

PAULO VÍTOR DE FARIA

**Estudo do Uso de Gadolínio em Refrigeradores
Magnéticos Recíprocos**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2019

PAULO VÍTOR DE FARIA

**Estudo do Uso de Gadolínio em Refrigeradores Magnéticos
Recíprocos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA – MG

2019

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, pela orientação e assistência prestada durante a execução do trabalho

Ao Prof. Dr. José Roberto Tozoni por me apresentar ao tema

À minha família e amigos pelo apoio durante a graduação.

“Que sorte a minha, que sorte da lama”

Kurt Vonnegut

FARIA, P. V., Estudo do Uso de Gadolínio em Refrigeradores Magnéticos Recíprocos. 2019. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Este trabalho realizou uma vasta pesquisa bibliográfica sobre refrigeradores magnéticos alternativos que utilizam o elemento químico gadolínio na fase sólida como refrigerante. A revisão bibliográfica abrange o efeito magnetocalórico, bem como, as características dos materiais que apresentam o efeito. Também na revisão é apresentado o princípio de funcionamento dos refrigeradores magnéticos alternativos e os principais parâmetros para avaliação de seu desempenho. Após a pesquisa bibliográfica foi confeccionada uma tabela, listando publicações pertinentes ao tema, de modo a facilitar pesquisas futuras. Posteriormente, foram propostos os parâmetros iniciais para o projeto de uma bancada alternativa de refrigeração magnética utilizando gadolínio. Por último, foi realizada uma análise de resultados publicados na literatura em condições similares às da bancada projetada, com objetivo de facilitar a análise de resultados a serem obtidos em experimentos futuros.

Palavras-chave: Refrigeração magnética, efeito magnetocalórico, gadolínio, AMR

FARIA, P. V., Estudo do Uso de Gadolínio em Refrigeradores Magnéticos Recíprocos. 2019. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

This study conducted an extensive research about alternative magnetic refrigerators that operate using solid gadolinium as refrigerant. The literature review includes the magnetocaloric effect and the properties of the magnetocaloric materials as well. The review also includes the basic operation of alternatives magnetocaloric refrigerators and evaluation main parameters. After the literature review, it was made a list with relevant articles to facilitate future searches on the subject. Subsequently, it was proposed an initial project of an alternative magnetocaloric refrigerator using gadolinium, to be used for future research. Finally, this study promoted an analysis of results found in the specialized literature, in such a way that future experiments can be easily analyzed.

Keywords: Magnetic refrigeration, magnetocaloric effect, gadolinium, AMR

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Emil Gabriel Warburg, descobridor do efeito magnetocalorico.	(13)
Figura 1.2: Efeito Magnetocalórico.....	(14)
Figura 2.1: Ciclo padrão de compressão de vapor. Fonte: Stoecker et Saiz Jabardo (2002).	(17)
Figura 2.2: Princípio do ciclo de refrigeração magnética. Fonte: Ekren et. al. (2016).....	(18)
Figura 2.3: Representação da variação da entropia total de um sistema. Fonte: Sardinha, F. C. (2008).....	(21)
Figura 2.4: ΔS_{mt} como função da temperatura para diversos materiais para uma variação de campo magnético de 1,5 T. Fonte: Aprea et al(2015).....	(22)
Figura 2.5: ΔT_{ad} como função da temperatura para diversos materiais e para uma variação de campo magnético de 1,5 T. Fonte: Aprea et al.(2015).....	(22)
Figura 2.6: Largura à meia altura da temperatura. Autor: Arne Nordmann (adaptada).....	(24)
Figura 2.7: Amostra de Gadolínio. Fonte: http://images-of-elements.com/gadolinium	(25)
Figura 2.8: magnetização do gadolínio (Fonte: Aprea et al. 2013).....	(26)
Figura 2.9: Calor específico do gadolínio (Fonte: Aprea et al. 2013).....	(27)
Figura 2.10: Ciclo Brayton magnético usando no AMR. Fonte: Aprea et al. (2013).....	(28)
Figura 2.11: Descrição esquemática do processo termo-magnético. Fonte: Barbosa et. al. (2014).....	(29)
Figura 2.12: Spam de temperatura em função da carga térmica para diferentes frequências de operação. Fonte: Gomez et. al. (2012).....	(30)
Figura 3.1: Desenho esquemático de uma célula de gadolínio.....	(35)
Figura 3.2: Ímã de neodímio 40x20x20. Fonte: polomagnetico.com.br	(36)
Figura 3.3: Representação esquemática do AMR. Fonte Ezan et al. (2016).....	(37)
Figura 3.4: Variação de temperatura anual em Uberlândia. Fonte: climate-data.org	(38)

