
Ganho de corrente	$4,7 \times 10^{-4}$
Fonte de Corrente Controlada por Corrente 2	
Ganho de corrente	$9,08 \times 10^{-3}$
Dispositivo Peltier 1	
Coefficiente de Seebeck	0,5 V/K
Resistência elétrica total	2,1 Ω
Condutância térmica	0,2875 W/K
Dispositivo Peltier 2	
Coefficiente de Seebeck	53×10^{-3} V/K
Resistência elétrica total	2,1 Ω
Condutância térmica	0,5 W/K
Fonte de Temperatura 1 (fonte quente)	
Temperatura	373,15 K
Fonte de Temperatura 2 (fonte fria)	
Temperatura	273,15 K

Tabela 1 – Parâmetros do modelo no Simulink[®] do sistema de transferência de calor.

O modelo do gadolínio é representado por um subsistema, que é mostrado na Figura

45 e os parâmetros de cada bloco deste subsistema são apresentados na Tabela 2. Para simular a mudança na capacidade térmica do gadolínio no momento da transição de fase, o subsistema utiliza seletores para variar sua massa já que variar seu calor específico seria mais complexo.

Figura 45 – Subsistema do modelo do gadolínio no Simulink®.



Fonte: O autor.

Resistências Térmicas Variáveis (1-4)	
Resistência térmica mínima	0,01 K/W
Massa térmica 1	
Massa	1 g
Calor específico	1188,08 J/(K·Kg)
Temperatura inicial	300,1175 K
Massa térmica 2	
Massa	1 g
Calor específico	1188,08 J/(K·Kg)
Temperatura inicial	300,8825 K
Massa térmica do gadolínio	
Massa	7,9 g
Calor específico	236 J/(K·Kg)
Temperatura inicial	300,5 K
Fonte de Temperatura 3 (fonte quente)	
Temperatura	300,8825 K
Fonte de Temperatura 4 (fonte fria)	
Temperatura	300,1175 K

Tabela 2 – Parâmetros do subsistema do modelo do gadolínio no Simulink®.

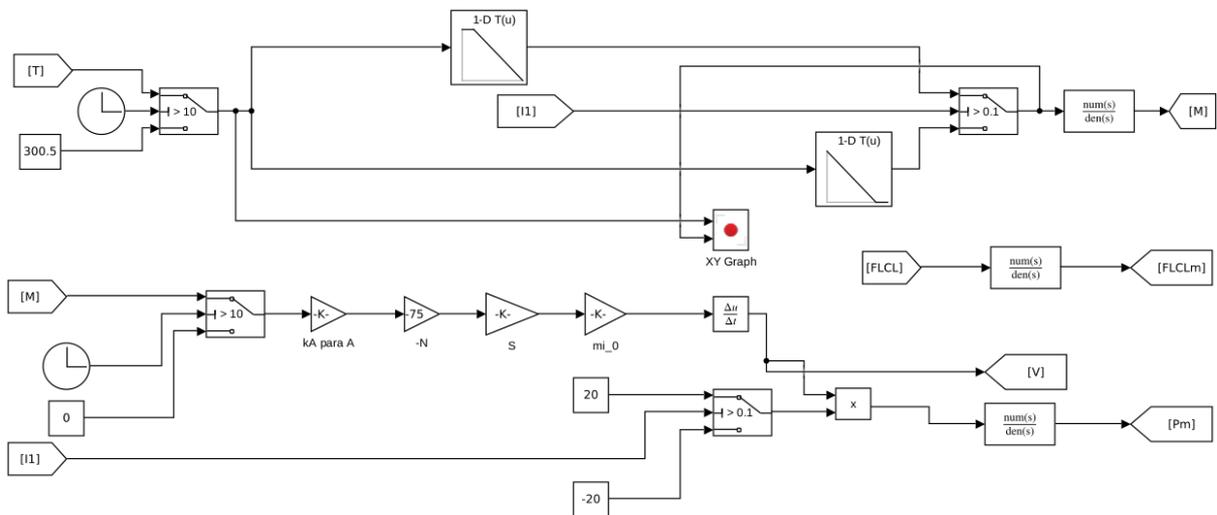
Para obtenção dos resultados com relação a magnetização, temperatura, tensão gerada, fluxo médio de calor, potência média gerada e ciclo de magnetização, montou-se o diagrama de blocos da Figura 46, onde os parâmetros das Tabelas de Pesquisa do ciclo de magnetização do gadolínio são apresentados na Tabela 3. As funções de transferência dos filtros passa-baixa utilizados para se calcular os valores médios dos sinais de magnetização M , potência média gerada P e fluxo médio de calor $FLCL$, são apresentadas abaixo.

