Carlos Vinicius Xavier Bessa

***MÉTODOS ANALÍTICOS PARA O CÁLCULO DE DESEMPENHO DE MOTORES
TERMOMAGNÉTICOS DO TIPO TESLA***

São Paulo

2018

Carlos Vinicius Xavier Bessa

***MÉTODOS ANALÍTICOS PARA O CÁLCULO DE DESEMPENHO DE MOTORES
TERMOMAGNÉTICOS DO TIPO TESLA***

Tese de doutoramento apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
doutor em ciências

São Paulo

2018

Carlos Vinicius Xavier Bessa

***MÉTODOS ANALÍTICOS PARA O CÁLCULO DE DESEMPENHO DE MOTORES
TERMOMAGNÉTICOS DO TIPO TESLA***

Tese de doutoramento apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
doutor em ciências

Orientador: Prof. Livre-Docente
Oswaldo Horikawa

São Paulo

2018

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob
responsabilidade única do autor e com a anuência do seu orientador.

São Paulo, 20 de junho de 2018

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Bessa, Carlos Vinicius Xavier

Métodos Analíticos para o Cálculo de Desempenho de Motores
Termomagnéticos do Tipo Tesla / C. V. X. Bessa. -- versão corr. --São Paulo,
2018.

205 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.ENERGIA TÉRMICA 2.TERMODINÂMICA 3.MOTORES TÉRMICOS
4.CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Dedico esse trabalho de pesquisa ao Prof. Isaias da Silva, um dos maiores responsáveis por eu ter seguido no caminho da vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho só foi possível graças à colaboração de algumas pessoas e sou grato a todas elas.

Primeiramente gostaria de agradecer o meu orientador, Prof. Dr. Oswaldo Horikawa, pela paciência, orientação, recomendações e tempo dedicado à realização dessa pesquisa.

Agradeço também ao Prof. Dr. Sergio Gama por todo apoio, conhecimento, recursos e tempo dedicado à realização deste estudo, sem isso esse trabalho não teria sido concluído.

Agradeço também aos amigos e colegas do Laboratório de Materiais e Manufatura Mecânica da Universidade de São Paulo, campus Diadema, bem como os amigos e colegas do Laboratório de Sistemas Mecatrônicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, laboratórios onde esse estudo foi desenvolvido.

Um agradecimento especial à minha família, minha mãe Almerinda Mendes Xavier Busanello, meu pai Antoninho Luiz Busanello, meu irmão Flávio Henrique Xavier Bessa e minha namorada Ana Paula Simões Pessoa, que mesmo de longe sempre me apoiaram e incentivaram.

Finalmente, gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Isaias da Silva (*in memoriam*) pelo apoio, incentivo, conhecimento e dedicação, sendo fundamental para a realização desse trabalho. Durante os anos de convivência ele se tornou um exemplo de determinação e dedicação para mim.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE EQUAÇÕES	xvii
GLOSSÁRIO	xx
RESUMO.....	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Efeito termomagnético	4
1.2. Efeito magnetocalórico	7
1.3. Motores termomagnéticos	11
1.3.1. Motores tipo Edison	11
1.3.2. Motores tipo Tesla	14
1.4. Geradores termomagnéticos sem partes móveis	15
1.5. Termodinâmica dos motores termomagnéticos	17
1.5.1. Trabalho da força magnética	19
1.5.2. Ciclo de operação	21
1.6. Objetivos	29
1.7. Visão geral do texto.....	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1. Início da tecnologia	33
2.2. Estudos teóricos.....	36
2.3. Estudos experimentais	45
2.4. O que falta estudar?.....	59
2.5. Visão geral sobre os motores termomagnéticos	61

2.5.1. Vantagens	61
2.5.2. Desvantagens.....	62
2.5.3. Sugestões de aplicação.....	63
3. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DAS EQUAÇÕES DE FORÇA E TRABALHO MAGNÉTICO.....	65
3.1. Força magnética na presença de gradiente de campo e magnetização	66
3.2. Força magnética na presença de campo uniforme e gradiente de magnetização	72
4. CICLO TERMODINÂMICO EXERCIDO PELOS DIFERENTES TIPOS DE MOTORES TERMOMAGNÉTICOS	81
4.1. Ciclo termodinâmico de um motor do tipo Edison	81
4.1.1. Simulações de transferência de calor.....	82
4.1.2. Simulação de campo magnético.....	85
4.1.3. Cálculo do ciclo.....	87
4.2. Ciclo termodinâmico de um motor do tipo Tesla	94
4.2.1. Campo aplicado pelo circuito magnético	98
4.2.2. Fator de demagnetização para a bancada.	101
4.2.3. Ciclo termodinâmico para um motor do tipo Tesla nos diagramas $M-H$ e $T-S$	106
4.3. Comparação entre os ciclos.....	112
5. CÁLCULO DO TRABALHO EM MOTORES TERMOMAGNÉTICOS DO TIPO TESLA.....	117
5.1. Motor termomagnético construído.....	117
5.2. Procedimento para o cálculo analítico do trabalho pelo Método da Força.	124

6. CARACTERIZAÇÃO DOS MOTORES TERMOMAGNÉTICOS DO TIPO TESLA	138
6.1. Análise generalista dos motores termomagnéticos tipo Tesla	138
6.1.1. Influência da temperatura	140
6.1.2. Influência do campo magnético aplicado	146
6.1.3. Influência do fator de demagnetização	155
6.1.4. Influência do tipo de transição magnética e da histerese térmica	158
6.2. Motor proposto considerando a influência dos parâmetros	171
7. CONCLUSÃO	185
7.1. Principais contribuições do trabalho	190
7.2. Propostas para trabalhos futuros	192
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	194

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstração do momento magnético associado ao: (a) Movimento orbital do elétron. (b) Spin do elétron.	5
Figura 2 – Esboço do comportamento da magnetização em função da temperatura a campo magnético constante. (a) Material de segunda ordem. (b) Material de primeira ordem. Linhas de mesma cor representam mesmo valor de campo aplicado.....	7
Figura 3 - Domínios magnéticos: (a) Sem aplicação de campo magnético. (b) Com aplicação de campo magnético.	8
Figura 4 – Esboço do comportamento do calor específico aparente a campo magnético constante 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.	9
Figura 5 – 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.	10
Figura 6 - Patente do motor termomagnético de Edison. (a) Conjunto. (b) Vista para destaque da roda termomagnética e circuito magnético.	12
Figura 7 - Mecanismo de funcionamento de uma roda de Curie.....	13
Figura 8 - Patente do motor de Tesla. (a) Motor termomagnético de Tesla. (b) Motor de Tesla montado com conjunto biela manivela para conversão do movimento pendular em rotação.	15
Figura 9 - Gerador elétrico termomagnético sem partes móveis.....	16

Figura 10 - (a) Densidade de fluxo magnético sem a presença de um material magnético. (b) Campo no interior do material magnético devido à aplicação de campo H	18
Figura 11 – Esboço do trabalho específico devido à ação da força magnética.....	20
Figura 12 - Motor termomagnético do tipo Tesla em diferentes estados termodinâmicos. (a) Estado 1. (b) Estado 2. (c) Estado 3. (d) Estado 4. A seta mostrada no pistão de saída de trabalho indica o sentido da força resultante atuando no conjunto.....	23
Figura 13 – Esboço do diagrama $M-H$ com os estados termodinâmicos descritos para o motor da Figura 12. (a) Considerando a Equação (11) no cálculo do trabalho. (b) Considerando a Equação (12) no cálculo do trabalho.	26
Figura 14 – Esboço do diagrama $T-s$ com os estados termodinâmicos descritos no motor da Figura 12.	27
Figura 15 - Primeiro esquema proposto para um motor termomagnético.	34
Figura 16 - η_{rel} calculada para diferentes temperaturas de fonte quente e fonte fria de 298 K. Velocidade considerada 300 RPM.	41
Figura 17 - Comparação do η_{rel} para diversos dispositivos de conversão de calor em trabalho considerando a temperatura da fonte fria de 298 K (temperatura ambiente).	42
Figura 18 - Motor termomagnético de Murakami e Nemoto.	46
Figura 19 - Curvas características do motor termomagnético de Murakami e Nemoto.	47
Figura 20 – (a) Representação do sistema construído por Andreevsk <i>at al.</i> , possibilitando montagem do motor com 1 ou 2 polos. (b) Curvas de potência em função do torque aplicado ao eixo do motor.....	50

Figura 21 - Velocidade angular em função do torque aplicado ao eixo do motor.....	51
Figura 22 - Motores termomagnéticos de Takahashi <i>et al.</i> (a) Motor de um polo com rotor cilíndrico. (b) Motor com três polos e rotor cilíndrico. (c) Motor com três polos e rotor composto por discos espaçados.....	54
Figura 23 - (a) Perdas no motor com três polos e rotor cilíndrico. (b) Perdas no motor com três polos e rotor composto por discos espaçados. (c) Potência e torque em função da velocidade angular nos motores de três polos de Takahashi <i>et al.</i>	54
Figura 24 - Motor termomagnético do tipo Tesla para aplicação em <i>energy harvesting</i>	56
Figura 25 – Motor termomagnético do tipo Tesla utilizando elemento piezoelétrico para conversão de energia mecânica em elétrica. (a) Foto do dispositivo. (b) Vista esquemática.....	58
Figura 26 - Motor termomagnético do tipo Tesla utilizando bobina para conversão de energia mecânica em elétrica. (a) Detalhe do dispositivo. (b) Esquema de funcionamento.....	58
Figura 27 – Diferentes configurações utilizadas no experimento de Araujo & Egolf. (a) Configuração 1. (b) Configuração 2. (c) Configuração 3.....	66
Figura 28 – Comparação entre as forças obtidas através das Equações de Kelvin e Liu e dados experimentais. (a) Configuração 1. (b) Configuração 2. (c) Configuração 3. Cálculos realizados utilizando os valores de campo aplicado e magnetização no centro da esfera de aço 100Cr6.	67
Figura 29 - Campo magnético aplicado para $y = 0$ para as três configurações apresentadas.....	67
Figura 30 - Comparação entre a força de Kelvin e de Liu considerando uma esfera de gadolínio. (a) Configuração 1. (b) Configuração 2. (c) Configuração 3.	68

Figura 31 – (a) Magnetização em função do campo aplicado a esfera. (b) Magnetização do gadolínio em função do campo magnético interno para diferentes temperaturas	69
Figura 32 – Força magnética experimental para uma esfera de gadolínio a temperatura ambiente, representada pelos pontos pretos. (a) Comparação com a equação de Kelvin, linhas cheias em azul. (b) Comparação com a equação de Liu, linhas traço ponto em verde.	71
Figura 33 – Arranjo experimental para verificação da força de Liu. (a) Suporte de amostra desenvolvido. (b) Montagem do conjunto no interior da bobina supercondutora.	73
Figura 34 - Gradiente de magnetização ao longo do comprimento (l) da amostra de gadolínio em função do campo aplicado pela bobina supercondutora.	75
Figura 35 - Resultados obtidos com a equação de força magnética de Liu para o caso estudado de campo magnético aplicado homogêneo e gradiente de magnetização induzido por temperatura.	75
Figura 36 – Esboço para comparação entre os diagramas de pressão e volume para um gás com campo magnético aplicado e magnetização para um material magnético. (a) Aumento de pressão a volume constante para gás. (b) Aumento de campo magnético aplicado para magnetização constante em material magnético. (c) Aumento de volume a pressão constante para um gás. (d) Aumento de magnetização a campo magnético aplicado constante em material magnético. $T_2 > T_1$	79
Figura 37 – Distribuição das fontes de calor e geometria para o modelo de motor do tipo Edison estudado.	83

Figura 38 - Distribuição de temperaturas no rotor para diferentes velocidades angulares.....	83
Figura 39 - Perfil de temperaturas em função da velocidade angular (a) $0 \leq \omega \leq 1$ RPM . (b) $1 \leq \omega \leq 80$ RPM.....	84
Figura 40 - Gradiente de temperaturas em função da velocidade angular (a) $0 \leq \omega \leq 1$ RPM . (b) $1 \leq \omega \leq 80$ RPM.....	85
Figura 41 - (a) Circuito magnético utilizado no estudo de determinação do ciclo termodinâmico de um motor tipo Edison. Dimensões em mm. (b) Representação do modelo geométrico para estudo de campo magnético utilizado no estudo de determinação de ciclo termodinâmico de um motor tipo Edison.	86
Figura 42 – Campo magnético em função da posição angular para o circuito magnético utilizado no estudo.....	86
Figura 43 - Rotor a velocidade de 1 RPM. (a) Distribuição de temperatura. (b) Distribuição do campo magnético aplicado.	87
Figura 44 - Variação de temperatura causada por uma aplicação adiabática de campo magnético. (b) Efeito magnetocalórico no rotor.....	88
Figura 45 - Distribuição de temperatura no raio médio do rotor considerando e desprezando a contribuição do efeito magnetocalórico (EMC).	89
Figura 46 – Propriedades termomagnéticas do gadolínio. (a) Magnetização em função da temperatura e do campo magnético interno. (b) Entropia relativa em função do campo interno e da temperatura.....	90
Figura 47 - Magnetização ao longo do rotor. (b) Entropia relativa ao longo do rotor.....	90
Figura 48 - Ciclo termodinâmico desenvolvido pelo motor tipo Edison estudado, considerando-se e desprezando-se o efeito magnetocalórico (EMC), velocidade angular de 1 RPM. (a) Diagrama $M-H$. (b) Diagrama $T-S$	91

Figura 49 - Diagramas $M-H$ para diferentes velocidades angulares do rotor para o motor tipo Edison estudado. (a) 0,05 RPM. (b) 5 RPM. (c) 10 RPM. (d) 40 RPM.	92
Figura 50 - Representação esquemática da bancada construída para verificação do ciclo termodinâmico desenvolvido em um motor do tipo Tesla.	94
Figura 51 – Bancada experimental construída para determinação do ciclo desenvolvido em um motor do tipo Tesla.	96
Figura 52 - Medidas para um ciclo na bancada para determinação do ciclo termodinâmico para um motor do tipo Tesla. (a) Temperaturas ao longo do tempo de um ciclo. (b) Posição da amostra ao longo do tempo.	97
Figura 53 - Temperatura da amostra de material magnético em função da posição.	97
Figura 54 - Circuito magnético utilizado na bancada. (a) Orientação dos ímãs. (b) Circuito magnético com o elemento Peltier que funciona como fonte quente.	99
Figura 55 - Campo magnético aplicado pelo circuito sobre a linha de deslocamento da amostra (a) Esquema de medição. (b) Campo medido com o gaussímetro.	99
Figura 56 - Campo aplicado em função da temperatura do material magnético medido na bancada experimental.	101
Figura 57 - Sistema de medição de força com amostra a temperatura constante e controlada. (a) Sistema estudado. (b) Sistema de medição de força.	103
Figura 58 - (a) Força magnética entre o circuito magnético e a amostra de gadolínio a 278 K. (b) Fator de demagnetização para o cálculo do resultado analítico.	104
Figura 59 - Alinhamento do campo magnético na região ocupada pelas amostras (a) região de interesse. (b) Detalhe do campo na região ocupada pela amostra para as posições -2,5 mm à esquerda e 10 mm à direita.	105
Figura 60 - Força em função da posição para diferentes temperaturas. Pontos: Valores experimentais. Linhas: Cálculos analíticos.	106

Figura 61 - Campo interno a amostra em função da posição.....	107
Figura 62 - (a) Magnetização em função da posição do centro da amostra. (b) Entropia relativa em relação a posição do centro da amostra.....	108
Figura 63 - Ciclo termodinâmico desenvolvido pelo motor de Tesla da bancada experimental no diagrama $M-H$	109
Figura 64 - Ciclo termodinâmico desenvolvido pelo motor de Tesla da bancada experimental no diagrama $T-s$	110
Figura 65 - Ciclo termodinâmico desenvolvido no motor da bancada experimental para carga reduzida aplicada ao eixo. (a)Diagrama $M-H$. (b) Diagrama $T-s$	111
Figura 66 - Comparação entre os motores do tipo Edison e tipo Tesla para as mesmas condições de temperatura do material magnético e campo magnético aplicado. (a) Trabalho específico. (b) Eficiência relativa à eficiência de Carnot.....	114
Figura 67 - Motor termomagnético do tipo Tesla construído para verificação do trabalho produzido por ciclo.	118
Figura 68 - Temperatura nas amostras em função do tempo para T_{Cold} ao redor de 283 K e T_{Hot} ao redor de 298 K para os 4 ciclos realizados pelo motor.....	121
Figura 69 – (a) Perda de carga no circuito hidráulico. (b) Detalhe da perda de carga no pulso indicado. $T_{Cold} \sim 283$ K e $T_{Hot} \sim 298$ K.	122
Figura 70 – (a) Vazão mássica no circuito hidráulico. (b) Detalhe da vazão mássica no pulso indicado. T_{Cold} ao redor de 283 K e T_{Hot} ao redor de 298 K.....	122
Figura 71 - (a) Potência da bomba de diafragma. (b) Detalhe da potência no pulso indicado. $T_{Cold} \sim 283$ K e $T_{Hot} \sim 298$ K.....	123
Figura 72- Trabalho específico do motor construído considerando uma eficiência de 100 % na bomba de diafragma.	124

Figura 73 - Temperatura na amostra em função da posição para diferentes T_0 durante o deslocamento. Os pontos representam valores experimentais. As linhas representam valores calculados através da Equação (29). $x_0 = 1,5$ mm.	127
Figura 74 - Temperaturas calculadas para as amostras do motor termomagnético durante o deslocamento do chassi móvel considerando $T_{0Frio} = 283$ K e $T_{0Quente} = 298$ K, $x_0 = 1,5$ mm.	128
Figura 75 - (a) Magnetização em função da posição da amostra durante o deslocamento do chassi móvel. $T_{0Frio} = 283$ K e $T_{0Quente} = 298$ K, $x_0 = 1,5$ mm. (b) Gradiente de campo em função da posição.	129
Figura 76 - Força magnética calculada no chassi móvel durante seu deslocamento. $T_{0Frio} = 283$ K e $T_{0Quente} = 298$ K, $x_0 = 1,5$ mm. Deslocamento da direita para esquerda.	130
Figura 77- Trabalho específico para diferentes condições de temperatura inicial. Linhas representam os valores calculados. Pontos representam os dados experimentais da Figura 72.	131
Figura 78 - Força magnética calculada no chassi móvel. $T_{0Frio} = 283$ K e $T_{0Quente} = 288$ K. $x_0 = 1,5$ mm.	134
Figura 79- Mínima diferença de temperaturas para garantir que o motor funcione.	136
Figura 80 - Modelo de motor termomagnético do tipo Tesla para aplicação da abordagem pela análise de ciclo.	139
Figura 81 - Trabalho específico em função das temperaturas atingidas em MM1 e MM2.	140
Figura 82 - Eficiência em função das temperaturas atingidas em MM1 e MM2.	142

Figura 83 - Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função das temperaturas atingidas em MM1 e MM2, considerando que MM1 e MM2 entram em equilíbrio térmico com a fonte com que fazem contato antes do movimento.....	143
Figura 84 - Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função das temperaturas atingidas em MM1 e MM2. (a) $T_{Hot} = 1,01T_{0Quente}$ e $T_{Cold} = 0,99T_{0Frio}$. (b) $T_{Hot} = 1,05T_{0Quente}$ e $T_{Cold} = 0,95T_{0Frio}$. $T_{Hot} = 1,1T_{0Quente}$ e $T_{Cold} = 0,9T_{0Frio}$. Legendas iguais às mostradas na Figura 83.	145
Figura 85 - Trabalho específico produzido por ciclo em função da variação de campo magnético aplicado e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.	147
Figura 86 – Esboço do Diagrama $T-s$ com ciclo construído. (a) Pequena diferença de temperaturas (b) Diferença maior de temperaturas.....	148
Figura 87 – Eficiência em função da variação de campo magnético aplicado e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.	150
Figura 88 – Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função da variação de campo magnético aplicado e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.	151
Figura 89 - Trabalho específico em função do campo magnético aplicado durante o resfriamento do material magnético para diferentes condições de temperatura e $\Delta H = 0,75$ T. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.	152
Figura 90 – Esboço do diagrama $M-H$ para motor termomagnético do tipo Tesla. Ciclos construídos para diferentes valores de campo durante o processo de resfriamento do material magnético.	152

Figura 91 - Eficiência em função da temperatura da fonte quente para diferentes campos magnéticos aplicados durante o resfriamento do material magnético considerando $\Delta H = 0,75$ T. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.....	153
Figura 92 - Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função do campo magnético aplicado durante o resfriamento do material magnético para diferentes condições de temperatura e $\Delta H = 0,75$ T. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K. ...	154
Figura 93 - Trabalho específico produzido por ciclo em função do fator de demagnetização e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.....	156
Figura 94 - Eficiência em função do fator de demagnetização e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.....	157
Figura 95 – Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função do fator de demagnetização e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.....	157
Figura 96 – (a) Calor específico aparente para o MnAs. (b) Diagrama $T-s$ do MnAs calculado a partir da Equação (2). Linhas contínuas: Campo aplicado de 1,5 T. Linhas tracejadas: Campo aplicado de 0 T. Linhas azuis: Medida durante o resfriamento. Linhas vermelhas: Medida durante o aquecimento.	161
Figura 97 - Diagramas $T-s$ para os diferentes materiais. Linhas contínuas: Aquecimento na presença de campo aplicado de 1,5 T. Linhas tracejadas: Resfriamento a campo zero.	162
Figura 98 - Trabalho específico em função da temperatura. (a) Gd. (b) $\text{LaFe}_{11,76}\text{Mn}_{0,06}\text{Si}_{1,18}\text{H}_{1,65}$. (c) MnAs. (d) Trabalho específico quando a temperatura da fonte fria está a 2 K abaixo de $T_{ColdMax}$	164

Figura 99 – Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função da temperatura. (a) Gd. (b) $\text{LaFe}_{11,76}\text{Mn}_{0,06}\text{Si}_{1,18}\text{H}_{1,65}$. (c) MnAs. (d) Eficiência relativa à eficiência de Carnot quando a temperatura da fonte fria está a 2 K abaixo de T_{ColdMax}	166
Figura 100 - Trabalho específico em função da eficiência relativa à eficiência de Carnot quando a temperatura da fonte fria é igual ao T_{ColdMax}	167
Figura 101 - Comparação da eficiência relativa à eficiência de Carnot para geradores termoelétricos e motores termomagnéticos do tipo Tesla.	170
Figura 102 - Motor termomagnético do tipo Tesla com placas de material magnético fixas e arranjo de ímãs móvel.....	173
Figura 103 - (a) Representação do circuito magnético proposto por Vasile & Muller. (b) Circuito magnético proposto para utilização no motor termomagnético.....	174
Figura 104 - (a) Dimensões do circuito magnético, valores em mm. (b) Campo magnético aplicado na região de interesse.	174
Figura 105 - Campo magnético aplicado em função da posição.....	175
Figura 106 - Fluxo magnético no circuito desenvolvido.....	176
Figura 107 – (a) Distribuição das placas de material magnético. (b) Motor termomagnético proposto.....	178
Figura 108 - (a) Trabalho produzido por ciclo no motor proposto. (b) Eficiência relativa à eficiência de Carnot no motor proposto.	180
Figura 109 - Trabalho produzido por ciclo em relação à eficiência relativa à eficiência de Carnot.....	181
Figura 110 - Trabalho produzido por ciclo em relação à eficiência relativa à eficiência de Carnot para a nova disposição considerando um curso de 50 mm.....	182

Figura 111 - Trabalho produzido por ciclo em relação à eficiência relativa à eficiência de Carnot para a nova disposição considerando cursos de (a) 40 mm. (a) 30 mm. (c) 20 mm. (d) 10 mm.183

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições e resultados experimentais para o ensaio de verificação da equação de Liu.....	76
Tabela 2 – Condições de temperatura usadas na construção dos ciclos Brayton, ΔT_{Hys} e ΔT_B para cada material considerado.....	162
Tabela 3 - Condições testadas para definição do comprimento das placas na direção x . Material: Gd.	178

LISTA DE EQUAÇÕES

Número	Equação	Página
(1)	$S_{Tot}(T, H) = S_{mag}(T, H) + S_{rede}(T) + S_{ele}(T)$	8
(2)	$s(T, H) = \int \frac{c_H}{T} dT \Big _H$	9
(3)	$B = \mu H$	17
(4)	$B = \mu_0(H + M)$	18
(5)	$H_{int} = H - H_{Dem}$	18
(6)	$H_{Dem} = NM$	18
(7)	$H_{int} = H - N.M(T, H_{int})$	18
(8)	$F_{mag} = V\mu_0 M \frac{dH}{dx}$	19
(9)	$dw_v = \mu_0 M dH$	20
(10)	$dw_v = \mu_0 H dM$	20
(11)	${}_{ei}w_{ef} = \frac{1}{\rho} \mu_0 \int_{H_{ei}}^{H_{ef}} M dH \Big _{S_{ei}}$	25
(12)	${}_{ei}w_{ef} = \frac{1}{\rho} \mu_0 \int_{M_{ei}}^{M_{ef}} H dM \Big _{S_{ei}}$	25
(13)	$w_{Res} = {}_1w_2 - {}_3w_4 $	25
(14)	$\Delta q = \Delta u + \Delta w$	26
(15)	$\oint dq = \oint dw$	26
(16)	$dq = T ds$	26
(17)	$q_{Hot} = {}_2q_3 = \int_{S_2}^{S_3} T ds \Big _{H_2}$	26

$$(18) \quad q_{Cold} = {}_4q_1 = \int_{s_4}^{s_1} T ds \Big|_{H_1} \quad 26$$

$$(19) \quad w_{Res} = \int_{s_2}^{s_3} T ds \Big|_{H_2} - \int_{s_1}^{s_4} T ds \Big|_{H_1} \quad 26$$

$$(20) \quad q_{Hot} = \int_{T_2}^{T_3} c_H(T, H) dT \Big|_{H_2} \quad 28$$

$$(21) \quad \eta = \frac{w_{Res}}{q_{Hot}} \quad 28$$

$$(22) \quad \eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_c} = \frac{\eta}{1 - \frac{T_{Cold}}{T_{Hot}}} \quad 28$$

$$(23) \quad F_{mag} = V\mu_0 M \nabla H \quad 65$$

$$(24) \quad F_{mag} = V\mu_0 H \nabla M \quad 65$$

$$(25) \quad Pot = \frac{\vartheta}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot \Delta P \quad 121$$

$$(26) \quad W_{Tot} = \int Pot. dt \quad 123$$

$$(27) \quad w = \frac{W_{Tot}}{n.m} \quad 123$$

$$(28) \quad F_{mag} = V\mu_0 M(H_{int}, N, T) \frac{dH}{dx} \quad 125$$

$$(29) \quad T(x_i) = T(x_{i-1}) + \Delta T(x_i) \quad 126$$

$$(30) \quad F_{MagR} = F_{MagEsquerda} + F_{MagDireita} \quad 130$$

$$(31) \quad W_{MagR} = \int_{x_0}^{x_f} F_{MagR} dx \quad 131$$

$$(32) \quad w_{Res} = \frac{2W_{MagR}}{2m} = \frac{W_{MagR}}{m} \quad 131$$

$$(33) \quad F_R = F_{MagR} + F_{Carga} + F_{Mancal} + F_{Reações} = m_m a \quad 134$$

$$(34) \quad T_{0Quente} = T_{0Frio} + \Delta T_{ad} \quad 143$$

$$(35) \quad T_{Hot} > T_{Cold} + \Delta T_{ad} \quad 144$$

$$(36) \quad c_H = \frac{\dot{Q}(H, T)}{m\dot{T}} \quad 160$$

$$(37) \quad \eta_{maxTermoelétrico} = \frac{T_{Hot} - T_{Cold}}{T_{Hot}} \left[\frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + T_{Cold}/T_{Hot}} \right] \quad 169$$

GLOSSÁRIO

B	Densidade de fluxo magnético	T
c_H	Calor específico aparente a campo magnético aplicado constante	J/(kgK)
F_{mag}	Força magnética	N
H	Campo magnético aplicado	A/m
H_{Dem}	Campo demagnetizante	A/m
H_{int}	Campo magnético interno	A/m
m	Massa	kg
M	Magnetização	A/m
n	Número de ciclos	[-]
N	Fator de demagnetização	[-]
P	Pressão	Pa
Pot	Potência	W
q	Calor por unidade de massa	J/kg
q_{Cold}	Calor por unidade de massa rejeitado a fonte fria	J/kg
q_{Hot}	Calor por unidade de massa recebido da fonte quente	J/kg
T	Temperatura	K
T_0	Temperatura inicial	K
T_{0Fria}	Temperatura inicial da amostra fria	K
$T_{0Quente}$	Temperatura inicial da amostra aquecida	K
T_C	Temperatura de Curie	K
T_{Cold}	Temperatura da fonte fria	K
T_{Hot}	Temperatura da fonte quente	K
S_{ele}	Entropia referente aos elétrons livres em um material.	J/K
S_{mag}	Entropia referente aos spins magnéticos de um material	J/K
S_{rede}	Entropia referente à vibração da rede cristalográfica em um material	J/K
S_{Tot}	Entropia total	J/K
u	Energia interna específica	J/kg
V	Volume	m ³
v	Volume específico	m ³ /kg

w	Trabalho específico por ciclo	J/kg
w_{Res}	Trabalho específico resultante de um ciclo	J/kg
w_v	Trabalho por unidade de volume	J/m ³
W_{MagR}	Trabalho realizado pela força magnética resultante	J
W_{Tot}	Trabalho total produzido	J

Símbolos

α	Posição angular	°
ΔP	Perda de carga	Pa
η	Eficiência Energética	%
η_C	Eficiência de Carnot	%
η_{rel}	Eficiência relativa à eficiência de Carnot	%
μ	Permeabilidade magnética	T/(mA)
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo	T/(mA)
ρ	Densidade	kg/m ³
ϑ	Vazão mássica	kg/s

Subíndices

ei	Estado inicial
ef	Estado final
1	Estado termodinâmico 1
2	Estado termodinâmico 2
3	Estado termodinâmico 3
4	Estado termodinâmico 4

RESUMO

Motores termomagnéticos são dispositivos capazes de converter calor em energia mecânica através do efeito termomagnético, e são uma alternativa para a conversão de energia de rejeitos térmicos de baixa e baixíssima qualidade. Neste trabalho é proposta uma classificação dos motores termomagnéticos como sendo de dois tipos, os motores tipo Edison e os motores tipo Tesla. Feita a classificação, diferenciou-se o comportamento de operação e os ciclos termodinâmicos desenvolvidos pelos dois tipos de motores, mostrando que motores do tipo Tesla desenvolvem um ciclo termodinâmico que pode ser aproximado por um ciclo Brayton magnético, já motores do tipo Edison descrevem um ciclo mais complexo, não podendo ser aproximado por um ciclo Brayton. Compararam-se os parâmetros de interesse para ambos os motores através de análises termodinâmicas, onde se concluiu que motores do tipo Tesla apresentam melhores respostas de trabalho e eficiência que motores do tipo Edison, quando são consideradas as mesmas condições de operação. Além disso, identificou-se que a equação de força de Kelvin é a equação que corretamente descreve o comportamento da força magnética em um motor termomagnético, essa contribuição é importante, pois vários trabalhos publicados na literatura utilizam equações que não descrevem corretamente o comportamento da força magnética. Mostrou-se que o trabalho produzido em um motor termomagnético é igual ao trabalho produzido pela força magnética resultante no dispositivo. Foi desenvolvida e validada uma metodologia para o cálculo do trabalho específico produzido em um motor do tipo Tesla. Utilizando as metodologias validadas, verificou-se como a temperatura, o campo magnético aplicado, o fator de demagnetização e o tipo de transição influenciam o comportamento dos motores termomagnéticos tipo Tesla, o que abre caminho para o desenvolvimento de dispositivos mais interessantes do ponto de vista termodinâmico.

Palavras-chave: Motores Termomagnéticos, Efeito termomagnético, Conversão de energia térmica, Trabalho e eficiência.

ABSTRACT

Thermomagnetic motors are devices capable of converting heat into mechanical energy through the thermomagnetic effect. These devices are able to operate using low or very low quality thermal waste, being an alternative to avail that range of thermal energy. This work classifies the thermomagnetic motors in two types: The Tesla type and the Edison type thermomagnetic motors, differentiating the operational behavior and the thermodynamic cycles developed in each type. By using thermodynamic approaches, it is shown that the Tesla type thermomagnetic motors have best response in terms of work and efficiency than the Edison type thermomagnetic motors, when the same operating conditions are considered. In addition, an experimental approach is presented, proving that the Kelvin force equation describes the behavior of the force in thermomagnetic motors, and the work produced in a motor is the same that the work produced by the resultant magnetic force in the system. It was developed and validated a method to estimate the work produced by cycle in a Tesla type thermomagnetic motor, and using thermodynamic approaches, the relevance of the temperature, applied magnetic field, demagnetizing factor and transition type in the Tesla type thermomagnetic motor were verified.

Keywords: Thermomagnetic motors, Thermomagnetic effect, Thermal energy conversion, Work and efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica no mundo é majoritariamente feita através de energia térmica, onde a geração em termoelétricas representa 65% e em termonucleares 12% da produção global de eletricidade [1]. Existem também sistemas onde o calor é convertido em trabalho mecânico para uso direto, como em alguns sistemas de moendas nos processos de fabricação de açúcar e álcool. Todos esses sistemas, por se tratarem de máquinas térmicas, necessitam que parte do calor fornecido a eles seja rejeitado para uma fonte fria. Em processos de cogeração de energia, parte desse calor é reaproveitado para produção de trabalho mecânico que posteriormente pode ser convertido em energia elétrica.

Segundo Thekdi & Nimbalkar [2] os rejeitos térmicos industriais podem ser classificados como de altíssima qualidade (temperatura superior a 1143 K), alta qualidade (temperatura entre 923 e 1143 K), média qualidade (temperatura entre 503 e 923 K), baixa qualidade (temperatura entre 393 e 503 K) e baixíssima qualidade (temperatura inferior a 393 K). Essa classificação é feita de acordo com a facilidade em reaproveitar esses rejeitos, sendo os rejeitos de altíssima qualidade facilmente aproveitados para diversos fins, já os de baixíssima qualidade tem aplicações muito limitadas.

Quanto à conversão de energia, os rejeitos de altíssima e alta qualidade podem ser facilmente aproveitados para pré-aquecimento de ar para combustão em turbinas. Os rejeitos de média qualidade podem ser utilizados em plantas de cogeração com ciclo vapor. Os rejeitos térmicos de baixa e baixíssima qualidade são os mais abundantes [3], contudo sua conversão em energia mecânica ou elétrica exige a utilização de sistemas mais complexos devido à baixa diferença de

temperaturas entre o reservatório frio (normalmente à temperatura ambiente) e quente [3].

Uma alternativa para conversão de energia utilizando rejeitos térmicos de baixa e baixíssima qualidade são os motores e geradores termomagnéticos, que tem como uma de suas principais características eficiências próximas à eficiência de Carnot (máxima eficiência possível para uma máquina térmica) para pequenas diferenças de temperatura entre a fonte fria e a fonte quente [4], [5], assim podendo operar até mesmo utilizando rejeitos térmicos de baixíssima qualidade [6].

Motores termomagnéticos são dispositivos capazes de converter calor em energia mecânica através do efeito termomagnético [7], [8]. Sendo assim, para compreendê-los é necessário primeiramente conhecer os dois principais fenômenos envolvidos no funcionamento desses dispositivos: o efeito termomagnético e o efeito magnetocalórico.

1.1. Efeito termomagnético

O efeito termomagnético é a relação entre a temperatura de um material e sua magnetização, de forma que, quanto maior a temperatura do material, menor será sua magnetização para um mesmo campo magnético aplicado, sendo que a magnetização de saturação é aquela à temperatura de zero absoluto [9].

Assim, se um material que está inicialmente em um estado ferromagnético (tem uma forte interação com campo magnético) é aquecido, sua magnetização começa a diminuir até passar pela Temperatura de Curie (T_C), onde o material se torna paramagnético (fraca interação com campo magnético). Caso o material esteja

inicialmente aquecido a uma temperatura maior que T_C e for resfriado, ele sofrerá uma transição do estado paramagnético para ferromagnético [10].