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Analogia entre refrigeração convencional e magnética. Fonte: Kitanoviki et Egolf (2006).....	(31)
Tabela 2.2: Tabela bibliográfica.....	(32)
Tabela 4.1: Parâmetros de projeto Trabalho 1.....	(39)
Tabela 4.2. Valores de ΔT_{ad} para diferentes utilizações Trabalho 1.....	(40)
Tabela 4.3: Parâmetros de projeto Trabalho 2.....	(41)
Tabela 4.4: Valores de ΔT_{ad} para diferentes utilizações Trabalho 2.....	(41)

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolos

T	Temperatura (K)
Q	Calor
W	Trabalho
S	Entropia
H	Campo Magnético
G	Energia Livre de Gibbs
M	Magnetização
C	Calor específico
F	Força
l	Percurso ao longo do qual a força é aplicada

Gregos

Δ	Diferença finita
φ	Fator de utilização
τ	Período de passagem de fluido no AMR
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
χ_m	Suscetibilidade magnética

Subscritos

carnot	Em relação ao ciclo de Carnot
cool	Referente a fonte fria
hot	Referente a fonte quente
comp	Gasto no compressor
aux	Gastos em auxiliares
Total	Soma de todas as componentes
lattice	Componente Latente
el	Componente eletrônica
Mag	Componente Magnética

M	Referente a etapa de magnetização
FWHM	Largura à meia altura do pico
max	Valor máximo
s	Spam
ad	Processo adiabático
p	Pressão constante
H	Campo magnético constante
b	Gasto pelo sistema de bombeamento

Siglas

MCE	Efeito Magnetocalórico
MCM	Material Magnetocalórico
FOMT	Material de transição magnética de primeira ordem
SOMT	Material de transição magnética de segunda ordem
RCP(s)	Capacidade de refrigeração em um processo isotérmico
RCP(T)	Capacidade de refrigeração em um processo adiabático
AMR	Regenerador Magnético Ativo
HHEX	Trocador de calor de alta temperatura
CHEX	Trocador de Calor de baixa temperatura

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - Introdução	12
1.1 Objetivo	14
1.2 Estrutura do Trabalho	14
CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica	16
2.1 Refrigeração Convencional.....	16
2.2 O Efeito Magnetocalórico.....	18
2.3 Abordagem Matemática do Fenômeno.....	19
2.4 Classificação dos MCM	21
2.5 Eficiência dos MCM.....	24
2.6 O Gadolinio.....	25
2.7 O Regenerador Magnético.....	27
2.8 O Campo Magnético.....	29
2.9 Quantificação de resultados.....	29
2.10 Analogia entre Refrigeração Convencional e Magnética.....	31
2.11 Tabela Bibliográfica.....	31
CAPÍTULO 3 – Projeto do AMR	35
3.1 Células de Gadolinio.....	35
3,2 O Campo Magnético.....	36
3.3 Sistema de Bombeamento de Fluido Intermediário.....	37
3.4 Temperatura dos Trocadores de Calor.....	38

CAPÍTULO 4 – Resultados da Literatura	39
4.1 Trabalho 1 (Gomez et al. 2013)	39
4.2 Trabalho 2 (Trevizoli et al. 2011)	41
CAPÍTULO 5 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	43
Referências Bibliográficas	45

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde o início dos tempos a estocagem de alimentos é uma necessidade das civilizações para lidar com períodos de escassez. Para tanto, foram criados diversos métodos de preservar e armazenar, entre eles a refrigeração. No último século, a refrigeração por compressão de vapor foi mundialmente difundida.

O grande problema do uso de fluidos refrigerantes é a sua agressividade ao meio ambiente, provocando efeito estufa e a degradação da camada de ozônio. Tendo em vista esse apelo ambiental, tem sido feito um esforço internacional com intenção de reduzir e extinguir o uso de fluidos que contribuam para mudanças climáticas, como o Protocolo de Montreal (1987) e o Protocolo de Kyoto (1997).

Nas últimas décadas, a chamada refrigeração magnética tem se mostrado uma alternativa viável para a refrigeração convencional. Utilizando do efeito magnetocalórico (MCE) em materiais sólidos, essa forma de refrigeração é considerada ecologicamente amigável por não fazer uso CFCs ou HFCs.