$$F(s)[M] = \frac{2\pi \times 10^2}{s + 2\pi \times 10^2}. \quad (4.2)$$

$$F(s)[P] = \frac{2\pi \times 10^{-2}}{s + 2\pi \times 10^{-2}}. \quad (4.3)$$

$$F(s)[FLCL] = \frac{2\pi \times 10^{-2}}{s + 2\pi \times 10^{-2}}. \quad (4.4)$$

Figura 46 – Modelo no Simulink® para obtenção dos resultados.



Fonte: O autor.

Tabela de Pesquisa 1

Dados da tabela	[750, 750, 435]
Breakpoints	[299,8825, 300,1175, 301,1175]

Tabela de Pesquisa 2

Dados da tabela	[750, 435, 435]
Breakpoints	[299,8825, 300,8825, 301,1175]

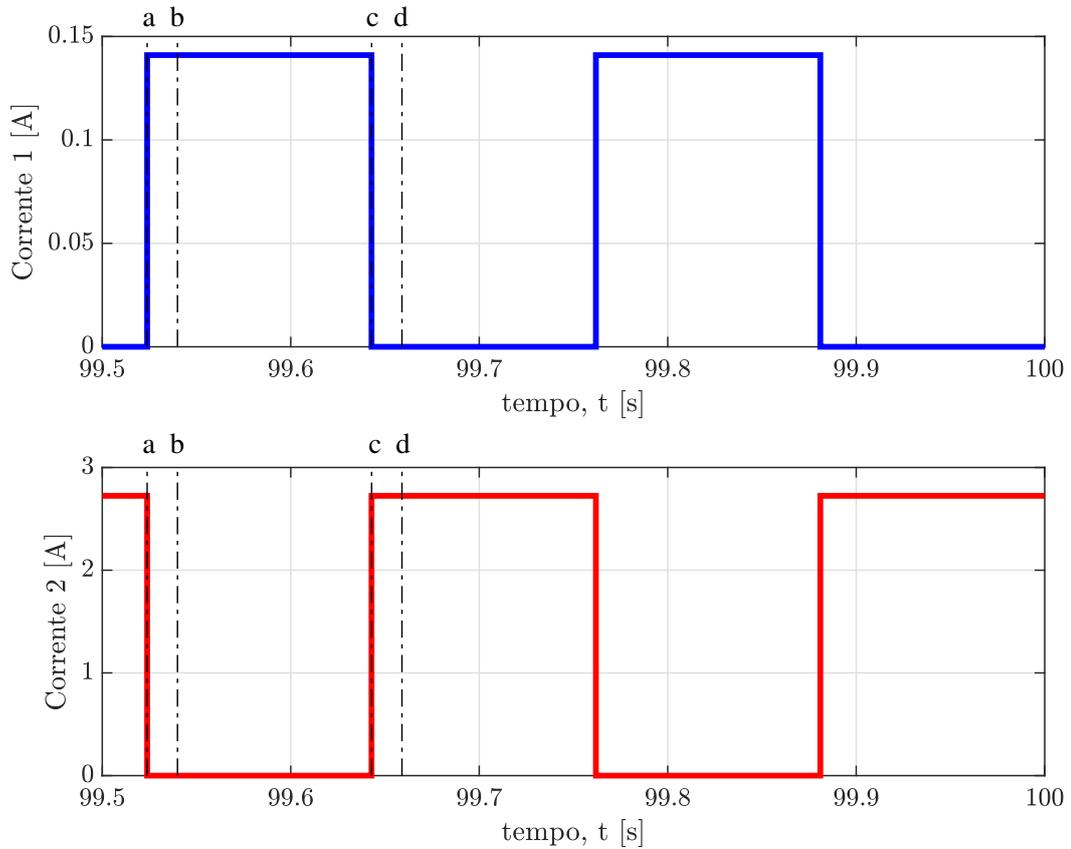
Tabela 3 – Parâmetros das Tabelas de Pesquisa do ciclo de magnetização do gadolínio.