A transição entre os estados ferromagnético e paramagnético normalmente acontece de forma gradual com o aumento da temperatura, o que caracteriza uma transição magnética de segunda ordem. Contudo, essa transição pode estar acoplada a uma transição cristalina do material [11], fazendo com que a transição magnética aconteça de forma abrupta. Quando a transição apresenta essas características é dita de primeira ordem. Em materiais que tem transição de segunda ordem, o T_C é o mesmo no aquecimento e resfriamento. Já em materiais que possuem transição de primeira ordem, pode existir uma histerese térmica [12], de forma que o T_C é maior no aquecimento do que no resfriamento.

Para entender o motivo da magnetização diminuir com o aumento da temperatura em uma transição ferromagnética para paramagnética, é preciso entender a origem da resposta ferromagnética que um material pode apresentar. Os momentos magnéticos surgem de cargas elétricas em movimento. Em um sólido, os elétrons apresentam dois tipos de movimento: movimento orbital ao redor do núcleo atômico e o de *spin* [13]. Esses movimentos geram momentos magnéticos, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Demonstração do momento magnético associado ao: (a) Movimento orbital do elétron. (b)

Spin do elétron.

Fonte: Livro de W. Callister & David Rethwisch [13].

A magnetização é uma medida proporcional à resultante da soma vetorial dos momentos magnéticos de um material. Em materiais magnéticos moles, sem a presença do campo magnético, a soma dos spins magnéticos normalmente tende a zero. Ao se aplicar um campo magnético, os spins magnéticos tendem a se alinhar com o campo aplicado, fazendo com que a magnetização cresça (resultante da soma vetorial dos spins magnéticos aumenta). A máxima magnetização é atingida quando todos os momentos magnéticos do material apontam para um mesmo sentido, sendo essa a chamada magnetização de saturação. Essa ocorre quando a intensidade do campo magnético aplicado tende a infinito ou a temperatura tende a 0 K.

Em um sólido, o aumento da temperatura resulta no aumento da magnitude da vibração térmica dos átomos. Esse aumento de vibração atômica tende a randomizar a direção dos momentos magnéticos. Assim, quanto maior a temperatura, mais difícil se torna alinhar os momentos magnéticos com o campo aplicado [13].

Essa diminuição da magnetização com o aumento da temperatura normalmente ocorre de forma gradual, o que caracteriza a transição de segunda ordem. Contudo, uma mudança na rede cristalina do material pode acontecer, fazendo com que o material mude de uma estrutura cristalográfica que apresenta resposta ferromagnética, para uma estrutura que apresenta resposta paramagnética. Essa mudança de estado acompanhada de uma transição cristalográfica caracteriza a transição magnética de primeira ordem.

Na Figura 2 estão representadas curvas características de magnetização (M) em função da temperatura (T) para diferentes campos magnéticos aplicados (H). A Figura 2a apresenta as curvas para um material de segunda ordem, nota-se que a

transição acontece de forma gradual com o aumento da temperatura. Já a Figura 2b apresenta as curvas para um material com transição de primeira ordem, observa-se que, para este caso, além da transição ocorrer de forma mais abrupta, existe também uma histerese térmica que normalmente acompanha esse tipo de transição. Essa histerese faz com que o T_C tenha valores diferentes para o aquecimento e o resfriamento do material. É possível observar também que a aplicação do campo magnético faz com que a fase ferromagnética seja estabilizada, o que desloca o T_C para a direita, aumentando a temperatura em que a transição ocorre.

Figura 2 – Esboço do comportamento da magnetização em função da temperatura a campo magnético constante. (a) Material de segunda ordem. (b) Material de primeira ordem. Linhas de mesma cor representam mesmo valor de campo aplicado.

Fonte: Autoria própria.

1.2. Efeito magnetocalórico

O efeito magnetocalórico consiste na alteração da temperatura de um material quando esse é submetido a uma variação de campo magnético em um processo adiabático [14], [15]. Assim, quando um material que apresenta o efeito

magnetocalórico se aproxima de um ímã sem trocar calor, sua temperatura aumenta. Quando o material se afasta do ímã, sua temperatura diminui [16].

Isso acontece, pois o campo magnético causa um alinhamento dos domínios magnéticos do material, conforme mostrado na Figura 3. Essa orientação dos momentos magnéticos se reflete numa redução da entropia magnética do material (S_{mag}) [17].

Figura 3 - Domínios magnéticos: (a) Sem aplicação de campo magnético. (b) Com aplicação de campo magnético.

Fonte: Adaptado do livro de Bozorth [18].

A entropia absoluta (S_{Tot}) de um sólido a pressão constante pode ser calculada pela Equação (1), onde S_{rede} é a porção da entropia referente às vibrações da rede cristalina, S_{ele} é a porção da entropia ligada aos elétrons livres no material, S_{mag} é a porção da entropia ligada aos spins magnéticos no material, T é a temperatura do material e H é o campo magnético aplicado.

$$S_{Tot}(T, H) = S_{mag}(T, H) + S_{rede}(T) + S_{ele}(T) \quad (1)$$

Em um processo adiabático reversível tem-se que S_{Tot} é constante, dessa maneira, se S_{mag} reduz, S_{rede} e/ou S_{ele} devem aumentar para satisfazer a igualdade da Equação (1). O aumento de S_{rede} tem como consequência um aumento na

temperatura do material [17]. Esse aumento de temperatura é o que caracteriza o efeito magnetocalórico.

A entropia específica (s) em um material magnético a campo constante pode ser calculada a partir do calor específico, conforme mostrado na Equação (2) [19]. Assim, o efeito magnetocalórico também pode ser explicado pela forte influência que o campo magnético exerce no calor específico aparente do material ao redor do T_C . Na Figura 4 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.

$$s(T, H) = \int \frac{c_H}{T} dT \Big|_H \quad (2)$$

Figura 4 – Esboço do comportamento do calor específico aparente a campo magnético constante 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: Autoria própria.

Aplicando-se a Equação (2) nas curvas de $c_H(T,H)$, obtém-se o comportamento da temperatura do material magnético em função da entropia, conforme mostrado na Figura 5 para materiais de primeira e segunda ordem. Nota-se que, ao se aplicar uma mudança de campo magnético em um processo adiabático reversível, a temperatura do material magnético se altera.

Figura 5 – 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: Autoria própria.

De posse do conhecimento dos efeitos termomagnético e magnetocalórico é possível entender o funcionamento dos dispositivos termomagnéticos. Os princípios de funcionamento para diferentes dispositivos são descritos a seguir.

1.3. Motores termomagnéticos

Ao longo da história, diversos motores termomagnéticos foram propostos, sendo os mais famosos os modelos patenteados por Thomas Edison [20] e Nikola Tesla [21]. Ambos os dispositivos fazem uso do efeito termomagnético para conversão de calor em energia mecânica, contudo, apresentam diferenças em alguns de seus mecanismos de funcionamento. Sendo assim, é proposta aqui a classificação dos motores termomagnéticos em dois tipos, os motores tipo Edison e os motores tipo Tesla. O funcionamento de cada um dos tipos de motores é descrito a seguir, fazendo uso dos modelos propostos nas patentes dos inventores.

1.3.1. Motores tipo Edison

Edison chamou seu dispositivo de motor piro-magnético (mostrado na Figura 6), ele é constituído de uma roda formada por tubos de paredes finas (A), essa roda é feita do material termomagnético que sofrerá a transição magnética. Uma fornalha (B) é utilizada para fornecer calor ao sistema, a fonte fria é o ar. O sistema também é dotado de um dínamo (D) movido pelo próprio motor termomagnético, o dínamo gera corrente elétrica que alimenta eletroímãs que provém o campo magnético do dispositivo.

Ar a temperatura ambiente entra pelo tubo “b”, e passa por alguns tubos que compõem a roda “A” resfriando-os a temperaturas inferiores a T_C do material utilizado. Esse ar alimenta a fornalha. Os gases de combustão são expulsos da fornalha pelo tubo “c”, sendo forçados a passar por alguns dos tubos que compõem a roda “A”, aquecendo-os a temperaturas superiores ao T_C , os gases de combustão

são então rejeitados para a atmosfera. Devido à transição do material e sua interação com o campo magnético aplicado, a roda gira devido à ação da força magnética.

Figura 6 - Patente do motor termomagnético de Edison. (a) Conjunto. (b) Vista para destaque da roda termomagnética e circuito magnético.

Fonte : Patente de Thomas Edison [20]

Em 1888, quando Edison propôs esse dispositivo, não existiam ímãs permanentes capazes de produzir campos magnéticos tão elevados quanto os ímãs atuais, sendo assim, a utilização de eletroímãs era mais vantajosa. Para os tubos que compunham “A” ele sugeriu a utilização de ferro (com T_C de 1043 K), pois não haviam materiais com temperaturas de transição próximos à temperatura ambiente.

É interessante verificar que Edison já pensava em sistemas de otimização do motor. Na patente ele descreve que os tubos que sofrerão transição térmica devem ter paredes finas para serem aquecidos e resfriados rapidamente.

Apesar do funcionamento um tanto quanto confuso, o mecanismo de operação do motor de Edison é exatamente o mesmo de uma roda de Curie (mostrada na Figura 7), onde calor é injetado na região onde o campo magnético é aplicado, fazendo com que o material na região se torne paramagnético, a porção adjacente a esse material, que ainda está ferromagnética, é atraída pelo campo magnético, fazendo com que o rotor gire. Dessa maneira, as rodas de Curie podem ser classificadas como motores do tipo Edison.

Figura 7 - Mecanismo de funcionamento de uma roda de Curie.

Fonte: Adaptado do artigo de A. Karle [22].

Pode-se dizer que os motores do tipo Edison são aqueles em que o calor é recebido e rejeitado pelo material termomagnético de maneira constante, permitindo que um movimento contínuo seja desenvolvido pelo sistema devido à ação constante da força magnética sobre o rotor. Dessa forma, o trabalho produzido é

constante. O material apresenta, ao longo de sua extensão, partes paramagnéticas e partes ferromagnéticas.

1.3.2. **Motores tipo Tesla**

A patente feita por Tesla em 1889 é mostrada na Figura 8a. Nela um material (A), inicialmente ferromagnético, é atraído pelo campo magnético de um ímã (N), um bico de Bunsen (H – fonte quente) aquece o material (A), o material passa por T_C , tornando-se paramagnético. A força magnética devido à interação do material (A) com o campo magnético proporcionado pelo ímã (N) diminui drasticamente, fazendo com que o material seja deslocado de sua posição pela ação da mola (W), deixando de receber calor do bico de Bunsen (H). Na nova posição, o material (A) troca calor com o ambiente (fonte fria) e se resfria, passando mais uma vez por T_C , e tornando-se novamente ferromagnético. A força magnética volta a ser significativa devido à interação entre o campo magnético do ímã (N) e o material (A), que se atraem.

Pode ser observado na Figura 8b, que o material (A) sofre um movimento pendular, Tesla ligou a esse pêndulo um sistema biela-manivela (12) para acionar um eixo (13), convertendo o movimento pendular em movimento rotativo. O material (A) retorna à posição inicial, tensionando a mola (W) e ficando novamente sobre o bico de Bunsen (H) e o ciclo se repete.

Os motores do tipo Tesla são aqueles em que o calor é recebido e rejeitado pelo material termomagnético de maneira intermitente. Idealmente, o movimento só ocorre após toda porção de material que está recebendo ou perdendo calor sofre transição entre os estados ferromagnético e paramagnético. Essas máquinas

normalmente apresentam movimentos intermitentes ou oscilatórios. O trabalho produzido também é intermitente.

Figura 8 - Patente do motor de Tesla. (a) Motor termomagnético de Tesla. (b) Motor de Tesla montado com conjunto biela manivela para conversão do movimento pendular em rotação.

Fonte: Patente de Nikola Tesla [21]

1.4. Geradores termomagnéticos sem partes móveis

Existe ainda um terceiro tipo de máquina para conversão de calor em energia mecânica usando o efeito termomagnético, essas foram chamadas por Thomas Edison de dínamos piro-magnéticos [23], [24]. Esses dispositivos são geradores termomagnéticos sem partes móveis, que são capazes de converter calor diretamente em energia elétrica [25]. Tais sistemas são constituídos por um circuito magnético que é aberto ou fechado por um material magnético que alterna entre os estados ferromagnético e paramagnético. Devido à variação do fluxo magnético no interior de uma bobina enrolada no circuito, uma diferença de potencial elétrico é induzida nos terminais dessa bobina.

Toma-se por base o esquema do gerador sem partes móveis mostrado na Figura 9. Inicialmente o material termomagnético está no estado ferromagnético, sendo assim, o fluxo magnético sai do polo norte do ímã e é conduzido até o material termomagnético por um circuito magnético. O fluxo atravessa o material termomagnético e retorna ao polo sul do ímã através da continuação do circuito, passando pelo núcleo da uma bobina. Em seguida, o material termomagnético é rapidamente aquecido, fazendo com que esse mude do estado ferromagnético para paramagnético. Nessa situação, o fluxo magnético deixa de passar pelo interior do circuito, fazendo com que haja uma queda drástica do fluxo no núcleo da bobina, essa variação do fluxo magnético induz a diferença de potencial elétrico nos terminais da bobina.

Figura 9 - Gerador elétrico termomagnético sem partes móveis.

Fonte: Adaptado do artigo de J. F. Elliott [26]

Em seguida o material termomagnético é novamente resfriado, reestabelecendo o fluxo magnético pelo circuito e induzindo novamente tensão na bobina. A tensão induzida nos terminais da bobina é proporcional à derivada do fluxo

magnético ao longo do tempo, quanto mais rápido a transição ocorrer, maior será a tensão induzida.

De posse dos conhecimentos dos conceitos por trás do funcionamento da conversão de calor utilizando o efeito termomagnético, e da apresentação dos dispositivos de conversão, será feita uma pequena introdução das descrições matemáticas que caracterizam parte dos fenômenos e principais grandezas envolvidas nos sistemas apresentados.

1.5. Termodinâmica dos motores termomagnéticos

Suponha que um campo magnético é aplicado em um local no espaço, conforme ilustrado na Figura 10a. Essa região apresentará uma densidade de fluxo magnético, que pode ser determinada pela Equação (3), B é a densidade de fluxo magnético, H é o campo magnético aplicado e μ é a permeabilidade magnética do meio. B e H são grandezas vetoriais, contudo, para simplificar as Equações (3) a (7) serão apresentados apenas casos unidimensionais, com os módulos das grandezas.

$$B = \mu H \quad (3)$$

Ao se inserir um material magnético nessa região (Figura 10b), um segundo campo magnético será induzido devido à magnetização (M) do material. Nessa condição, B é definido pela Equação (4), onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

O campo magnético interno ao material (H_{int}) pode ser determinado pela Equação (5), onde H_{Dem} é o campo demagnetizante, mostrado na Equação (6) [27],

[28]. N é o fator de demagnetização, que pode assumir valores entre 0 e 1, dependendo da geometria do material magnético e de seu alinhamento com H [29]. De modo que, para se definir M como uma propriedade de estado do material magnético, independente da sua forma ou alinhamento com o campo, deve-se determinar M em função de H_{int} e da temperatura do material.

Figura 10 - (a) Densidade de fluxo magnético sem a presença de um material magnético. (b) Campo no interior do material magnético devido à aplicação de campo H .

Fonte: Adaptado do artigo de Kitanovski & Egolf [30].

Isolando e igualando H_{Dem} nas Equações (5) e (6), tem-se a Equação (7).

$$B = \mu_0(H + M) \quad (4)$$

$$H_{int} = H - H_{Dem} \quad (5)$$

$$H_{Dem} = NM \quad (6)$$

$$H_{int} = H - N \cdot M(T, H_{int}) \quad (7)$$

1.5.1. Trabalho da força magnética

Considera-se agora um material magnético submetido a um campo aplicado H_0 , tendo como resposta magnética uma magnetização M_0 . Supondo-se que N é igual a zero, tem-se que H é igual à H_{int} . Supondo-se que devido à ação da força magnética, o material se desloca para uma região onde o campo aplicado é H_f (maior que H_0), atingindo uma magnetização M_f . Como definir o trabalho de deslocamento do material?

Bozorth, em seu clássico livro “Ferromagnetismo” [31], define a força magnética conforme mostrado na Equação (8), onde V é o volume de material magnético e x é a direção da trajetória de deslocamento. Aplicando-se a definição de trabalho, onde esse é igual à integral da força na direção do deslocamento, determina-se que o trabalho de deslocamento do material por unidade de volume (w_v) pode ser calculado pela Equação (9).

Contudo, em aplicações de motores termomagnéticos e refrigeradores magnetocalóricos, diversos autores não utilizam a Equação (9) para determinação do trabalho, fazendo uso da Equação (10) [3], [17], [22], [27], [32]–[35], enquanto outros aplicam as Equações (8) e (9) [14], [36]–[40]. Na Figura 11 é apresentada uma representação gráfica do trabalho de deslocamento para o material magnético que se deslocou devido à ação de uma força magnética de um campo H_0 para um campo H_f , w é o trabalho específico e ρ é a densidade. Observa-se que as Equações (9) e (10) podem retornar resultados diferentes.

$$F_{mag} = V\mu_0 M \frac{dH}{dx} \quad (8)$$

$$dw_v = \mu_0 M dH \quad (9)$$

$$dw_v = \mu_0 H dM \quad (10)$$

Kitanovski & Egolf [30] fazem uma analogia entre o processo de compressão de gás na refrigeração tradicional e o ciclo de refrigeração magnetocalórica, explicando a razão para a existência das Equações (9) e (10), e em qual situação devem ser utilizadas. Os autores consideram que a pressão do gás (p) no ciclo de refrigeração tradicional é análoga ao H em um ciclo de refrigeração magnetocalórico, e o volume específico do gás (v) é análogo à M do material magnético.

Figura 11 – Esboço do trabalho específico devido à ação da força magnética.

Fonte: Autoria própria.

Na analogia, assim como $p dv$ é utilizado no cálculo do trabalho específico na compressão de um gás em um sistema fechado (não há massa do gás cruzando as fronteiras do sistema), $\mu_0 H dM$ deve ser utilizado para o cálculo do trabalho em um sistema magnético fechado (material magnético não cruza as fronteiras do sistema) [30].

Em contrapartida, em um processo adiabático de compressão de gás em um sistema aberto (onde massa de gás cruza a fronteira do volume de controle), o trabalho efetivo pode ser calculado através de vdp . Por analogia, em um processo magnético aberto (massa de material magnético cruza a fronteira do volume de controle) e adiabático, $\mu_0 M dH$ deve ser utilizado na determinação do trabalho [30].

Conclui-se então que em processos adiabáticos com sistemas abertos deve-se utilizar a Equação (9) na definição do trabalho. Já em processos com sistemas fechados, deve-se utilizar a Equação (10). Em trabalhos abordando motores termomagnéticos e refrigeradores magnetocalóricos, Egolf *et al.* [5], [27] tratam os dispositivos como sendo sistemas fechados, utilizando a Equação (10). Contudo, neste texto, na explicação do funcionamento dos ciclos termodinâmicos desenvolvidos nos motores termomagnéticos, serão considerados ambos os casos, sistemas abertos e sistemas fechados.

1.5.2. Ciclo de operação

Motores termomagnéticos, tanto os do tipo Edison, quanto os do tipo Tesla, são descritos na literatura operando segundo um ciclo Brayton magnético (com dois processos isocampos e dois processos adiabáticos reversíveis) em um sentido reverso ao ciclo de refrigeração magnetocalórica [4], [5], [9], [36], [41]. Devido a essa inversão nos sentidos dos processos, o efeito termomagnético é chamado também de efeito magnetocalórico reverso [3].

Um motor do tipo Tesla foi escolhido para explicar o ciclo termodinâmico desenvolvido nos motores termomagnéticos, pois os estados termodinâmicos são mais facilmente visualizados nessa configuração. Na Figura 12 é mostrado o motor

em questão, onde um arranjo magnético (montagem dos ímãs com o material magnético mole) fornece o campo magnético aplicado H . Inicialmente, o material magnético (MM) encontra-se no estado 1, apresentando comportamento ferromagnético a temperatura T_1 e campo aplicado H_1 , como mostrado na Figura 12a.

Devido à ação da força magnética, MM se desloca para a posição mostrada na Figura 12b, sendo colocado em contato com a fonte quente, onde o campo H_2 é aplicado. Durante o deslocamento, MM não troca calor (processo adiabático). Devido ao efeito magnetocalórico, a temperatura de MM aumenta de T_1 para T_2 , e o estado 2 é atingido. Durante o processo de mudança do estado 1 para o estado 2 ($1 \rightarrow 2$), a mola é comprimida e trabalho pode ser extraído do sistema pelo pistão de saída de trabalho. Por $1 \rightarrow 2$ se tratar de um processo adiabático e reversível, tem-se que a entropia do estado 1 (s_1) é igual à entropia do estado 2 (s_2).

Em contato com a fonte quente, MM troca calor a campo magnético aplicado constante (processo isocampo) H_2 . Com o aumento da temperatura de T_2 para T_3 , a magnetização de MM diminui de M_2 para M_3 , e com isso o estado 3 é atingido, com MM apresentando-se paramagnético, conforme mostrado na Figura 12c. Tem-se então que, durante o processo de mudança do estado 2 para o estado 3 ($2 \rightarrow 3$), MM recebe calor da fonte, fazendo com que sua entropia aumente de s_2 para s_3 . Por se tratar de um processo isocampo, tem-se que H_2 é igual a H_3 .

Com MM paramagnético, a força magnética de atração entre o arranjo magnético e MM reduz. Devido à ação da força elástica da mola comprimida, MM se desloca para a posição mostrada na Figura 12d, sendo colocado em contato com a fonte fria. O deslocamento de MM entre a fonte quente e a fonte fria acontece de

forma adiabática. Com a redução do campo magnético aplicado de H_3 para H_4 , a temperatura de MM reduz de T_3 para T_4 , assim o estado 4 é atingido.

Figura 12 - Motor termomagnético do tipo Tesla em diferentes estados termodinâmicos. (a) Estado 1. (b) Estado 2. (c) Estado 3. (d) Estado 4. A seta mostrada no pistão de saída de trabalho indica o sentido da força resultante atuando no conjunto.

Fonte: Adaptado de artigo de Bessa *et al.*[19] (artigo do autor).

O processo de mudança do estado 3 para o estado 4 ($3 \rightarrow 4$) exige que trabalho seja fornecido a MM para vencer a pequena força magnética entre MM (paramagnético) e o arranjo magnético. Nesse sistema, a mola usa energia elástica armazenada durante $1 \rightarrow 2$ para deslocar o material entre a fonte quente e a fonte fria. $3 \rightarrow 4$ é um processo adiabático e reversível, assim, tem-se que as entropias s_3 e

s_4 são iguais. Comparando-se a Figura 12a com Figura 12d, nota-se que a posição de MM é a mesma nos estados 1 e 4, assim, tem-se que H_1 é igual a H_4 .

Em contato com a fonte fria, MM tem sua temperatura reduzida de T_4 para T_1 , rejeitando calor em um processo isocampo, retornando ao estado 1, completando um ciclo de funcionamento do motor. Devido à redução da temperatura de MM durante a mudança do estado 4 para o estado 1 ($4 \rightarrow 1$), a magnetização de MM aumenta de M_4 para M_1 e sua entropia é reduzida de s_4 para s_1 .

Assim, tem-se que $1 \rightarrow 2$ é um processo adiabático e reversível em que o MM realiza trabalho. $2 \rightarrow 3$ é um processo isocampo onde o MM recebe calor da fonte quente. $3 \rightarrow 4$ é um processo adiabático e reversível, onde MM sofre a ação de uma força que o remove da região de campo mais elevado (trabalho recebido por MM). $4 \rightarrow 1$ é um processo isocampo onde o MM rejeita calor para a fonte fria. Considerando a analogia descrita por Kitanovski & Egolf [30], um processo isobárico em um gás é análogo a um processo isocampo em um material magnético. Um ciclo Brayton ideal em processos convencionais é composto por dois processos adiabáticos reversíveis e dois processos isobáricos. De forma análoga, sistemas magnéticos que apresentam dois processos adiabáticos reversíveis e dois processos isocampo, como os motores termomagnéticos, desenvolvem um ciclo Brayton magnético.

Conforme discutido anteriormente, as Equações (9) e (10) foram propostas para o cálculo do trabalho desenvolvido por um material magnético no interior de um campo magnético aplicado. De modo que o trabalho específico realizado/recebido pelo material magnético nos processos $1 \rightarrow 2$ ou $3 \rightarrow 4$ de um motor termomagnético deve ser calculado pela Equação (11), considerando que a Equação (9) está correta. Ou pela Equação (12), considerando que a Equação (10) é a correta. Os subíndices

ei e ef indicam o estado inicial e o estado final do processo, respectivamente. O trabalho específico resultante (w_{Res}) no pistão do motor termomagnético durante um ciclo pode ser calculado por meio da Equação (13).

$${}_{ei}w_{ef} = \frac{1}{\rho} \mu_0 \int_{H_{ei}}^{H_{ef}} M dH \Big|_{s_{ei}} \quad (11)$$

$${}_{ei}w_{ef} = \frac{1}{\rho} \mu_0 \int_{M_{ei}}^{M_{ef}} H dM \Big|_{s_{ei}} \quad (12)$$

$$w_{Res} = |{}_1w_2| - |{}_3w_4| \quad (13)$$

A Figura 13 mostra o diagrama M - H desenvolvido pelo motor termomagnético, esse diagrama é análogo a um diagrama v - p em sistemas convencionais de gás. 1, 2, 3 e 4 representam os estados termodinâmicos. As áreas destacadas são proporcionais aos trabalhos para cada processo considerando as Equações (11) e (12).

Da primeira lei da Termodinâmica tem-se a Equação (14), onde u é a energia interna específica e q o calor por unidade de massa. Aplicando-se a primeira lei a um ciclo, sabe-se que a variação da energia interna é nula, logo tem-se a Equação (15) para um ciclo. O calor pode ser definido fazendo uso da Equação (16).

Retomando o motor descrito na Figura 12 e fazendo uso da Equação (16), determina-se que o calor recebido pelo material magnético da fonte quente (q_{Hot}) durante $2 \rightarrow 3$ pode ser calculado usando a Equação (17). Já o calor rejeitado pelo material magnético para a fonte fria (q_{Cold}) durante $4 \rightarrow 1$ pode ser calculado usando a Equação (18). Resolvendo-se a Equação (15) e aplicando-se as Equações (17) e

(18), conclui-se que o trabalho específico resultante produzido no motor durante um ciclo também pode ser calculado utilizando a Equação (19).

Figura 13 – Esboço do diagrama M - H com os estados termodinâmicos descritos para o motor da Figura 12. (a) Considerando a Equação (11) no cálculo do trabalho. (b) Considerando a Equação (12) no cálculo do trabalho.

Fonte: Autoria própria.

$$\Delta q = \Delta u + \Delta w \quad (14)$$

$$\oint dq = \oint dw \quad (15)$$

$$dq = Tds \quad (16)$$

$$q_{Hot} = {}_2q_3 = \int_{s_2}^{s_3} Tds \Big|_{H_2} \quad (17)$$

$$q_{Cold} = {}_4q_1 = \int_{s_4}^{s_1} Tds \Big|_{H_1} \quad (18)$$

$$w_{Res} = \int_{s_2}^{s_3} Tds \Big|_{H_2} - \int_{s_1}^{s_4} Tds \Big|_{H_1} \quad (19)$$

A Figura 14 mostra o diagrama T - s desenvolvido pelo motor termomagnético, análogo a um diagrama T - s em sistemas convencionais de gás. 1, 2, 3 e 4 representam os estados termodinâmicos. As áreas destacadas representam o calor absorvido e rejeitado pelo material magnético durante o ciclo.

Figura 14 – Esboço do diagrama T - s com os estados termodinâmicos descritos no motor da Figura 12.

Fonte: Autoria própria.

O calor recebido pelo material da fonte quente também pode ser calculado fazendo uso da Equação (20), onde c_H é o calor específico aparente sob campo magnético aplicado constante (esta propriedade do material magnético será melhor discutida no item 6.1.4). A desvantagem da Equação (17) em relação à Equação (20) é que a primeira exige que a entropia utilizada no cálculo seja a absoluta (determinada desde a temperatura de zero absoluto). Na maioria dos trabalhos publicados, os valores de entropia exibidos são relativos e não absolutos. Isso se deve ao fato que a entropia é calculada a partir da integral mostrada na Equação (2), o que embute muitos erros devido à integração para diferenças de temperaturas tão grandes (de zero até a temperatura de interesse). Na Equação (19), o trabalho é

calculado a partir da diferença das integrais de Tds , dessa maneira, a utilização da entropia relativa retorna o mesmo valor de trabalho que o uso da entropia absoluta.

$$q_{Hot} = \int_{T_2}^{T_3} c_H(T, H) dT \Big|_{H_2} \quad (20)$$

Além do trabalho, outro importante parâmetro dos motores é a eficiência. Em máquinas térmicas a eficiência energética (η) pode ser determinada pela Equação (21). A máxima eficiência possível em uma máquina térmica é a eficiência de Carnot (η_C), assim é comum expressar os valores de eficiência em razão da eficiência de Carnot. Essa razão é conhecida como eficiência relativa à eficiência de Carnot (η_{rel}), calculada pela Equação (22), onde T_{Cold} é a temperatura da fonte fria e T_{Hot} é a temperatura da fonte quente.

$$\eta = \frac{w_{Res}}{q_{Hot}} \quad (21)$$

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_C} = \frac{\eta}{1 - \frac{T_{Cold}}{T_{Hot}}} \quad (22)$$

Agora que uma introdução aos fenômenos e termodinâmica envolvidos no funcionamento dos motores termomagnéticos foi apresentada, os princípios de funcionamento e parâmetros envolvidos foram demonstrados, e uma classificação dos tipos de motores termomagnéticos foi feita, serão apresentados os objetivos desse trabalho.

1.6. Objetivos

Esse trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de abordagens analíticas que auxiliem no entendimento, estudo e desenvolvimento de motores termomagnéticos, verificando como a alteração de parâmetros, condições de operação e propriedades dos materiais magnéticos alteram o comportamento dos sistemas. Para isso, os seguintes objetivos parciais precisaram ser alcançados:

- Fazer uma extensa revisão bibliográfica, identificando os princípios envolvidos, tipos de motores, métodos e modelos para descrição do comportamento, vantagens, desvantagens e sugestões de aplicação para a conversão de energia através do efeito termomagnético, e identificar o que ainda falta ser estudado nesses dispositivos.
- Fazer uma classificação dos tipos de motores termomagnéticos, identificando as diferenças de operação e comportamento termodinâmico desses dispositivos.
- Verificar o comportamento da força magnética que atua nos motores termomagnéticos, identificando quais equações devem ser utilizadas para descrever os dispositivos.
- Identificar qual o ciclo termodinâmico real desenvolvido nos diferentes tipos de motores termomagnéticos, detectando se a aproximação para um ciclo Brayton magnético é válida.
- Uma vez identificado o comportamento do ciclo termodinâmico para cada tipo de motor, comparar os parâmetros de interesse para os diferentes tipos de motores operando em condições iguais, verificando assim qual tipo de motor é mais interessante do ponto de vista termodinâmico.

- Validar uma metodologia para o cálculo do trabalho em um motor termomagnético do tipo Tesla.
- Identificar, através das metodologias validadas, como parâmetros geométricos, propriedades de materiais e condições de operação alteram o comportamento dos motores termomagnéticos do tipo Tesla.

1.7. Visão geral do texto

Como já mostrado na introdução, a tese inicia-se com uma breve classificação dos tipos de rejeitos térmicos, apontando a conversão de energia termomagnética como uma alternativa para o uso de rejeitos térmicos de baixa e baixíssima qualidade. Em seguida, tem-se uma explicação dos principais fenômenos físicos envolvidos na conversão de energia através do efeito termomagnético. Apresentou-se então uma proposta de classificação sobre os tipos de motores termomagnéticos. Também foi abordada a Termodinâmica destas máquinas, apresentando as equações envolvidas e o ciclo termodinâmico teórico desenvolvido pelos motores.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, mostrando os primeiros estudos abordando os motores termomagnéticos e analisando os principais trabalhos teóricos e experimentais. A partir disso, comentam-se os estudos que ainda devem ser realizados abordando os dispositivos. Ao final desse capítulo é apresentada uma visão geral dos motores termomagnéticos, mostrando suas vantagens, desvantagens e sugestões de aplicação.

No Capítulo 3 é mostrada uma verificação experimental do comportamento da força magnética, comparando os resultados obtidos com diferentes equações,

identificando qual delas descreve corretamente o comportamento da força magnética. Dessa maneira, também foi possível determinar qual equação descreve corretamente o trabalho produzido por uma força magnética.

No Capítulo 4 são mostrados estudos abordando os ciclos termodinâmicos desenvolvidos nos diferentes tipos de motores termomagnéticos. Para os motores tipo Edison, é utilizada uma abordagem via simulação computacional. Para o motor tipo Tesla, utiliza-se uma abordagem experimental. Os ciclos para os diferentes tipos de motores são comparados e diferenciados, observando-se que os motores tipo Edison descrevem um ciclo muito diferente dos motores tipo Tesla. Conhecendo-se o comportamento do ciclo de cada um dos motores, é apresentada uma comparação do trabalho produzido e da eficiência para dois motores de tipos diferentes, operando exatamente nas mesmas condições de temperatura, campo magnético e fator de demagnetização. Os resultados dessa comparação indicam que os motores tipo Tesla são mais interessantes do ponto de vista termodinâmico que os motores tipo Edison. Devido a isso, a partir desse ponto, os estudos seguintes concentraram-se apenas nos motores do tipo Tesla.

No Capítulo 5 é apresentada e validada uma metodologia para o cálculo do trabalho produzido em um motor termomagnético do tipo Tesla, utilizando a equação que corretamente descreve o comportamento da força magnética mostrada no Capítulo 3. O método de cálculo foi descrito e validado utilizando uma bancada experimental que também é descrita no capítulo. São apresentadas as vantagens e desvantagens desse método quando comparado com a abordagem pela análise por ciclo termodinâmico.

No Capítulo 6 são aplicados os métodos analíticos a fim de verificar a influência da temperatura, campo magnético, fator de demagnetização, tipo de

transição e histerese térmica no comportamento do trabalho e da eficiência de um motor termomagnético do tipo Tesla. A partir das conclusões dessa análise, é proposto um motor que leva em consideração a influência de cada um dos parâmetros estudados, buscando operar na melhor condição para uma aplicação real.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho, elencando suas principais contribuições científicas e sugerindo trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É apresentada neste capítulo uma revisão bibliográfica, sendo mostrados os primeiros trabalhos envolvendo os motores termomagnéticos. Em seguida são apresentados trabalhos que buscaram descrever esses sistemas através de abordagens termodinâmicas e modelos matemáticos. Também são descritos e analisados diversos trabalhos abordando protótipos de motores termomagnéticos já construídos e testados. Este capítulo ainda inclui uma análise sobre o estado do conhecimento envolvendo motores termomagnéticos, além da apresentação de uma visão geral dos dispositivos baseada nos trabalhos apresentados, sendo apontadas características de operação, vantagens, desvantagens e sugestões de aplicações dos dispositivos estudados.

2.1. Início da tecnologia

Não se sabe ao certo quem foi o primeiro a observar o efeito termomagnético. Em 1833 Michael Faraday já estudava a relação entre a força magnética de atração entre um ímã e alguns metais a diferentes temperaturas, afirmando que era fato conhecido que com o incremento da temperatura a força magnética diminuía [42].

O primeiro motor termomagnético foi sugerido em 1879 pelos professores Elihu Thomson e Edwin Houston [43], [44]. O motor foi idealizado durante a investigação dos autores sobre a relação do campo coercitivo do aço e sua temperatura. Os mesmos afirmaram que a máquina não produziria valores práticos de eficiência para aplicação, pois a força magnética que gera o trabalho seria muito pequena quando comparada com a quantidade de calor necessária para aquecer o

material. Contudo, eles julgaram o sistema suficientemente curioso do ponto de vista científico para ser descrito [43].

O motor proposto pelos professores é mostrado na Figura 15, onde “D” é um fino disco de aço, que fecha o circuito magnético junto ao ímã “M”. Se a região “H” do disco de aço for suficientemente aquecida, o disco irá se mover na direção da seta. Mantendo-se a fonte de aquecimento na região “H” e resfriando o disco na região “C”, uma rotação contínua será desenvolvida no sentido da seta.

Figura 15 - Primeiro esquema proposto para um motor termomagnético.