O MCE é geralmente descrito como o aquecimento ou resfriamento de sólidos magnéticos mediante a variação de um campo magnético externo (Pecharsky et al., 2001). Embora sua primeira aplicação tenha sido na obtenção de temperaturas próximas ao zero absoluto por intermédio da desmagnetização adiabática de sais paramagnéticos (Swalin, 1962, p. 67), o seu uso em protótipos de refrigeradores em temperaturas próximas às temperaturas de refrigeração convencional tem se tornado alvo de estudos constantes ao redor do globo (Sari and Balli, 2013).

Descoberto em 1881 por Warburg (fig 1.1), o chamado efeito magnetocalórico é a variação de temperatura em um material mediante a variações no campo magnético em que está imerso (Warburg, 1881).

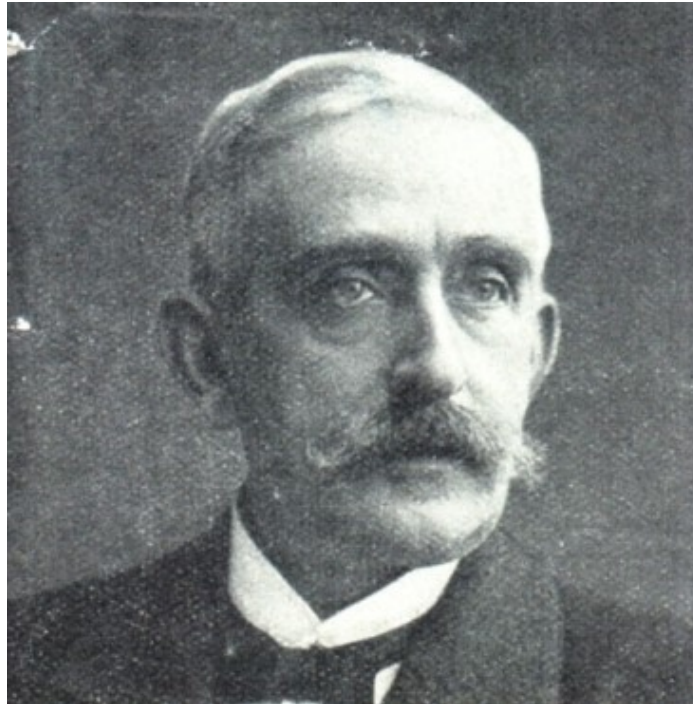


Figura 1.1 – Emil Gabriel Warburg, descobridor do efeito magnetocalorico.

Por possuir características magnéticas peculiares, o elemento químico gadolínio, tem sido alvo de pesquisas em varias frentes tecnológicas. Na refrigeração magnética, é comumente escolhido como material magnetocalórico por possuir o máximo de sua capacidade frigorifica em temperaturas próximas às temperaturas de refrigeração convencional. Por isso o elemento é comumente associado a refrigeração magnética.

Em 1982 Barclay propôs um sistema capaz de remover calor de uma fonte fria ciclicamente fazendo uso de material magnetocalorico. Apesar da simplicidade do ciclo, vários equipamentos diferentes foram desenvolvidos nesse modelo (Benedict et al, 2016), desde então a refrigeração magnética tem sido considerada uma alternativa viável para substituir a refrigeração por compressão de vapor.

Com o advento dos regeneradores magnéticos seguindo o ciclo proposto por Barclay, dois tópicos emergiram objetivando melhores resultados em refrigeradores magnéticos. O primeiro deles é o desenvolvimento de materiais magnetocalóricos que possuam o MCE em uma faixa maior de temperatura e possuam capacidades frigorificas melhores. O segundo tópico é o desenvolvimento de equipamentos que consumam menos energia para que os regeneradores atinjam coeficientes de desempenho mais elevados (Sari and Bali, 2013).

Com a popularização dos ímãs permanentes de Neodímio-Ferro-Boro, capazes de produzir elevados campos magnéticos, e a descoberta do efeito magnetocalórico gigante na liga $Gd_5(Si_2Ge_2)$ (Pecharsky e Gscheidner Jr, 1997). Essas tecnologias permitiram um grande avanço em ambos os tópicos e também favoreceram a formação de diversos grupos de pesquisa em refrigeração magnética.

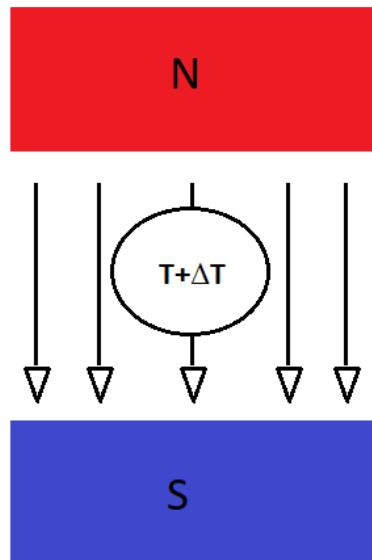


Figura 1.2 – Efeito Magnetocalórico.