A seguir, são mostradas nas Figuras 47-52 as respostas de regime permanente de PWM das correntes dos Dispositivos Peltier, magnetização, temperatura, tensão gerada, fluxo médio de calor, potência média gerada e do ciclo de magnetização do gadolínio, respectivamente.

A Figura 47 representa os sinais PWM das correntes responsáveis por polarizar os Dispositivos Peltier. Pode-se notar a existência de dois sinais em oposição de fases. Cada um dos sinais controla um dos Dispositivos Peltier, sendo a Corrente 1 responsável pela entrada de calor proveniente da fonte quente no elemento gadolínio e a Corrente 2 responsável pela saída do calor do elemento gadolínio para a fonte fria. Com isso, verifica-se que o Dispositivo Peltier funciona como uma válvula para entrada e saída de calor. Observando esta figura, nota-se que quando o primeiro Dispositivo Peltier está fornecendo calor ao sistema, o segundo fica inativo. Quando a temperatura desejada é atingida, o primeiro Dispositivo Peltier é desligado e o segundo é acionado, causando o resfriamento do sistema. Pode ser visto também na figura, os momentos a,b,c e d referentes ao ciclo de magnetização.

A Figura 48 mostra as curvas de variação de magnetização e temperatura do gadolínio.

Figura 47 – PWMs de corrente dos Dispositivos Peltier.