Fonte: Artigo de Thomson & Houston [43]

Ao contrário de Thomson e Houston, Thomas Edison acreditava fortemente na utilização do efeito termomagnético para conversão de calor em energia mecânica e elétrica [24]. Em 1887 seu gerador termomagnético foi capa da *Scientific American* [23], onde ele afirma ter construído um pequeno protótipo que produziu 15 watts de potência. Ainda no mesmo texto é dito que um segundo gerador, com aproximadamente 680 kg, já estava construído e deveria produzir 2240 watts, porém não foi encontrada outra publicação que tratasse dessa máquina. Nesse trabalho, Edison identificou que a troca de calor deveria ser intensificada para aumentar a

potência da máquina, assim, sugeriu a utilização de tubos corrugados para aumentar a transferência de calor e melhorar a eficiência e potência de suas máquinas.

Ainda em 1887, Carl Hering apresenta um trabalho de revisão intitulado “Motores e Geradores de Eletricidade Piro-Magnéticos”, apontando as publicações de Edison, Thomson e Houston, e outro motor proposto por Chas K. McGee em 1884 [44]. Em março de 1888 Edison patenteia seu motor piromagnético [20], que é seguida pelas patentes de Tesla: o motor termomagnético, depositada em 1889 [21] e o gerador elétrico piromagnético, depositada em 1890 [45].

Com o início do século XX tem-se a primeira observação experimental do efeito magnetocalórico (mudança da temperatura devido à aplicação de campo magnético durante um processo adiabático) ao redor do T_C no níquel, feita por Weiss & Piccard em 1917 [15], fenômeno importante presente nos motores termomagnéticos, como discutido no capítulo de introdução.

Durante a primeira metade do século XX, poucos trabalhos abordando os dispositivos termomagnéticos para conversão de energia foram publicados. Destacando-se entre esses poucos trabalhos, a patente de um gerador sem partes móveis, feita por Schwarzkopf em 1935 [46], e o desenvolvimento de equações para estimar o desempenho dessas máquinas feito por Brillouin & Iskenderian em 1948 [47].

Apesar do esforço e investimento feito por Thomas Edison, os motores termomagnéticos não aparentavam ser viáveis. Os materiais termomagnéticos conhecidos na época apresentavam altos T_C 's (por volta de 633 K para o níquel, 1043 K para o ferro e 1403 K para o cobalto), o que inviabilizava a aplicação dos dispositivos termomagnéticos devido à oxidação acelerada do material e degradação dos ímãs permanentes submetidos a altas temperaturas [26]. A baixa eficiência

provocada pelo grande montante de calor necessário para aquecer os materiais acima de T_C 's tão altos também não tornava os dispositivos atraentes.

A descoberta e caracterização da transição magnética do gadolínio, com T_C por volta de 293 K [26], [48], eliminou grande parte das dificuldades térmicas na aplicação do efeito termomagnético na conversão de energia. Com a possibilidade de trabalhar próximo à temperatura ambiente, houve uma retomada nos estudos dos dispositivos termomagnéticos. Uma série de estudos e protótipos foi desenvolvida desde então.

Os trabalhos abordando motores termomagnéticos apresentam uma distância muito grande entre os trabalhos experimentais e os que buscam modelar e descrever o comportamento desses dispositivos. Os estudos teóricos e modelos desenvolvidos são raramente validados ou comparados com resultados experimentais. Enquanto os trabalhos experimentais não fazem uso da teoria e dos modelos para desenvolver e testar os dispositivos nas condições ótimas de operação. Sendo assim, a partir desse momento os trabalhos apresentados nesse capítulo serão separados em dois grupos: os contendo os estudos teóricos, que utilizam de abordagens termodinâmicas e modelos para o cálculo dos parâmetros de interesse, e os contendo estudos experimentais, onde motores termomagnéticos foram construídos e testados.

2.2. Estudos teóricos

Em 1948, Brillouin & Iskenderian [47] propõem a utilização de abordagens termodinâmicas para estimar a eficiência e o trabalho de geradores sem partes móveis. Eles consideram que esses dispositivos operam idealmente segundo um

ciclo de Carnot, tendo dois processos adiabáticos e dois processos isotérmicos, desprezando a influência do efeito magnetocalórico.

Em 1959, Elliott [26] aplica as equações propostas por Brillouin & Iskenderian [47] para um gerador sem partes móveis usando gadolínio como material termomagnético. Para prover o campo magnético, Elliot considerou o uso de ímãs permanentes de Alnico XII (liga de ferro, alumínio, níquel e cobalto), ímãs permanentes que ofereciam os maiores campos na época. Considerando uma variação de 3 K para o material termomagnético nas vizinhanças de seu T_C , com a fonte fria em uma temperatura de 277 K e a fonte quente a temperatura de 300 K, encontrou-se uma eficiência energética (η) de 0,57%, eficiência relativa à eficiência de Carnot (η_{rel}) de 7,43% e potência produzida de 6,9 W para cada quilograma de gadolínio [26].

Brailsford [8] publicou um estudo propondo uma teoria para calcular trabalho e eficiência energética em um motor termomagnético que operava conforme um motor do tipo Edison em 1964. O estudo consistiu na análise de um ciclo termomagnético desenvolvido dentro de um diagrama $M - H$. Como condições de contorno, o autor adotou que a máxima temperatura atingida pelo material era igual ao seu T_C , e que metade da roda encontrava-se nessa temperatura. Considerou-se ainda que a outra metade da roda encontrava-se na temperatura mínima, não havendo temperaturas intermediárias.

Aplicando sua teoria ao aço, com T_C de 1043 K, para um H de $5,6 \times 10^5$ A/m (aproximadamente 0,7 T) e uma razão de temperatura mínima sobre temperatura máxima de 0,6, Brailsford [8] estimou um η de 0,05%, resultando em um η_{rel} de 0,125%. Para a mesma razão de temperaturas e um campo aplicado de $2,7 \times 10^5$ A/m (aproximadamente 0,34 T) em materiais com T_C 's próximos ao zero absoluto, como

o hólmio e o érbio ($T_C = 20$ K e 32 K, respectivamente), o η calculado é de 9,5% o que resulta em um η_{rel} de 23,75%.

O autor observou que a eficiência se aproximava da eficiência de Carnot para regiões da vizinhança de T_C , sendo a máxima eficiência energética possível para todos os casos testados por Brailsford de 27,6% [8]. Contudo, pode-se destacar que as condições de contorno adotadas por Brailsford são questionáveis, principalmente no referente à distribuição de temperatura no material termomagnético. Por outro lado, sua observação quanto à eficiência energética se aproximar da de Carnot para regiões na vizinhança do T_C foi posteriormente apontada por outros autores [4], especialmente para campos mais elevados dos que os testados por Brailsford.

Em 1978 Steyert [49] propõe que os motores termomagnéticos funcionam em um ciclo reverso ao ciclo de um refrigerador magnetocalórico. Em seus cálculos considera um motor do tipo Edison com um rotor poroso feito de gadolínio ($T_C = 293$ K) e campo magnético de 7 T, gerado por bobina supercondutora. Foram calculados valores de η_{rel} muito altos para um grande intervalo de temperaturas. Contudo, o autor não leva em conta a energia gasta para refrigerar as bobinas supercondutoras do eletroímã, e nem a energia gasta no bombeamento dos fluídos de aquecimento e arrefecimento através do material poroso, o que implicaria em uma grande perda de carga hidráulica e, conseqüentemente, uma alta potência de bombeamento.

Thomas Edison [23], [24] já sugeria que a utilização de regeneradores térmicos deveria aumentar consideravelmente a eficiência dos motores termomagnéticos. Contudo, a utilização de regeneradores térmicos em motores termomagnéticos foi investigada somente quase 100 anos depois. Em 1984, Kirol & Mills [25] são os primeiros a estudar o uso de regeneradores térmicos na conversão de energia utilizando o efeito termomagnético. Os autores apresentaram um estudo

numérico sobre geradores sem partes móveis, onde durante o resfriamento do material termomagnético parte do calor excedente recebido durante o processo de aquecimento retornava para a fonte quente por meio de regeneração. Foi calculado um η_{rel} de 47% quando utilizado gadolínio como material termomagnético, mesmo para um gradiente de temperaturas de 50 K (considerado elevado para esse tipo de aplicação) e um campo aplicado de 400 kA/m (aproximadamente 0,5 T).

Apesar do ótimo resultado, o regenerador proposto por Kirol & Mills [25] é idealizado e impossível de se executar, mas demonstra a importância da aplicação de regeneradores nas máquinas termomagnéticas para maximização da eficiência. A contribuição dos regeneradores se deve ao fato de que a energia térmica é dominada pelo calor específico associado às vibrações da rede cristalina, sendo assim, a maior parte do calor é utilizada para aquecer o material e depois é rejeitada para a fonte fria. Com a aplicação dos regeneradores é possível aproveitar parte do calor que seria rejeitado na fonte fria para aquecer o material termomagnético no próximo ciclo do dispositivo.

Em 1989, Solomon [9] é o primeiro a apresentar um estudo teórico da aplicação de regeneradores em motores termomagnéticos. No estudo são propostos dois motores, um do tipo Tesla, chamado pelo autor de motor termomagnético alternativo, e outro do tipo Edison, chamado pelo autor de motor termomagnético rotativo. Em ambos os motores foi considerado o uso de bobinas supercondutoras para prover o campo magnético. O ciclo de operação para ambos os motores são iguais segundo a descrição do artigo [9].

Os regeneradores propostos são colunas de fluídos que durante o resfriamento do material termomagnético tomam parte do calor para si. Esse calor é devolvido ao material no ciclo de operação seguinte, diminuindo assim o calor

requerido da fonte quente durante o processo de aquecimento do material magnético. Em 1991 Solomon [50] expande os modelos aplicados no estudo para utilização em geradores termomagnéticos sem partes móveis. Os resultados apresentados apontam eficiências relativas à eficiência de Carnot bem elevadas, contudo, para os cálculos, Solomon [9] desprezou a contribuição do efeito magnetocalórico.

Em 2009 Egolf *et al.* [4] verificam a eficiência da aplicação da conversão de energia pelo efeito termomagnético por meio de abordagem de ciclos termodinâmicos. O estudo considerou motores do tipo Edison, onde os rotores de material magnético seriam porosos, com a troca de calor sendo feita por escoamento de fluido através desses poros. Foi considerado que os motores termomagnéticos operariam em cascata, com materiais termomagnéticos com diferentes T_C 's, cobrindo todo o intervalo de temperaturas entre a fonte quente e a fonte fria. Considerou-se também que cada motor operava segundo um ciclo Brayton magnético.

No estudo, gadolínio foi adotado como material de referência. Para calcular as propriedades dos diferentes materiais, com diferentes T_C 's, que compunham os rotores, considerou-se o gadolínio como um gás ideal, e, a partir do T_C desejado, determinou-se as demais propriedades dos materiais. A aproximação de gás ideal é justificada pela analogia usualmente feita entre a refrigeração magnetocalórica e a refrigeração tradicional, descrita na introdução deste texto.

A Figura 16 mostra os valores η_{rel} em função da temperatura da fonte quente e do campo magnético aplicado calculados por Egolf *et al.* [4]. Foram considerados motores em cascatas com as propriedades dos materiais sendo calculadas a partir das propriedades do gadolínio. Foi considerada uma velocidade de rotação de

300 RPM. A temperatura da fonte fria foi considerada igual à temperatura ambiente, 298 K para o estudo.

Figura 16 - η_{rel} calculada para diferentes temperaturas de fonte quente e fonte fria de 298 K.

Velocidade considerada 300 RPM.

Fonte: Reproduzido do artigo de Egolf *et al.* [4].

Em uma segunda publicação, Egolf *et al.* [5] verificaram a viabilidade da aplicação dos motores termomagnéticos do tipo Edison no aproveitamento de rejeitos térmicos industriais. Para isso, os autores compararam os resultados mostrados na Figura 16 para conversão termomagnética com outras tecnologias de conversão de calor em trabalho. Os resultados obtidos pelos autores, expostos na Figura 17, mostram a vantagem da utilização de dispositivos termomagnéticos para conversão de calor, quando comparados com outras tecnologias.

Contudo, as hipóteses adotadas por Egolf *et al.* em [4] são extremamente otimistas e questionáveis, uma vez que não foram encontrados na literatura relatos

de motores do tipo Edison operando em velocidades tão elevadas (300 RPM). Bem como a validade questionável da analogia entre gadolínio e um gás ideal.

Figura 17 - Comparação do η_{rel} para diversos dispositivos de conversão de calor em trabalho considerando a temperatura da fonte fria de 298 K (temperatura ambiente).

Fonte: Dados retirados do artigo de Egolf *et al.* [5].

A principal contribuição dos trabalhos de Egolf *et al.* [4], [5] foi a verificação dos ganhos na utilização de motores em cascata ou utilizando rotores compostos por multicamadas de materiais com T_C 's diferentes. A utilização de dispositivos termomagnéticos para conversão de calor em trabalho em configuração de cascata já havia sido proposta anteriormente [47], contudo Egolf *et al.* [4], [5] foram os primeiros a quantificar essa contribuição.

A utilização de motores em cascata possibilita a aplicação dessa tecnologia para gradientes de temperaturas maiores, sem comprometer sua eficiência. Segundo Kitanovski *et al.* [51], para ligas à base de lantânio ou manganês, considerando fontes quentes por volta de 160 °C, e fonte fria à temperatura

ambiente, seriam necessárias de 20 a 25 camadas de materiais para compor o rotor do motor e manter sua eficiência elevada.

Em 2010 Trapanese [52] descreveu uma correlação entre os parâmetros elétricos de um motor elétrico de corrente contínua e os fenômenos físicos em um motor termomagnético do tipo Edison. Uma validação experimental para as equações propostas pelo autor foi apresentada no ano seguinte [53], utilizando como valores experimentais os dados publicados por Palmy [54], que construiu um motor termomagnético onde o rotor era um ímã permanente que levitava entre dois discos de bismuto. Esse tipo de motor ficou conhecido posteriormente como roda de Palmy [4].

Nos anos seguintes Trapanese *et al.* [55], [56] aplicam a teoria desenvolvida em um motor muito semelhante ao proposto por Edison (em sua patente [20]), porém usando gadolínio como material magnético no rotor. Os autores comprovam a existência de uma forte relação entre o fluxo de calor e o torque do motor, bem como a relação entre a diferença de temperaturas da fonte fria e fonte quente e a velocidade de rotação. Sendo que, quanto maior o fluxo de calor que passa pelo rotor, maior é o torque desenvolvido no eixo da máquina. Porém existe um ponto de saturação, onde o aumento do fluxo de calor não implica no aumento do torque.

A grande limitação da correlação utilizando a teoria dq axial feita por Trapanese [52] é que o conjunto de equações utilizadas nessa abordagem apresenta uma série de variáveis que só podem ser definidas empiricamente após o ensaio do motor, sendo assim, é muito difícil utilizá-la para auxiliar no projeto e desenvolvimento desses dispositivos.

Em 2011 Hsu *et al.* [57] apresentam um método para cálculo da performance de motores termomagnéticos do tipo Tesla. O conjunto de equações desenvolvidas

desprezam a contribuição do efeito magnetocalórico e da influência do campo magnético no calor específico do material. Em 2013 Post *et al.* [37] apresentam um estudo teórico baseado nas equações propostas por Hsu *et al.* [57], utilizando-se de abordagens analíticas e simulações computacionais, comparando a utilização de materiais de primeira ordem e segunda ordem em motores termomagnéticos do tipo Tesla e geradores sem partes móveis.

No estudo de Post *et al.* [37] para o motor do tipo Tesla, quando considerado que a temperatura da fonte quente era igual ao T_C do material magnético, a temperatura da fonte fria era 5 K menor que a da fonte quente, e um campo magnético aplicado de 0,3 T, obteve-se um η_{rel} de 11,4% para o material de segunda ordem e 15,9 % para o material de primeira ordem, mostrando uma melhoria na eficiência com a utilização da transição de primeira ordem.

Ao se elevar o campo magnético aplicado para 1,5 T calculou-se um η_{rel} de 63,8 % para o material de primeira ordem, contra apenas 20 % para o material de segunda ordem. Isso indica uma grande vantagem na aplicação de materiais de primeira ordem nos sistemas termomagnéticos de conversão de energia, principalmente em condições de operação com campos magnéticos mais elevados.

No Brasil, um grupo da Universidade Estadual de Maringá apresentou uma série de estudos abordando o desenvolvimento de modelos numéricos para simulação computacional aplicada ao projeto de motores termomagnéticos [58]–[60]. Alves *et al.* [58], [59] apresentaram dois estudos, via simulação, para motores termomagnéticos do tipo Edison, fazendo uso direto da radiação solar sobre o rotor. Posteriormente o grupo apresentou um modelo numérico para o estudo via simulação computacional de um motor tipo Tesla vertical [60], onde a gravidade exerceria a função da mola na patente de Tesla [21].

De forma geral conclui-se que existem divergências quanto ao ciclo termodinâmico desenvolvido pelos motores termomagnéticos apresentados nos diferentes trabalhos, contudo a maior parte dos trabalhos recentes afirma que estes descrevem um ciclo Brayton magnético. Não foram feitas distinções quanto ao ciclo de operação para um motor tipo Edison e um motor Tipo Tesla. Os modelos analíticos e numéricos presentes na literatura raramente foram validados experimentalmente, e muitas vezes desprezam a contribuição do efeito magnetocalórico.

Com o intuito de verificar os sistemas já construídos e testados, são mostrados agora os trabalhos envolvendo protótipos de motores termomagnéticos construídos e ensaiados.

2.3. Estudos experimentais

Em 1972, Murakami & Nemoto [61] apresentam o primeiro estudo experimental de motores termomagnéticos usando materiais com T_C mais próximos da temperatura ambiente. O motor era constituído de um rotor e um estator. Para o rotor, tinha-se um aro de resina acrílica com o diâmetro de meio metro, ao longo do comprimento da circunferência deste aro foram presas 65 pastilhas de material termomagnético com T_C igual a 323 K e dimensões de $2 \times 4,5 \times 20 \text{ mm}^3$.

Por conveniência, o estator se tratava de um eletroímã que provia o campo magnético à máquina, assim o campo aplicado pôde ser facilmente ajustado através da diferença de potencial aplicada nos terminais da bobina do eletroímã. O conjunto ainda possuía um sistema para aplicação de carga no eixo do motor e um reservatório de óleo de silicone aquecido para ser usado como fonte quente. O

arrefecimento das pastilhas foi feito ao ar a temperatura ambiente. A Figura 18 mostra o motor de Murakami e Nemoto.

Figura 18 - Motor termomagnético de Murakami e Nemoto.

Fonte: Obtido do artigo de Murakami & Nemoto [61].

Para verificar a temperatura nas pastilhas termomagnéticas foram utilizados termopares fixados a essas em um passo de 90° ao longo da circunferência do rotor. O controle de rotação foi feito adicionando-se ou removendo-se peso no sistema de aplicação de carga no eixo. As curvas de potência e η em função da rotação podem ser vistas na Figura 19.

Os autores informaram que a razão das temperaturas da fonte fria e fonte quente em $^\circ\text{C}$ utilizada era de 0,1. A fonte fria utilizada foi o ar a temperatura ambiente, considerando essa igual a 25°C (298 K) tem-se que a fonte quente estava a 250°C (523 K). A eficiência de Carnot (η_c) para as fontes é de 43 %, valor quase 1.800 mil vezes superior à eficiência máxima obtida no experimento. Tal diferença é

explicada pelo grande ΔT apresentado entre as fontes de calor, não estando esses na vizinhança da temperatura de transição do material termomagnético.

Figura 19 - Curvas características do motor termomagnético de Murakami e Nemoto.

Fonte: Dados utilizados na construção das curvas retirados do artigo de Murakami & Nemoto [61].

Devido à baixa eficiência energética apresentada no sistema, os autores indicam que não haveria aplicabilidade do efeito termomagnético para conversão de calor em trabalho mecânico, sugerindo a utilização desses motores como atuadores para controle de posição. Contudo, o sistema operou em condições de temperatura desfavoráveis para aplicação de motores termomagnéticos, que têm como uma de suas características altos η_{rel} para pequenas diferenças de temperaturas ao redor de T_C . O intervalo de temperaturas utilizado no estudo foi muito grande e distante da temperatura de transição magnética do material aplicado.

O fato de Murakami & Nemoto [61] testarem o motor em uma condição tão desfavorável é consequência da já citada distância entre os trabalhos experimentais e teóricos envolvendo motores termomagnéticos. O trabalho teórico publicado por

Brailsford [8] 8 anos antes já mostrava que esses sistemas apresentariam alta eficiência relativa à eficiência de Carnot apenas para temperaturas de operação ao redor do T_C . Murakami & Nemoto [61] testaram o sistema apenas para diferenças de temperaturas muito elevadas, contrariando o apontado por Brailsford [8].

É claro que o acesso a outros trabalhos em 1972 era muito mais complicado do que nos dias atuais, contudo, ainda é possível encontrar trabalhos recentes testando motores termomagnéticos em condições desfavoráveis ao desempenho.

O campo magnético é uma variável fundamental para o funcionamento dos motores termomagnéticos. No início da década de oitenta, Halbach [62] propôs um arranjo de ímãs permanentes capaz de concentrar o campo magnético em uma região de interesse, possibilitando assim a aplicação de ímãs permanentes para obtenção de campos magnéticos mais elevados.

No mesmo período são criados os ímãs de NdFeB capazes de prover campos magnéticos bem mais elevados dos que os ímãs permanentes que se tinham até então [63]. Combinando os ímãs de NdFeB e arranjos inspirados nos propostos por Halbach, já foram obtidos experimentalmente campos magnéticos superiores a 1,9 T para entreferros de 20 mm, isso sem a necessidade de construção de ímãs com geometrias especiais [64].

Utilizando ímãs construídos com geometrias especiais, Kumada *et al.* [65] desenvolveram e construíram um arranjo de ímãs capaz de alcançar experimentalmente campos de até 3,9 T para um entreferro de 3 mm. Os autores afirmaram que conseguiriam atingir o mesmo nível de campo magnético para um entreferro de 30 mm se o diâmetro do arranjo montado fosse alterado de 100 mm para 1.000 mm.

Com a possibilidade de operar em campos magnéticos tão elevados utilizando-se ímãs permanentes, a aplicação de eletroímãs e ímãs supercondutores em motores termomagnéticos deixou de ter sentido. Apesar disso, não foi encontrado um único trabalho onde o foco fosse o desenvolvimento de arranjos de ímãs e circuitos magnéticos voltados para aplicação em motores termomagnéticos.

Em 1998, Andreevsk *et al.* [36] construíram e testaram um motor termomagnético do tipo Edison, verificando a influência do aumento de número de polos no estator do motor. Foi utilizado gadolínio como material magnético no rotor do sistema. O estator permitia duas montagens. A primeira com: 1 entrada de calor , 2 saídas de calor e um par de ímãs. A segunda com 2 entradas de calor, 2 saídas de calor e 2 pares de ímãs, conforme mostrado na representação da Figura 20a. A temperatura da fonte quente por volta de 340 K e de fonte fria por volta de 288 K. O campo provido ao motor estava situado entre 1,5 e 2 T na região de interesse.

As curvas de potência em função do torque aplicado no eixo do motor são mostradas na Figura 20b, onde é possível observar uma mudança significativa do comportamento da máquina com a mudança do número de polos. Com a adição de mais um polo, uma quantidade maior de calor é disponibilizada para a máquina, fazendo com que o trabalho produzido em uma revolução aumente. De maneira que, se os calores injetados (Q_{hot}) nos dois polos forem iguais entre si, e se os calores rejeitados (Q_{cold}) nos dois polos também forem iguais entre si, o trabalho produzido em uma revolução é o dobro do que o produzido quando o sistema é montado com apenas um polo. A aplicação de carga ao eixo do motor foi feita de forma semelhante à mostrada na Figura 18.

Figura 20 – (a) Representação do sistema construído por Andreevsk *et al.*, possibilitando montagem do motor com 1 ou 2 polos. (b) Curvas de potência em função do torque aplicado ao eixo do motor.

Fonte: (a) autoria própria. (b) Calculado a partir de dados do artigo de Andreevsk *et al.* [36].

Em ambas as montagens, para pequenos torques aplicados, a potência aumenta conforme o torque aplicado no eixo aumenta, até atingir um valor máximo. A partir deste momento, o aumento do torque aplicado faz com que a potência diminua. Isso pode ser explicado observando o comportamento da velocidade angular do motor, mostrado na Figura 21. Com a aplicação do torque, a velocidade angular começa a diminuir, com isso a diferença entre a temperatura máxima e mínima atingida no material aumenta e, por consequência, o trabalho realizado pelo material termomagnético em um ciclo também aumenta. Essa característica será mais uma vez abordada no Item 4.1 deste texto.

A redução da potência com o aumento do torque após o ponto de potência máxima pode ser explicada por algumas análises que serão mostrados no item 6.1 desse texto. Conclui-se que existe uma saturação do trabalho produzido pelo material com o aumento da diferença de temperaturas. Ao se aproximar dessa saturação de trabalho, a redução de velocidade se torna mais significativa do que a

contribuição do aumento da diferença de temperaturas, assim a potência começa a reduzir.

Figura 21 - Velocidade angular em função do torque aplicado ao eixo do motor.

Fonte: Calculado a partir dos dados de Andreevsk *et al.* [36]

Os motores ensaiados por Andreevsk *et al.* [36] e Murakami & Nemoto [61] possuem arquitetura próxima, contudo os resultados obtidos por Andreevsk *et al.* mostram um salto na potência obtida, mesmo utilizando-se uma diferença de temperaturas entre as fontes quente e fria muito menor. Isso se deve ao fato do sistema de Andreevsk *et al.* ter operado com campos magnéticos mais elevados, utilizar escoamento de água na fonte fria ao invés de resfriamento pelo ar do ambiente, e diferenças nas propriedades termomagnéticas e de transporte dos materiais utilizados no rotor.

Quanto à contribuição na potência provocada pelo aumento do número de polos, Andreevsk *et al.* [36] não se aprofunda na explicação. Contudo, ao se olhar para o sistema visualizando o ciclo termodinâmico, tem-se que com um único polo, o motor desenvolve um ciclo termodinâmico completo por rotação. Ao se adicionar um segundo polo tem-se que dois ciclos termodinâmicos serão completados por rotação, aumentando o trabalho produzido por volta dada no rotor.

Entre 2003 e 2006, Takahashi *et al.* [7], [66]–[68] publicaram uma série de estudos experimentais do desenvolvimento de um motor termomagnético do tipo Edison, usando como material magnético o composto $\text{Fe}_{54}\text{Ni}_{36}\text{Cr}_{10}$ com T_C de 373 K. Assim foi possível verificar as influências de cada uma das melhorias implementadas no sistema, detectando e solucionando problemas encontrados.

A primeira versão do motor (Figura 22a) consistia em um rotor de material magnético em forma de casca de cilindro preso a um eixo, o estator era um circuito magnético feito de ímãs permanentes. Para aquecer o sistema foi utilizado um fluxo de água a 363 K e o resfriamento foi feito por uma corrente de ar a 291 K. A máxima potência foi obtida em uma rotação de 24 RPM, sendo ela igual a 0,3 W [67].

Para melhorar o desempenho de potência do sistema, foram incluídos mais dois polos no motor, como mostrado na Figura 22b. Dessa vez foi utilizado como fluido de trabalho água no aquecimento e resfriamento, onde a temperatura da fonte fria foi de 284 K e a da fonte quente de 368 K. A máxima potência obtida também ocorreu a 24 RPM, sendo ela igual a 3,7 W, 12 vezes maior que na primeira versão do conjunto. Esse aumento de potência pode ser justificado por dois fatos: o aumento do número de polos do motor e a troca do fluido de trabalho no resfriamento [68].

O aumento de polos do motor fez com que um torque maior fosse aplicado ao eixo da máquina. A troca do fluido de trabalho no resfriamento fez com que um gradiente de temperaturas maior fosse aplicado ao rotor. Para o primeiro caso, a diferença entre a temperatura máxima e mínima atingida pelo material magnético, para uma rotação de 24 RPM, foi de 10 K [67], enquanto para o segundo caso, na mesma rotação, a diferença de temperaturas foi de 43 K [68]. Conclui-se então que, no segundo caso, o motor operou em condições bem mais favoráveis,

experimentando um gradiente de temperaturas maior no rotor, e por consequência, um maior gradiente de magnetização.

Takahashi *et al.* [7] identificaram que a maior parte das perdas no sistema se dava pela frenagem devido à correntes parasitas induzidas no rotor. Para minimizar esse efeito, o cilindro do rotor foi substituído por discos espaçados (Figura 22c). Isso fez com que as perdas por correntes parasitas deixassem de ser significativas quando o sistema operava. É válido ressaltar que o mesmo volume de material magnético no rotor e os circuitos magnéticos no estator foram aplicados em ambos os casos.

Na Figura 23a e Figura 23b são mostradas as perdas para o motor com rotor cilíndrico e rotor composto por discos espaçados. A utilização dos discos diminuiu consideravelmente a perda total, devido à diminuição da frenagem causada pelas correntes parasitas. Houve também uma considerável melhoria da potência do motor, que teve seu pico de potência de 6 W. A rotação do pico de potência foi a mesma para todos os casos, 24 RPM.

A Figura 23c mostra as curvas de potência e torque em função da velocidade angular, pode-se observar que o formato das curvas é semelhante aos calculados nesse texto para o trabalho de Andreevsk *et al.* [36] (Figura 21). Através de simulações, Takahashi *et al.* [7] afirmam que, com a utilização de 68 discos no rotor, uma potência de 100 W poderia ser alcançada no eixo da máquina.

Figura 22 - Motores termomagnéticos de Takahashi *et al.* (a) Motor de um polo com rotor cilíndrico. (b) Motor com três polos e rotor cilíndrico. (c) Motor com três polos e rotor composto por discos espaçados.

Fonte: Adaptado dos artigos de Takahashi *et al.* (a) [67]. (b) [68]. (c) [7].

Figura 23 - (a) Perdas no motor com três polos e rotor cilíndrico. (b) Perdas no motor com três polos e rotor composto por discos espaçados. (c) Potência e torque em função da velocidade angular nos motores de três polos de Takahashi *et al.*

Fonte: Adaptado do artigo de Takahashi *et al.* [7].

Em nenhum dos trabalhos dos autores foram apresentados dados referentes à eficiência. Contudo, foi fornecido o gradiente de temperaturas no rotor de material magnético para a rotação de 24 RPM. O calor específico de um material termomagnético varia com a temperatura e com o campo aplicado, contudo foi fornecido apenas um valor constante no artigo de Takahashi *et al* [7]. Considerando esse calor específico constante, a densidade do material utilizado no rotor e o gradiente de temperaturas medido, foi possível ter uma ideia do fluxo de calor entre a fonte quente e o material magnético. Com isso foi possível estimar um η de 0,24% para o motor com três polos e rotor cilíndrico. Considerando a diferença de temperaturas entre a fonte quente e a fonte fria, tem-se um η_{rel} de 1,05% para esse sistema.

Não foram apresentados valores de temperaturas para o motor com o rotor composto de discos espaçados, entretanto pode-se assumir que o gradiente de temperaturas para esse rotor é semelhante ao do rotor cilíndrico, já que ambos possuem mesma massa e praticamente a mesma área de transferência de calor. Fazendo essas considerações, para velocidade angular de 24 RPM, obteve-se um valor de η 61,7% maior para o rotor composto por discos espaçados do que no rotor cilíndrico. Essa comparação reforça a importância de garantir que no projeto de motores termomagnéticos sejam consideradas as perdas por correntes parasitas.

É importante destacar que nos trabalhos de Takahashi *et al*. [7], [67], [68], o material magnético operou sempre no estado ferromagnético, com a temperatura da fonte quente utilizada nos ensaios sendo sempre menor que o T_C do material utilizado, aproveitando-se da variação da magnetização com a temperatura antes da transição. No item 6.1.1 será mostrado que operar em condições que não garantam

a transição entre os estados ferromagnético e paramagnético compromete a relação entre trabalho produzido e eficiência nos motores termomagnéticos.

Em 2007, Ujihara *et al.* [69] propõem a utilização do efeito termomagnético para geração de energia elétrica para alimentação de sistemas baixa potência. Para isso, os autores construíram um pequeno motor do tipo Tesla, conforme ilustrado na Figura 24, onde o gadolínio é atraído para um ímã à temperatura mais elevada e depois empurrado contra uma fonte fria por uma mola. Até onde foi possível pesquisar, esse foi o primeiro motor termomagnético do tipo Tesla que foi formalmente testado e analisado para aplicação. Antes disso houveram alguns sistemas construídos, mas nenhuma medida de parâmetros de operação foram reportadas [70].

Figura 24 - Motor termomagnético do tipo Tesla para aplicação em *energy harvesting*.

Fonte: adaptado do artigo de Ujihara *et al.* [69]

Os autores testaram o sistema para diferentes distâncias entre as fontes fria e quente, mudando o comprimento do espaçador (Figura 24). Foi observado que a frequência de operação do sistema é fortemente relacionada à distância de deslocamento do material termomagnético. Isso ocorre, pois quanto maior é essa distância, maior será o gradiente de campo magnético aplicado no conjunto. Isso

muda o comportamento da força magnética aplicada ao material magnético, mudando a força resultante que atua no conjunto. De modo que, para maiores distâncias, é necessário aquecer/resfriar mais o gadolínio.

Visto que essa influência da distância entre fonte quente e fonte fria muda fortemente o comportamento dos motores tipo Tesla, esse mesmo tipo de comportamento será demonstrado no item 5.2 desse texto, fazendo uso de um método desenvolvido neste trabalho.

Os autores reportam que conseguiram operar o motor com uma diferença mínima de temperaturas entre a fonte quente e fonte fria de até 10 K. Para extrair a energia do sistema, foi proposta a utilização do efeito piezoelétrico, convertendo a energia mecânica gerada em energia elétrica através de um elemento piezoelétrico associado à mola. Considerando a eficiência de conversão do elemento piezoelétrico, os autores calcularam densidades energéticas equivalentes a sistemas comerciais termoelétricos baseados no efeito Seebeck [69].

Em 2015, Coray *et al.* [71] apresentam no encontro “*Delft Days on Magneto Calorics*” um resumo de um trabalho abordando um motor termomagnético do tipo Edison, desenvolvido pela empresa “SWISS BLUE ENERGY AG”. Os autores afirmam que o dispositivo é capaz de produzir até 1 kW de energia mecânica, operar entre zero e 150 RPM, e aplicar um torque de até 200 Nm, operando com fonte quente a temperatura menor que 353 K. Ainda em 2015, a empresa responsável pelo desenvolvimento da máquina apresenta um relatório à agência de fomento suíça que financiou a pesquisa [72]. Apesar dos bons resultados conseguidos, não foram feitas outras publicações divulgando os resultados obtidos com o sistema.

Nos últimos anos, diversas publicações abordando aplicações de conversão de calor utilizando motores termomagnéticos para geração de energia elétrica, em

aplicações de baixíssima potência (como a alimentação de sensores sem fio), foram divulgadas [73]–[77]. Esses dispositivos são motores termomagnéticos do tipo Tesla, dotados de um sistema de conversão de energia mecânica em elétrica, como elementos piezoelétricos (Figura 25) ou uma bobina se deslocando em um campo magnético (Figura 26).

Figura 25 – Motor termomagnético do tipo Tesla utilizando elemento piezoelétrico para conversão de energia mecânica em elétrica. (a) Foto do dispositivo. (b) Vista esquemática.

Fonte: Adaptado do artigo de Chen *et al.* [74].

Figura 26 - Motor termomagnético do tipo Tesla utilizando bobina para conversão de energia mecânica em elétrica. (a) Detalhe do dispositivo. (b) Esquema de funcionamento.

Fonte: Adaptado do artigo de Guelting *et al.* [76].

No Brasil foram desenvolvidos alguns estudos sobre motores termomagnéticos, em sua grande maioria considerando o uso de energia solar como fonte de calor. Ferreira *et al.* [6] fizeram o uso de coletores solares planos para aquecer água e utilizá-la como fonte quente em um motor de movimento alternativo do tipo Tesla, apresentando os resultados de potência e eficiência obtidos no sistema. O grupo publicou outros dois trabalhos contendo resultados experimentais e simulados, buscando melhorar a transferência de calor no motor e, por consequência, aumentar a sua frequência de operação e potência [78], [79].

Quanto aos estudos experimentais, conclui-se que poucos dispositivos foram construídos e testados, sendo que boa parte deles não se apoiou nas conclusões apontadas pelos trabalhos teóricos. Apenas recentemente os motores do tipo Tesla começaram a ser estudados de forma experimental, em sua grande maioria para aplicação da conversão de calor em elétrica visando a alimentação de sensores sem fio.