1.1 Objetivo

O Objetivo do presente trabalho é realizar uma revisão da literatura sobre o uso do elemento químico gadolínio em refrigeradores magnéticos de primeira geração. Nessa condição, dar-se-á o efeito magnetocalórico no gadolínio de uma perspectiva termodinâmica e seu uso em refrigeradores magnéticos. Por fim, o trabalho também propõe os parâmetros iniciais para o desenvolvimento de um refrigerador magnético de primeira geração segundo o modelo de Barclay.

1.2 Organização do trabalho

O trabalho foi dividido em cinco capítulos para melhor organização e facilitar a busca por informações e permitir uma leitura contínua e de fácil compreensão.

No capítulo 1 é realizada uma breve introdução sobre o tema apresentando o assunto, justificando a importância da substituição de refrigeradores convencionais e o objetivo do trabalho.

O capítulo 2 é destinado a uma breve revisão teórica sobre o efeito magnetocalórico e seu uso em refrigeração, uma breve comparação entre a refrigeração convencional e a magnética, além de apresentar resultados publicados na literatura mostrando sua competitividade para com a refrigeração convencional.

No capítulo 3 estão propostas as etapas básicas para o projeto de um refrigerador magnético recíproco, como os estudados durante a revisão bibliográfica.

O capítulo 4 é dedicado a resultados experimentais encontrados na literatura em refrigeradores semelhantes.

No capítulo 5 estão as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo de qualquer sistema de refrigeração é remover calor de uma fonte fria e rejeitar para uma fonte quente, tal processo, de acordo com a segunda lei da termodinâmica, não pode acontecer espontaneamente, sendo assim necessário despende trabalho para sua realização (Nussenzveig, 2002, p.210).

2.1 Refrigeração Convencional

O sistema de refrigeração convencional faz uso da evaporação endotérmica de um fluido refrigerante, chamado de efeito frigorífico. Para que o efeito aconteça ciclicamente é necessária uma sucessão de estados termodinâmicos que retornem o fluido ao mesmo estado termodinâmico inicial.

Na figura 2.1 é apresentado as etapas de um ciclo convencional de refrigeração, onde:

- 1-2 → Compressão de fluido refrigerante;
- 2-3 → Calor rejeitado para a fonte quente no condensador;
- 3-4 → Expansão do fluido no dispositivo de expansão;
- 4-1 → Retirada de calor da fonte fria no evaporador.

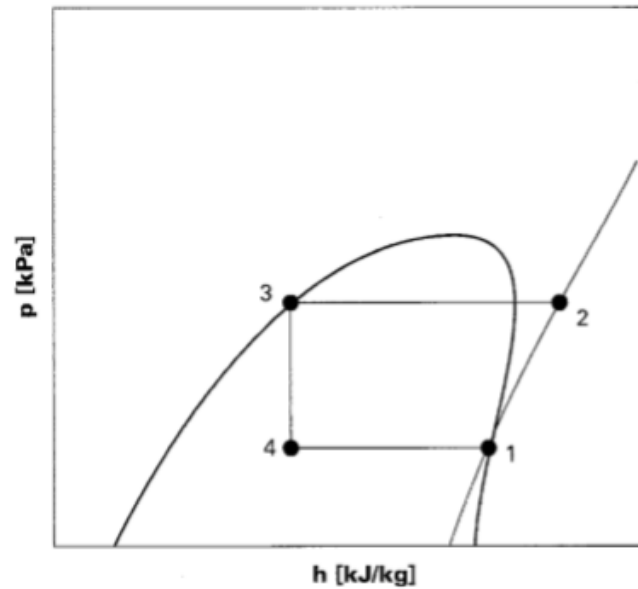


Figura 2.1 – Ciclo padrão de compressão de vapor. Fonte: Stoecker et Saiz Jabardo (2002).

A compressão do fluido (ponto 1) aumenta sua energia total, permitindo que haja um fluxo de energia para fora do fluido no trocador de calor de alta temperatura (ponto 2) até que o fluido deixe a região de mudança de fase (ponto 3). Logo após o líquido comprimido passa por um dispositivo de expansão adiabática, onde sua temperatura cai bruscamente (ponto 4). Essa redução de temperatura é responsável pela transferência de calor da fonte fria para o fluido, provocando sua mudança de fase e o retorno ao estado termodinâmico inicial.