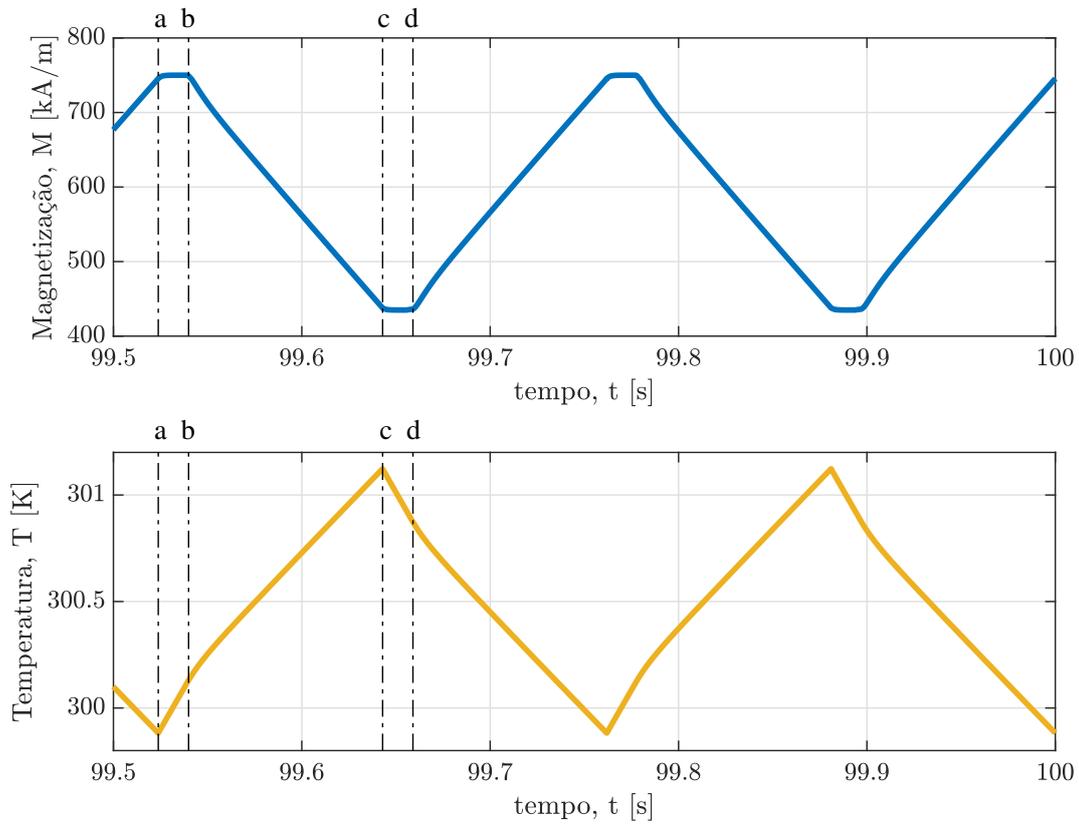


Fonte: O autor.

É possível notar que a temperatura, tanto no aquecimento quanto no resfriamento, apresenta taxas de variação no tempo com inclinações diferentes. Isso se deve à mudança da capacidade térmica do gadolínio ao passar por essa transição. Logo, no início do aquecimento, a temperatura aumenta com maior taxa de variação e depois passa a aumentar mais lentamente. A curva de magnetização, como esperado, permanece constante por um curto período de tempo e logo a decresce por conta do aumento da temperatura. Ao chegar no valor mínimo de magnetização desejado, a curva permanece algum tempo constante e recomeça a aumentar com o resfriamento do gadolínio. Analisando a curva de magnetização no tempo, pode-se notar que o período em que o gadolínio permanece com magnetização constante é muito curto. Logo, na maior parte do período de duração do ciclo, o material está variando o fluxo interno e induzindo tensão na bobina.

A Figura 49 mostra a tensão gerada na bobina do gerador. Nota-se que a tensão é alternada e aproximadamente uma onda quadrada. Isso se deve ao fato de que a variação da magnetização é aproximadamente linear. É importante observar que a indução de tensão se dá

Figura 48 – Magnetização e temperatura do gadolínio.



Fonte: O autor.

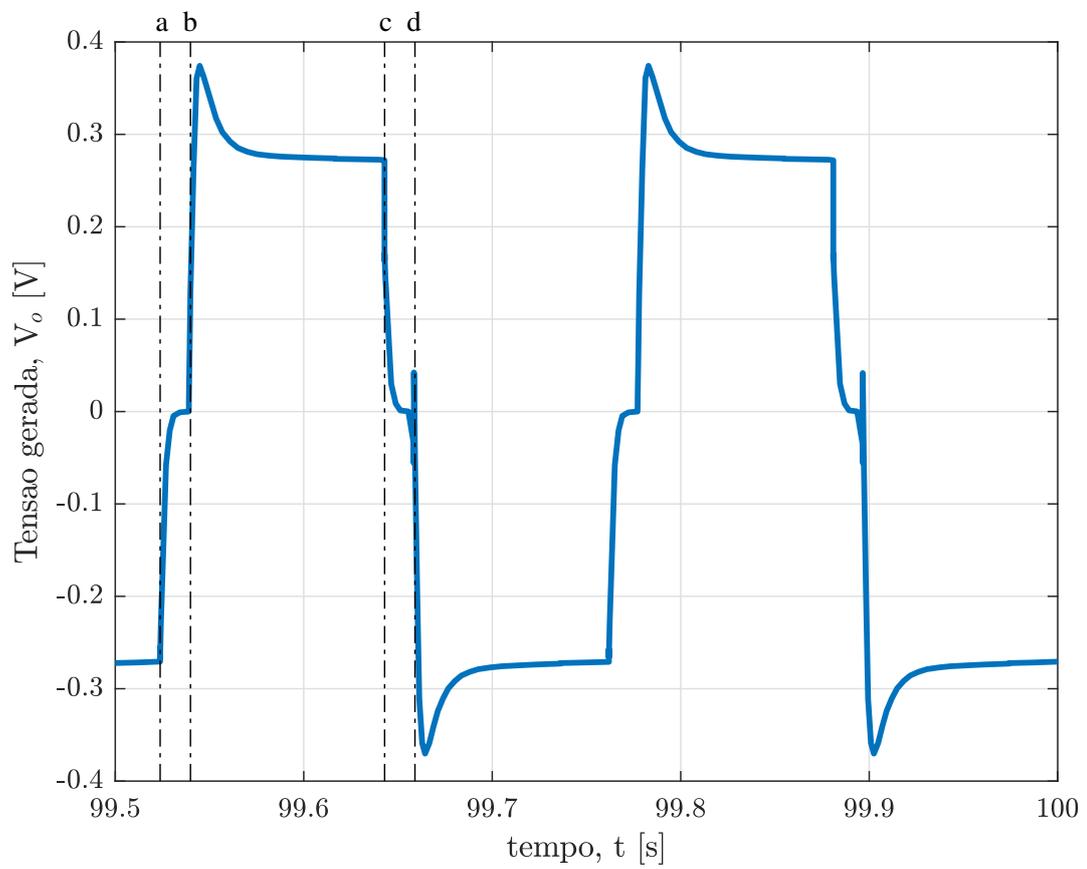
basicamente entre b-c e d-a.