Agora que tanto os trabalhos utilizando abordagens teóricas quanto os que apresentam resultados experimentais foram discutidos, serão apontadas algumas conclusões sobre os estudos envolvendo motores termomagnéticos, buscando-se identificar o que ainda falta ser estudado para os dispositivos.

2.4. O que falta estudar?

Apesar de terem sido idealizados no final do século XIX, muitos aspectos do comportamento dos motores termomagnéticos ainda não foram bem descritos. Isso se deve ao fato de uma desconexão entre os trabalhos teóricos e experimentais.

Um forte indicador disso é que até o desenvolvimento desse trabalho não foi possível encontrar na literatura trabalhos experimentais verificando o ciclo termodinâmico desenvolvido pelos motores termomagnéticos, sendo que na literatura diferentes ciclos de funcionamento já foram propostos para esses dispositivos.

Os diferentes tipos de motores, apesar de apresentarem características de funcionamento diferentes, são sempre descritos utilizando ciclos termodinâmicos iguais. Não foi possível encontrar nenhum trabalho, tanto teórico quanto experimental, verificando se o ciclo desenvolvido por um motor tipo Tesla é igual ao desenvolvido por um motor tipo Edison.

As metodologias e modelos descritos na literatura para o cálculo de desempenho dos motores termomagnéticos são raramente validadas experimentalmente. A maior parte dos modelos dedica-se aos motores termomagnéticos do tipo Edison.

Apesar de o campo magnético exercer forte influência nos dispositivos, não foram encontrados estudos buscando desenvolver arranjos e circuitos magnéticos dedicados aos motores termomagnéticos.

O fator de demagnetização e a histerese térmica são variáveis que devem modificar significativamente o comportamento dos motores termomagnéticos, contudo, não foram encontrados na literatura trabalhos verificando a influência dessas variáveis no comportamento dos dispositivos.

Além dos estudos aplicados diretamente ao desenvolvimento dos motores termomagnéticos, ainda podem ser feitos estudos visando o desenvolvimento de materiais para aplicação nesses dispositivos.

A seguir será mostrada uma visão geral dos motores termomagnéticos, mostrando as vantagens, desvantagens e sugestões de aplicação segundo a literatura.

2.5. Visão geral sobre os motores termomagnéticos

Pode-se concluir que os motores termomagnéticos são dispositivos que possuem alto η_{rel} para pequenas diferenças de temperaturas ao redor de T_C . Contudo, a diferença de temperatura pode ser ampliada com a associação de diferentes materiais termomagnéticos sem comprometer a eficiência.

Esses dispositivos podem ser aplicados tanto em situações de baixa requisição de potência, até potências da ordem de kW. Quanto à temperatura de operação, pode funcionar em uma larga faixa, devido à existência de diversos materiais magnéticos, com diferentes T_C 's. Podem ser miniaturizados e são extremamente confiáveis, o que permite serem aplicados em situações onde não é possível reparo ou falha.

A seguir são elencadas as principais vantagens e desvantagens dos motores termomagnéticos, bem como algumas sugestões de aplicação que foram extraídas da revisão bibliográfica.

2.5.1. Vantagens

- Apresentam força/torque elevados, principalmente para diferenças maiores de temperatura.

- Torque e velocidade de rotação podem ser ajustados através da diferença de temperaturas aplicada e do fluxo de calor.
- O sentido de rotação, no caso de motores do tipo Edison, pode ser facilmente alterado, bastando mudar o sentido do fluxo de calor no material termomagnético.
- Podem ser miniaturizados devido à simplicidade construtiva.
- São versáteis quanto às temperaturas de operação, podendo ser aplicados desde sistemas criogênicos (usando como material magnético o érbio, por exemplo) até sistemas de alta temperatura (usando, por exemplo, o cobalto). Bastando apenas selecionar o material pelo T_C de acordo com a temperatura de operação desejada.
- Ao se sacrificar a simplicidade do sistema, pode-se operar com alta eficiência mesmo em condições de grandes intervalos de temperaturas, através do uso de motores em cascata ou rotores compostos por multicamadas de materiais com diferentes T_C 's.
- São robustos.
- Podem ser utilizados como motores de controle de posição, motores de passo ou atuadores.

2.5.2. Desvantagens

- Baixas frequências de operação quando comparado a sistemas convencionais de conversão de energia.

- Alto custo financeiro para aplicações de alta potência, devido à grande quantidade de material magnético e ímãs permanentes necessários. Especialmente quando esses apresentam terras raras em sua composição.
- Dificuldade de obtenção de matéria prima. Não existem aplicações comerciais para boa parte dos materiais termomagnéticos, principalmente os de primeira ordem. Isso faz com que seja necessário desenvolver técnicas para a produção desses materiais em escala industrial.
- Baixa eficiência quando não são utilizados motores em cascata ou rotores compostos por multimateriais para diferenças de temperaturas maiores.

2.5.3. Sugestões de aplicação

- Conversão de energia por meio de rejeitos térmicos industriais [5], [80].
- Conversão de energia solar e geotérmica [59], [78].
- Geração de energia elétrica em larga escala [81].
- Alimentação de sensores sem fio (aplicações em sistemas de baixíssima potência) [76], [82]
- Exploração aeroespacial [83].
- Atuadores acionados termicamente [84], [85].
- Sistemas de arrefecimento acionados pelo calor [22].
- Atuadores mecânicos em sistemas de criogenia [8].

Agora que a revisão bibliográfica abordando a evolução dos motores magnéticos foi apresentada, mostrando suas vantagens, desvantagens e sugestões de aplicações, será exibida uma série de estudos experimentais e analíticos tratando do comportamento e teoria por traz do funcionamento desses sistemas. O primeiro

estudo conduzido buscou verificar as equações que descrevem corretamente a força magnética e o trabalho exercido por essa força, conforme mostrado a seguir.

3. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DAS EQUAÇÕES DE FORÇA E TRABALHO MAGNÉTICO

Como mostrado na introdução deste texto, diversos autores divergem sobre o uso das Equações (9) e (10) para o cálculo do trabalho proveniente da ação de uma força magnética. Derivando-se as duas equações de trabalho ao longo das direções x , y e z , deduzem-se as equações de força magnética correspondentes. Assim, tem-se para a derivada da Equação (9) a chamada força magnética de Kelvin, mostrada na Equação (23). E para a derivada da Equação (10) a chamada força magnética de Liu, mostrada na equação (24) [30].

$$F_{mag} = V\mu_0 M \nabla H \quad (23)$$

$$F_{mag} = V\mu_0 H \nabla M \quad (24)$$

Buscando determinar qual das equações descreve corretamente o comportamento da força magnética e, por consequência, qual equação descreve o trabalho da força, foram conduzidos dois estudos. O primeiro deles baseou-se no trabalho de Araujo & Egolf [86], comparando a força experimentada por uma esfera de material magnético quando submetida a um gradiente de campo, provido por arranjo de ímãs permanentes. O segundo consistiu em verificar a força magnética na presença de campo magnético uniforme na presença de um gradiente de magnetização.

3.1. Força magnética na presença de gradiente de campo e magnetização

Araujo & Egolf [86] verificaram experimentalmente a força magnética em uma esfera de 4 mm de diâmetro, feita de aço 100Cr6 e à temperatura ambiente, para as configurações mostradas na Figura 27 utilizando ímãs permanentes de NdFeB 50M. Os autores obtiveram valores analíticos de força muito próximos para as diferentes equações [Equações (23) e (24)].

Figura 27 – Diferentes configurações utilizadas no experimento de Araujo & Egolf. (a) Configuração 1. (b) Configuração 2. (c) Configuração 3.

Fonte: Retirado do artigo de Gama *et al.* [87] (artigo do autor).

Comparando os resultados analíticos com os experimentais, Araujo & Egolf [86] concluíram que ambas as equações podem ser utilizadas no cálculo da força magnética. Na Figura 28 são mostradas as comparações entre a força obtida experimentalmente pelos autores e o calculado usando as Equações (23) e (24). Observa-se que, apesar de não retornarem exatamente os mesmos valores, ambas as equações retornam valores muito próximos dos obtidos experimentalmente. O campo magnético provido pelos ímãs foi calculado utilizando a equação proposta por Engel-Herbert & Hesjedal [88] e é apresentado na Figura 29.

Figura 28 – Comparação entre as forças obtidas através das Equações de Kelvin e Liu e dados experimentais. (a) Configuração 1. (b) Configuração 2. (c) Configuração 3. Cálculos realizados utilizando os valores de campo aplicado e magnetização no centro da esfera de aço 100Cr6.

Fonte: Autoria própria. Dados experimentais do projeto de graduação de Araujo sob orientação de Egolf [86]

Figura 29 - Campo magnético aplicado para $y = 0$ para as três configurações apresentadas.

Fonte: Autoria própria.

A conclusão apontada por Araujo & Egolf [86] é contraintuitiva, pois, se ambas as equações podem ser utilizadas no cálculo da força magnética, os resultados de trabalho obtidos utilizando as Equações (9) e (10) devem ser muito próximos. O que não é necessariamente verdade, conforme discutido para a Figura 11 {pág. 20}.

Buscando verificar a afirmação de Araujo & Egolf [86], aplicaram-se as Equações (23) e (24) para os mesmos arranjos mostrados na Figura 27, porém, considerando-se dessa vez uma esfera de 4 mm de diâmetro feita de gadolínio, à temperatura de 283 K. Os resultados para as três configurações, considerando a esfera de gadolínio, são mostrados na Figura 30. Observa-se que, diferentemente dos resultados mostrados na Figura 28, a força calculada utilizando as Equações (23) e (24) para as Configurações 1 e 3 divergem significativamente. Apenas para o caso da Configuração 2 as forças para ambas as equações se sobrepõem.

Figura 30 - Comparação entre a força de Kelvin e de Liu considerando uma esfera de gadolínio. (a) Configuração 1. (b) Configuração 2. (c) Configuração 3.

Fonte: Autoria própria.

A diferença nos resultados de força magnética utilizando a esfera de aço 100Cr6 e gadolínio, pode ser explicada ao se observar a curva de magnetização em função do campo aplicado para cada uma das esferas. Na Figura 31a são apresentadas as curvas $M-H$ indicando o máximo valor de campo aplicado para cada uma das configurações de ímãs estudadas. Os dados de magnetização para as

esferas foram obtidos utilizando-se do SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*) modelo MPMS XL da Quantum Design.

Para o gadolínio foram feitas medidas de magnetização em função do campo aplicado para diferentes temperaturas. Na Figura 31b são apresentados os resultados de magnetização em função da temperatura, sendo o campo magnético interno (H_{int}) calculado considerando o fator de demagnetização da esfera (1/3).

Figura 31 – (a) Magnetização em função do campo aplicado a esfera. (b) Magnetização do gadolínio em função do campo magnético interno para diferentes temperaturas

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que, para a Configuração 2, o máximo campo aplicado à esfera encontra-se na região linear da curva M - H para ambos os materiais. Assim, as áreas proporcionais ao trabalho calculadas pelas Equações (9) e (10) serão as mesmas. De modo que, como a força magnética é calculada a partir da derivada do trabalho em função do deslocamento, tem-se que as Equações (23) e (24) retornarão os mesmos valores de força.

Para a Configuração 1, a esfera de aço 100Cr6 ainda apresenta-se na região linear da curva $M-H$, enquanto a esfera de gadolínio não. Dessa maneira, as áreas proporcionais ao trabalho calculadas pelas Equações (9) e (10) serão iguais para o caso utilizando a esfera de aço 100Cr6. Porém, para o caso da esfera de gadolínio as áreas irão divergir. A força magnética se comporta da mesma maneira que o trabalho, onde os resultados obtidos por uso das Equações (23) e (24) divergem.

Na Configuração 3 a esfera de aço 100Cr6 começa a sair da região linear, isso causa uma pequena diferença nos resultados de força. Essa divergência pode ser observada para a região $2 \text{ mm} \leq x \leq 3 \text{ mm}$ na Figura 28c. Para o caso da esfera de gadolínio, o comportamento é similar ao descrito para a Configuração 1.

Conclui-se então que as equações de força e trabalho testadas retornarão os mesmos valores apenas na região em que o material magnético apresentar comportamento linear de magnetização em relação ao campo magnético aplicado. Os dados apresentados em [86] são insuficientes para definir qual equação descreve corretamente o comportamento da força magnética, pois o material utilizado nos ensaios operou apenas na região de comportamento linear da curva $M-H$.

Utilizando-se do equipamento descrito em [87], mediu-se a força em função da posição para uma esfera de gadolínio à temperatura ambiente (por volta de 296 K) para a Configuração 1. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 32. Por estar acima do T_C do gadolínio, a força magnética experimentada pela esfera é pequena. De modo que a razão de ruído por sinal (*noise to signal ratio*) do equipamento de medição nessa condição é grande. Devido a isso observa-se uma grande oscilação nos valores experimentais.

Analiticamente, calculou-se a força magnética para a esfera de gadolínio utilizando-se as Equações (23) e (24), considerando as propriedades magnéticas do material a temperaturas de 293 K e 298 K (medidas no SQUID já citado). De modo que, como a temperatura durante a medida de força situava-se por volta dos 296 K, os dados experimentais devem estar localizados entre as duas curvas calculadas analiticamente. Tendo isso em mente, observando-se os resultados mostrados na Figura 32, a Equação (23) aparenta descrever melhor o comportamento da força magnética do que a Equação (24), visto que, principalmente para o trecho onde $x < 10$ mm, tem-se uma melhor distribuição dos pontos entre as curvas calculadas analiticamente considerando a Equação (23) do que para Equação (24).

Figura 32 – Força magnética experimental para uma esfera de gadolínio a temperatura ambiente, representada pelos pontos pretos. (a) Comparação com a equação de Kelvin, linhas cheias em azul. (b) Comparação com a equação de Liu, linhas traço ponto em verde.

Fonte: Autoria própria.

Uma vez que os resultados mostrados no experimento anterior não foram completamente conclusivos, um segundo experimento foi proposto, desenvolvido e

realizado. Dessa vez um campo magnético homogêneo foi aplicado, e um gradiente de magnetização foi induzido na amostra testada, condição ideal para a verificação da Equação (24). O experimento em questão é descrito a seguir.

3.2. Força magnética na presença de campo uniforme e gradiente de magnetização

Segundo a equação de força magnética de Liu, uma amostra de material magnético que apresenta um gradiente de magnetização, quando submetida a um campo magnético homogêneo, deve experimentar uma força. Na Figura 2 observa-se que, mesmo para um campo constante, ao redor do T_C , a magnetização do material magnético muda com a temperatura devido ao efeito termomagnético.

Dessa maneira, ao se aplicar um gradiente de temperatura ao redor do T_C de um material submetido a um campo magnético homogêneo, um gradiente de magnetização surgirá. Caso a Equação (24) descreva corretamente o comportamento da força magnética, esse gradiente de magnetização, na presença do campo magnético homogêneo, deve gerar uma força magnética.

Para testar essa hipótese, desenvolveu-se um suporte de amostras capaz de aplicar um gradiente de temperaturas ao redor do T_C do gadolínio. O suporte em questão é mostrado na Figura 33a. O elemento Peltier resfria o suporte superior (fabricado em alumínio), que por sua vez, resfria uma das extremidades de uma amostra cilíndrica, feita de gadolínio, com diâmetro de 2 mm e comprimento de 20 mm. A parede lateral da amostra é isolada termicamente por uma bucha fabricada de Celeron. A outra extremidade da amostra se encaixa no suporte inferior (fabricado em alumínio), que é mantido a temperatura constante e maior que a

temperatura do suporte superior. Uma mola de silicone exerce uma pequena força, pressionando a amostra entre os suportes inferior e superior, garantindo o contato térmico. Dessa maneira, o fluxo de calor na amostra se dá na direção axial.

A base do isolamento e as demais partes não indicadas na Figura 33a, que fazem parte da carcaça do dispositivo, são fabricadas em alumínio. As temperaturas das extremidades da amostra são determinadas pelos sensores de temperatura (termo resistências) indicados na figura. O conjunto foi colocado dentro da bobina supercondutora de um PPMS (*Physical Property Measurement System*), capaz de gerar um campo magnético constante e homogêneo em seu interior. Por meio da haste, o sistema é ligado a uma balança analítica com precisão de 10^{-4} g, conforme mostrado na Figura 33b.

Figura 33 – Arranjo experimental para verificação da força de Liu. (a) Suporte de amostra desenvolvido. (b) Montagem do conjunto no interior da bobina supercondutora.

Fonte: Autoria própria.

Durante o experimento, a temperatura da câmara do PPMS foi controlada e mantida constante a 300 K, trocando calor com a carcaça do suporte de amostra, mantendo a extremidade inferior da amostra à mesma temperatura da câmara. Aplicou-se uma diferença de potencial elétrico nos terminais do elemento Peltier, resfriando a extremidade superior da amostra, sendo essa mantida por volta de 285 K. Assim, estabeleceu-se um gradiente de temperaturas ao redor do T_C (293 K) na amostra de gadolínio. Aguardou-se que o sistema entrasse em equilíbrio térmico, verificando-se o momento em que as temperaturas medidas nos sensores de temperatura não se alterassem mais.

Com o sistema montado, tarou-se a balança analítica. Aplicou-se então um campo magnético homogêneo usando a bobina supercondutora, induzindo um gradiente de magnetização ao longo da amostra. Considerando um gradiente de temperaturas linear entre as extremidades da amostra (o que induziria o menor gradiente de magnetização possível), calculou-se o gradiente de magnetização induzido, fazendo uso das curvas $M-H_{int}$ mostrados na Figura 31b. O fator de demagnetização da amostra foi calculado utilizando a referência [89], sendo esse igual a 0,0457. Na Figura 34 é apresentado o gradiente de magnetização da amostra em função do campo magnético aplicado pela bobina supercondutora.

Utilizando-se da Equação (24), calculou-se a força magnética que deveria ser indicada pela balança analítica para o gradiente de magnetização mostrado na Figura 34. O resultado analítico obtido com a equação estudada é mostrado na Figura 35.

Figura 34 - Gradiente de magnetização ao longo do comprimento (l) da amostra de gadolínio em função do campo aplicado pela bobina supercondutora.

Fonte: Autoria própria.

Figura 35 - Resultados obtidos com a equação de força magnética de Liu para o caso estudado de campo magnético aplicado homogêneo e gradiente de magnetização induzido por temperatura.

Fonte: Autoria própria.

Apesar da equação de Liu afirmar que uma força magnética deve aparecer na presença de um gradiente de magnetização, quando um campo homogêneo é aplicado, nenhuma força magnética foi observada no caso estudado para campos aplicados de até 5 T. A Tabela 1 apresenta as condições, resultados esperados e medidos para o ensaio, onde T_{sup} é a temperatura medida pelo sensor colocado na região em contato com a extremidade da amostra resfriada pelo elemento Peltier, T_{inf}

é a temperatura medida pelo sensor colocado na região em contato com a extremidade da amostra em equilíbrio térmico com a câmara do PPMS, M_{sup} e M_{inf} são as magnetizações para as extremidades da amostra, calculadas a partir das curvas mostradas na Figura 31b. $F_{esperada}$ é a força magnética calculada por meio da Equação (24), mostrada na Figura 35, e F_{medida} é a força indicada pela balança analítica.

Tabela 1 – Condições e resultados experimentais para o ensaio de verificação da equação de Liu.

$\mu_0 H$ [T]	T_{sup} [K]	T_{inf} [K]	M_{sup} [A/m]	M_{inf} [A/m]	$F_{esperada}$ [N]	F_{medida} [N]
0	285,16	300,02	0	0	0	0,001
1	285,68	300,02	6,395E5	3,999E5	0,7527	-0,001
2	286,20	300,06	7,475E5	5,628E5	1,16	0
3	286,20	300,06	8,266E5	6,749E5	1,429	0
4	286,45	300,1	---	---	---	0,002
5	278,23	300,06	---	---	---	0

O resultado obtido prova que não há força magnética macroscópica na presença de campo magnético aplicado homogêneo em um sistema fechado. De modo que apenas o gradiente de magnetização não é suficiente para induzir uma força magnética, sendo necessário um gradiente de campo aplicado para tal.

Essa conclusão invalida a equação de Liu como uma descrição do comportamento da força magnética e, por consequência, invalida a equação de trabalho de onde ela é deduzida. Logo a Equação (10) não descreve corretamente o comportamento do trabalho realizado por uma força magnética em um sistema fechado.

A partir dos resultados mostrados nos itens 3.1 e 3.2, conclui-se que a equação que descreve corretamente o comportamento da força magnética é a equação de força de Kelvin, mostrada na Equação (23), que afirma ser necessário

um gradiente de campo magnético para que haja uma força magnética, visto que apenas um gradiente de magnetização não foi capaz de induzir uma força magnética na presença de um campo magnético homogêneo.

O sistema estudado é considerado um sistema fechado. Assim, como a equação de força de Kelvin é a que descreve corretamente o comportamento da força magnética, a equação de trabalho que dá origem a ela, Equação (9), é a que descreve corretamente o trabalho realizado pela força magnética em um sistema fechado. Conclusão que contraria o que foi proposto por Kitanovski & Egolf [30] na analogia entre processo de compressão de gás e refrigeração magnetocalórica.

Para entender o problema com a analogia de Kitanovski & Egolf [30], deve-se analisar como se dá o comportamento das curvas isotérmicas nos diagramas de pressão e volume para um gás, e campo magnético aplicado e magnetização em um material magnético. Na Figura 36a tem-se um diagrama pressão-volume para um gás que sofre um processo isovolumétrico. Supondo que o gás está inicialmente à temperatura T_1 , e a pressão aumente, a temperatura do gás aumentará, como indicado pela temperatura T_2 , que é maior que T_1 .

O processo para um material magnético análogo ao processo sofrido pelo gás mostrado na Figura 36a é mostrado na Figura 36b. Onde, mantendo-se a magnetização do material constante e aumentando o campo magnético, tem-se que a temperatura do material aumenta de T_1 para T_2 . Conclui-se que, para um processo isovolumétrico, o aumento da pressão causa um aumento na temperatura do gás, bem como, em um processo a magnetização constante, o aumento do campo causa um aumento na temperatura do material magnético. Para essa condição, a analogia funciona perfeitamente.

Na Figura 36c é mostrado um processo isobárico para um gás no diagrama pressão-volume. Considerando que o gás está inicialmente a uma temperatura T_1 , ao se aumentar o volume, tem-se necessariamente um aumento da temperatura.

O processo magnético análogo ao mostrado na Figura 36c é mostrado na Figura 36d. Observa-se que, no processo isocampo, o aumento da magnetização do material magnético se dá com a redução da temperatura. Assim, conclui-se que, em um processo isobárico em um gás, o aumento do volume é acompanhado de um aumento de temperatura. Já em um processo isocampo em um material magnético, o aumento da magnetização se dá com a diminuição da temperatura. Nota-se então que a analogia entre processo isobárico e isocampo não é perfeita, isso justifica a diferença na conclusão obtida experimentalmente nesse trabalho e no que foi afirmado por Kitanovski & Egolf em [30].

Dessa maneira, conclui-se então que, mesmo em sistemas fechados, a força magnética surge apenas na presença de um gradiente de campo magnético. A equação que descreve corretamente o comportamento da força magnética é a Equação (23). Por consequência, o trabalho realizado pela força magnética deve ser calculado pela Equação (9).

Da mesma maneira, em um motor termomagnético, a equação que descreve o trabalho específico desenvolvido por ciclo é a Equação (11). Essa conclusão anula o uso da Equação (12) para determinação do trabalho específico produzido durante um ciclo de operação do motor termomagnético. Conclui-se também que a representação correta no diagrama $M-H$ é a apresentada na Figura 13a.

Figura 36 – Esboço para comparação entre os diagramas de pressão e volume para um gás com campo magnético aplicado e magnetização para um material magnético. (a) Aumento de pressão a volume constante para gás. (b) Aumento de campo magnético aplicado para magnetização constante em material magnético. (c) Aumento de volume a pressão constante para um gás. (d) Aumento de magnetização a campo magnético aplicado constante em material magnético. $T_2 > T_1$.

Fonte: Autoria própria.

Uma segunda maneira de entender qual equação deve ser utilizada nos cálculos de ciclos termodinâmicos dos motores termomagnéticos do tipo Tesla pode ser feita através de uma análise termodinâmica. Sabe-se que sistemas a gás que operam segundo ciclo Brayton tem seu trabalho calculado pela equação $\int v dp$, de forma análoga, um sistema magnético que opera segundo um ciclo Brayton magnético deve ter seu trabalho proporcional a $\int M dH$, considerando que v é análogo a M e p é análogo a H .

Agora que foi definida a equação que descreve corretamente o comportamento do trabalho específico em um motor termomagnético, bem como sua

representação no diagrama $M-H$, será apresentado um estudo diferenciando o comportamento do ciclo desenvolvido em um motor termomagnético do tipo Edison e do tipo Tesla.

4. CICLO TERMODINÂMICO EXERCIDO PELOS DIFERENTES TIPOS DE MOTORES TERMOMAGNÉTICOS

Como dito na introdução deste texto, os motores termomagnéticos, tanto os do tipo Edison quanto os do tipo Tesla, são normalmente descritos na literatura desenvolvendo um ciclo Brayton magnético. Esse ciclo foi descrito com auxílio da Figura 12 onde um motor do tipo Tesla foi apresentado.

Todavia, descrever o ciclo termodinâmico de um motor do tipo Edison é bem mais complicado, pois nessa arquitetura, o calor é recebido, rejeitado e o trabalho é extraído simultaneamente. De modo que nenhum desses processos acontece sobre campo magnético constante ou de forma adiabática.

Sendo assim, foi desenvolvido um estudo buscando verificar, comparar e diferenciar os ciclos termodinâmicos desenvolvidos em um motor do tipo Edison e em um motor do tipo Tesla.

4.1. Ciclo termodinâmico de um motor do tipo Edison

Para se estudar o ciclo termodinâmico desenvolvido em um motor do tipo Edison, adotou-se um modelo semelhante à roda de Curie mostrada na Figura 7. Foram conduzidos dois estudos numéricos a partir do modelo. O primeiro consistiu em determinar a distribuição de temperaturas ao longo do rotor de material magnético. O segundo consistiu em determinar a distribuição do campo magnético aplicado para um arranjo de ímãs que fornece o campo ao sistema. A partir dos resultados de distribuição de temperaturas e campo magnético, e das propriedades

termomagnéticas do material, foi possível calcular o ciclo termodinâmico desenvolvido pela máquina. Esses estudos são apresentados a seguir.

4.1.1. Simulações de transferência de calor

Em um motor tipo Edison, a fonte fria, a fonte quente e o campo magnético aplicado não possuem movimento relativo entre si. Quem se desloca no interior do campo é o material magnético que compõe o rotor do sistema. Sendo assim, buscou-se determinar a distribuição de temperaturas ao longo do rotor de um motor termomagnético para diferentes velocidades angulares desenvolvidas pelo mesmo.

O modelo geométrico adotado para o estudo é mostrado na Figura 37, onde um rotor, com diâmetro interno de 95 mm e diâmetro externo de 105 mm, rotacional ao redor da origem com velocidade angular (ω). O rotor troca calor por condução com a fonte fria e a fonte quente, conforme a distribuição na figura. Como condições de contorno, adotou-se a temperatura da fonte fria (T_{Cold}) e da fonte quente (T_{Hot}) constantes. O rotor troca calor apenas através das áreas em contato com as fontes, sendo as demais partes consideradas adiabáticas.

Considerou-se que o rotor é feito de gadolínio, com as propriedades de calor específico (a campo magnético zero) descritas em [90] e condutividade térmica mostrada em [91] como função da temperatura. Considerou-se as fontes como sendo de alumínio, tendo calor específico e condutividade térmica constante.

O modelo foi construído no *software* ANSYS CFX, que já tem funções prontas para a solução de troca de calor por condução em sistemas com rotação. Foi determinada a distribuição de temperaturas no rotor para diferentes velocidades

angulares, conforme os resultados mostrados na Figura 38 para as velocidades de 0, 0,5 e 40 RPM.

Figura 37 – Distribuição das fontes de calor e geometria para o modelo de motor do tipo Edison estudado.

Fonte: Autoria própria.

Figura 38 - Distribuição de temperaturas no rotor para diferentes velocidades angulares.

Fonte: autoria própria.

Determinou-se o perfil de temperaturas para o raio médio do rotor (50 mm) em função da posição angular (α) para diferentes velocidades angulares, esses perfis podem ser observados na Figura 39a, para $0 \leq \omega \leq 1$ RPM e na Figura 39b para

$1 \leq \omega \leq 80$ RPM, onde se observa que, com o aumento da velocidade angular a variação de temperaturas no rotor diminui.

Figura 39 - Perfil de temperaturas em função da velocidade angular (a) $0 \leq \omega \leq 1$ RPM . (b) $1 \leq \omega \leq 80$

Fonte: Autoria própria.

Isso pode ser claramente observado através do cálculo do gradiente de temperaturas no raio médio do rotor, mostrado na Figura 40. Com a redução do gradiente de temperaturas no rotor, o torque de saída do eixo de um motor do tipo Edison diminui. Esse resultado corrobora a explicação dada no Capítulo 2, para comportamento dos gráficos mostrados na Figura 20b e Figura 21 para o trabalho de Andreevsk *et al.* [36].

Determinado o perfil de temperaturas no rotor, causado pela troca de calor com as fontes, fez-se o estudo para determinação do campo aplicado ao motor. Esse estudo é descrito a seguir.

Figura 40 - Gradiente de temperaturas em função da velocidade angular (a) $0 \leq \omega \leq 1$ RPM . (b) $1 \leq$

$\omega \leq 80$ RPM.

Fonte : Autoria própria.

4.1.2. Simulação de campo magnético

Para prover o campo ao conjunto, considerou-se um circuito magnético composto por ímãs permanentes e uma armadura de aço SAE1010. Para o ímã, utilizou-se as propriedades do NdFeB 50M. O circuito magnético estudado é mostrado na Figura 41a. Desenvolveu-se então um estudo com o auxílio do *software Ansoft Maxwell*, seguindo o modelo mostrado na Figura 41b, onde θ representa o ângulo formado entre o eixo x do plano cartesiano mostrado na Figura 37 e a linha que passa pelo centro do circuito magnético.

O entreferro do arranjo foi ajustado para que o campo magnético na direção radial, na posição do raio médio do rotor (50 mm), atingisse exatamente 1 T, obtendo-se um valor de 5,65 mm para o entreferro. Na Figura 42 é mostrado o campo magnético aplicado na direção radial para a condição de θ igual a 0° . Observou-se que para o raio médio do rotor o campo magnético distribui-se apenas na direção radial.

Figura 41 - (a) Circuito magnético utilizado no estudo de determinação do ciclo termodinâmico de um motor tipo Edison. Dimensões em mm. (b) Representação do modelo geométrico para estudo de campo magnético utilizado no estudo de determinação de ciclo termodinâmico de um motor tipo Edison.

Fonte: Autoria própria.

Figura 42 – Campo magnético em função da posição angular para o circuito magnético utilizado no estudo.

Fonte: Autoria própria

De posse do gradiente de temperaturas, causado pela troca de calor entre as fontes e o rotor, e do campo magnético aplicado ao material magnético, é possível calcular o ciclo termodinâmico desenvolvido pelo sistema. Isso é mostrado a seguir.

4.1.3. Cálculo do ciclo

Para o cálculo será considerado o gradiente de temperaturas no rotor com velocidade de 1 RPM. Nessa condição, o máximo gradiente de temperaturas acontece para α igual a 352° . Assim, considerou-se que o arranjo magnético estava posicionado sobre a região de máximo gradiente de temperaturas, dessa maneira θ igual a 352° . A Figura 43 mostra a distribuição de temperaturas e campo magnético aplicado ao longo do rotor, para a condição considerada.

Figura 43 - Rotor a velocidade de 1 RPM. (a) Distribuição de temperatura. (b) Distribuição do campo magnético aplicado.

Fonte: Autoria própria.

A partir desse momento podem ser feitas duas considerações, a primeira é que a contribuição do efeito magnetocalórico (variação da temperatura devido à aplicação de campo para um processo adiabático) na temperatura é desprezível, visto que o pequeno aumento da temperatura, causado pela aplicação de campo, se

dissiparia por condução através do rotor, principalmente para pequenas velocidades angulares. A segunda opção é considerar que não há dissipação do efeito magnetocalórico por condução ao longo do rotor, levando em conta a contribuição do efeito. Na Figura 44a é mostrada a variação de temperatura para o gadolínio em função do campo magnético aplicado e da temperatura, considerando um processo adiabático. Na Figura 44b é mostrada a variação de temperaturas no rotor para a condição estudada, calculada a partir da superfície mostrada na Figura 44a, levando em conta a distribuição de temperaturas e o campo magnético aplicado, mostrados na Figura 43.

Figura 44 - Variação de temperatura causada por uma aplicação adiabática de campo magnético. (b)

Fonte: (a) Interpolado a partir dos dados de [90]. (b) Autoria própria.

Se a contribuição do efeito magnetocalórico for considerada desprezível, os cálculos seguem utilizando a distribuição de temperaturas mostrada na Figura 43a. Caso o efeito magnetocalórico não seja desprezível, pode-se adicionar à distribuição de temperaturas no rotor a curva mostrada na Figura 44b. As distribuições de temperaturas no rotor para ambos os casos são mostradas na Figura 45.

Figura 45 - Distribuição de temperatura no raio médio do rotor considerando e desprezando a contribuição do efeito magnetocalórico (EMC).

Fonte: Autoria própria.

Conhecendo a distribuição de temperaturas e campo magnético aplicado é possível determinar a magnetização e a entropia no rotor. Para isso é necessário conhecer as propriedades termomagnéticas do material utilizado no rotor. Risser *et al.* [90] levantaram as propriedades termomagnéticas do gadolínio, e essas são mostradas na Figura 46.

As distribuições de magnetização e entropia ao longo do rotor são mostradas na Figura 47 para a velocidade angular estudada, considerando e desprezando a contribuição do efeito magnetocalórico. A influência do fator de demagnetização foi desprezada, assim o campo interno do material é igual ao campo aplicado.

A partir dos dados da Figura 47 é possível determinar os diagramas $M-H$ e $T-s$ para o motor tipo Edison estudado. Os diagramas são mostrados na Figura 48 para o caso estudado.

Figura 46 – Propriedades termomagnéticas do gadolínio. (a) Magnetização em função da temperatura e do campo magnético interno. (b) Entropia relativa em função do campo interno e da temperatura.

Fonte: Interpolado a partir dos dados de [90].

Figura 47 - Magnetização ao longo do rotor. (b) Entropia relativa ao longo do rotor.

Fonte: Autoria própria.

Em ambas as condições estudadas, desprezando ou considerando a contribuição do efeito magnetocalórico, o ciclo desenvolvido para o motor do tipo Edison difere consideravelmente do ciclo Brayton magnético, considerando as

mesmas condições de temperatura e campo magnético aplicado. Esse resultado contraria o ciclo proposto para esse tipo de máquina em [4] e [36].

Figura 48 - Ciclo termodinâmico desenvolvido pelo motor tipo Edison estudado, considerando-se e desprezando-se o efeito magnetocalórico (EMC), velocidade angular de 1 RPM. (a) Diagrama $M-H$.

(b) Diagrama $T-s$.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se também que existe uma região em que o material que compõe o rotor é aquecido e resfriado sem a presença de campo magnético, esse fenômeno pode ser observado no lado esquerdo do diagrama $T-s$, mostrado na Figura 48b. Esse calor recebido pelo material magnético é completamente rejeitado para a fonte fria, sem ser parcialmente convertido em trabalho. Esse fenômeno prejudica a eficiência do dispositivo.

Esse efeito pode ser minimizado aproximando-se a fonte quente da fonte fria (que foram colocadas em extremidades opostas do diâmetro do rotor), contudo, é impossível impor que o calor flua apenas em uma direção nesse tipo de arranjo, sendo o efeito apenas minimizado e não anulado.

Na Figura 49 são mostrados os ciclos termodinâmicos desenvolvidos pelo motor tipo Edison estudado, no diagrama $M-H$, para diferentes velocidades angulares. Onde se verifica que com o aumento da velocidade a área do ciclo proporcional ao trabalho produzido diminui.

Figura 49 - Diagramas $M-H$ para diferentes velocidades angulares do rotor para o motor tipo Edison estudado. (a) 0,05 RPM. (b) 5 RPM. (c) 10 RPM. (d) 40 RPM.

Fonte: Autoria própria.