O parâmetro comumente usado para avaliar a eficiência dos ciclos de refrigeração convencional é o COP (coeficiente de desempenho) que é calculado em valores ideais (em relação ao ciclo de Carnot), e em valores reais conforme as equações abaixo:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{cool}}{T_{heat} - T_{cool}} \quad (1)$$

$$COP = \frac{Q_{cool}}{\Sigma(W_{comp} + W_{aux})} \quad (2)$$

Em que T_{cool} e T_{heat} são a temperatura da fonte fria e a temperatura da fonte quente respectivamente, Q_{cool} é o calor retirado na fonte fria e $\Sigma(W_{comp} + W_{aux})$ corresponde ao somatório de todos os trabalhos envolvidos no funcionamento do ciclo de refrigeração.

2.2 O Efeito Magnetocalórico

Segundo Ekren et. al (2016) todos os materiais magnéticos apresentam efeito magnetocalórico (MCE), o efeito tem seu máximo na temperatura de Curie (temperatura de mudança de fase magnética de um material magnético). O MCE ocorre em materiais magnéticos submetidos ao um campo magnético variável. A Temperatura do material magnético aumenta quando um campo magnético é aplicado. A entropia do material magnético é função da temperatura e do campo magnético e consiste em três componentes principais: entropia dos elétrons (S_e), entropia de rede (S_r), e entropia magnética (S_m) (Pecharsky et al. 2001).

$$S_{total}(H, T) = S_m(H, T) + S_r(T) + S_e(T) \quad (3)$$

O efeito da entropia dos elétrons é desprezível frente às outras entropias.

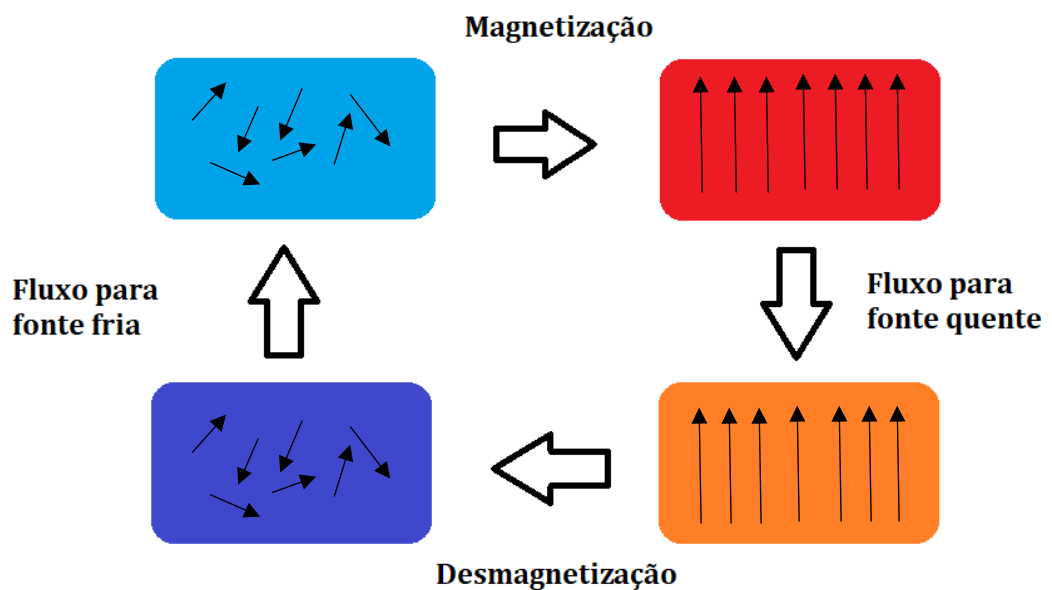


Figura 2.2 – Princípio do ciclo de refrigeração magnética.

A figura 2.2 mostra as duas etapas básicas do MCE: o processo isotérmico que provoca uma variação na entropia, e o processo adiabático que causa uma variação na temperatura. Quando o material magnetocalórico (MCM) é exposto ao campo magnético os momentos moleculares são forçados a se alinhar na mesma direção do campo, provocando uma redução na entropia magnética (Kitanovsk et. al. 2005). Como a entropia total permanece constante, a

redução na entropia magnética é compensada pelo aumento da entropia da rede. O aumento de entropia da rede causa um aumento de temperatura adiabático no material. Por outro lado, durante a desmagnetização os momentos moleculares tendem a se dispor de forma randômica, causando um aumento da entropia magnética (Kitanovsk et. al. 2005). De maneira contrária a etapa de magnetização, esse aumento de entropia provoca uma queda adiabática de temperatura no material.