A Figura 50 mostra o fluxo de calor médio no elemento gadolínio. O valor médio foi obtido aplicando o sinal do fluxo de calor a um filtro passa baixa. Tem-se então um valor médio de fluxo de calor de aproximadamente 33,96 W.

A Figura 51 mostra a potência média gerada. O valor médio foi obtido através da aplicação do sinal de potência por um filtro passa baixa. A potência foi calculada multiplicando o sinal de tensão gerada pela corrente controlada, que é constante em cada transformação isentrópica. A potência média é de aproximadamente 4,754 W.

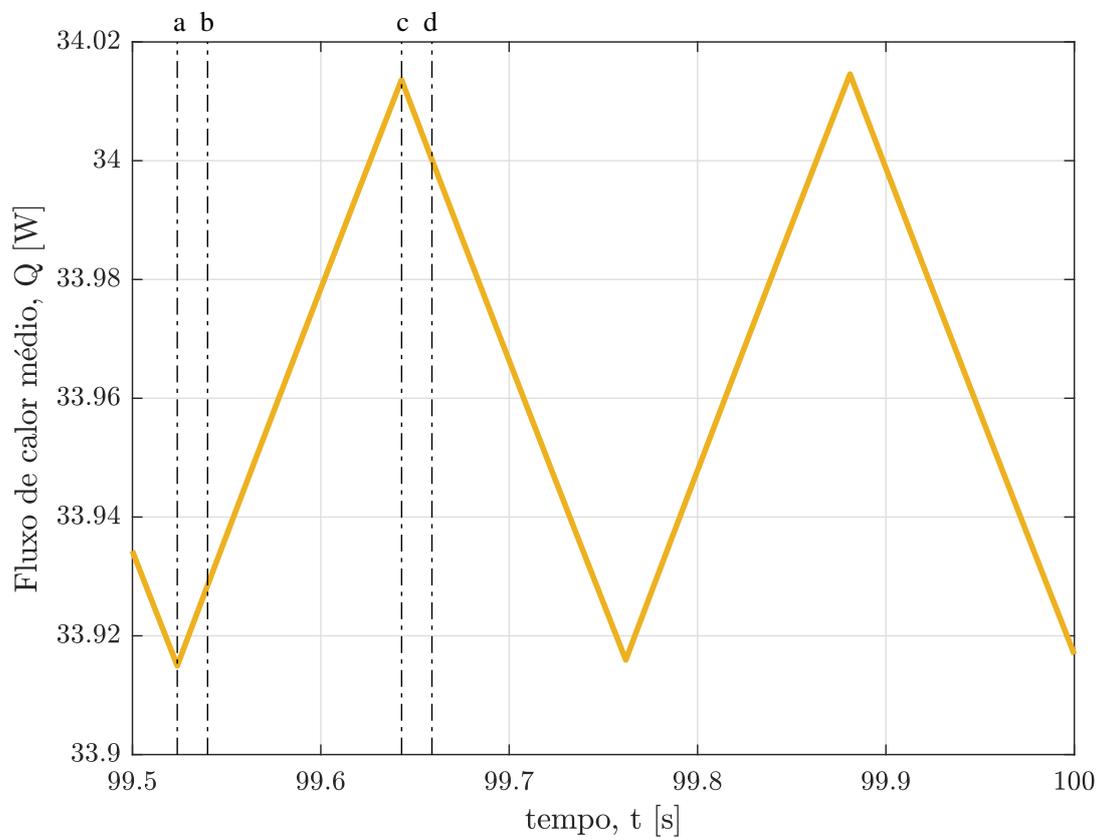
Na Figura 52 é apresentado o ciclo de magnetização adotado. É importante ressaltar que o período das transformações isomagnéticas é bem menor que o período das transformações isentrópicas.