Isso ocorre devido ao fato de que o aumento da velocidade angular faz com que haja uma diminuição no gradiente de temperaturas desenvolvido no rotor devido

à troca de calor com as fontes. Com a diminuição do gradiente, a temperatura com que o material magnético adentra a região onde o campo é aplicado se aproxima da temperatura com que o material sai da região. Assim, as curvas referentes a esses processos se aproximam no diagrama $M-H$, fazendo com que a área proporcional ao trabalho também diminua.

Para todas as velocidades angulares estudadas, considerando e desprezando o efeito magnetocalórico, o ciclo desenvolvido no motor do tipo Edison estudado diverge significativamente de um ciclo Brayton. Isso ocorre, pois tanto a entrada quanto a saída do material da região onde o campo magnético é aplicado não acontece de forma adiabática, visto que o calor flui através do material por condução, apresentando um gradiente de temperaturas ao longo do rotor. Pelo mesmo motivo, o calor não necessariamente entra no material a campo constante e elevado, tampouco é rejeitado a campo constante e nulo.

O ciclo desenvolvido em um motor do tipo Edison é complexo, onde a entrada e saída de calor e a produção de trabalho acontecem de forma simultânea, não podendo ser aproximado por um ciclo Brayton magnético, onde esses fenômenos acontecem separadamente para um motor termomagnético tipo Tesla, conforme explicado no capítulo de introdução deste texto.

Agora que o ciclo desenvolvido por um motor do tipo Edison já foi discutido, será apresentado um estudo abordando o comportamento do ciclo desenvolvido em motores do tipo Tesla.

4.2. Ciclo termodinâmico de um motor do tipo Tesla

No item 1.5.2 deste texto foi descrito o ciclo de operação de um motor termomagnético através do funcionamento de um motor do tipo Tesla. De modo que será apresentado agora um estudo experimental para verificar se o ciclo desenvolvido nesse tipo de motor é realmente o Brayton magnético. Para isso, foi construído um motor do tipo Tesla em forma de bancada experimental, mostrado na Figura 50.

Figura 50 - Representação esquemática da bancada construída para verificação do ciclo termodinâmico desenvolvido em um motor do tipo Tesla.

Fonte: Autoria própria.

Na bancada, uma amostra de material magnético cilíndrica, com 15 mm de diâmetro, 4 mm de comprimento e feita de gadolínio, é atraída por um circuito magnético, e colocada em contato com a fonte quente. Ao aquecer, a amostra se torna paramagnética e é afastada do circuito magnético e da fonte quente por ação da força elástica da mola da guia linear flexível, sendo colocada em contato com a fonte fria. A amostra começa a ser resfriada e mais uma vez se torna ferromagnética, sendo novamente atraída para a região de máximo campo e colocada em contato com a fonte quente, onde é aquecida e o ciclo se repete.

Como o objetivo da bancada é verificar o ciclo de operação de um motor do tipo Tesla (e não uma aplicação real para essas máquinas) é interessante que as temperaturas das fontes possam ser ajustadas facilmente. Sendo assim, foram utilizados elementos Peltiers (de dimensões 40x40x3,8 mm³) nas fontes, onde a temperatura pôde ser facilmente ajustada apenas com a mudança da diferença de potencial elétrico nos terminais dos mesmos.

As temperaturas no sistema foram determinadas por três termopares tipo N instalados em contato com a fonte fria, com a amostra magnética e com a fonte quente, optou-se pelos termopares tipo N pois esses apresentam baixíssima resposta magnética. A posição da amostra em relação às fontes foi determinada por um sensor de efeito Hall, modelo 538292 da FESTO, capaz de medir a posição do suporte móvel da amostra. A aquisição dos sinais dos sensores aconteceu de forma simultânea, registrando a temperatura e posição da amostra ao longo do tempo.

Para a bancada funcionar como motor é necessário extrair o trabalho produzido no sistema, para isso, o suporte móvel foi ligado ao pistão de uma bomba de água do tipo diafragma. A bomba estava conectada a dois reservatórios de água com alturas diferentes. Dessa maneira, o trabalho produzido no sistema alimentava

a bomba, que causava uma diferença de pressão no sistema, bombeando a água do reservatório mais baixo para o mais elevado. Além da diferença de alturas entre os reservatórios, o circuito hidráulico do conjunto apresenta uma perda de carga, que também contribuiu na dissipação do trabalho produzido no motor.

A carga aplicada ao motor podia ser alterada através da mudança da diferença de alturas dos reservatórios de água. De acordo com a carga aplicada, a tensão na guia linear era ajustada, alterando a deformação mínima na mola, isso pôde ser feito ajustando a distância x indicada na Figura 50. A Figura 51 mostra uma foto da bancada construída, já com a bomba instalada junto ao suporte de amostra móvel. Nos experimentos descritos a seguir, a diferença de alturas entre os reservatórios foi mantida fixa, por volta de 300 mm.

Figura 51 – Bancada experimental construída para determinação do ciclo desenvolvido em um motor do tipo Tesla.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 52 mostra as temperaturas medidas pelos termopares e a posição da amostra em um ciclo do motor. O curso total do motor, indicado por “c” na Figura 50, era de 5 mm, de modo que quando o centro da amostra estava posicionado em - 2,5 mm, esta encontrava-se em contato com a fonte fria. Quando o centro da

amostra estava posicionado a 2,5 mm, esta se situava em contato com a fonte quente, assim a posição 0 mm estava localizada na posição central do curso. A temperatura do material magnético em função da sua posição foi determinada a partir dos dados medidos na bancada e é mostrada na Figura 53.

Figura 52 - Medidas para um ciclo na bancada para determinação do ciclo termodinâmico para um motor do tipo Tesla. (a) Temperaturas ao longo do tempo de um ciclo. (b) Posição da amostra ao longo do tempo.

Fonte: Autoria própria.

Figura 53 - Temperatura da amostra de material magnético em função da posição.

Fonte: Autoria própria.

Para se determinar um estado termodinâmico em uma substância pura é preciso conhecer duas variáveis de estado independentes. A temperatura do material magnético já foi apresentada, bastando agora apenas determinar mais uma variável. Para isso, mediu-se o campo magnético aplicado à amostra.

As propriedades termodinâmicas de um material magnético são funções do campo interno ao material, conforme discutido no item 1.5, sendo assim, também foi necessário determinar o fator de demagnetização da amostra para o campo aplicado. Os estudos para determinação do campo aplicado e do fator de demagnetização para a bancada são mostrados a seguir.

4.2.1. Campo aplicado pelo circuito magnético

O campo magnético da bancada foi provido por um circuito magnético composto por dois ímãs permanentes de NdFeB G50M e uma armadura de aço SAE 1020. Os ímãs são alinhados de forma que o fluxo magnético passe pela armadura de aço na parte anterior do circuito, e pela região onde se encontra a amostra na parte posterior. Cada ímã tem dimensões $20 \times 20 \times 50 \text{ mm}^3$. O arranjo é mostrado na Figura 54.

Com o auxílio de um gaussímetro, modelo TLMP-HALL da *Global Mag*, o campo magnético foi determinado ao longo do eixo de deslocamento da amostra, o esquema de medição é ilustrado na Figura 55a. A medição de campo ocorre sem a presença da amostra magnética, a projeção na figura apenas representa o espaço que seria ocupado pela amostra quando essa estivesse em contato com a fonte quente. Os valores obtidos para o campo aplicado em função da posição são

mostrados na Figura 55b, já para a posição do centro da amostra (-2,5 mm quando a amostra está em contato com a fonte quente).

Figura 54 - Circuito magnético utilizado na bancada. (a) Orientação dos ímãs. (b) Circuito magnético com o elemento Peltier que funciona como fonte quente.

Fonte: Autoria própria.

Figura 55 - Campo magnético aplicado pelo circuito sobre a linha de deslocamento da amostra (a) Esquema de medição. (b) Campo medido com o gaussímetro.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o máximo campo magnético aplicado é de 0,458 T, e acontece para a região ocupada pelo centro da amostra quando esta se encontra

em contato com o elemento Peltier que atua como fonte quente. O menor campo aplicado na região de interesse é de 0,253 T, e acontece para a posição em que o centro da amostra se encontra quando esta se apresenta em contato com a fonte fria, considerando o curso de 5 mm para o motor.

A variação de campo aplicada no conjunto foi de apenas aproximadamente 0,2 T. Em um motor termomagnético deve-se buscar maximizar a variação de campo ao qual o material magnético é submetido, assim maximizando o trabalho produzido por ciclo, conforme será discutido no item 6.1.2. Contudo, para a verificação do comportamento do ciclo termodinâmico desenvolvido, essa variação de campo é suficiente.

De posse da temperatura do material magnético em função da posição e do campo magnético aplicado à amostra em função da posição, é possível determinar o ciclo desenvolvido pela amostra no diagrama campo aplicado – temperatura, mostrado na Figura 56. Esse ciclo não tem significado físico, mas é o ciclo que é diretamente medido na bancada construída. A partir do ciclo mostrado na Figura 56 é possível determinar o ciclo desenvolvido nos diagramas $T-s$ e $M-H$.

Nota-se também na Figura 56 que o processo de aquecimento acontece a campo constante e mais elevado, e o processo de resfriamento acontece a campo constante e mais reduzido. Também é possível observar que, ao se afastar do ímã, a temperatura do material se reduz, e ao se aproximar, ela aumenta, por conta do efeito magnetocalórico. Um ciclo Brayton magnético apresenta dois processos isocampo e dois processos adiabáticos, sendo que, nos processos adiabáticos, há uma redução da temperatura do material magnético ao se afastar da região de máximo campo, e um aumento da temperatura ao se aproximar dessa região, novamente por conta do efeito magnetocalórico. O comportamento descrito para o

ciclo Brayton magnético é muito próximo ao que foi observado no diagrama $H-T$ mostrado na Figura 56.

Figura 56 - Campo aplicado em função da temperatura do material magnético medido na bancada experimental.

Fonte: Autoria própria.

De posse do diagrama $H-T$, para se determinar a magnetização e a entropia no material, basta apenas agora conhecer o fator de demagnetização para a amostra no interior do campo aplicado, visto que a magnetização e a entropia são propriedades funções do campo interno ao material. Para isso, o experimento a seguir foi conduzido.

4.2.2. Fator de demagnetização para a bancada.

Como citado no item 1.5 desse texto, o fator de demagnetização depende da geometria do material magnético e do alinhamento dessa geometria com o campo magnético aplicado, podendo esse variar entre 0 e 1. De modo que, para um cilindro de raio finito e comprimento infinito, se o campo aplicado estiver alinhado com a

direção axial do cilindro, o fator de demagnetização é 0. Para o mesmo cilindro, caso o campo aponte na direção radial do cilindro, o fator de demagnetização é 1. Assim, o fator de demagnetização depende exclusivamente da geometria da amostra e de sua orientação em relação ao campo magnético aplicado, não importando as demais propriedades magnéticas.

Para se determinar o fator de demagnetização da amostra na bancada, mediu-se a força de atração entre a amostra à temperatura constante e o circuito magnético, para diferentes posições, conforme mostrado na Figura 57a. O suporte de ímãs é idêntico à armadura de aço SAE 1020 e os ímãs são do mesmo material e com mesma orientação dos mostrados na Figura 54a.

Aplicou-se então a Equação (8) para calcular a força magnética que atua na amostra, alterando-se o valor do fator de demagnetização para a determinação da magnetização, a fim de fazer com que o valor calculado analiticamente coincidissem com o medido experimentalmente.

O sistema de força utilizado foi descrito em [92] e é mostrado na Figura 57b. Uma amostra cilíndrica de diâmetro 15 mm e comprimento 4 mm, feita de gadolínio (idêntica à utilizada na bancada mostrada na Figura 50), teve sua temperatura controlada, mantida constante a 278 K. O controle de temperatura da amostra foi feito através do acionamento do elemento Peltier, controlado através da verificação da temperatura da amostra pelos termopares tipo N, obtendo uma precisão de ± 1 K na estabilização da temperatura da amostra.

No sistema, a amostra foi mantida fixa, enquanto o arranjo de ímãs se deslocava pela ação do atuador linear de precisão. Uma célula de carga, com precisão de $\pm 0,05$ N, verificou a força de atração entre a amostra e o circuito magnético. Na Figura 58a é mostrada a força magnética de atração entre o circuito

magnético e a amostra de gadolínio à temperatura de 278 K. A posição representada na figura segue o mesmo eixo de coordenadas mostrado na Figura 55a.

Figura 57 - Sistema de medição de força com amostra a temperatura constante e controlada. (a)

Sistema estudado. (b) Sistema de medição de força.

Fonte: (a) Autoria própria. (b) Adaptado do artigo de Ferreira *et al.* [92] (artigo do autor).

Para o cálculo analítico da força foram utilizados os dados de campo magnético aplicado mostrados na Figura 55b. A magnetização do material foi determinada através da curva de magnetização em função do campo interno para o gadolínio a 278 K, mostrada na Figura 31b. O campo interno à amostra foi calculado utilizando-se a Equação (7), variando-se o fator de demagnetização para cada posição assumida pelo material, fazendo com que a força calculada analiticamente com a Equação (8) coincidissem com os resultados obtidos experimentalmente. O fator de demagnetização obtido experimentalmente é mostrado na Figura 58b.

O fator de demagnetização muda com a posição, pois as linhas de campo magnético também mudam, assim o alinhamento do campo aplicado com a amostra também depende da posição. Isso pode ser observado na Figura 59, resultado de

uma simulação do arranjo no *software* Ansoft Maxwell. Observa-se que o alinhamento do campo muda de acordo com a região estudada, e isso é suficiente para alterar o fator de demagnetização.

Figura 58 - (a) Força magnética entre o circuito magnético e a amostra de gadolínio a 278 K. (b) Fator de demagnetização para o cálculo do resultado analítico.

Fonte: Autoria própria.

Buscando verificar os valores do fator de demagnetização calculados a partir dos resultados experimentais de força, foram feitas mais seis medidas de força em função da posição, na bancada mostrada na Figura 57b. Dessa vez foram realizados ensaios com a amostra a temperaturas de 283, 288, 293, 298, 303 e 308 K. Os resultados experimentais foram comparados com resultados analíticos obtidos com a Equação (8), mantendo o mesmo fator de demagnetização mostrado na Figura 58b.

A Figura 60 mostra a comparação, onde se observa uma boa correlação entre os valores obtidos experimentalmente e o cálculo analítico para todas as temperaturas testadas. Esse resultado comprova os valores do fator de demagnetização calculado.

Agora que a temperatura da amostra, o campo magnético aplicado e o fator de demagnetização foram determinados em função da posição do centro da amostra, é possível calcular a magnetização e a entropia do material também em função da posição da amostra, e a partir desses dados, determinar o ciclo desenvolvido pelo motor do tipo Tesla da bancada nos diagramas $M-H$ e $T-s$. Isso é mostrado a seguir.

Figura 59 - Alinhamento do campo magnético na região ocupada pelas amostras (a) região de interesse. (b) Detalhe do campo na região ocupada pela amostra para as posições -2,5 mm à esquerda e 10 mm à direita.

(a)

Projeção da região
ocupada pela amostra

(b)

Fonte: Autoria própria

Figura 60 - Força em função da posição para diferentes temperaturas. Pontos: Valores experimentais.

Linhas: Cálculos analíticos.

Fonte: Autoria própria.

4.2.3. Ciclo termodinâmico para um motor do tipo Tesla nos diagramas $M-H$ e $T-s$.

Para a determinação do ciclo de operação nos diagramas $M-H$ e $T-s$, basta apenas determinar a magnetização e a entropia da amostra em função da posição, visto que a temperatura do material magnético e o campo aplicado são conhecidos. Com o auxílio da Equação (7) e dos dados de fator de demagnetização em função da posição do centro da amostra, mostrados na Figura 58b, é possível determinar o campo interno à amostra, levando em conta a temperatura (Figura 53) e o campo aplicado (Figura 55).

Na Figura 61 é mostrado o campo interno em função da posição do centro da amostra. Observa-se que, diferentemente do campo aplicado (mostrado na Figura 55) o campo interno é diferente para o processo em que o material se aproxima ou se afasta do ímã. Isso ocorre, pois os processos acontecem em temperaturas

diferentes, mudando a magnetização do material e, por consequência, o campo interno. A variação de temperatura do material durante os processos de aquecimento e resfriamento também altera o campo interno pelo mesmo motivo.

Figura 61 - Campo interno a amostra em função da posição.

Fonte: Autoria própria.

Com a temperatura e o campo interno sendo conhecidos, a magnetização e a entropia para a amostra podem ser facilmente interpoladas das curvas de propriedades termomagnéticas do gadolínio. A magnetização foi interpolada das curvas apresentadas na Figura 31a e a entropia foi interpolada dos dados apresentados na Figura 46b. Os valores obtidos são mostrados em função da posição na Figura 62.

Observa-se que para os processos de aproximação e afastamento do material magnético do ímã, existe uma pequena variação na entropia da amostra. Essa pequena mudança mostra que durante a movimentação da amostra uma pequena porção de calor é trocada com o ambiente, o que é normal, considerando que esse é um processo real e não ideal.

Figura 62 - (a) Magnetização em função da posição do centro da amostra. (b) Entropia relativa em relação a posição do centro da amostra.

Fonte: Autoria própria.

De posse da magnetização, do campo aplicado, da temperatura e da entropia, pôde-se construir o ciclo desenvolvido nos diagramas $M-H$ e $T-s$. A Figura 63 mostra o ciclo desenvolvido no motor do tipo Tesla da bancada experimental no diagrama $M-H$. Observa-se através dos resultados experimentais que o ciclo desenvolvido se aproxima muito de um ciclo Brayton magnético teórico (ideal), a pequena divergência entre os ciclos acontece para os processos de aproximação e afastamento do material magnético dos ímãs. Esses processos, como já discutido na Figura 62b, envolvem uma pequena troca de calor com o ambiente, o que faz com que a entropia sofra uma pequena variação.

Isso pode ser mais bem observado nos detalhes mostrados na Figura 64 para o diagrama $T-s$, onde é possível verificar a pequena mudança na entropia durante a movimentação do material. Durante o afastamento da amostra dos ímãs, extremidade direita do ciclo, a temperatura da amostra é maior que a ambiente (por volta de 295 K durante o experimento), assim, o material perde calor para o

ambiente, fazendo com que a entropia diminua ligeiramente. Durante a aproximação da amostra dos ímãs, processo representado na extremidade esquerda do ciclo, a temperatura da amostra é menor que a temperatura ambiente, assim, o gadolínio ganha calor do entorno, fazendo com que a entropia aumente ligeiramente.

Figura 63 - Ciclo termodinâmico desenvolvido pelo motor de Tesla da bancada experimental no diagrama $M-H$.

Fonte: Autoria própria.

A troca entre a amostra e o ambiente faz com que a área proporcional ao trabalho produzido por ciclo diminua ligeiramente, contudo os resultados obtidos mostram que o ciclo desenvolvido em um motor do tipo Tesla pode ser seguramente aproximado por um ciclo Brayton magnético, desde que o calor trocado durante os processos de aplicação e remoção de campo na amostra não seja significativo.

Conclui-se então que, diferentemente dos motores tipo Edison, os motores tipo Tesla descrevem um ciclo Brayton magnético durante sua operação. Sendo assim, para esses sistemas o trabalho produzido por ciclo pode ser calculado por

meio das Equações (11) a (13) para o diagrama $M-H$, e pela Equação (19) para o diagrama $T-s$.

Figura 64 - Ciclo termodinâmico desenvolvido pelo motor de Tesla da bancada experimental no diagrama $T-s$.

Fonte: Autoria própria.

Verificou-se experimentalmente que o calor é recebido da fonte quente pela amostra a campo magnético mais elevado e constante (Figura 56), dessa maneira, a Equação (20) pode realmente ser utilizada para determinar o calor requisitado da fonte quente no caso dos motores do tipo Tesla.

O estudo foi repetido mantendo-se as configurações de temperatura nas fontes e campo magnético aplicado, variando-se a carga aplicada ao motor através da mudança na diferença de altura entre reservatórios de água, corrigindo a tensão mínima na mola para cada carga aplicada. Os resultados obtidos são semelhantes aos já apresentados para o primeiro estudo.

A Figura 65 mostra o ciclo desenvolvido na bancada para uma condição onde os reservatórios estão a uma diferença de alturas por volta de 80 mm. Como a carga aplicada é menor, espera-se que o trabalho produzido por ciclo seja menor. Isso pode ser facilmente observado, comparando a área no interior do ciclo para os casos apresentados. Nota-se que, para os diagramas exibidos na Figura 65, a área no interior do ciclo é menor do que a área apresentada na Figura 63 para o diagrama $M-H$ e Figura 64 para o diagrama $T-s$, confirmando a redução do trabalho produzido por ciclo para o caso com menor carga aplicada ao motor.

Figura 65 - Ciclo termodinâmico desenvolvido no motor da bancada experimental para carga reduzida aplicada ao eixo. (a) Diagrama $M-H$. (b) Diagrama $T-s$.

Fonte: Autoria própria.

Com a redução da carga aplicada a velocidade de deslocamento do material magnético entre as fontes aumenta, e com isso o tempo de viagem da amostra reduz. Devido à redução do tempo, o material magnético troca menos calor com o ambiente durante o deslocamento, aproximando ainda mais os processos de

aplicação e redução do campo a um processo adiabático, descrevendo um ciclo ainda mais próximo do ciclo Brayton magnético.

Observa-se também que com a redução da carga aplicada, a variação de temperatura à qual a amostra de material magnético é submetida reduz, reduzindo também a diferença entre a força magnética no processo de aproximação e afastamento do ímã. De modo que essa diferença de forças é a resultante que produz trabalho no sistema.

Visto que as características dos ciclos dos motores termomagnéticos do tipo Edison e do tipo Tesla foram elencadas e discutidas, será apresentada uma breve comparação entre os sistemas.

4.3. Comparação entre os ciclos

No item 4.1.3 deste texto foram apresentados ciclos termodinâmicos para diferentes velocidades angulares desenvolvidos em um motor do tipo Edison. Esses resultados foram apresentados na Figura 48 e Figura 49, sendo comparados com um ciclo Brayton para as mesmas condições de temperatura e campo aplicado.

No item 4.2.3 concluiu-se que os motores do tipo Tesla executam sim um ciclo Brayton. Assim, pode-se considerar que os resultados apresentados na Figura 48 e Figura 49 já mostram a comparação entre os ciclos executados pelos diferentes tipos de motores termomagnéticos, isso considerando as mesmas condições de temperatura no material magnético e campo magnético aplicado.

Calculou-se então a área formada no interior do ciclo desenvolvido para o motor do tipo Edison mostrado no estudo do item 4.1, considerando as diferentes velocidades no rotor do motor, esta área é igual ao trabalho específico produzido por

ciclo. Foi considerado apenas o caso onde se leva em conta a contribuição do efeito magnetocalórico.

Buscando comparar os resultados obtidos para o motor do Tipo Edison com um motor do tipo Tesla, considerou-se o ciclo Brayton que seria desenvolvido no motor do tipo Tesla para as mesmas condições de temperatura atingidas no material magnético do motor do tipo Edison estudado (que mudam com a velocidade desenvolvida no rotor). Também foram consideradas as mesmas condições de amplitude de campo aplicado, variando de zero a 1 T.

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 66a, onde é possível observar que para todas as condições estudadas, o motor do tipo Tesla apresenta maior densidade energética. Com o aumento da velocidade do rotor do motor do tipo Edison (aumento da frequência), a diferença entre a máxima e a mínima temperatura atingidas no material magnético diminui. De modo que o aumento da velocidade angular representa uma menor diferença de temperaturas aplicada ao material magnético. Isso faz com que o trabalho produzido por ciclo diminua com o aumento da velocidade angular.

A variação de temperatura utilizada nos cálculos para o motor do tipo Tesla é a mesma variação obtida para cada uma das rotações estudadas para o motor do tipo Edison. Assim, tem-se que o trabalho específico diminui com a diminuição da diferença de temperaturas do material.

Além do trabalho específico, calculou-se a eficiência relativa à eficiência de Carnot para cada um dos tipos de motores. Considerando-se que para a fonte fria manteve-se a temperatura de 283 K e para a fonte quente manteve-se a temperatura de 303 K (mesma condição adotada no estudo apresentado no item 4.1.1), determinou-se o calor recebido pelo material magnético da fonte quente para

cada um dos motores, considerando a variação de temperaturas sofrida para cada uma das velocidades angulares do motor tipo Edison estudado.

O comportamento da eficiência relativa à eficiência de Carnot é mostrado na Figura 66b, onde é possível observar que o motor do tipo Tesla (que desenvolve um ciclo Brayton magnético) apresenta um desempenho melhor para todas as condições de variação de temperatura estudadas. Isso acontece, pois para os motores do tipo Edison existem regiões de gradiente de temperatura no material magnético onde não há aplicação de campo. O material é aquecido e resfriado a campo magnético nulo, de modo que para essas condições o calor é apenas recebido da fonte quente e rejeitado na fonte fria, não sendo parcialmente convertido em trabalho, como já discutido para a Figura 48.

Figura 66 - Comparação entre os motores do tipo Edison e tipo Tesla para as mesmas condições de temperatura do material magnético e campo magnético aplicado. (a) Trabalho específico. (b)

Eficiência relativa à eficiência de Carnot.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 49 pode ser observado que quanto mais baixa a velocidade desenvolvida no rotor do motor do tipo Edison, menos o ciclo desenvolvido difere de

um ciclo Brayton magnético. Devido a isso, o comportamento dos motores é mais próximo para pequenas velocidades angulares. Com o aumento da velocidade do rotor a diferença entre o ciclo desenvolvido em um motor do tipo Edison e um ciclo Brayton aumenta ainda mais, fazendo com que o comportamento dos motores do tipo Tesla e Edison se diferenciem.

Comparando-se os resultados obtidos conclui-se que os motores do tipo Tesla são mais vantajosos que os motores do tipo Edison no que se refere à densidade energética e eficiência de operação, parâmetros pelos quais devem ser comparados motores térmicos [3]. Assim, pode-se afirmar que os motores do tipo Tesla são mais viáveis do que os do tipo Edison do ponto de vista termodinâmico.

Essa conclusão vai à contra mão do que é apresentado na maior parte dos estudos publicados, visto que a grande maioria deles, principalmente quando se exclui os sistemas de baixíssima potência, apresentam modelos matemáticos ou protótipos dos motores tipo Edison [7], [8], [72], [81], [83], [93], [22], [36], [52], [55], [59], [61], [68], [71].

Isso provavelmente ocorre, pois não existem trabalhos anteriores a este classificando os diferentes tipos de motores termomagnéticos, mostrando as diferenças de operação e dos ciclos termodinâmicos entre eles. De modo que para ambos os tipos de motores a literatura considera que o ciclo termodinâmico desenvolvido é o mesmo, sendo esse um ciclo Brayton.

Verificada a diferença entre ciclos dos diferentes tipos de motores e concluindo que os motores termomagnéticos do tipo Tesla são mais vantajosos que os do tipo Edison, observa-se uma necessidade maior de trabalhos que explorem, modelem e testem motores do tipo Tesla.

Dito isso, será apresentado a seguir um estudo buscando validar uma metodologia para cálculo do trabalho produzido em um motor termomagnético do tipo Tesla.

5. CÁLCULO DO TRABALHO EM MOTORES TERMOMAGNÉTICOS DO TIPO TESLA

No capítulo anterior demonstrou-se analítica e experimentalmente que os motores termomagnéticos do tipo Tesla descrevem um ciclo termodinâmico que pode ser aproximado por um ciclo Brayton magnético. Porém não foram apresentados dados comparando o trabalho produzido no motor testado e os previstos considerando o ciclo Brayton magnético.

Nesse capítulo será apresentado um protótipo de motor termomagnético do tipo Tesla, sendo medido o trabalho produzido por ciclo nesse dispositivo para diferentes condições de temperatura. Posteriormente será calculado analiticamente o trabalho que deveria ser produzido no dispositivo, e os resultados analíticos e experimentais serão comparados. É importante destacar que o objetivo do protótipo construído é validar o método analítico utilizado para o cálculo do trabalho, não sendo o sistema projetado construído objetivando maximizar a potência e eficiência de operação.

5.1. Motor termomagnético construído

Na Figura 50 foi apresentada uma bancada experimental na forma de motor termomagnético do tipo Tesla, onde era preciso ajustar a tensão mínima na mola da guia linear para cada condição de carga aplicada ao motor. Para evitar esse problema, uma segunda versão da bancada experimental foi construída, mostrada na Figura 67. Foi adicionado ao conjunto mais uma fonte quente, uma fonte fria e outra amostra de material magnético.

Figura 67 - Motor termomagnético do tipo Tesla construído para verificação do trabalho produzido por ciclo.

Fonte: Autoria própria.

Nesse sistema o afastamento da amostra não se dá pela ação da força elástica da mola, mas sim pela força magnética de atração entre a segunda amostra adicionada e o novo circuito magnético. Assim, enquanto a amostra do lado direito do conjunto está em contato com a fonte quente (lado direito) e próxima ao circuito magnético (lado direito), a amostra do lado esquerdo está trocando calor com a fonte fria (lado esquerdo) e afastada do circuito magnético (lado esquerdo). Quando a força que atua na amostra do lado direito é superada pela força que atua na amostra do lado esquerdo, o chassi móvel se desloca da direita para a esquerda, e o sistema realiza trabalho. A amostra do lado direito é então colocada em contato com a fonte fria, e a amostra do lado esquerdo é colocada em contato com a fonte quente.

Com a diminuição da temperatura da amostra do lado direito, a força magnética de atração entre o circuito magnético e essa amostra começa a aumentar. Do lado esquerdo, a força de atração entre o circuito magnético e a

amostra começa a diminuir devido ao aumento de temperatura dessa amostra. Quando a força que atua na amostra do lado direito supera a força que atua na amostra do lado esquerdo, o conjunto se desloca da esquerda para a direita, realizando trabalho e voltando à posição inicial.

Os circuitos magnéticos usados no sistema são idênticos aos mostrados na Figura 54. Como fontes quentes e frias foram utilizados elementos Peltier idênticos aos utilizados na bancada mostrada na Figura 50. Optou-se pelos Peltier, pois foram ensaiadas diferentes condições de temperatura nos estudos, sendo a temperatura das fontes facilmente ajustadas, apenas alterando a diferença de potencial elétrico nos terminais dos elementos Peltier.

Para mensurar o trabalho produzido no sistema foi utilizada a bomba de água do tipo diafragma, mostrada na Figura 51, que teve seu diafragma ligado ao chassi móvel do motor termomagnético, conforme representado na Figura 67. Assim, quando o chassi se movimentava, o trabalho produzido no motor era transferido à bomba de água.

A bomba estava ligada ao reservatório de água pelo circuito hidráulico representado na Figura 67. Quando o chassi móvel se deslocava da esquerda para a direita, a câmara da bomba se enchia, extraíndo água do reservatório. Quando o chassi se deslocava da direita para a esquerda, a água era expulsa da câmara da bomba e retornava ao reservatório.

A energia mecânica do motor era dissipada devido à ação das forças viscosas no circuito hidráulico. Para determinar a energia dissipada, foram instalados dois sensores de vazão mássica no circuito hidráulico, um para determinar a vazão de entrada e outro a de saída da bomba. Também foram instalados sensores de pressão na linha, determinando a perda de carga no circuito hidráulico. O circuito

hidráulico ainda possuía duas válvulas para ajuste da perda de carga. De modo que essas foram ajustadas para que a perda de carga fosse igual na linha entre o reservatório e a bomba, e na linha entre a bomba e o reservatório. Após o ajuste das válvulas, essas não tiveram sua posição alterada durante os ensaios.

As temperaturas no sistema foram determinadas por termopares, instalados nas fontes quentes, frias e nas amostras de material magnético. A posição do chassi móvel foi determinada por um sensor de efeito Hall. O curso do motor, representado por “c” na Figura 67, foi mantido em 3 mm durante os ensaios realizados.

Ajustou-se a diferença de potencial elétrico nos terminais dos elementos Peltier para que a temperatura das fontes quentes se situasse ao redor de 298 K, e das fontes frias ao redor de 283 K. Manualmente, travou-se o movimento do chassi móvel, mantendo a amostra do lado direito em contato com a fonte fria, e a amostra do lado esquerdo em contato com a fonte quente. Quando as amostras alcançaram o equilíbrio térmico com a fonte de calor com a qual faziam contato, o chassi era liberado. Devido à ação da força resultante atuando no chassi, esse se deslocou da direita para a esquerda, movendo o diafragma da bomba.

Na nova posição, a amostra do lado direito trocou calor com a fonte quente, enquanto a amostra do lado esquerdo trocou calor com a fonte fria, o chassi foi mais uma vez travado manualmente, mantendo o conjunto estático até o equilíbrio térmico ser alcançado. Ao se alcançar o equilíbrio térmico entre as amostras e as fontes, o chassi foi mais uma vez liberado, deslocando-se de volta para a posição inicial, e mais uma vez atuando no diafragma da bomba. O procedimento descrito foi repetido quatro vezes.

Na Figura 68 são mostradas as temperaturas das amostras ao longo do experimento para os quatro ciclos do motor. Observa-se que, como o sistema ficou

travado até atingir o equilíbrio térmico com as fontes, o tempo para completar um ciclo é longo, por volta de 260 segundos em média. Para aplicações de motores termomagnéticos, deve-se buscar minimizar o período de troca térmica, contudo, como o objetivo do sistema construído era verificar a metodologia analítica para cálculo do trabalho produzido por ciclo, não se buscou diminuir o período.

Figura 68 - Temperatura nas amostras em função do tempo para T_{Cold} ao redor de 283 K e T_{Hot} ao redor de 298 K para os 4 ciclos realizados pelo motor.

Fonte: Autoria própria.

Além da temperatura das amostras, foram registradas a perda de carga e a vazão mássica de água no circuito hidráulico, conforme mostrado na Figura 69 e Figura 70, respectivamente. A potência (P_{ot}) produzida no sistema pôde ser calculada utilizando-se da Equação (25), ϑ é a vazão mássica de água, $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água e ΔP representa a perda de carga na linha. Na Figura 71 é mostrada a potência calculada para o ensaio.

$$P_{ot} = \frac{\vartheta}{\rho_{\text{água}}} \cdot \Delta P \quad (25)$$

Figura 69 – (a) Perda de carga no circuito hidráulico. (b) Detalhe da perda de carga no pulso indicado.

$T_{\text{Cold}} \sim 283 \text{ K}$ e $T_{\text{Hot}} \sim 298 \text{ K}$.

Fonte: Autoria própria.

Figura 70 – (a) Vazão mássica no circuito hidráulico. (b) Detalhe da vazão mássica no pulso indicado.

T_{Cold} ao redor de 283 K e T_{Hot} ao redor de 298 K

Fonte: Autoria própria.

Conhecendo o perfil da potência ao longo do tempo, foi possível calcular o trabalho total (W_{Tot}) realizado durante todo o experimento com uso da Equação (26). Para determinar o trabalho específico, utilizou-se a Equação (27), m é a massa de

material magnético no sistema e n o número de ciclos realizados. Para os resultados mostrados na Figura 71, o trabalho específico foi de 5,25 J para a condição onde a fonte fria estava por volta de 283 K e a fonte quente por volta de 298 K.

Figura 71 - (a) Potência da bomba de diafragma. (b) Detalhe da potência no pulso indicado. $T_{\text{Cold}} \sim$

283 K e $T_{\text{Hot}} \sim 298$ K.

Fonte: Autoria própria.

$$W_{\text{Tot}} = \int Pot. dt \quad (26)$$

$$w = \frac{W_{\text{Tot}}}{n \cdot m} \quad (27)$$

O procedimento experimental foi repetido para outras condições de temperaturas, os resultados obtidos são mostrados na Figura 72. É importante destacar que, num primeiro momento, foi considerada uma eficiência na bomba de diafragma de 100%.

Figura 72- Trabalho específico do motor construído considerando uma eficiência de 100 % na bomba de diafragma.

Fonte: Autoria própria.

Agora que já foram levantadas as curvas de trabalho específico em função das temperaturas das fontes quando o material termomagnético atinge o equilíbrio térmico com essas, será apresentado o cálculo analítico do trabalho para o motor termomagnético do tipo Tesla construído.

5.2. Procedimento para o cálculo analítico do trabalho pelo Método da Força.

No Capítulo 3 deste texto provou-se experimentalmente que a força magnética em um material magnético submetido a um gradiente de campo deve ser calculada com uso da Equação (23). De modo que, para se aplicar a equação, é necessário conhecer o perfil de campo magnético e a magnetização do material.