2.3 Abordagem Matemática do Fenômeno

Aqui serão apresentados apenas os aspectos fundamentais e mais relevantes mostrados por Barbosa et. al. (2014). Dessa forma, admitindo pressão e volume constantes, a forma da energia livre de Gibbs do material magnetocalórico pode ser escrita da seguinte forma:

$$-dG = SdT + MdH = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_H dT + \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_T dH \quad (4)$$

Sendo M a magnetização e H o campo magnético. Entropia e magnetização se relacionam segundo a seguinte relação de Maxwell:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_T = \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H \quad (5)$$

Ao ser integrada, a eq.5, resulta uma relação entre entropia como função da temperatura e do campo magnético:

$$\Delta S = \int_{H_1}^{H_2} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H dH \quad (6)$$

Entropia também pode ser escrita como função do calor específico:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_H = \frac{c(H,T)}{T} \quad (7)$$

Se integrada, a eq.7 nos dá a variação da entropia como função da temperatura e de um campo magnético, sendo divididos entre campo zero ($H = 0$) e um campo qualquer não nulo ($H \neq 0$):

$$S(T)_{H=0} - S(0)_{H=0} = \int_0^T \frac{C(H=0,T)}{T} dT \quad (8)$$

$$S(T)_H - S(0)_H = \int_0^T \frac{C(H,T)}{T} dT \quad (9)$$

ou:

$$\Delta S = S(T)_H - S(T)_{H=0} = \int_0^T \frac{1}{T} [C(H,T) - C(H=0,T)] dT \quad (10)$$

A pressão e volume constantes, a entropia pode ser escrita em termos da temperatura e do campo magnético:

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_H dT + \left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_T dH \quad (11)$$

Substituindo as equações já mostradas para cálculo de entropia em uma transformação adiabática e reversível:

$$dT = -\frac{T}{C(H,T)} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right) dH \quad (12)$$

Integrando a eq. 12, obtemos a variação de temperatura adiabática entre os campos magnéticos H_0 e H_1 .

$$\Delta T_{ad} = -\int_{H_0}^{H_1} \frac{T}{C(H,T)} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right) dH \quad (13)$$

Ou:

$$\Delta T_{ad} = T(S(H_1)) - T(S(H_2)) = -\int_{H_1}^{H_2} \frac{T}{C(H,T)} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right) dH \quad (14)$$

A figura 2.3 mostra as curvas de entropia total de um sistema, em função da temperatura para dois campos magnéticos diferentes, H_0 e H_1 . A figura também mostra as duas transformações associadas a variação de campo magnético já equacionadas (adiabática e isotérmica). Na fig.2.3 também é mostrado a influência de cada componente na entropia total do material, e sua resposta ao aumento de temperatura.

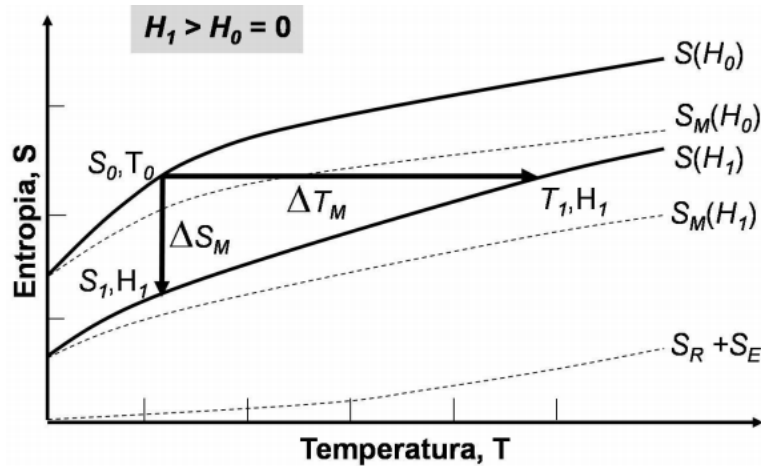


Figura 2.3– Representação da variação da entropia total de um sistema. Fonte: Sardinha, F. C. (2008).