Figura 49 – Tensão gerada na bobina do gerador.



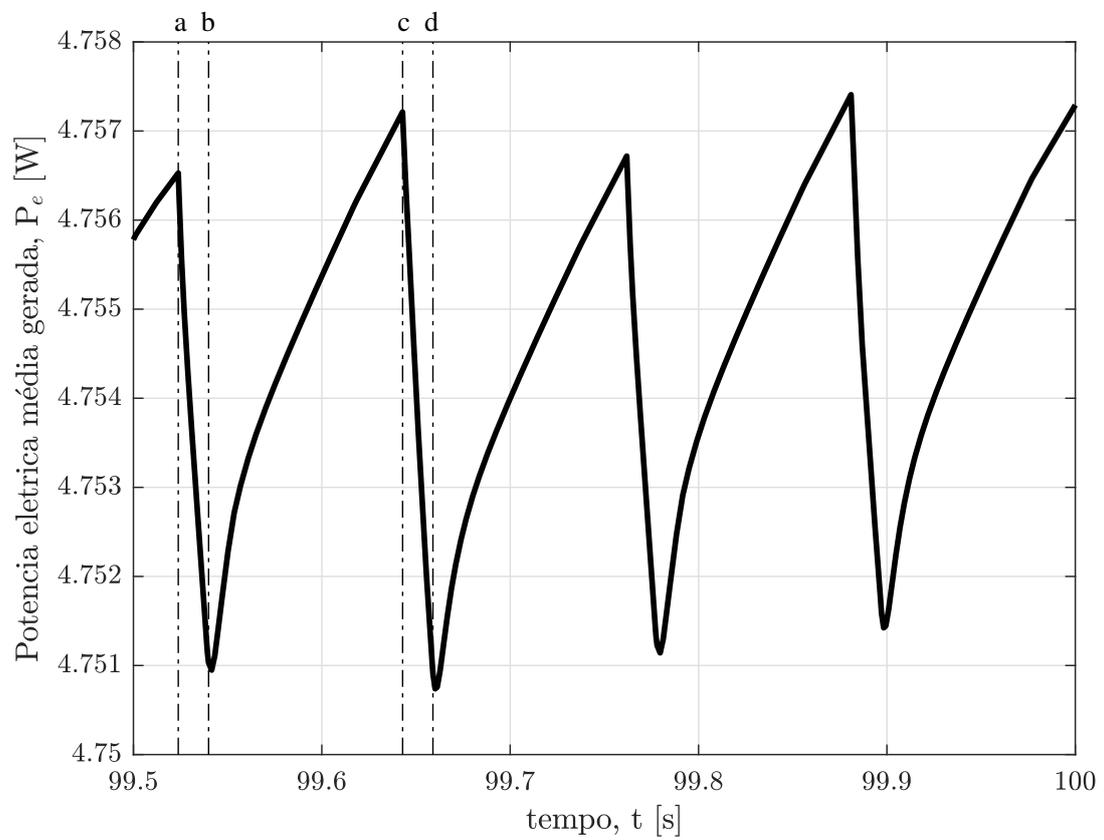
Fonte: O autor.