Em um motor termomagnético a temperatura provoca uma importante mudança na magnetização do material magnético (efeito termomagnético). A magnetização de um material magnético, para ser considerada uma propriedade do

material, excluindo a influência da geometria, deve ser determinada em função do campo interno. Com isso em mente, a equação de força magnética atuando no material pode ser escrita conforme mostrado na Equação (28), quando considerada uma variação de campo magnético uniaxial (direção x). V é o volume de material magnético, H_{int} é o campo magnético interno ao material e N o fator de demagnetização.

$$F_{mag} = V\mu_0 M(H_{int}, N, T) \frac{dH}{dx} \quad (28)$$

No motor termomagnético ensaiado, mostrado na Figura 67, $H(x)$ é conhecido, mostrado na Figura 55, e $N(x)$, mostrado na Figura 58b, para a amostra no interior do campo aplicado pelo circuito magnético. Conhecendo-se a temperatura é possível determinar a magnetização (M) das amostras de material magnético através dos dados mostrados na Figura 31b, utilizando-se a Equação (7) para determinar o H_{int} . De posse do H_{int} e da temperatura pode-se determinar a entropia s do material com o uso dos dados mostrados na Figura 46b.

Para o cálculo da força magnética que atua em uma das amostras do motor, considerou-se que esta estava na posição inicial x_0 , e a uma temperatura inicial T_0 . Como $N(x_0)$ e $H(x_0)$ são conhecidos, é possível determinar $M(x_0)$, $H_{int}(x_0)$ e $s(x_0)$.

Aplicou-se então um pequeno deslocamento Δx na amostra, de modo que esta chegasse à posição x_1 . Nessa posição $H(x_1)$ e $N(x_1)$ são conhecidos. Em um motor termomagnético do tipo Tesla o deslocamento do material magnético pode ser considerado um processo que ocorre de forma adiabática e reversível, assim tem-se que $s(x_0)$ é igual a $s(x_1)$ que é igual à entropia em qualquer posição durante esse deslocamento $s(x_i)$.

Devido ao efeito magnetocalórico a temperatura do material muda com o deslocamento devido à mudança do campo magnético aplicado. Determinou-se então a variação de temperaturas na amostra, considerando a mudança de $H(x_0)$ para $H(x_1)$ e mantendo-se a entropia constante. A mudança de temperatura foi interpolada dos dados mostrados na Figura 46b. A temperatura da amostra ao longo do deslocamento pode ser generalizada através da Equação (29), i representa o número de deslocamentos de amplitude Δx aplicados, x_i é a posição atual do centro da amostra e x_{i-1} é a posição ocupada pela amostra antes do último deslocamento. $\Delta T(x_i)$ representa a mudança de temperatura devida ao efeito magnetocalórico para uma variação de campo de $H(x_{i-1})$ até $H(x_i)$. Vale destacar que antes de se aplicar o primeiro deslocamento, a temperatura do material é T_0 , sendo esse o valor de $T(x_0)$.

$$T(x_i) = T(x_{i-1}) + \Delta T(x_i) \quad (29)$$

Aplicou-se a Equação (29) para a amostra do lado esquerdo do motor representado na Figura 67, calculando-se $T(x)$ para diferentes condições de T_0 considerando o processo de deslocamento adiabático. Os resultados obtidos através do cálculo foram comparados com resultados experimentais das medidas de temperatura da amostra do motor construído. Esses resultados são mostrados na Figura 73, para x_0 igual a 1,5 mm, e considerando um Δx de 50 μm . Para esse ensaio o circuito magnético do lado direito foi removido, assim a força magnética resultante atuando no conjunto era igual à força magnética de atração entre a amostra do lado esquerdo e o circuito magnético também do lado esquerdo.

Figura 73 - Temperatura na amostra em função da posição para diferentes T_0 durante o deslocamento. Os pontos representam valores experimentais. As linhas representam valores calculados através da Equação (29). $x_0 = 1,5$ mm.

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os valores de temperatura em função da posição obtidos através do cálculo preveem muito bem os resultados experimentais. Existe uma pequena diferença nas temperaturas calculadas e medidas que pode ser associada à troca de calor durante o deslocamento da amostra. No processo real tem-se que o deslocamento se dá na presença de uma pequena troca de calor com o entorno. Para as temperaturas iniciais mais baixas a amostra recebe uma pequena quantia de calor do ambiente. Para as temperaturas iniciais mais altas a amostra rejeita um pouco de calor.

Observa-se também que, para as temperaturas mais elevadas (mostradas na Figura 73c), a divergência entre os resultados calculados e experimentais é maior do que nas temperaturas mais baixas. Isso se deve ao fato de que a força magnética que atua na amostra para as temperaturas de 298 K e 303 K é muito menor que nas condições mostradas na Figura 73a e Figura 73b, visto que para as temperaturas

maiores, a amostra encontra-se no estado paramagnético. Com a diminuição da força a velocidade de deslocamento da amostra diminui, e ela passa mais tempo rejeitando calor para o ambiente, causando a maior divergência entre os resultados medidos e calculados.

No motor termomagnético mostrado na Figura 67 existem duas amostras de material magnético. Nos cálculos mostrados a seguir considerou-se que a amostra do lado esquerdo está inicialmente fria, a uma temperatura T_{0Fria} de 283 K, e em contato com a fonte fria. Já a amostra do lado direito está inicialmente quente, à temperatura $T_{0Quente}$ de 298 K e em contato com a fonte quente.

A Figura 74 mostra as temperaturas das amostras em função do deslocamento do chassi móvel, calculadas através da metodologia que usa a Equação (29). Na posição inicial tem-se x_0 igual a 1,5 mm. O chassi móvel se desloca 3 mm, da direita para a esquerda, até que a amostra do lado esquerdo entre em contato com a fonte quente, e a amostra do lado direito entre em contato com a fonte fria, na posição x igual a -1,5 mm (posição final).

Figura 74 - Temperaturas calculadas para as amostras do motor termomagnético durante o deslocamento do chassi móvel considerando $T_{0Frio} = 283$ K e $T_{0Quente} = 298$ K, $x_0 = 1,5$ mm.

Fonte: Autoria própria.

Como esperado, a amostra da esquerda, que se aproxima da região de campo mais intenso, tem sua temperatura aumentada. Já a amostra da direita, que se afasta da região de campo mais elevado, sofre uma redução de temperatura.

Simultaneamente ao cálculo da temperatura em função da posição, determinou-se a magnetização das amostras e o gradiente de campo magnético aplicado a elas. Para o cálculo da magnetização, utilizou-se os valores de $H(x)$, $N(x)$ e $T(x)$. Os resultados calculados são mostrados na Figura 75.

Figura 75 - (a) Magnetização em função da posição da amostra durante o deslocamento do chassi móvel. $T_{0Frio} = 283$ K e $T_{0Quente} = 298$ K, $x_0 = 1,5$ mm. (b) Gradiente de campo em função da posição.

Fonte: Autoria própria.

Uma vez determinados a magnetização e o gradiente de campo aplicado, bastou calcular a força magnética que atua em cada uma das amostras utilizando a Equação (28). A força magnética resultante que atua no motor pôde ser calculada pela Equação (30). $F_{MagEsquerda}$ era a força magnética que atuava na amostra da esquerda, e $F_{MagDireita}$ era a força magnética que atuava na amostra da direita. A Figura 76 apresenta as forças magnéticas atuando nas amostras e a força

magnética resultante, obtidas através da metodologia descrita, considerando

$T_{0Frio} = 283 \text{ K}$, $T_{0Quente} = 298 \text{ K}$ e $x_0 = 1,5 \text{ mm}$.

$$F_{MagR} = F_{MagEsquerda} + F_{MagDireita} \quad (30)$$

Figura 76 - Força magnética calculada no chassi móvel durante seu deslocamento. $T_{0Frio} = 283 \text{ K}$ e

$T_{0Quente} = 298 \text{ K}$, $x_0 = 1,5 \text{ mm}$. Deslocamento da direita para esquerda.

Fonte: Autoria própria.

O trabalho realizado pela força magnética resultante durante o deslocamento foi calculado pela Equação (31), x_f representa a posição final e x_0 a posição inicial. Para completar um ciclo, o chassi móvel deve voltar à posição inicial. Considerando que o retorno acontece quando a temperatura da amostra da direita é T_{0Frio} , e a temperatura da amostra da esquerda é $T_{0Quente}$, tem-se que o trabalho total realizado por ciclo é igual ao dobro de W_{MagR} . Assim, o trabalho específico realizado por ciclo do motor pôde ser obtido através da Equação (32). Na equação m é a massa de uma amostra usada no motor. Para o resultado mostrado na Figura 76, o trabalho específico produzido por ciclo calculado foi de $5,41 \text{ J/kg}$.

$$W_{MagR} = \int_{x_0}^{x_f} F_{MagR} dx \quad (31)$$

$$w_{Res} = \frac{2W_{MagR}}{2m} = \frac{W_{MagR}}{m} \quad (32)$$

A metodologia descrita foi repetida, alterando-se os valores de T_{0Frio} e $T_{0Quente}$, os valores de trabalho calculados são mostrados na Figura 77, onde também foram incluídos os dados experimentais de trabalho, já mostrados na Figura 72. Destaca-se aqui que para algumas condições de temperaturas iniciais, F_{MagR} apresenta trechos com valores negativos, e para essas condições o motor ficaria travado na posição inicial (desconsiderando-se a força elástica que atua no chassi), dessa forma foram excluídas as situações onde a força magnética resultante no sistema apresenta valores negativos, garantindo a condição necessária para que o deslocamento ocorra.

Figura 77- Trabalho específico para diferentes condições de temperatura inicial. Linhas representam os valores calculados. Pontos representam os dados experimentais da Figura 72.

Fonte: Autoria própria.

Pode ser observado na comparação entre os resultados experimentais e calculados que a metodologia utilizada descreve bem o comportamento do trabalho de um motor termomagnético do tipo Tesla. Observou-se uma pequena divergência entre os resultados obtidos experimentalmente e com a metodologia aplicada. Contudo isso pode ser facilmente explicado se for levado em conta que a eficiência da bomba de água utilizada nos ensaios não tem uma eficiência de conversão de 100 %. Além disso, perdas, como as induzidas por correntes parasitas na amostra, não foram computadas.

Na metodologia descrita considera-se que os processos de deslocamento das amostras acontecem de forma adiabática. Contudo, como mostrado nos resultados e conclusões apresentados no item 4.2.3 deste texto, o material magnético troca um pouco de calor durante sua movimentação, e essa troca de calor reduz ligeiramente a área proporcional ao trabalho no ciclo termodinâmico, quando comparado a um ciclo Brayton magnético ideal.

Mesmo com a diferença entre o ciclo real e o ideal desenvolvido no motor termomagnético estudado, com a consideração de uma eficiência de 100 % na conversão de energia na bomba de água, e desprezando outras perdas no sistema, a maior divergência apresentada entre os valores medidos e calculados foi menor que 9 % do valor medido.

Com isso conclui-se que a metodologia para o cálculo do trabalho descrita nesse capítulo apresenta previsões muito boas com relação ao trabalho produzido em um motor termomagnético do tipo Tesla.

No item 4.2 provou-se que os motores termomagnéticos do tipo Tesla operam em um ciclo termodinâmico muito próximo a um ciclo Brayton magnético teórico. De modo que, além do método descrito nesse capítulo, chamado de Método da Força,

pode ser aplicado o método da análise por ciclo termodinâmico, mostrado no item 1.5.2, utilizando-se a Equação (13) ou a Equação (19) para se determinar o trabalho específico gerado por ciclo.

O Método da Força utiliza equações derivadas das equações do método da análise por ciclo termodinâmico, assim ambos os métodos retornam os mesmos resultados. Contudo, o Método da Força exige o conhecimento do perfil de campo magnético aplicado e sua distribuição ao longo do espaço. Enquanto para o método da análise por ciclo termodinâmico é necessário conhecer apenas os campos aplicados ao material magnético na posição inicial e na final do curso do motor.

Por outro lado, ao se utilizar o Método da Força, é possível identificar se o motor partirá para a condição de temperaturas estabelecida, observando se a força resultante que atua na a parte móvel do motor aponta na direção em que o deslocamento deve ocorrer. Essa verificação não é possível com o método da análise por ciclo termodinâmico. A Figura 78 mostra a força magnética resultante atuando no motor da Figura 67, para a condição onde T_{0Frio} é igual a 283 K e $T_{0Quente}$ igual a 288 K. Observa-se que na posição x_0 (1,5 mm), a força magnética que atua no conjunto é negativa, o que significa que ela aponta no sentido oposto ao do movimento que deve ser realizado pelo chassi móvel. Desta maneira, o motor não parte (aqui foi desprezada a força elástica no sistema, visto que para o conjunto em questão ela é muito pequena).

Ao se aplicar o método da análise por ciclo termodinâmico no motor em questão conclui-se que o trabalho específico realizado no motor, para uma variação de temperatura entre 283 e 288 K, uma variação de campo magnético de $H(x = 1,5 \text{ mm})$ até $H(x = -1,5 \text{ mm})$ é de aproximadamente 1,86 J/kg. Esse é mesmo valor encontrado ao se aplicar o Método da Força. Contudo, por apresentar valor de força

resultante negativa na posição x_0 , sabe-se que o motor não partirá, logo, nenhum trabalho será produzido.

Figura 78 - Força magnética calculada no chassi móvel. $T_{0Frio} = 283$ K e $T_{0Quente} = 288$ K. $x_0 = 1,5$ mm.

Fonte: Autoria própria.

Desse modo, pode-se dizer que um motor termomagnético irá produzir trabalho apenas para as condições em que a força resultante (F_R) que atua na parte móvel do sistema apontar no sentido em que o deslocamento deve ocorrer. Aplicando-se a primeira lei de Newton a um motor termomagnético do tipo Tesla, tem-se a Equação (33). F_{Carga} representa a carga aplicada ao motor, F_{Mancal} representa a força exercida pelo mancal utilizado no motor, no caso do motor construído corresponde à força elástica. $F_{Reações}$ representa forças reativas resultantes, no caso do motor construído, a força de reação exercida pelas fontes de calor nas amostras magnéticas. m_m é a massa móvel no motor, e a é a aceleração desta parte móvel.

$$F_R = F_{MagR} + F_{Carga} + F_{Mancal} + F_{Reações} = m_m a \quad (33)$$

Quando o motor está trocando calor com as fontes não há movimento no conjunto, logo a é zero. Tem-se então que F_{MagR} é igual à soma de F_{Carga} , F_{Mancal} e $F_{Reações}$. Ao se atingir as condições de temperatura em que $F_{Reações}$ é igual a zero, o motor está na iminência do movimento. As forças que atuam no sistema nesse momento são F_{MagR} , F_{Carga} e F_{Mancal} .

No motor ensaiado, representado na Figura 67, a carga é aplicada apenas quando o sistema está em movimento, visto que toda a energia era dissipada apenas pela força viscosa do escoamento de fluido, não havendo diferença de alturas no reservatório de água. Assim, no instante anterior ao início do movimento tem-se que F_{Carga} é nulo.

F_{Mancal} no motor construído é uma força elástica, resultante da soma da força na mola e a força elástica exercida pela deformação do diafragma da bomba de água. Determinou-se que no sistema estudado a constante elástica resultante da associação em paralelo da mola do mancal e do diafragma da bomba é de aproximadamente a 0,79 N/mm.

Vale lembrar aqui que a força elástica não produz trabalho durante o deslocamento, sendo a energia elástica uma energia conservativa. A energia acumulada na mola na posição inicial é devolvida ao sistema para deformá-la até a posição final. A única força que produz trabalho no conjunto é a força magnética. Apesar de não produzir trabalho, F_{Mancal} modifica a força resultante, o que altera a condição de temperatura necessária para o motor partir.

A Figura 79 apresenta a mínima diferença de temperaturas entre a amostra do lado direito e a amostra do lado esquerdo para garantir que a F_R não seja negativa na posição x_0 , considerando diferentes valores de curso para o motor construído, representado por c na Figura 67. Observa-se que com o aumento do

curso é preciso aplicar uma diferença maior de temperatura entre as amostras de material magnético. Isso ocorre, pois quanto maior o curso do motor menores são o campo magnético aplicado, a magnetização e o gradiente de campo aplicado à amostra que está em contato com a fonte fria.

Figura 79- Mínima diferença de temperaturas para garantir que o motor funcione.

Fonte: Autoria própria.

O resultado apresentado na Figura 79 é válido apenas para o motor construído, já que a diferença mínima de temperaturas entre as amostras muda de acordo com o fator de demagnetização, o perfil de campo magnético aplicado, além é claro, das propriedades do material magnético.

Conclui-se então que o Método da Força para o cálculo do trabalho deve ser utilizado quando se conhece a distribuição de campo magnético, sendo possível através dele determinar as condições específicas de temperatura que garantam o funcionamento do motor, sendo esse método mais interessante para o uso no projeto de motores termomagnéticos do tipo Tesla. Para cálculos mais generalistas, onde se busca verificar o potencial de uso de diferentes materiais magnéticos,

influência de propriedades físicas, potencial de uso da tecnologia, pode ser utilizada a abordagem de análise de ciclo termodinâmico.

Agora que as metodologias para o cálculo do trabalho específico em um motor termomagnético do tipo Tesla foram explicadas e experimentalmente validadas, apresentam-se no capítulo a seguir estudos que fazem uso das metodologias descritas, abordando o comportamento dos motores termomagnéticos do tipo Tesla.

6. CARACTERIZAÇÃO DOS MOTORES TERMOMAGNÉTICOS DO TIPO TESLA

Em um motor termomagnético, parâmetros como temperatura, campo magnético aplicado, fator de demagnetização e tipo de transição magnética influenciam o desempenho e comportamento da máquina. Através da abordagem pela análise por ciclo termodinâmico é possível verificar, de forma generalista, como cada um desses parâmetros modifica o comportamento de um motor termomagnético do tipo Tesla.

Feito isso, é possível aplicar o Método da Força, descrito no capítulo anterior, para auxiliar no desenvolvimento de um motor termomagnético tipo Tesla, levando em conta as conclusões sobre a influência dos parâmetros que contribuam para maximizar o desempenho da máquina.

Aplicou-se a abordagem pela análise de ciclo para determinar como cada parâmetro influencia o comportamento do motor termomagnético, e a partir das conclusões dessa análise, buscou-se propor um motor termomagnético do tipo Tesla, verificando seu comportamento através do Método da Força. Esses estudos são mostrados a seguir.

6.1. Análise generalista dos motores termomagnéticos tipo Tesla

Para a abordagem pela análise de ciclo apresentada considerou-se um motor termomagnético como o mostrado na Figura 80a. Duas porções de material magnético (MM) com mesma massa, uma em contato com a fonte fria e outra em contato com a fonte quente, são ligadas pelo pistão para extração de trabalho. Considerou-se que quando MM1, em contato com a fonte fria, atinge a temperatura

T_{0Fria} , e MM2, em contato com a fonte quente, atinge a temperatura $T_{0Quente}$, o pistão do motor se desloca devido à ação da força magnética resultante no conjunto. Devido ao deslocamento, MM1 sofre uma variação de campo que vai de H_0 até H_f , quando entra em contato com a fonte quente. Já o MM2 sofre uma variação de campo que vai de H_f até H_0 , entrando em contato com a fonte fria. Na nova posição, mostrada na Figura 80b, MM1 recebe calor da fonte quente até atingir $T_{0Quente}$, enquanto MM2 rejeita calor para fonte fria até atingir a temperatura T_{0Frio} . Nesse momento o motor retorna para a posição inicial devido à ação da força magnética resultante no sistema.

Figura 80 - Modelo de motor termomagnético do tipo Tesla para aplicação da abordagem pela análise de ciclo.

Fonte: Autoria própria.

A abordagem pela análise de ciclo foi aplicada a esse modelo considerando que MM1 e MM2 encontravam-se a uma temperatura homogênea de T_{0Fria} ou $T_{0Quente}$. O fator de demagnetização N foi considerado igual para ambas as porções de material. Os resultados obtidos são mostrados a seguir para diferentes condições de temperaturas, campo aplicado e fator de demagnetização. Considerou-se MM1 e MM2 feitos de gadolínio, com as propriedades magnéticas apresentadas em [90].

Também foram feitos estudos considerando outros materiais, esses com transição de primeira ordem, a fim de verificar a influência do tipo da transição no comportamento dos motores tipo Tesla.

6.1.1. Influência da temperatura

Para a verificação da influência da temperatura, considerou-se um H_0 de 0 T, H_f de 1,5 T, e o N igual a 0. O trabalho específico produzido por ciclo para essas condições é mostrado na Figura 81. Tem-se que quanto maior a diferença de temperaturas aplicada ao material, maior é o trabalho específico produzido por ciclo no motor. Mais à frente será mostrado que esse aumento do trabalho atinge um limite, onde mesmo com o aumento da diferença de temperaturas o trabalho produzido mantém-se constante.

Figura 81 - Trabalho específico em função das temperaturas atingidas em MM1 e MM2.

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se também que para o material testado (gadolínio, com transição de segunda ordem), mesmo para condições onde o material opera sem sofrer transição magnética, há geração de trabalho. Considerando um motor em que o material magnético opere com T_{0Frio} igual a 278 K na Figura 81, esse produzirá trabalho para $T_{0Quente}$ menores que o T_C do gadolínio (~293 K), sendo que para essa condição o material apresenta-se sempre no estado ferromagnético. O mesmo também é verdade para um motor onde T_{0Frio} é maior que o T_C do material, sendo que nesta condição o material opera apenas no estado paramagnético.

Isso ocorre, pois na transição magnética de segunda ordem, a variação da magnetização ocorre de forma gradual e para um longo intervalo de temperaturas, assim, mesmo operando apenas no estado ferromagnético ou paramagnético, existe uma diferença na força magnética que atua em MM1 e MM2 devido à diferença na magnetização causada pelas diferentes temperaturas T_{0Frio} e $T_{0Quente}$.

O calor necessário para aquecer o material magnético até $T_{0Quente}$ foi determinado por meio da Equação (20). Determinado o calor, calculou-se a eficiência η esperada para o motor com a Equação (21), os resultados obtidos são mostrados na Figura 82.

O comportamento de η muda de acordo com o estado magnético em que o material frio se encontra. Quando este está na fase ferromagnética, para um mesmo T_{0Fria} , a eficiência aumenta com o aumento de $T_{0Quente}$, até que um ponto de máximo é alcançado. A partir desse momento, η diminui com o aumento de $T_{0Quente}$. Para essa condição o ponto de máxima eficiência muda de acordo com T_{0Fria} , de modo que quanto menor for T_{0Fria} , maior é o valor de $T_{0Quente}$ onde o ponto de máxima eficiência acontece. Ainda é possível observar que $T_{0Quente}$ para o ponto de máxima eficiência é sempre maior que o T_C do material, o que mostra que um motor que opera

transicionando entre os estados ferromagnético e paramagnético é mais eficiente do que um motor que opera apenas no estado ferromagnético.

Figura 82 - Eficiência em função das temperaturas atingidas em MM1 e MM2.

Fonte: Autoria própria.

Para os casos onde T_{0Frio} é maior que o T_C do material, isto é, com o motor operando apenas no estado paramagnético, a eficiência sempre diminui com o aumento de $T_{0Quente}$. Apesar da eficiência para algumas condições de temperaturas nessa situação serem elevadas, o trabalho produzido por ciclo é baixo (vide Figura 81). Conclui-se que do ponto de vista da eficiência é interessante para o motor operar em condições onde a transição magnética aconteça.

A eficiência relativa à eficiência de Carnot η_{rel} foi calculada com a Equação (22). Para isso considerou-se que o material alcançava o equilíbrio térmico com a fonte com a qual trocava calor, dessa forma, T_{0Fria} é igual à temperatura da fonte fria (T_{Cold}), e $T_{0Quente}$ é igual à temperatura da fonte quente (T_{Hot}). A Figura 83 apresenta o comportamento de η_{rel} em função de T_{0Frio} e $T_{0Quente}$ para a condição descrita. Conclui-se que no motor termomagnético η_{rel} é máximo para a condição de

temperaturas onde o trabalho é mínimo. De modo que o ponto de máximo de η_{rel} respeita a condição mostrada na Equação (34), ΔT_{ad} é a variação de temperatura devido ao efeito magnetocalórico, considerando uma variação adiabática do campo magnético no material que está inicialmente à temperatura T_{0Frio} .

$$T_{0Quente} = T_{0Frio} + \Delta T_{ad} \quad (34)$$

Figura 83 - Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função das temperaturas atingidas em MM1 e MM2, considerando que MM1 e MM2 entram em equilíbrio térmico com a fonte com que fazem contato antes do movimento.

Fonte: Autoria própria.

Para um mesmo T_{0Frio} , η_{rel} diminui com o aumento de $T_{0Quente}$, quando considerado que o equilíbrio térmico entre o material magnético e a fonte com a qual troca calor é atingido. Tem-se então que motores termomagnéticos do tipo Tesla operando com pequenas diferenças de temperatura apresentam eficiência próxima à máxima eficiência possível em uma máquina térmica.

Para a condição onde a Equação (34) é verdadeira, tem-se também o mínimo trabalho produzido. Para o material considerado no estudo, com transição de segunda ordem, o mínimo trabalho produzido é zero. De modo que para o sistema funcionar tem-se que o trabalho produzido deve ser maior que zero. Assim, é possível determinar o menor valor de T_{Hot} para um determinado T_{Cold} que garanta que o trabalho produzido seja maior que zero, bastando substituir na Equação (34) $T_{0Quente}$ por T_{Hot} e T_{0Frio} por T_{Cold} , chegando à Equação (35). Caso a condição estabelecida na Equação (35) não seja verificada, o sistema irá operar como um refrigerador magnetocalórico, necessitando que trabalho seja inserido na máquina.

$$T_{Hot} > T_{Cold} + \Delta T_{ad} \quad (35)$$

Também é possível operar os motores sem que o equilíbrio térmico entre os materiais e as fontes de calor seja estabelecido, uma vez que estabelecer essa condição demanda grandes períodos de troca térmica. Para se reduzir o período de um ciclo é possível fazer com que T_{Cold} seja menor que T_{0Fria} e T_{Hot} maior que $T_{0Quente}$. Com a mudança da temperatura das fontes, a eficiência de Carnot se altera, mudando os valores de η_{rel} .

A Figura 84a mostra η_{rel} considerando que T_{Hot} é 1 % maior que $T_{0Quente}$, e que T_{Cold} é 1% menor que T_{0Fria} . A mesma consideração foi feita para a Figura 84b e Figura 84c, porém a variação considerada foi de 5% e 10% respectivamente. Com o aumento da diferença entre as temperaturas atingidas pelos materiais e as temperaturas das fontes, o valor máximo de η_{rel} diminui.

Figura 84 - Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função das temperaturas atingidas em MM1 e MM2. (a) $T_{Hot} = 1,01T_{0Quente}$ e $T_{Cold} = 0,99T_{0Frio}$. (b) $T_{Hot} = 1,05T_{0Quente}$ e $T_{Cold} = 0,95T_{0Frio}$. $T_{Hot} = 1,1T_{0Quente}$ e $T_{Cold} = 0,9T_{0Frio}$. Legendas iguais às mostradas na Figura 83.

Fonte: Autoria própria.

Além disso, o perfil das curvas também se altera, mudando para cada uma das condições estudadas. Para a variação de 10%, o máximo η_{rel} não acontece para a condição de trabalho mínimo produzido. Com o aumento na diferença entre as temperaturas das fontes e as atingidas nos materiais, o comportamento de η_{rel} se aproxima do comportamento de η , mostrado na Figura 82.

Quanto à influência da temperatura no desempenho dos motores termomagnéticos do tipo Tesla, conclui-se que:

- Quanto maior a diferença de temperaturas atingida pelos materiais magnéticos, maior é o trabalho produzido por ciclo.
- A eficiência do sistema muda de acordo com as temperaturas atingidas no material, passando por pontos de máximo.
- Motores operando em condições de temperatura que garantam a transição entre os estados ferromagnético e paramagnético do material

apresentam uma melhor relação entre trabalho produzido por ciclo e eficiência.

- Ao operar em condições que o material magnético entra em equilíbrio térmico com a fonte com a qual troca calor, a eficiência do sistema se aproxima da eficiência de Carnot para pequenas diferenças de temperaturas entre as fontes. Contudo, o trabalho produzido por ciclo se aproxima de zero. Ao se aumentar a diferença de temperaturas entre as fontes, mantendo a condição de equilíbrio térmico, tem-se uma redução da eficiência relativa à eficiência de Carnot, contudo, o trabalho produzido por ciclo aumenta. De modo que é preciso adotar uma solução de compromisso, garantindo que seja produzida uma quantidade razoável de trabalho por ciclo, mantendo uma eficiência relativa à eficiência de Carnot aceitável.
- Ao se aumentar a diferença de temperaturas entre as fontes de calor e as temperaturas atingidas pelo material, tem-se uma redução da eficiência relativa à eficiência de Carnot. Sabe-se que o tempo demandado para que o material entre em equilíbrio térmico com a fonte é muito longo, assim condições de altíssimas eficiências relativas à eficiência de Carnot requerem baixas frequências de operação.

6.1.2. Influência do campo magnético aplicado

Para a verificação da influência do campo magnético aplicado, considerou-se um H_0 de 0 T, N igual a 0, T_{0Fria} igual ao T_{Cold} e $T_{0Quente}$ igual ao T_{Hot} (condição onde o equilíbrio térmico entre o material e a fonte com a qual troca calor é alcançado).

Variou-se então o valor de H_f , calculando-se o trabalho realizado por ciclo, η e η_{rel} . A Figura 85 mostra o comportamento do trabalho em função da variação de campo aplicado, onde ΔH representa a diferença entre H_f e H_0 .

Com exceção de uma das curvas apresentadas para cada T_{Cold} testado, o trabalho produzido por ciclo em um motor termomagnético aumenta com o aumento do ΔH . Isso ocorre, pois quanto maior o campo aplicado, maior a distância entre as curvas de temperatura em função da entropia para os campos H_0 e H_f .

Figura 85 - Trabalho específico produzido por ciclo em função da variação de campo magnético aplicado e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.

Fonte: Autoria própria.

Contudo, para entender o motivo da curva com menor diferença de temperaturas entre as fontes apresentarem um ponto de trabalho máximo, para um ΔH menor do que o maior ΔH estudado, é preciso verificar o que acontece no ciclo para pequenas diferenças de temperaturas. A Figura 86a apresenta dois esboços de ciclos Brayton magnéticos para motores operando nas mesmas condições de temperatura, porém com campos aplicados diferentes. Como para ambos os ciclos H_0 é 0 T, tem-se que a entropia s_1 para H_0 e T_{Cold} são iguais para ambos os motores.

Contudo, como H_f é diferente para ambas as condições têm-se que a entropia para o campo mais elevado (s_{3a}) é mais baixa que a entropia para H_f menor (s_{3b}).

Ao calcular-se a área correspondente ao trabalho no ciclo observa-se que para H_f mais elevado, o trabalho produzido por ciclo é igual à soma de w_a e w_b . Já para o caso de H_f menor, tem-se que o trabalho produzido por ciclo é igual à soma de w_b e w_c . Para o caso de temperaturas próximas, a contribuição da diferença de entropias pode ser maior que a contribuição da separação das curvas $T(s)$ pelo aumento do campo no cálculo da área equivalente ao trabalho.

Para diferenças de temperaturas maiores, a contribuição da separação das curvas $T(s)$ para H_0 e H_f , com o aumento de ΔH , é muito maior que a contribuição da diferença de entropias. Dessa maneira o trabalho produzido por ciclo aumenta com o aumento de ΔH , conforme ilustrado na Figura 86b. Para diferenças de temperaturas menores, ambas as contribuições são significativas, fazendo com que o ponto de máximo apareça na curva.

Figura 86 – Esboço do Diagrama T - s com ciclo construído. (a) Pequena diferença de temperaturas (b) Diferença maior de temperaturas.

Fonte: Autoria própria.

Também é esperado que o trabalho produzido por ciclo alcance uma saturação com o aumento de ΔH , visto que para valores muito altos de campo a magnetização do material se aproxima da magnetização de saturação. Assim, mesmo para temperaturas diferentes, em casos de campos magnéticos muito elevados, a magnetização é a mesma. Isso se reflete no diagrama $T-s$, em que a partir de certo nível de campo, a curva $T(s)$ não se desloca mais com o aumento do campo aplicado.

Com o aumento do ΔH , o efeito magnetocalórico aumenta (ΔT_{ad} aumenta). Assim a diferença mínima de temperaturas entre as fontes, calculada pela Equação (35), também aumenta. De forma que com o aumento de ΔH o motor deixa de produzir trabalho para uma determinada condição de temperaturas.

A Figura 87 mostra o comportamento da eficiência em função de ΔH . Para todas as condições de temperaturas estudadas a eficiência sempre aumenta com o aumento de ΔH , de forma que uma saturação de eficiência será alcançada no mesmo momento em que houver a saturação do trabalho produzido com o aumento de ΔH .

Diferentemente das curvas de trabalho, para pequenas diferenças de temperatura a curva de $\eta(\Delta H)$ não apresenta comportamento anômalo para pequenas diferenças de temperatura. Isso ocorre, pois a diminuição do trabalho específico, após o ponto de máximo para os casos de pequenas diferenças de temperaturas, é compensada pela diminuição do calor requerido da fonte quente. A diminuição do calor requerido ocorre por ação do efeito magnetocalórico, que faz com que a temperatura do material chegue muito próxima de T_{Hot} . Assim, não há redução de η com o aumento de ΔH .

Figura 87 – Eficiência em função da variação de campo magnético aplicado e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 88 mostra a eficiência relativa à eficiência Carnot em função de ΔH . Quanto maior o ΔH maior é η_{rel} para todas as configurações de temperaturas testadas. O máximo η_{rel} possível é de 100%, e isso ocorrerá quando o trabalho produzido for nulo (conforme indicado nas conclusões sobre a influência da temperatura). Com o aumento de ΔH ocorre um aumento do η_{rel} , como a eficiência de Carnot é função apenas da temperatura das fontes, a variação de campo não muda seu valor, assim, a razão entre a eficiência e a eficiência de Carnot tende a aumentar com o aumento de ΔH .

Nas análises da influência do campo magnético aplicado mostradas até aqui foi considerado que H_0 é 0, contudo também é possível que o motor opere com campo magnético diferente de zero durante o processo de resfriamento do material. Essa condição pode ser observada nos sistemas de conversão de calor em energia elétrica para alimentação de sensores sem fio utilizando motores do tipo Tesla [69], [74], onde os pequenos deslocamentos não permitem que o campo aplicado à amostra vá a 0 T.

Para verificar a influência de H_0 no comportamento de um motor termomagnético do tipo Tesla foi conduzido um estudo onde se considerou um ΔH constante de 0,75 T, para diferentes valores de H_0 , calculando-se o trabalho específico, η e η_{rel} para diferentes condições de temperaturas (foi considerado que o material magnético entra em equilíbrio térmico com a fonte com a qual troca calor).

Figura 88 – Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função da variação de campo magnético aplicado e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 89 mostra o comportamento do trabalho para diferentes valores de H_0 para um ΔH de 0,75 T. Quanto maior o campo inicial, maior o trabalho específico produzido por ciclo no motor para uma mesma condição de temperaturas.

O comportamento do trabalho específico em função de H_0 pode ser explicado com auxílio do diagrama $M-H$ mostrado na Figura 90, onde são mostrados esboços de ciclos Brayton magnético construídos para diferentes valores de H_0 e H_f , mantendo-se sempre o mesmo ΔH . Para campos menores, as curvas de entropia constante estão mais próximas, assim, a área proporcional ao trabalho formada no ciclo é menor que para campos mais altos. A partir de certo nível de campo, a área

deixa de variar em função de H_0 , de modo que o trabalho começa a se tornar constante para um mesmo ΔH , não importando o valor de H_0 .

Figura 89 - Trabalho específico em função do campo magnético aplicado durante o resfriamento do material magnético para diferentes condições de temperatura e $\Delta H = 0,75$ T. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.

Fonte: Autoria própria.

Figura 90 – Esboço do diagrama $M-H$ para motor termomagnético do tipo Tesla. Ciclos construídos para diferentes valores de campo durante o processo de resfriamento do material magnético.

Fonte: Autoria própria.