2.4 Classificação do MCM

Materiais magnetocalóricos (MCM) são categorizados pela natureza de sua resposta a um campo magnético em temperaturas constantes próximas a temperatura de Curie, conforme a energia livre de Gibbs (eq.15). Materiais que apresentam descontinuidade na primeira derivada em relação ao campo magnético da energia livre de Gibbs (Magnetização) (eq.16), são classificados como materiais de transição magnética de primeira ordem (FOMT). Materiais cuja descontinuidade está na segunda derivada em relação ao campo magnético da energia livre de Gibbs (Susceptibilidade magnética) (eq.17), são classificados como materiais de transição magnética de segunda ordem (SOMT) (Aprea et al.,2015).

$$-dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_H dT + \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_T dH \quad (15)$$

$$M = \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_T dH \quad (16)$$

$$\chi_m = \frac{\partial}{\partial H} \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_T dH \quad (17)$$

A figura 2.4 e 2.5 mostram valores de ΔT_{ad} e ΔS_M obtidos por Aprea et al. (2015) para diferentes MCMs. Nas figuras fica evidente a formação de picos nos valores de ΔT_{ad} e ΔS_M nas temperaturas de mudança de fase de cada material. Também é notável que em materiais cuja transição magnética é de primeira ordem, como o $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$, o $MnFeP_{0,45}As_{0,55}$ e o $LaFe_{11,384}Mn_{0,356}Si_{1,26}H_{1,52}$, possuem os maiores valores de ΔS_M (Aprea et al. 2015).

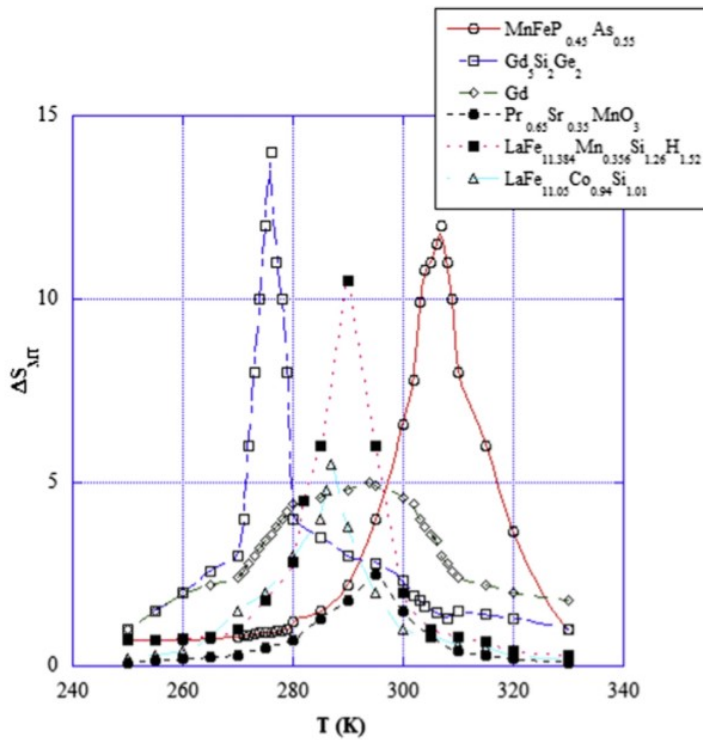


Figura 2.4– ΔS_M como função da temperatura para diversos materiais para uma variação de campo magnético de 1,5 T. Fonte: Aprea et al.(2015).

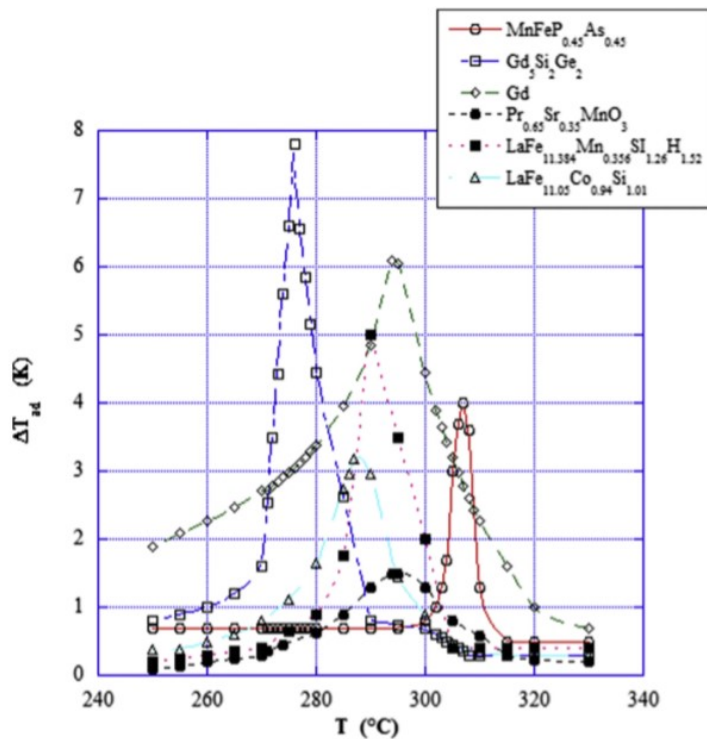


Figura 2.5– ΔT_{ad} como função da temperatura para diversos materiais e para uma variação de campo magnético de 1,5 T. Fonte: Aprea et al.(2015).