Figura 50 – Fluxo médio de calor no gadolínio.



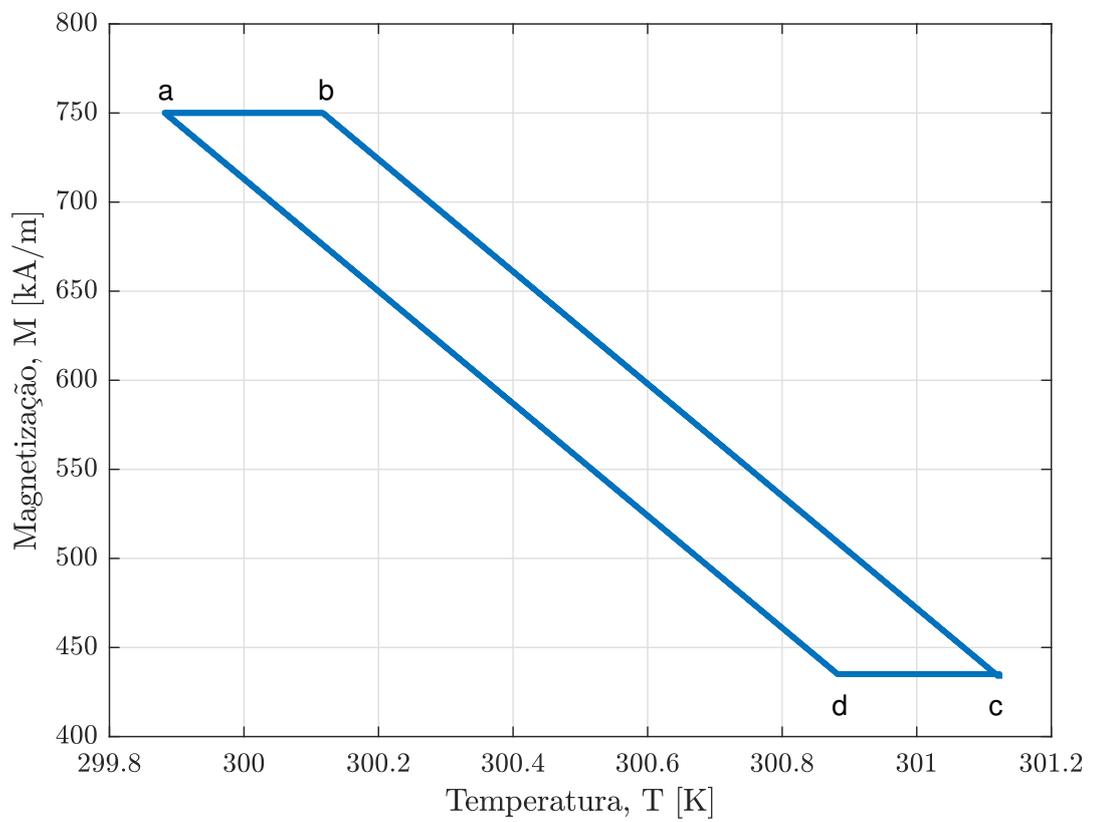
Fonte: O autor.

Figura 51 – Potência média gerada.



Fonte: O autor.

Figura 52 – Ciclo de magnetização.



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um gerador termomagnético sem parte móveis baseado no efeito magnetocalórico. Também foi apresentada, para a comprovação do funcionamento do sistema, a análise do seu modelo por meio de simulação. Portanto, mostrou-se que o sistema funciona para o ciclo adotado.

O sistema tem várias vantagens quando comparado com os métodos de geração convencionais que utilizam a energia térmica como fonte primária. A primeira vantagem é a eliminação do entreferro. Em um sistema convencional, como o gerador apresenta movimento mecânico, um entreferro mínimo precisa existir para permitir a movimentação do rotor da máquina. No gerador analisado, como o sistema é estático e não necessita de entreferro, pode-se obter um maior fluxo no elemento gadolínio, atingindo uma maior magnetização.