Para campos altíssimos, onde a magnetização deixa de variar com a temperatura, e por consequência, com a entropia, as curvas s e s_0 estarão sobrepostas, o que fará com que o trabalho produzido seja nulo. Assim, é esperado que para H_0 altíssimos, o trabalho produzido por ciclo volte a diminuir, até chegar a zero. A sobreposição das curvas s e s_0 se dá devido à estabilização da fase ferromagnética pelo campo aplicado.

A Figura 91 mostra o comportamento da eficiência em função de H_0 , considerando o ΔH de 0,75 T, e diferentes configurações de temperaturas. Com o aumento de H_0 , a eficiência aumenta para uma mesma condição de temperaturas. Isso ocorre devido ao aumento do trabalho produzido com o aumento de H_0 para uma mesma variação de ΔH , enquanto o calor requerido da fonte quente aumenta muito pouco.

Figura 91 - Eficiência em função da temperatura da fonte quente para diferentes campos magnéticos aplicados durante o resfriamento do material magnético considerando $\Delta H = 0,75$ T. (a) $T_{Cold} = 278$ K.

(b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.

Fonte: Autoria própria.

Para a condição de altíssimo campo espera-se que a eficiência diminua, visto que o trabalho específico produzido por ciclo do motor diminui, contudo o calor requerido da fonte quente não. Quando o trabalho específico se torna nulo, a eficiência também é nula.

A Figura 92 apresenta o comportamento de η_{rel} em função de H_0 , para o ΔH de 0,75 T, e diferentes configurações de temperaturas. Quanto maior é H_0 maior é η_{rel} , para uma mesma condição de temperaturas. Isso ocorre pois a eficiência de Carnot não é função do campo, assim o aumento de η com o aumento de H_0 acarreta num aumento de η_{rel} para a mesma condição de temperaturas.

Figura 92 - Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função do campo magnético aplicado durante o resfriamento do material magnético para diferentes condições de temperatura e $\Delta H = 0,75$ T. (a)

$T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.

Fonte: Autoria própria.

Pelo mesmo motivo que se espera uma redução de η para altíssimos campos magnéticos aplicados, η_{rel} também se reduzirá, chegando a zero para determinadas condições de campo.

Quanto à influência do campo aplicado no desempenho dos motores termomagnéticos do tipo Tesla, conclui-se que:

- Para pequenas diferenças de temperaturas existe um valor ótimo de variação de campo que produzirá a maior quantidade de trabalho específico por ciclo. Esse valor de campo depende das propriedades magnetocalóricas do material magnético.
- Para diferença de temperaturas maiores o trabalho produzido por ciclo aumenta com o aumento da variação de campo aplicado.
- Para campos altíssimos a fase ferromagnética do material é estabilizada, fazendo com que a magnetização deixe de depender da temperatura, assim há uma saturação no trabalho produzido.
- Para uma mesma condição de temperaturas tanto a eficiência quanto a eficiência relativa à eficiência de Carnot aumentam com o aumento da variação de campo magnético aplicado.
- Para uma mesma variação de campo magnético aplicado, quanto maior for o campo aplicado durante o resfriamento, maior é o trabalho específico, a eficiência e a eficiência relativa à eficiência de Carnot, para uma mesma condição de temperaturas. Lembrando que o campo magnético aplicado durante o aquecimento deve necessariamente ser maior que o aplicado durante o resfriamento.

6.1.3. Influência do fator de demagnetização

Para a verificação da influência do fator de demagnetização, considerou-se um H_0 de 0 T, H_f de 1,5 T, T_{0Fria} igual ao T_{Cold} e $T_{0Quente}$ igual ao T_{Hot} (condição onde o

equilíbrio térmico entre o material e a fonte com a qual troca calor é alcançada). Variou-se então o valor do fator de demagnetização, calculando-se o trabalho realizado por ciclo (Figura 93), η (Figura 94) e η_{rel} (Figura 95) para várias condições de temperaturas.

Observa-se ao se comparar a Figura 85 com a Figura 93, a Figura 87 com a Figura 94 e a Figura 88 com a Figura 95, que o aumento do fator de demagnetização altera o trabalho específico, η e η_{rel} da mesma maneira que uma redução do ΔH alteraria. Isso ocorre, pois o aumento no fator de magnetização faz com que o campo interno ao material se reduza.

Figura 93 - Trabalho específico produzido por ciclo em função do fator de demagnetização e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.

Fonte: Autoria própria.

Nas análises da influência do campo magnético aplicado considerou-se o fator de demagnetização nulo, nessa condição o campo aplicado é igual ao campo interno do material. As propriedades magnéticas de um material são função do campo interno, dessa maneira ao se aumentar o fator de demagnetização, tem-se uma resposta muito semelhante a uma redução do ΔH .

Figura 94 - Eficiência em função do fator de demagnetização e da temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b)

$T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.

Fonte: Autoria própria.

Figura 95 – Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função do fator de demagnetização e da

temperatura. (a) $T_{Cold} = 278$ K. (b) $T_{Cold} = 283$ K. (c) $T_{Cold} = 288$ K.

Fonte: Autoria própria.

Quanto à influência do fator de demagnetização no desempenho dos motores termomagnéticos do tipo Tesla, conclui-se que:

- Para pequenas diferenças de temperaturas existe um valor ótimo de fator de demagnetização que produzirá a maior quantidade de trabalho específico por ciclo. O valor ideal para o fator de demagnetização

dependerá das propriedades termomagnéticas e magnetocalóricas do material magnético, bem como da variação campo magnético aplicado, visto que esses alteram o campo interno ao material.

- Para diferenças de temperaturas maiores, o trabalho produzido por ciclo diminui com o aumento do fator de demagnetização.
- Para uma mesma condição de temperaturas, tanto a eficiência quanto a eficiência relativa à eficiência de Carnot aumentam com a diminuição do fator de demagnetização.
- De modo geral, no desenvolvimento de motores termomagnéticos do tipo Tesla deve-se sempre tentar minimizar o fator de demagnetização, pois isso contribui para aumentar o trabalho específico por ciclo, a eficiência e a eficiência relativa à eficiência de Carnot, para as mesmas condições de temperatura. A exceção são os casos para pequenas diferenças de temperatura.

6.1.4. Influência do tipo de transição magnética e da histerese térmica

As transições magnéticas de primeira ordem são aquelas acopladas a uma transição estrutural no material magnético. Para essas transições o efeito magnetocalórico é muito mais acentuado do que nas transições de segunda ordem [94].

As transições magnéticas de primeira ordem são normalmente acompanhadas de uma histerese térmica (ΔT_{His}) [95], que modifica a temperatura de transição do material durante os processos de aquecimento e resfriamento para um

mesmo campo aplicado. De modo que o T_C do material é maior durante o aquecimento do que durante o resfriamento.

Além disso, a presença do campo magnético estabiliza a fase ferromagnética. Em uma transição de primeira ordem, para o mesmo processo (de aquecimento ou resfriamento), a presença do campo modifica a temperatura em que a transição estrutural ocorre, de modo que durante um processo de aquecimento, a temperatura de transição estrutural do material para um campo aplicado menor, é menor do que a temperatura de transição do material para um campo magnético maior. Essa diferença nas temperaturas de transição estrutural devido à presença de campo será chamada aqui de ΔT_B .

Dessa maneira, a fim de garantir a transição entre os estados ferromagnético e paramagnético em um motor termomagnético do tipo Tesla, T_{0Frio} nunca deve ser superior a $T_{ColdMax}$, e $T_{0Quente}$ nunca deve ser inferior a T_{HotMin} , onde $T_{ColdMax}$ é igual à temperatura de transição do material durante o processo de resfriamento no motor, e T_{HotMin} é igual à temperatura de transição do material durante o processo de aquecimento no motor.

Nos itens 1.1 e 1.2 mostrou-se a diferença no comportamento do efeito termomagnético e do efeito magnetocalórico para materiais de primeira ordem e segunda ordem. Como esses efeitos são fundamentais no funcionamento dos motores termomagnéticos, a diferença no tipo de transição implica em diferenças no comportamento do trabalho e eficiência dos motores.

As transições magnéticas de primeira ordem, por estarem acopladas a uma transição estrutural no material, envolvem calor latente, de modo que para se aplicar a Equação (2) na determinação das curvas do diagrama $T-s$, e a Equação (20) no

cálculo do calor requerido pelo motor da fonte quente, é necessário embutir o valor do calor latente envolvido.

As medidas para verificação do efeito magnetocalórico podem ser feitas através de análises calorimétricas, determinando-se o calor específico aparente c_H em função do campo magnético aplicado e da temperatura. Para isso, aplica-se uma taxa de aquecimento $\dot{T}$ constante no material estudado, e mede-se o fluxo de calor $\dot{Q}$ no material para diferentes condições de campo magnético aplicado. Desse modo, ao se passar por uma transição de primeira ordem, a fim de garantir $\dot{T}$ constante, $\dot{Q}$ aumenta vertiginosamente devido à contribuição do calor latente. O calor específico aparente, que inclui a contribuição do calor específico e, no caso de uma transição de primeira ordem, do calor latente, pode ser calculado a partir da Equação (36) [96]. m é a massa de material magnético.

$$c_H = \frac{\dot{Q}(H, T)}{m\dot{T}} \quad (36)$$

Na Figura 96a são mostradas as curvas de c_H para campos magnéticos aplicados de 0 T e 1,5 T, durante o aquecimento e o resfriamento para o MnAs, material com grande histerese térmica ($\Delta T_{\text{His}} = 10,6$ K). As medidas apresentadas foram feitas no equipamento descrito em [96] para o material em pó (N aproximadamente zero). São indicados na figura T_{ColdMax} e T_{HotMin} para um motor termomagnético do tipo Tesla, operando com $H_0 = 0$ e $H_f = 1,5$ T, e com MnAs como material magnético.

Aplicando-se a Equação (2) é possível calcular as curvas do diagrama T - s para o MnAs, conforme mostrado na Figura 96b. Em cinza é mostrado um ciclo Brayton desenvolvido em um motor tipo Tesla operando com $H_0 = 0$ T e $H_f = 1,5$ T.

Figura 96 – (a) Calor específico aparente para o MnAs. (b) Diagrama T - s do MnAs calculado a partir da Equação (2). Linhas contínuas: Campo aplicado de 1,5 T. Linhas tracejadas: Campo aplicado de 0 T. Linhas azuis: Medida durante o resfriamento. Linhas vermelhas: Medida durante o aquecimento.

Fonte: Adaptado do artigo de Bessa *et al.*[19]. (Artigo do autor).

A fim de verificar a influência do tipo de transição e da histerese térmica associada à transição de primeira ordem, comparou-se o comportamento do trabalho e da eficiência para diferentes materiais com transição de primeira ordem, tendo diferentes ΔT_{His} e ΔT_B . Gadolínio (transição de segunda ordem) foi utilizado como um material de referência nas comparações. Na Figura 97 são mostradas as curvas no diagrama T - s para diferentes materiais, onde foram construídos os ciclos de Brayton para o motor tipo Tesla estudado. Na Tabela 2 são mostrados os valores de $T_{ColdMax}$, T_{HotMin} , ΔT_{His} , ΔT_B para cada material, além da referência de onde as propriedades dos materiais foram retiradas.

Figura 97 - Diagramas T - s para os diferentes materiais. Linhas contínuas: Aquecimento na presença de campo aplicado de 1,5 T. Linhas tracejadas: Resfriamento a campo zero.

Fonte: Adaptado do artigo de Bessa *et al.*[19]. (Artigo do autor).

Tabela 2 – Condições de temperatura usadas na construção dos ciclos Brayton, ΔT_{Hys} e ΔT_B para cada material considerado.

Material	$T_{ColdMax}$ [K]	T_{HotMin} [K]	$T_{HotMin} - T_{ColdMax}$ [K]	ΔT_{His} [K]	ΔT_B [K]	Referência.
Gd	293	293	0	0	---	[90]
$LaFe_{11,22}Mn_{0,46}Si_{1,32}H_{1,6}$	269,5	276,5	7	~0	6,8	[12]
$LaFe_{11,76}Mn_{0,06}Si_{1,18}H_{1,6}$	338,2	344,2	6	1,5	4,8	[12]
$Mn_{1,3}Fe_{0,65}P_{0,5}Si_{0,5}$	272,8	278,9	6,1	1	5,1	[97]
MnAs	303,2	318,3	15,1	10,6	4,5	[19]

A Figura 98 apresenta o trabalho específico em função de T_{Cold} e T_{Hot} , (considerando que o material magnético entra em equilíbrio térmico com a fonte com a qual troca calor) em (a) Gd, material de segunda ordem, em (b) $LaFe_{11,76}Mn_{0,06}Si_{1,18}H_{1,65}$, material de baixa histerese térmica, e em (c) MnAs, material com alta histerese térmica.

Tem-se que para um motor operando com o material de segunda ordem o mínimo trabalho específico produzido (w_{Min}) é zero. Considerando um motor operando com material de baixa histerese térmica, w_{Min} é maior que zero, porém, muito menor que o w_{Min} para um motor utilizando material de alta histerese. Isso acontece, pois a histerese térmica provoca um aumento na separação das curvas

$T(s)$ para os processos de resfriamento e aquecimento do material magnético do motor, como pode ser observado na Figura 97. Dessa maneira, a área proporcional ao trabalho no ciclo aumenta com o aumento da histerese.

Materiais que possuem histerese térmica elevada sofrem uma maior variação de sua energia interna durante a transição do que materiais com pouca ou nenhuma histerese. Isto se reflete em um aumento do calor requerido da fonte quente para aquecer o material com alta histerese até este se tornar paramagnético. Parte desse calor é convertido em trabalho no motor termomagnético quando o material volta a ser ferromagnético. Assim, quanto maior a quantidade de calor requerida da fonte quente para que a transição magnética ocorra, maior será o trabalho produzido por ciclo.

Motores que se utilizam dos materiais com transição de primeira ordem atingem uma saturação no trabalho produzido para uma diferença de temperaturas muito menor que nos motores usando materiais de segunda ordem. Isso acontece, pois a transição de primeira ordem se dá de forma abrupta, em um intervalo de temperaturas muito menor do que na transição de segunda ordem. Isso pode ser verificado nas curvas mostradas na Figura 97, onde é possível notar que tanto para o MnAs quanto para o $\text{LaFe}_{11,76}\text{Mn}_{0,06}\text{Si}_{1,18}\text{H}_{1,65}$, as curvas para o processo de aquecimento e resfriamento se sobrepõem para regiões distantes da transição. Ao se observar o comportamento do Gd, nota-se que mesmo para temperaturas mais distantes do T_C , as curvas para o processo de resfriamento e aquecimento ainda não estão sobrepostas.

A Figura 98d mostra as curvas de trabalho específico para os materiais considerados, para uma condição de T_{Cold} 2 K menor que $T_{ColdMax}$. A densidade energética para um motor usando o MnAs (maior histerese térmica entre os

materiais estudados) é muito maior que para motores utilizando-se dos demais materiais, sendo esse seguido pelo $\text{LaFe}_{11,76}\text{Mn}_{0,06}\text{Si}_{1,18}\text{H}_{1,65}$ (segunda maior histerese térmica).

Figura 98 - Trabalho específico em função da temperatura. (a) Gd. (b) $\text{LaFe}_{11,76}\text{Mn}_{0,06}\text{Si}_{1,18}\text{H}_{1,65}$. (c) MnAs. (d) Trabalho específico quando a temperatura da fonte fria está a 2 K abaixo de T_{ColdMax} .

Fonte: Adaptado do artigo de Bessa *et al.*[19]. (Artigo do autor).

A Figura 99 apresenta a eficiência relativa à eficiência de Carnot considerando o uso de (a) Gd, (b) $\text{LaFe}_{11,76}\text{Mn}_{0,06}\text{Si}_{1,18}\text{H}_{1,65}$ e (c) MnAs no motor termomagnético. Para todos os materiais estudados, observa-se que o η_{rel} é máximo quando o trabalho específico é mínimo. O perfil das superfícies mostradas é similar para todos os materiais estudados. Contudo, ao se checar a eficiência em função da diferença de temperaturas, observa-se um comportamento interessante.

Na Figura 99d é mostrado η_{rel} considerando o uso dos diferentes materiais para as mesmas condições de temperatura dos resultados mostrados na Figura 98d. A alta histerese permite operar com η_{rel} mais altos do que para materiais com baixa ou nenhuma histerese, quando em condições de diferença de temperaturas maiores.

Como visto, o trabalho específico produzido é mínimo quando o η_{rel} é máximo. De maneira que é preciso adotar soluções de compromisso para determinar o ponto de operação ideal de um motor termomagnético do tipo Tesla. É interessante verificar o comportamento do trabalho específico em função de η_{rel} , comparando os dois principais parâmetros de interesse em um motor térmico.

Figura 99 – Eficiência relativa à eficiência de Carnot em função da temperatura. (a) Gd. (b) $\text{LaFe}_{11,76}\text{Mn}_{0,06}\text{Si}_{1,18}\text{H}_{1,65}$. (c) MnAs. (d) Eficiência relativa à eficiência de Carnot quando a temperatura da fonte fria está a 2 K abaixo de T_{ColdMax} .

Fonte: Adaptado do artigo de Bessa *et al.*[19]. (Artigo do autor).

A Figura 100 mostra as curvas de trabalho específico em função de η_{rel} quando T_{Cold} é igual à T_{ColdMax} . Para todos os trechos onde o motor operando com MnAs produz trabalho, para um mesmo valor de eficiência, o trabalho específico produzido por ciclo é muito maior do que para os outros materiais. Ao se desconsiderar o MnAs, o material que apresenta melhor desempenho no uso em motores termomagnéticos

tipo Tesla é o $\text{LaFe}_{11,76}\text{Mn}_{0,06}\text{Si}_{1,18}\text{H}_{1,65}$, que é o material com a segunda maior histerese entre os estudados.

Figura 100 - Trabalho específico em função da eficiência relativa à eficiência de Carnot quando a temperatura da fonte fria é igual ao T_{ColdMax} .

Fonte: Adaptado do artigo de Bessa *et al.*[19]. (Artigo do autor).

Também foi observada uma diferença no perfil das curvas de trabalho específico em função de η_{rel} , onde para os materiais de primeira ordem, a concavidade apresentada pelas curvas é negativa. Quando considerado o material de segunda ordem, a concavidade da curva é positiva.

Uma importante conclusão desse estudo é que, diferente dos refrigeradores magnetocalóricos, a histerese térmica contribui favoravelmente com certos aspectos no comportamento dos motores termomagnéticos do tipo Tesla. Em refrigeração magnética, materiais com alta histerese são descartados, pois a alta histerese causa perdas nesses sistemas, e no caso de ΔT_{His} muito grandes, ela pode até anular o efeito magnetocalórico para determinados níveis de campo aplicado [11], [98].

A diferença da influência da histerese em refrigeradores e motores se deve ao fato de que em refrigeradores magnetocalóricos os parâmetros de entrada são a temperatura da fonte quente e o trabalho, e o parâmetro de saída é a temperatura da fonte fria. De modo que para ΔT_{His} muito grandes, a transição entre os estados ferromagnético e paramagnético pode deixar de acontecer.

Já em motores termomagnéticos, os parâmetros de entrada são a temperatura da fonte quente e a temperatura da fonte fria, e o parâmetro de saída é o trabalho. Dessa forma, desde que as temperaturas das fontes estejam ajustadas de forma a se sobrepor à histerese térmica, garantindo a transição magnética, o motor é capaz de operar. Assim, uma série de materiais magnéticos que tiveram sua aplicação descartada em refrigeradores magnéticos devido à histerese, podem ser aplicados em motores termomagnéticos.

Quanto à influência do tipo de transição e da histerese térmica no desempenho dos motores termomagnéticos do tipo Tesla, conclui-se que:

- Motores termomagnéticos utilizando materiais com alta histerese térmica apresentam maior trabalho específico produzido por ciclo, para as mesmas variações de temperatura e de campo magnético aplicado.
- A histerese térmica elevada permite aplicações de motores termomagnéticos em condições de maiores diferenças de temperaturas, com alta densidade energética, e sem afetar a eficiência relativa à eficiência de Carnot, quando comparado com motores utilizando materiais com transição de segunda ordem ou com baixa histerese térmica.

- Quanto maior a histerese térmica no material, melhor é a relação entre o trabalho específico produzido por ciclo e a eficiência relativa à eficiência de Carnot.

De posse do conhecimento da influência da temperatura, campo aplicado, fator de demagnetização e tipo de transição magnética, comparou-se o comportamento de motores termomagnéticos operando em diferentes condições com outra tecnologia de conversão de calor em trabalho, isso é mostrado a seguir.

6.1.5. Aplicabilidade dos motores termomagnéticos do tipo Tesla

A fim de verificar a aplicabilidade dos motores termomagnéticos do tipo Tesla, comparou-se a eficiência η_{rel} para diferentes condições de operação para os motores com geradores termoelétricos baseados no efeito Seebeck.

Para isso, calculou-se a máxima eficiência possível em um gerador termoelétrico utilizando a Equação (37), ZT é a figura de mérito, que determina o coeficiente de performance para os geradores termoelétricos, sendo esse função do coeficiente de Seebeck, da condutividade térmica e da condutividade elétrica do material termoelétrico.[99].

$$\eta_{maxTermoelétrico} = \frac{T_{Hot} - T_{Cold}}{T_{Hot}} \left[\frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + T_{Cold}/T_{Hot}} \right] \quad (37)$$

ZT muda com a temperatura, sendo os maiores valores já registrados por volta de 2,7. Contudo, ao redor da temperatura ambiente, os valores mais altos são

inferiores a 1 [100]. Calculou-se o η_{rel} em função da temperatura da fonte quente para um gerador termoelétrico, considerando T_{Cold} igual a 285 K e ZT igual a 0,8, um valor bastante elevado para ZT para temperaturas ao redor da ambiente.

Os resultados obtidos para o gerador termoelétrico foram comparados com os calculados para motores termomagnéticos do tipo Tesla, considerando gadolínio como material magnético, e são mostrados na Figura 101. Para isso, considerou-se no motor termomagnético o T_{Cold} igual a 285 K, H_0 igual a 0 T e o fator de demagnetização igual a zero. Considerou-se também que a mínima temperatura atingida pelo material magnético era 1 % maior que T_{Cold} e que a máxima temperatura atingida pelo material era 1 % menor que T_{Hot} .

Figura 101 - Comparação da eficiência relativa à eficiência de Carnot para geradores termoelétricos e motores termomagnéticos do tipo Tesla.

Fonte: Autoria própria.

Para todos os casos testados, os motores termomagnéticos apresentam faixas de temperaturas onde η_{rel} demonstra vantagens em relação aos geradores termoelétricos. Ao se aumentar o gradiente de campo aplicado, a vantagem na aplicação dos motores termomagnéticos se torna mais evidente.

Além dos geradores termoelétricos, buscou-se comparar os motores termomagnéticos com outras máquinas térmicas para conversão de calor em trabalho, porém não se encontrou na literatura estudos de eficiência para outros tipos de dispositivos operando na mesma faixa de temperaturas.

A partir das conclusões apontadas no item 6.1, foi possível propor um motor termomagnético do tipo Tesla que leve em consideração a influência de cada um dos fatores estudados, buscando operar na melhor condição para uma aplicação real. O motor proposto, levando em consideração as conclusões da influência dos parâmetros estudados, é mostrado a seguir.

6.2. Motor proposto considerando a influência dos parâmetros

Nos motores termomagnéticos do tipo Tesla construídos para esse trabalho, mostrados nos itens 4.2 e 5.1, a transferência de calor entre o material magnético e as fontes se deu por condução. De maneira que para assegurar o bom contato térmico, é preciso ter superfícies lisas e muito bem alinhadas. Caso essas condições não sejam satisfeitas o tempo de troca térmica é alongado, fazendo com que a frequência de operação dos motores diminua, e por consequência, diminuindo a potência da máquina.

Uma alternativa para evitar as complicações da troca térmica por condução é fazer o uso de escoamento forçado de um fluido de trabalho, trocando calor por convecção forçada. Para isso, pode-se manter o material magnético parado, fazendo com que um fluxo alternado de fluido de trabalho, ora quente, ora frio, passe pelo material, permitindo que o arranjo magnético se desloque em relação ao material magnético.

Essa configuração foi proposta por Ferreira *et al.* [6] e é exemplificado na Figura 102, onde duas placas de material magnético, A e B, mantem-se estáticas. No primeiro momento, o arranjo de ímãs está posicionado sobre a placa A, por onde passa um fluxo de água quente. No mesmo instante, a placa B é resfriada por um fluxo de água fria. A placa A se torna paramagnética, enquanto a placa B se torna ferromagnética. Por ação da força magnética resultante no sistema, o arranjo de ímãs é deslocado em direção à placa B, posicionando-se sobre esta. Nesse momento, invertem-se os fluxos de água. A placa A é resfriada pelo fluxo de água fria e a placa B é aquecida pelo fluxo de água quente. Quando a força magnética resultante que atua no arranjo de ímãs aponta na direção de A, esse se desloca para a posição inicial, e o fluxo de água é mais uma vez alternado, fazendo com que o sistema retorne ao ponto inicial, e repetindo o ciclo.

Conforme demonstrado na análise da influência do campo magnético, excluindo algumas exceções de condições de temperatura, quanto maior o ΔH no sistema, maior é o trabalho produzido por ciclo. Assim, o projeto de um motor termomagnético pode partir da definição do circuito magnético a ser utilizado e neste deve-se buscar maximizar o ΔH . Além disso, deve ser levado em consideração que em um motor termomagnético do tipo Tesla, o resfriamento do material ocorre a campo reduzido, e o aquecimento a campo elevado.

É possível encontrar na literatura diversos arranjos e circuitos magnéticos com ímãs permanentes voltados para aplicação em refrigeração magnética [101]. Contudo, não foi localizado nenhum trabalho dedicado ao desenvolvimento de circuitos magnéticos para aplicação em motores termomagnéticos. Dessa forma, para o motor proposto, foi necessário desenvolver o circuito magnético baseado em circuitos utilizados em refrigeração.

Figura 102 - Motor termomagnético do tipo Tesla com placas de material magnético fixas e arranjo de ímãs móvel.

Fonte: Adaptado do artigo de Ferreira *et al.* [6]. (artigo do Autor).

Vasile & Muller [64] desenvolveram um circuito magnético baseado no arranjo de Halbach para aplicação em refrigeração, onde afirmam ter conseguido um campo de 1,9 T na região útil da montagem, mantendo um entreferro de ar de 20 mm. O circuito magnético é constituído por um arranjo de ímãs, seguindo a orientação mostrada na Figura 103a, uma armadura de material magnético mole, e um núcleo de FeCo, material com forte magnetização e de rápida saturação.

Inspirado no circuito mostrado na Figura 103a, desenvolveu-se o circuito magnético para aplicação no motor proposto, mostrado na Figura 103b. Utilizaram-se apenas ímãs de dimensões iguais, já disponíveis comercialmente. A orientação dos ímãs segue a mesma ideia do arranjo proposto por Vasile & Muller [64]. Contudo, no circuito desenvolvido não foi utilizado o núcleo de FeCo. A armadura de material mole também foi alterada, a fim de se adequar melhor à aplicação no motor proposto.

Como material mole considerou-se no sistema proposto aço SAE 1010. Os ímãs permanentes são de NdFeB G50M, com dimensões de 20x20x40 mm³, disponíveis comercialmente. As dimensões da armadura de material magnético mole são mostradas na Figura 104a, onde é indicado um entreferro de ar de 20 mm. Na

Figura 104b é mostrado o campo magnético obtido no entreferro, calculado via simulação numérica no *software* Ansoft Maxwell. Observa-se ao longo do entreferro uma variação de aproximadamente 1,3 T, apresentando nas extremidades da região de interesse duas regiões onde o campo aplicado é próximo de zero, e uma região central de campo intenso.

Figura 103 - (a) Representação do circuito magnético proposto por Vasile & Muller. (b) Circuito magnético proposto para utilização no motor termomagnético.

Fonte: (a) Adaptado do artigo de Vasile & Muller [64]. (b) Autoria própria.

Figura 104 - (a) Dimensões do circuito magnético, valores em mm. (b) Campo magnético aplicado na região de interesse.

Fonte: Autoria própria.

Para verificação do comportamento do motor proposto foi utilizada a abordagem pelo Método da Força, visto que com esse método é possível identificar as posições em que o motor não parte devido à força magnética resultante negativa. Para aplicação do Método da Força é necessário conhecer o campo magnético em função da posição, e não apenas nas posições onde o material troca calor. Sendo assim, o campo magnético para o circuito proposto é mostrado na Figura 105, para y igual a zero. Destaca-se que para o circuito magnético desenvolvido o gradiente de campo aplicado na direção y é muito pequeno, principalmente para a região central do entreferro.

Na análise da influência do fator de demagnetização nos parâmetros de interesse do motor termomagnético concluiu-se que deve-se tentar minimizar o fator de demagnetização, maximizando o campo interno ao material magnético. O fator de demagnetização é um parâmetro que depende da geometria do material magnético e sua orientação em relação ao campo magnético aplicado. Assim, é preciso conhecer a orientação do campo magnético na região do entreferro.

Figura 105 - Campo magnético aplicado em função da posição.

Fonte: Autoria própria.

Uma boa forma de visualizar a direção do campo é verificar o comportamento das linhas de fluxo magnético, visto que o campo magnético segue a direção das linhas de fluxo. Na Figura 106 são mostradas as linhas de fluxo magnético para o circuito proposto, para a região do entreferro, as linhas de fluxo seguem o sentido vertical. Conclui-se que o campo magnético aplicado no entreferro segue majoritariamente na direção y .

Com isso, tem-se que para minimizar o fator de demagnetização, o comprimento do material magnético na direção x deve ser muito menor que na direção y . No circuito magnético desenvolvido, o entreferro tem 20 mm de comprimento na direção y , sendo esse o comprimento máximo possível para o material magnético nessa direção. O circuito magnético se moverá em relação ao material magnético, sendo assim estabeleceu-se um comprimento de 18 mm para o material magnético na direção y , garantindo folga entre o material magnético e o circuito magnético, além de espaço para possível instalação de suportes para o material magnético.

Figura 106 - Fluxo magnético no circuito desenvolvido.

Fonte: Autoria própria.

A fim de minimizar o comprimento do material magnético na direção x , ao invés de se operar com duas placas de material magnético, como mostrado na Figura 102, pode-se aumentar o número de placas, agrupando-as em dois grupos, sendo um formado pelo grupo de placas frias (placas que estão sendo resfriadas), e outro formado pelas placas quentes (placas que estão sendo aquecidas). Na Figura 107a é mostrada a distribuição proposta para as placas de material magnético, sendo mostrado em azul as placas frias e em vermelho as placas quentes, para a posição ocupada pelo circuito magnético no momento mostrado na figura.

Estudou-se então o comportamento do trabalho específico para o motor proposto, alterando-se o valor do comprimento em x (espessura “e”) de cada placa de material magnético. Para manter a massa de material magnético constante, ao se reduzir “e” aumentava-se o número de placas que compunham os grupos de placas frias e quentes. A distância entre as placas (p) também foi alterada para cada uma das condições estudadas. Na Figura 107b é mostrada uma representação do sistema testado, considerando-se um comprimento em z de 100 mm. Foi considerado que o grupo de placas frias estava a 278 K e o de placas quentes estava a 308 K.

O fator de demagnetização N foi calculado através da equação proposta por Aharoni [89], onde observou-se que para os comprimentos de placa nas direções x e y estudados, N não sofre alterações significativas para z maior que 40 mm. Aplicou-se então o Método da Força para a definição do trabalho, calculando-se o trabalho por unidade de massa de material magnético no sistema. Os resultados obtidos para as diferentes configurações de espessura nas placas são mostrados na Tabela 3. Quanto menor o valor de “e”, menor é N , conseqüentemente, o trabalho produzido por ciclo do motor aumenta com a diminuição de “e”.

Figura 107 – (a) Distribuição das placas de material magnético. (b) Motor termomagnético proposto.

Fonte: Autoria própria.

Quanto menor a espessura das placas maior o trabalho produzido por ciclo. Contudo, em termos construtivos, há limitações na espessura mínima que se pode obter. A variação de trabalho obtida entre o motor operando com placas de espessura com 0,25 mm e com 0,5 mm é muito pequena. Sendo assim, para as análises seguintes, foi considerado que o sistema operava com 10 placas no grupo de placas quentes e 10 placas no grupo de placas frias. O comprimento do conjunto na direção z foi mantido em 100 mm.

Tabela 3 - Condições testadas para definição do comprimento das placas na direção x . Material: Gd.

Nº de placas por grupo	e [mm]	N	p [mm]	Trabalho específico [J/kg]
5	1	0,07466	12	59,49
10	0,5	0,04344	5,389	63,77
20	0,25	0,02478	2,567	65,72

As análises da influência do tipo de transição e da histerese térmica no comportamento dos motores termomagnéticos indicaram vantagens no uso de

materiais com transição de primeira ordem e apresentando alta histerese térmica. Contudo, para aplicação do Método da Força, é preciso conhecer as curvas de $M(H,T)$ e $s(H,T)$ em detalhes.

Materiais com alta histerese não são tão reportados na literatura, visto que a aplicação destes em refrigeração magnética não é viável. Sendo que grande parte dos trabalhos que abordam esses materiais buscam formas de reduzir a histerese térmica, não focando na descrição extensa dos comportamentos da entropia e magnetização. Devido a isso foi considerado o uso do gadolínio como material magnético no motor proposto, visto que esse é extensamente descrito na literatura. Desse modo, a massa de material magnético utilizada no conjunto totalizou 0,142 kg para o caso considerado.

Aplicou-se o Método da Força para diferentes condições de temperatura, considerando que as placas frias entravam em equilíbrio térmico com a fonte fria, e as placas quentes entravam em equilíbrio térmico com a fonte quente. A troca de calor pode ser feita através de fluido escoando entre as placas que formam cada um dos grupos de placas, sendo T_{Hot} a temperatura do fluido que escoa entre as placas que formam o grupo de placas quentes, e T_{Cold} a temperatura do fluido que escoa entre as placas que formam o grupo de placas frias.

Na Figura 108 são apresentados o trabalho produzido por ciclo e η_{rel} em função das temperaturas das fontes, considerando o curso total do motor de 50 mm. Na condição de menor trabalho produzido η_{rel} é máximo. O maior trabalho aconteceu para a maior diferença de temperaturas, sendo que a produção de trabalho não saturou para o range de temperaturas estudado.

Figura 108 - (a) Trabalho produzido por ciclo no motor proposto. (b) Eficiência relativa à eficiência de Carnot no motor proposto.

Fonte: Autoria própria.

Ao se calcular o trabalho específico no motor (por unidade de massa de material magnético), chegou-se ao valor máximo de 63,77 J/kg para as temperaturas verificadas, aproximadamente 62% do valor para a mesma condição de temperaturas e considerando um ΔH de 1,3 T calculado pela abordagem pela análise de ciclo. A diferença acontece, pois para o motor funcionar, é preciso que parte do material esteja submetido a um gradiente de campo. Assim, algumas das 10 placas que compõem o conjunto de placas frias estão submetidas a um campo intermediário entre zero e 1,3 T. Essa condição também reduz o ΔT_{ad} nessas placas, aumentando um pouco o calor requerido da fonte quente e modificando η_{rel} .

A Figura 109 mostra a relação de trabalho produzido por ciclo e η_{rel} , onde é possível observar ser capaz de operar o motor com η_{rel} de 30 %, produzindo mais de 3 J de trabalho por ciclo. Ao se reduzir η_{rel} para 20% é possível extrair pouco mais

de 4,6 J de trabalho mecânico por ciclo do sistema. Em condições de η_{rel} iguais a 10 % o trabalho produzido por ciclo é por volta de 7,7 J.

Figura 109 - Trabalho produzido por ciclo em relação à eficiência relativa à eficiência de Carnot

Fonte: Autoria própria.

Para ampliar o trabalho produzido por ciclo alterou-se o valor de “p” mostrados na Tabela 3, buscando fazer com que a variação de campo sofrida por todas as placas fosse ampliada. Para isso, “p” foi alterado para 2,4 mm. A fim de manter a mesma variação de campo para as placas durante o deslocamento dos ímãs para a direita e para a esquerda, a distância entre o grupo das placas que estão sendo resfriadas e o grupo das placas que estão sendo aquecidas (valor de 10 mm no detalhe B mostrado na Figura 107a) foi alterada para 29 mm.

Na Figura 110 é apresentado o trabalho específico em função do η_{rel} para a nova disposição dos grupos de placas. Com a alteração, o trabalho máximo produzido por ciclo para as condições de temperaturas consideradas passou de 9,07 J para 11 J. Isso acontece, pois na nova disposição há uma variação de campo maior para as placas próximas às extremidades de cada grupo de placas. Por outro

lado, o η_{rel} máximo reduziu de 30% para pouco menos de 20%, isso acontece, pois na nova disposição a mínima diferença de temperaturas necessária para o motor operar aumenta.