Com relação aos resultados obtidos por simulação, mostrou-se que o gerador na configuração apresentada é capaz de gerar potência ativa para alimentar as mais diversas cargas. O sinal de tensão na saída do sistema pode ser manipulado através de circuitos eletrônicos para se adequar às necessidades de outros sistemas elétricos, visto que a tensão gerada é uma onda quadrada. Pelo fato de se utilizar uma pequena variação de temperatura no ciclo, a velocidade com que o material muda seu estado de magnetização se mostrou satisfatória e prática. Por fim, as simulações mostraram que o sistema é funcional e que seu princípio de funcionamento pode ser explorado para futuras aplicações na indústria.

O ciclo termomagnético adotado no gerador proposto se assemelha ao ciclo Brayton, que não é o ciclo ideal quanto ao rendimento de uma máquina. Como trabalho futuro, poderia ser realizada uma análise do rendimento real do gerador, fazendo-se também uma comparação com o ciclo de Carnot, que apresenta rendimento superior. Pode-se também desenvolver um sistema de controle que controlará a corrente na bobina de indução do gerador, tanto para o ciclo Brayton quanto para o ciclo de Carnot. Portanto, um protótipo real poderia ser construído, de modo a possibilitar uma coleta de dados mais coerente com a realidade.

REFERÊNCIAS

- BESSA, C. V. X. **Métodos Analíticos para o Cálculo de Desempenho de Motores Termomagnéticos do Tipo Tesla**. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, jun 2018.
- BRASIL ESCOLA. **Indução eletromagnética: definição e fórmulas**. 2021. <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-inducao-eletromagnetica.htm>>. Acessado: 15-09-2021.
- BRASIL ESCOLA. **Lei de Lenz: definição e exercícios resolvidos**. 2021. <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-lei-lenz.htm>>. Acessado: 15-09-2021.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas - 5ed.** [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- CHEMICAL ELEMENTS. **Chemical Elements - Gadolinium**. 2022. <<https://images-of-elements.com/gadolinium.php>>. Acessado: 17-03-2022.
- DAN'KOV, S. Y.; TISHIN, A. M.; PECHARSKY, V. K.; GSCHNEIDNER, K. A. Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium. **Phys. Rev. B**, American Physical Society, v. 57, p. 3478–3490, Feb 1998.
- DANTE, A. D. **Construção e Caracterização de um Protótipo para Refrigerar Dispositivos Eletrônicos de Dimensões Reduzidas Utilizando o Efeito Magnetocalórico**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, nove 2008.
- DE SOUSA, V. A. **Estudo do efeito magnetocalórico nos sistemas $Gd(Ni(1-x)Al(x))_2$ e $RMg(2)$ ($R=Pr, Dy, Er, Nd$)**. Tese (Doutorado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, dez 2007.
- Eletrobrás-PROCEL EDUCAÇÃO; Universidade Federal de Itajubá. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações - 2ed.** Itajubá, MG: FUPAI, 2006.
- GANESAN, V. **Internal Combustion Engines**. [S.l.]: McGraw-Hill Education (India) Private, 2012.
- HAYT, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo - 8ed.** Porto Alegre-RS: Bookman Editora, 2013.
- MathWorks. **Help Center for MATLAB, Simulink, and other MathWorks products**. 2022. <<https://www.mathworks.com/help/index.html>>. Acessado: 11-05-2022.
- RETHWISCH, D. G.; CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução - 9ed.** [S.l.]: LTC, 2016.
- RO CARNEVAL. **EM07 - DOMÍNIO MAGNÉTICO**. 2022. <https://rocarneval.neocities.org/EM_07-Dominio.html>. Acessado: 07-02-2022.
- WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. **Magnetic refrigeration - Wikipedia, The Free Encyclopedia**. 2022. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetic_refrigeration&oldid=1073791544>. Acessado: 17-03-2022.
- WIKIPÉDIA. **Efeito Peltier - Wikipédia, a enciclopédia livre**. 2019. <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Efeito_Peltier&oldid=55575972>. Acessado: 17-03-2022.