Figura 110 - Trabalho produzido por ciclo em relação à eficiência relativa à eficiência de Carnot para a nova disposição considerando um curso de 50 mm.

Fonte: Autoria própria.

Para diminuir a diferença mínima de temperaturas necessária, pode-se alterar o curso total do motor, conforme discutido para a Figura 79. Isso causará uma redução na variação do campo aplicado às placas, tendo como consequência a redução do trabalho produzido por ciclo para a mesma diferença de temperaturas, porém permite que o motor opere em diferenças menores de temperaturas. Na Figura 111 são mostradas as curvas de trabalho em função de η_{rel} considerando diferentes cursos do motor.

Como esperado, o trabalho produzido por ciclo diminui com a redução do curso total, por outro lado η_{rel} aumenta consideravelmente, passando de pouco menos de 20 % no curso de 50 mm para 39,5 % no curso de 10 mm. Quanto à

mínima diferença de temperaturas necessária, considerando-se T_{Cold} igual a 278 K, tem-se que a mínima diferença de temperaturas é de 5,5 K para o curso de 10 mm, 12,6 K para o curso de 20 mm, 18,1 K para o curso de 30 mm, 19,9 K para o curso de 40 mm e 20,2 K para o curso de 50 mm.

Figura 111 - Trabalho produzido por ciclo em relação à eficiência relativa à eficiência de Carnot para a nova disposição considerando cursos de (a) 40 mm. (a) 30 mm. (c) 20 mm. (d) 10 mm.

Fonte: Autoria própria.

É possível aumentar o trabalho produzido por ciclo aumentando-se a massa de material magnético. Isso pode ser feito aumentando o comprimento z do sistema. Outra maneira é através da montagem de motores em paralelo, onde cada motor funciona como pistão e pode acionar um eixo virabrequim, sendo o trabalho produzido por ciclo igual à soma dos trabalhos de cada motor.

7. CONCLUSÃO

Visando o desenvolvimento de modelos analíticos para o entendimento, estudo e desenvolvimento de motores termomagnéticos do tipo Tesla, esse trabalho apresentou inicialmente os conceitos fundamentais por trás dos principais fenômenos envolvidos nesses dispositivos, o efeito termomagnético e o efeito magnetocalórico.

Demonstraram-se as equações envolvidas na conversão de calor em trabalho através do efeito termomagnético, além da Termodinâmica que rege o funcionamento desses dispositivos. Foi apresentado o ciclo Brayton magnético que normalmente é utilizado na literatura para descrever esses dispositivos, fazendo uso dos diagramas de magnetização – campo magnético e temperatura - entropia. Além disso, uma analogia entre as grandezas envolvidas nos sistemas tradicionais de compressão de gás e as envolvidas nos processos magnéticos foi mostrada.

Foi proposta uma classificação dos motores termomagnéticos como sendo de dois tipos diferentes. Os motores do tipo Edison, que são aqueles onde o material magnético recebe calor, realiza trabalho e rejeita calor simultaneamente, e os motores do tipo Tesla, onde o material magnético recebe calor, realiza trabalho e rejeita calor em momentos distintos. Posteriormente, foram conduzidos estudos mostrando que o ciclo termodinâmico desenvolvido nos motores tipo Edison é diferente do desenvolvido nos motores tipo Tesla. Mostrou-se experimentalmente que os motores do tipo Tesla desenvolvem um ciclo real que se aproxima com bastante precisão de um ciclo Brayton magnético. Já para os motores tipo Edison mostrou-se através de abordagem numérica que o ciclo desenvolvido não pode ser

aproximado por um ciclo Brayton magnético. Para esses motores o ciclo é complexo e difícil de se descrever.

Foi feita uma comparação entre ambos os tipos de motores através da análise dos ciclos, considerando que ambos operavam nas mesmas condições de temperatura, campo magnético aplicado e fator de demagnetização, concluiu-se que os motores do tipo Tesla apresentam melhores respostas de trabalho específico produzido por ciclo e eficiência relativa à eficiência de Carnot.

Foi apresentada uma extensa revisão bibliográfica, demonstrando as principais contribuições dos trabalhos envolvendo motores termomagnéticos. Na revisão foram apresentados protótipos descritos na literatura, comparações entre a conversão de calor utilizando motores termomagnéticos e outras tecnologias, além da análise de resultados experimentais de alguns trabalhos. Foi mostrada uma visão geral dos motores termomagnéticos, e a partir dos trabalhos explorados na revisão bibliográfica, foram elencadas vantagens, desvantagens e sugestões de aplicações para os motores termomagnéticos.

No capítulo de introdução, mostrou-se que foram encontradas na literatura duas equações distintas para o cálculo da força magnética, sendo que, pela análise do trabalho realizado pelas forças descritas nas diferentes equações, existiriam condições onde elas retornariam valores diferentes. A fim de determinar a equação que corretamente descreve a força magnética, que é a responsável por produzir trabalho num motor termomagnético, foram conduzidos dois experimentos de medição de força.

Os resultados mostraram que a força magnética só ocorre na presença de gradiente de campo magnético, sendo que um gradiente de magnetização induzido por um gradiente de temperaturas, não é capaz de produzir força magnética na

presença de um campo magnético homogêneo. Concluiu-se que a equação que descreve corretamente o comportamento da força magnética é a equação de força de Kelvin. Sendo que a equação que descreve o comportamento do trabalho realizado por uma força magnética é a que dá origem à equação de força de Kelvin.

Aplicou-se então uma metodologia usando a equação de força de Kelvin para o cálculo da força magnética resultante em um motor termomagnético do tipo Tesla, demonstrando que o trabalho produzido no motor é igual ao trabalho produzido pela força magnética resultante. Essa metodologia para o cálculo do trabalho foi validada, comparando-se os resultados de trabalhos calculados analiticamente com os dados experimentais de um protótipo construído e ensaiado para diferentes temperaturas. Essa metodologia validada foi chamada de Método da Força.

Foram descritas as vantagens e desvantagens da aplicação do Método da Força em relação à abordagem por análise de ciclo termodinâmico, que foi descrita na introdução e posteriormente validada experimentalmente. Concluindo que a abordagem por análise do ciclo termodinâmico retorna valores mais generalistas, sendo necessário conhecer apenas o campo magnético aplicado durante o resfriamento e o aquecimento do material magnético, além das suas curvas de entropia em função da temperatura e do campo magnético.

Já para o Método da Força é necessário conhecer o perfil do campo aplicado, fazendo uso das curvas de entropia em função da temperatura e do campo magnético, para determinar a variação de temperatura devido ao efeito magnetocalórico, e as curvas de magnetização em função do campo magnético e da temperatura, na determinação da força magnética que atua no sistema. Contudo, ao se aplicar o Método da Força é possível verificar as condições mínimas de

temperatura para o sistema funcionar, levando em conta a carga aplicada e o circuito magnético que fornece o campo ao motor.

A fim de verificar a influência da temperatura, do campo magnético aplicado, do fator de demagnetização e do tipo de transição magnética, aplicou-se a abordagem por análise de ciclo termodinâmico, verificando o comportamento do trabalho específico produzido por ciclo, e da eficiência relativa à eficiência de Carnot.

Quanto à temperatura, concluiu-se que quanto maior a diferença de temperaturas atingidas pelo material magnético durante os processos de aquecimento e resfriamento, maior o trabalho produzido por ciclo, sendo que há saturação do trabalho para grandes diferenças de temperaturas. Ao se impor uma condição de temperaturas que garanta a transição entre os estados ferromagnético e paramagnético, têm-se melhores relações de trabalho produzido por ciclo e eficiência. Observou-se que para condição onde o material magnético entra em equilíbrio térmico com a fonte com a qual troca calor, a eficiência relativa à eficiência de Carnot é máxima quando o trabalho produzido por ciclo é mínimo.

Quanto ao campo magnético aplicado, concluiu-se que, de forma geral, quanto maior a diferença entre o campo magnético aplicado nos processos de aquecimento e resfriamento, maior o trabalho produzido por ciclo. Contudo, observa-se uma exceção para as condições de pequenas diferenças de temperaturas, onde se nota que, com o aumento da variação de campo, o trabalho produzido por ciclo aumenta até atingir um valor máximo, e então começa a diminuir. Mostrou-se também que existe uma saturação do trabalho com o aumento do campo, e isso ocorre para campos magnéticos altíssimos, onde a fase ferromagnética se torna estável devido ao campo aplicado. Para regiões distantes das regiões de saturação de trabalho por estabilização da fase ferromagnética, quanto maior a diferença de

campo aplicado, melhor a resposta em termos de eficiência relativa à eficiência de Carnot.

Quanto ao fator de demagnetização, mostrou-se que o aumento deste funciona exatamente como uma redução na variação do campo magnético aplicado. Assim, conclui-se que, de modo geral, deve-se tentar minimizar o fator de demagnetização, obtendo-se melhores resultados de trabalho produzido por ciclo e eficiência relativa à eficiência de Carnot.

Quanto ao tipo de transição, mostrou-se que motores operando com materiais com transição de primeira ordem apresentam melhores respostas de trabalho específico produzido por ciclo em relação à eficiência relativa à eficiência de Carnot, principalmente quando há uma alta histerese térmica associada à transição. Motores termomagnéticos operando com materiais que possuam alta histerese térmica apresentarão elevada densidade energética.

Baseado nas conclusões das influências de cada um dos parâmetros estudados propôs-se um motor termomagnético do tipo Tesla. O desenvolvimento do motor teve início a partir do desenvolvimento de seu circuito magnético, onde foi proposto um arranjo constituído de ímãs disponíveis comercialmente, obtendo-se para esse arranjo uma variação de pouco mais 1,3 T de campo aplicado no entreferro. A partir do campo magnético foi desenvolvido um estudo a fim de minimizar o fator de demagnetização para o material magnético utilizado no sistema. Foi selecionada uma geometria que produz um fator de demagnetização de 0,043. Apesar das análises indicarem que o uso de materiais de primeira ordem com alta histerese térmica ser vantajoso, a literatura carece de materiais desse tipo bem descritos. Considerou-se então o uso de gadolínio como material magnético no motor proposto.

De posse da geometria e do campo magnético, aplicou-se o Método da Força para determinação das curvas características do motor, sendo calculado o trabalho produzido por ciclo em função da temperatura, a eficiência relativa à eficiência de Carnot e a relação de trabalho e eficiência.

Como nesses sistemas a frequência de operação é majoritariamente determinada pelo tempo de troca de calor, não foi possível calcular a potência do sistema, pois o Método da Força desenvolvido não aborda os instantes de transferência de calor, mas apenas os instantes de realização de trabalho.

Dito isso, são elencadas a seguir as principais contribuições científicas deste trabalho.

7.1. Principais contribuições do trabalho

- Foi proposta uma classificação para os motores termomagnéticos, sendo classificados em dois tipos, os motores tipo Edison e os motores tipo Tesla. Os tipos de motores foram diferenciados quanto ao modo de funcionamento e ciclo termodinâmico. Foi feita uma comparação entre dois motores de diferentes tipos, operando nas mesmas condições, onde se mostrou que os motores tipo Tesla apresentam características de trabalho e eficiência mais interessantes.
- Foram feitas medidas experimentais de ciclo termodinâmico, mostrando que o ciclo desenvolvido nos motores do tipo Tesla pode ser aproximado para um ciclo Brayton magnético teórico. Os resultados de ciclos foram mostrados nos diagramas magnetização - campo aplicado e temperatura - entropia. Até onde se sabe, essa é a primeira

vez que medidas experimentais de ciclo em motores termomagnéticos são apresentadas e comparadas com o ciclo Brayton magnético.

- Foi apresentado um estudo demonstrando que apenas um gradiente de magnetização não é capaz de produzir força magnética, quando submetido a um campo uniforme e homogêneo. Mostrando que a equação que corretamente descreve a força magnética é a equação de força de Kelvin. Dessa forma, concluiu-se que o trabalho produzido pela força magnética em um motor termomagnético é calculado a partir da equação de onde se deriva a força de Kelvin. Essa é uma importante contribuição, visto que diversos trabalhos abordando motores termomagnéticos usam equações referentes à força magnética de Liu, que não descreve corretamente o comportamento da força magnética fora da região linear das curvas de magnetização em função do campo aplicado.
- Foi proposto um método para o cálculo do trabalho, mostrando que o trabalho realizado em um motor é igual ao trabalho realizado pela força magnética resultante no sistema. Com o método é possível identificar as condições de funcionamento levando em conta as temperaturas atingidas pelo material magnético e a carga aplicada ao motor.
- Através de análises por ciclo termodinâmico, verificou-se a influência da temperatura, condições de campo magnético, fator de demagnetização, tipo de transição e histerese térmica em motores termomagnéticos. Sendo que, até onde se sabe, esta é a primeira vez que a influência do fator de demagnetização e da histerese térmica são verificadas para motores termomagnéticos. Os resultados obtidos

mostram que esses parâmetros não podem ser desprezados no desenvolvimento desses dispositivos.

É claro que esse trabalho não resolve todas as questões relacionadas ao estudo e aplicação de motores termomagnéticos, contudo, suas contribuições abrem caminho para outros estudos abordando os motores termomagnéticos. A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que complementariam as contribuições descritas neste texto.

7.2. Propostas para trabalhos futuros

Os estudos envolvendo motores termomagnéticos do tipo Edison foram conduzidos via simulação computacional. Dessa forma, fica proposta a condução de um trabalho onde se construa um motor termomagnético do tipo Edison, e nele sejam conduzidos experimentos semelhantes aos mostrados nesse texto para a determinação experimental do ciclo desenvolvido em um motor do tipo Tesla. Dessa forma, a partir de medidas experimentais de ciclo nos motores tipo Edison, propor um ciclo de operação teórico apropriado para o dispositivo.

Também pode ser feita uma abordagem semelhante para os geradores termomagnéticos sem partes móveis. Assim, todos os tipos de dispositivos de conversão de calor em trabalho utilizando-se do efeito termomagnético estariam bem caracterizados, com seus ciclos de operação identificados.

Para aplicações reais, um dos principais parâmetros de interesse em motores térmicos é a potência gerada pelo sistema. Nos motores termomagnéticos do tipo Tesla, a frequência de operação é regida pelo tempo de troca térmica. Sendo assim, modelos para determinação da potência devem incluir os termos de transferência de

calor. Foi desenvolvida uma metodologia para o cálculo da força durante os instantes em que os motores tipo Tesla realizam trabalho. De forma que, a fim de se desenvolver modelos capazes de calcular a potência dessas máquinas, é proposto o desenvolvimento de modelos para os instantes em que o material magnético troca calor com as fontes, determinando o tempo de troca térmica e possibilitando uma boa estimativa do perfil de potência dessas máquinas.

Na revisão bibliográfica foram apresentados estudos mostrando como a utilização de regeneradores térmicos pode contribuir na melhoria da eficiência de dispositivos termomagnéticos. Sendo assim, sugere-se a realização de estudos buscando maneiras de se usar a regeneração de calor nesses dispositivos, bem como verificar como seu uso modifica os parâmetros de interesse nos motores termomagnéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. E. Lora and F. N. Teixeira, “Capítulo 3 - Energia e Meio Ambiente,” in *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações*, Itajubá MG: FUPAI, 2006.
- [2] A. Thekdi and S. U. Nimbalkar, *Industrial Waste Heat Recovery: Potential Applications, Available Technologies and Crosscutting R&D Opportunities*. 2015.
- [3] R. A. Kishore and S. Priya, “Low-grade waste heat recovery using the reverse magnetocaloric effect,” *Sustain. Energy Fuels*, 2017.
- [4] P. W. Egolf, A. Kitanovski, M. Diebold, C. Gonin, and D. Vuarnoz, “Magnetic power conversion with machines containing full or porous wheel heat exchangers,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 7, pp. 758–762, Apr. 2009.
- [5] D. Vuarnoz *et al.*, “Quantitative feasibility study of magnetocaloric energy conversion utilizing industrial waste heat,” *Appl. Energy*, vol. 100, pp. 229–237, 2012.
- [6] L. D. R. Ferreira, C. V. X. Bessa, I. Silva, and S. Gama, “A linear reciprocating thermomagnetic motor powered by water heated using solar energy,” in *Green Design, Materials and Manufacturing Processes*, T. Ferreira, Ed. London: CRC Press, 2013, pp. 107–111.
- [7] Y. Takahashi, T. Matsuzawa, and M. Nishikawa, “Fundamental performance of the disc-type thermomagnetic engine,” *Electr. Eng. Japan*, vol. 148, no. 4, pp. 26–33, Sep. 2004.
- [8] F. Brailsford, “Theory of a ferromagnetic heat engine,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 111, no. 9, p. 1602, 1964.
- [9] D. Solomon, “Thermomagnetic mechanical heat engines,” *J. Appl. Phys.*, vol.

- 65, no. 1989, p. 3687, 1989.
- [10] A. Iorga, M. M. Codescu, R. Şaban, and E. A. Pătroi, "Low Curie temperature in Fe-Cr-Ni-Mn alloys," *UPB Sci. Bull. Ser. B Chem. Mater. Sci.*, vol. 73, no. 4, pp. 195–202, 2011.
 - [11] L. Von Moos, K. K. Nielsen, K. Engelbrecht, and C. R. H. Bahl, "Experimental investigation of the effect of thermal hysteresis in first order material MnFe(P,As) applied in an AMR device," *Int. J. Refrig.*, vol. 37, no. 1, pp. 303–306, 2014.
 - [12] V. Basso *et al.*, "Specific heat and entropy change at the first order phase transition of La(Fe-Mn-Si)₁₃-H compounds," *J. Appl. Phys.*, vol. 118, no. 5, p. 053907, 2015.
 - [13] W. D. Callister and David G. Rethwisch, "Magnetic Properties," in *Materials science and engineering: an introduction*, 8th ed., John Wiley & Sons, Inc, 2009, pp. 800–839.
 - [14] M. Almanza, A. Kedous-Lebouc, J.-P. Yonnet, U. Legait, and J. Roudaut, "Magnetic refrigeration: Recent developments and alternative configurations," *EPJ Appl. Phys.*, vol. 71, no. 1, pp. 1–11, 2015.
 - [15] A. Smith, "Who discovered the magnetocaloric effect?," *Eur. Phys. J. H*, vol. 38, no. 4, pp. 507–517, 2013.
 - [16] P. W. Egolf, A. Kitanovski, D. Vuarnoz, M. Diebold, and C. Besson, "An introduction to magnetic refrigeration," in *22th International Congress on Refrigeration*, 2007, pp. 1–8.
 - [17] A. M. J. Mahdy, "Overview for published Magnetocaloric Materials," *Int. J. Comput. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 192–200, 2017.
 - [18] R. M. Bozorth, "The Magnetization Curve and the Domain Theory," in

- Ferromagnetism*, IEEE Magnetics Society Liaison to IEEE Press, 1993, pp. 476–554.
- [19] C. V. X. Bessa, L. D. R. Ferreira, O. Horikawa, J. C. B. Monteiro, F. G. Gandra, and S. Gama, “On the influence of thermal hysteresis on the performance of thermomagnetic motors,” *J. Appl. Phys.*, vol. 122, no. 24, p. 244502, Dec. 2017.
 - [20] T. A. Edison, “Pyromagnetic Motor,” US Patent 380,100, 1888.
 - [21] N. Tesla, “Thermo Magnetic Motor,” US Patent 396,121, 1889.
 - [22] A. Karle, “The thermomagnetic Curie-motor for the conversion of heat into mechanical energy,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 40, no. 9, pp. 834–842, Oct. 2001.
 - [23] T. A. Edison, “On the Pyromagnetic Dynamo - A Machine for Producing Electricity Directly from Fuel,” *Sci. Am.*, vol. 57, no. 9, p. 133, 1887.
 - [24] T. A. Edison, “On the Pyromagnetic Dynamo, a Machine for Producing Electricity Directly from Fuel,” *Electr. World*, vol. 9, pp. 111–113, 1887.
 - [25] L. Kirol and J. Mills, “Numerical analysis of thermomagnetic generators,” *J. Appl. Phys.*, vol. 83415, no. March, pp. 824–828, 1984.
 - [26] J. F. Elliott, “Thermomagnetic Generator,” *J. Appl. Phys.*, vol. 30, no. 11, p. 1774, 1959.
 - [27] P. W. Egolf, S. Gama, and D. Vuarnoz, “Thermomagnetism with external and internal magnetic field quantities,” *J. Appl. Phys.*, vol. 118, no. 2, p. 023903, 2015.
 - [28] A. Smith, C. R. H. Bahl, R. Bjork, K. Engelbrecht, K. K. Nielsen, and N. Pryds, “Materials challenges for high performance magnetocaloric refrigeration devices,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 2, no. 11, pp. 1288–1318, 2012.
 - [29] B. K. Pugh, D. P. Kramer, and C. H. Chen, “Demagnetizing factors for various

- geometries precisely determined using 3-D electromagnetic field simulation,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 4100–4103, 2011.
- [30] A. Kitanovski and P. W. Egolf, “Thermodynamics of magnetic refrigeration,” *Int. J. Refrig.*, vol. 29, no. 1, pp. 3–21, 2006.
- [31] R. M. Bozorth, “Energy, specific heat, and magnetocaloric effect,” in *Ferromagnetism*, IEEE Press., IEEE Magnetics Society Liaison to IEEE Press, 1993, pp. 728–744.
- [32] G. Vats, A. Kumar, N. Ortega, C. R. Bowen, and R. S. Katiyar, “Pyroelectric control of magnetization for tuning thermomagnetic energy conversion and magnetocaloric effect,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, no. 7, pp. 2383–2391, 2016.
- [33] R. A. Kishore and S. Priya, “A review on design and performance of thermomagnetic devices,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. February 2017, pp. 33–44, 2018.
- [34] C.-J. Hsu, S. M. Sandoval, K. P. Wetzlar, and G. P. Carman, “Thermomagnetic conversion efficiencies for ferromagnetic materials,” *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 12, p. 123923, 2011.
- [35] E. T. Dilmieva *et al.*, “Experimental simulation of a magnetic refrigeration cycle in high magnetic fields,” *Phys. Solid State*, vol. 58, no. 1, pp. 81–85, 2016.
- [36] K. N. Andreevskii, A. G. Mandzhavidze, I. G. Margvelashvili, and S. V. Sobolevskaya, “Investigation of the thermodynamic and physical characteristics of a thermomagnetic engine with a gadolinium working element,” *Tech. Phys.*, vol. 43, no. 9, pp. 1115–1118, Sep. 1998.
- [37] A. Post, C. Knight, and E. Kisi, “Thermomagnetic energy harvesting with first order phase change materials,” *J. Appl. Phys.*, vol. 114, no. 3, p. 033915, 2013.

- [38] K. B. Joshi and S. Priya, "Multi-physics model of a thermo-magnetic energy harvester," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 5, p. 055005, 2013.
- [39] A. Noume, M. Risser, and C. Vasile, "Modeling of a Magnetocaloric System for Electric Vehicles," in *Proceedings of the 2013 COMSOL Conference in Rotterdam*, 2013.
- [40] R. Teyber *et al.*, "Passive force balancing of an active magnetic regenerative liquefier," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 451, pp. 79–86, 2018.
- [41] M. Almanza, A. Pasko, F. Mazaleyrat, and M. LoBue, "First vs second order magnetocaloric material for thermomagnetic energy conversion," *IEEE Trans. Magn.*, pp. 1–6, 2017.
- [42] M. Faraday, "Experimental researches in electricity. Fourth Series," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. 123, pp. 507–522, 1833.
- [43] E. J. Houston and E. Thomson, "A curious thermo-magnetic motor," *J. Franklin Inst.*, vol. 107, no. 1, pp. 39–40, Jan. 1879.
- [44] C. Hering, "Pyro-magnetic motors and generators of electricity," *J. Franklin Inst.*, vol. 124, no. 4, pp. 278–288, Oct. 1887.
- [45] N. TESLA, "Pyromagneto-electric generator," US Pat. 428,057, 1890.
- [46] E. Schwarzkopf, "Thermo-magnetically actuated source of power," US Patent 2016100 A, 1935.
- [47] L. Brillouin and H. P. Iskenderian, "Thermomagnetic Generator," *Elec. Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 300–311, 1948.
- [48] J. F. Elliot, S. Legvold, and F. H. Spedding, "The ferromagnetic properties of the rare earth metals, Ames Laboratory ISC Technical Reports. 48.," 1953.
- [49] W. A. Steyert, "Stirling-cycle rotating magnetic refrigerators and heat engines for use near room temperature," *J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 3, p. 1216, 1978.

- [50] D. Solomon, "Design of a thermomagnetic generator," *Energy Convers. Manag.*, vol. 31, no. 2, pp. 157–173, 1991.
- [51] A. Kitano, J. Tušek, U. Tomc, U. Plaznik, M. Ožbolt, and A. Poredoš, *Magnetocaloric Energy Conversion*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [52] M. Trapanese, "D-Q axis theory of thermomagnetic Curie motor," in *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, 2010, pp. 3282–3286.
- [53] M. Trapanese, "A dq axis theory of the magnetic, thermal, and mechanical properties of Curie motor," *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 7, p. 07E706, 2011.
- [54] C. Palmy, "A new thermo-magnetic wheel," *Eur. J. Phys.*, vol. 27, no. 6, pp. 1289–1297, Nov. 2006.
- [55] M. Trapanese, A. Viola, and V. Franzitta, "Design and Experimental Test of a Thermomagnetic Motor," *AASRI Procedia*, vol. 2, pp. 199–204, 2012.
- [56] M. Trapanese, G. Cipriani, V. Di Dio, V. Franzitta, and A. Viola, "Optimization of a thermomagnetic motor," *J. Appl. Phys.*, vol. 117, no. 17, p. 17A750, May 2015.
- [57] C.-J. J. Hsu, S. M. Sandoval, K. P. Wetzlar, and G. P. Carman, "Thermomagnetic conversion efficiencies for ferromagnetic materials," *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 12, p. 123923, 2011.
- [58] C. S. Alves, G. L. Foleiss, G. T. F. Vieira, W. Szpak, and F. C. Colman, "SIMULATION OF A THERMOMAGNETIC MOTOR USING NiFe ALLOY AND Gd," in *Fifth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag V*, 2012, no. September, pp. 17–20.
- [59] C. S. Alves, F. C. Colman, G. L. Foleiss, G. T. F. Vieira, and W. Szpak,

- “Numerical simulation and design of a thermomagnetic motor,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 61, no. 2, pp. 616–622, 2013.
- [60] A. C. Souza *et al.*, “Modeling and simulation of thermomagnetic reciprocating engine by gravity,” in *Refrigeration Science and Technology Proceedings - Thermag VII*, 2016, no. September, pp. 87–90.
- [61] K. Murakami and M. Nemoto, “Some experiments and considerations on the behavior of thermomagnetic motors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 8, no. 3, pp. 387–389, Sep. 1972.
- [62] K. Halbach, “Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material,” *Nucl. Instruments Methods*, vol. 169, no. 1, pp. 1–10, Feb. 1980.
- [63] M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto, and Y. Matsuura, “New material for permanent magnets on a base neodymium and iron,” *Sumitomo Tokushu Kinzoku Giho*, vol. 8, pp. 17–23, 1985.
- [64] C. Vasile and C. Muller, “Innovative design of a magnetocaloric system,” *Int. J. Refrig.*, vol. 29, no. 8, pp. 1318–1326, 2006.
- [65] M. Kumada *et al.*, “Development of 4 Tesla permanent magnet,” *PACS2001. Proc. 2001 Part. Accel. Conf. (Cat. No.01CH37268)*, vol. 5, pp. 3221–3223, 2001.
- [66] Y. Takahashi and M. Nishikawa, “Development of thermomagnetic engine for exhaust heat recovery,” in *Digest of INTERMAG 2003. International Magnetism Conference (Cat. No.03CH37401)*, 2003, vol. 1, no. 3, p. EA-12.
- [67] Y. Takahashi and T. I. M. Nishikawa, “Experiment on Cylindrical Thermomagnetic Engine for Exhaust Heat Recovery,” *IEEJ Trans. PE*, vol. 123, no. 3, pp. 389–394, 2003.

- [68] Y. Takahashi, K. Yamamoto, and M. Nishikawa, "Fundamental performance of triple magnetic circuit type cylindrical thermomagnetic engine," *Electr. Eng. Japan*, vol. 154, no. 4, pp. 68–74, Mar. 2006.
- [69] M. Ujihara, G. P. Carman, and D. G. Lee, "Thermal energy harvesting device using ferromagnetic materials," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 9, pp. 1–4, 2007.
- [70] Authur S. Cookfair, "Tesla's Thermomagnetic Motor," *Popular Electronics*, pp. 70–71 & 114, 1966.
- [71] P. S. Coray, D. Wymann, R. Brunner, and N. Vida, "Fully Operational Prototype of a 1 kW Thermo- Magnetic Motor for Generating Electricity from <80°C," in *Abstract for the Delft Days on Magneto Calorics DDMC 2015 Science Center TU Delft*, Nov. 2-3, 2015, p. Invited Mo I 4.
- [72] K. C. Heiniger, D. Wymann, and R. Brunner, "Industrietauglicher Prototyp eines thermomagnetischen Motors (TMM) zur Stromerzeugung, Annual report - Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK - Schweizer Eidgenossenschaft," 2015.
- [73] C.-C. Chen, T.-K. Chung, C.-C. Cheng, and C.-Y. Tseng, "A novel miniature thermomagnetic energy harvester," *SPIE Smart Struct. Mater. Nondestruct. Eval. Heal. Monit.*, vol. 9057, p. 90570X–90570X–6, 2014.
- [74] C. C. Chen, T. K. Chung, C. Y. Tseng, C. F. Hung, P. C. Yeh, and C. C. Cheng, "A Miniature Magnetic-Piezoelectric Thermal Energy Harvester," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 7, 2015.
- [75] A. Rendon-Hernandez and S. Basrour, "Coupled multiphysics finite element model and experimental testing of a thermo-magnetically triggered piezoelectric generator," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 773, p. 012024, 2016.
- [76] M. Gueltig *et al.*, "High Performance Thermomagnetic Generators Based on

- Heusler Alloy Films,” *Adv. Energy Mater.*, pp. 1–19, 2016.
- [77] J. Chun, H.-C. Song, M.-G. Kang, H. B. Kang, R. A. Kishore, and S. Priya, “Thermo-Magneto-Electric Generator Arrays for Active Heat Recovery System,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. August 2016, p. 41383, 2017.
- [78] L. D. R. Ferreira, C. V. X. Bessa, I. da Silva, and S. Gama, “A heat transfer study aiming optimization of magnetic heat exchangers of thermomagnetic motors,” *Int. J. Refrig.*, vol. 37, pp. 209–214, Jan. 2014.
- [79] C. V. X. Bessa *et al.*, “Optimization of heat exchange in magnetic refrigerators and thermomagnetic motors,” in *Refrigeration Science and Technology Proceedings - Thermag VII*, 2016, no. September, pp. 154–157.
- [80] A. Viola, S. Gama, L. D. R. Ferreira, C. V. X. Bessa, and M. Trapanese, “Study of thermomagnetic energy conversion driven by renewable energy,” in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2017, pp. 1–6.
- [81] A. Kitanovski, D. Vuarnoz, M. Diebold, C. Gonin, and P. W. Egolf, “Application of Magnetic << Power Production>> and Its Assessment, Annual report - Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK - Schweizer Eidgenossenschaft,” 2007.
- [82] T.-K. Chung, U. Shukla, C.-Y. Tseng, C.-C. Chen, and C.-M. Wang, “A magnetic/piezoelectric-based thermal energy harvester,” *Act. Passiv. Smart Struct. Integr. Syst.*, vol. 8688, no. January, p. 86880M, 2013.
- [83] D. A. Gabrielyan, V. V. Semenov, and D. S. Martirosov, “Analysis of nonstationary heating and cooling of a thermomagnetic engine gadolinium working element,” *Russ. Aeronaut. (Iz VUZ)*, vol. 56, no. 3, pp. 266–273, Dec.

2013.

- [84] E. Hashimoto, Y. Uenishi, H. Tanaka, and A. Watabe, "Development of a thermally controlled magnetization actuator (TCMA) for a micromachined motor," *Electron. Commun. Japan (Part II Electron.)*, vol. 78, no. 12, pp. 96–103, Dec. 1995.
- [85] C. Cheng, T. Chung, C. Chen, and H. Wang, "A Rotational Actuator Using a Thermomagnetic-Induced Magnetic Force Interaction," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [86] R. Araujo and P. W. Egolf, "Démagnétisation des pistons magnétocaloriques - Thesis," Haute École Spécialisée de Suisse Occidentale, 2015.
- [87] S. Gama *et al.*, "Analytic and Experimental Analysis of Magnetic Force Equations," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 7, pp. 1–4, Jul. 2016.
- [88] R. Engel-Herbert and T. Hesjedal, "Calculation of the magnetic stray field of a uniaxial magnetic domain," *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 7, p. 074504, 2005.
- [89] A. Aharoni, "Demagnetizing factors for rectangular ferromagnetic prisms," *J. Appl. Phys.*, vol. 83, no. 6, pp. 3432–3434, Mar. 1998.
- [90] M. Risser, C. Vasile, B. Keith, T. Engel, and C. Muller, "Construction of consistent magnetocaloric materials data for modelling magnetic refrigerators," *Int. J. Refrig.*, vol. 35, no. 2, pp. 459–467, 2012.
- [91] C. Glorieux, J. Thoen, G. Bednarz, M. A. White, and D. J. W. Geldart, "Photoacoustic investigation of the temperature and magnetic-field dependence of the specific-heat capacity and thermal conductivity near the Curie point of gadolinium," *Phys. Rev. B*, vol. 52, no. 17, pp. 12770–12778, 1995.
- [92] L. D. R. Ferreira, C. V. X. Bessa, S. Gama, and O. Horikawa, "A test stand to measure the magnetization work of magnetocaloric materials," in *Refrigeration*

- Science and Technology Proceedings - Thermag VII*, 2016, no. September, pp. 11–14.
- [93] C. S. Alves, F. C. Colman, G. L. Foleiss, W. Szpak, G. T. F. Vieira, and A. C. Bento, "Corrigendum to 'Simulation of a solar curie wheel using NiFe alloy and Gd' [Int. J. Refrig. 37 (2013) 215–222]," *Int. J. Refrig.*, vol. 43, no. July, p. 227, Jul. 2014.
 - [94] L. Tocado, E. Palacios, and R. Burriel, "Entropy determinations and magnetocaloric parameters in systems with first-order transitions: Study of MnAs," *J. Appl. Phys.*, vol. 105, no. 9, pp. 1–4, 2009.
 - [95] J. L. Zhao, J. Shen, F. X. Hu, Y. X. Li, J. R. Sun, and B. G. Shen, "Reduction of magnetic hysteresis loss in $\text{La}_{0.5}\text{Pr}_{0.5}\text{Fe}_{11.4}\text{Si}_{1.6}\text{Hx}$ hydrides with large magnetocaloric effects," *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 11, p. 113911, 2010.
 - [96] J. C. B. Monteiro, R. D. Reis, A. M. Mansanares, and F. G. Gandra, "Determination of the magnetocaloric entropy change by field sweep using a heat flux setup," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 7, p. 074104, 2014.
 - [97] A. Bartok *et al.*, "Influence of Particles size on the Magnetocaloric Properties of $\text{Mn}_{1.30}\text{Fe}_{0.65}\text{Si}_{0.5}$ Powders," in *Refrigeration Science and Technology Proceedings - Thermag VII*, 2016, pp. 119–122.
 - [98] L. Tocado, E. Palacios, and R. Burriel, "Adiabatic measurement of the giant magnetocaloric effect in MnAs," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 84, no. 1, pp. 213–217, 2006.
 - [99] K. Gaurav and S. K. Pandey, "Efficiency calculation of a thermoelectric generator for investigating the applicability of various thermoelectric materials," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 1, 2017.
 - [100] X. Zhang and L. Zhao, "Thermoelectric materials: Energy conversion between

- heat and electricity," *J. Mater.*, vol. 1, no. 2, pp. 92–105, Jun. 2015.
- [101] R. Bjork, C. R. H. Bahl, A. Smith, and N. Pryds, "Review and comparison of magnet designs for magnetic refrigeration," *Int. J. Refrig.*, vol. 33, no. 3, pp. 437–448, 2010.