Para a maioria dos materiais, o pico da variação de temperatura adiabática é maior nos materiais de FOMT do que nos de SOMT. Em materiais que apresentam FOMT o MCE se concentra em uma faixa estreita de temperatura, enquanto que nos de segunda ordem o efeito acontece numa faixa mais ampla.

Esses resultados são justificados pela tendência de que na maioria dos MCMs, o pico da variação de temperatura adiabática é maior nos materiais de FOMT do que nos de SOMT. O comportamento observado no formato das curvas nas fig.2.4 e fig.2.5 ilustra o comportamento do MCE, onde nos FOMTs o MCE se concentra em uma faixa estreita de temperatura, enquanto que nos de segunda ordem o efeito acontece numa faixa mais ampla.

Critérios para se selecionar o melhor material magnético para refrigeração:

- Grande MCE à temperatura ambiente e à campos magnéticos moderados;
- Material atóxico e não muito caro;
- Elevada estabilidade química;
- Resistência à corrosão;
- Número limitado de elementos em sua composição de modo a facilitar a reprodutibilidade;
- Processo de síntese compatível com produção em larga escala;
- Baixa histerese;
- Baixo calor específico e elevada condutividade térmica;
- Elevada resistência elétrica;
- Correspondência instantânea do MCE com variações no campo;
- Pequenas variações no volume;

2.5 Eficiência dos MCM

A eficiência do MCM como refrigerador magnético pode ser estimada considerando a magnitude de ΔS_M , ΔT_{ad} e considerando dois diferentes parâmetros: RCP(S) e RCP(T), (RCP – relative cooling power)(Phan et Yu, 2007). RCP(S) representa a capacidade de refrigeração em um processo isotérmico, definido pela seguinte equação:

$$RCP(S) = \Delta S_{M(max)} * \Delta T_{FWHM} \quad (15)$$

Onde $\Delta S_{M(max)}$ é o valor máximo de ΔS_M para uma dada variação de campo magnético e ΔT_{FWHM} é a largura do pico correspondendo a metade do máximo, também referido como largura à meia altura da temperatura, como ilustrado na fig. 2.6.

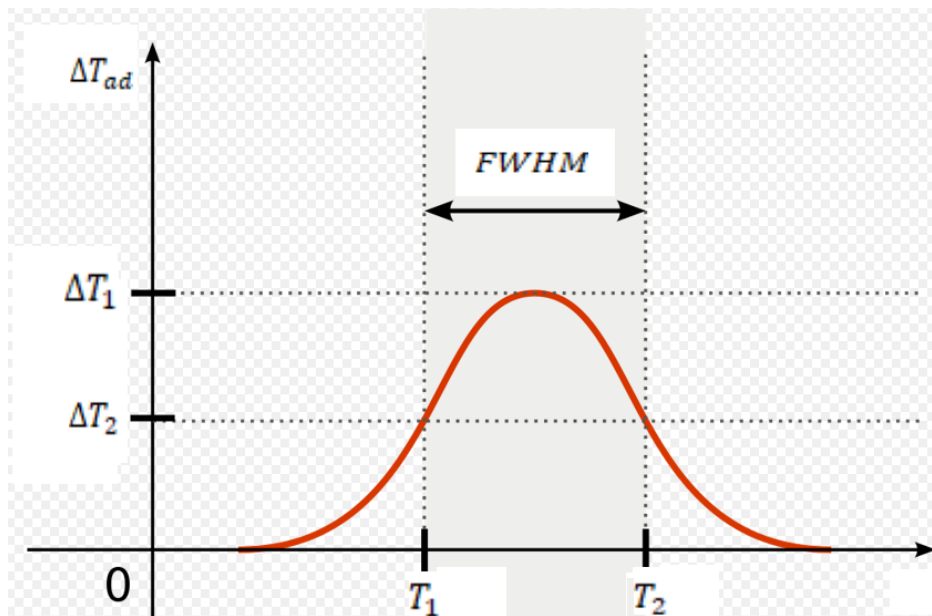


Figura 2.6– Largura à meia altura da temperatura. Autor: Arne Nordmann (adaptada)

De maneira similar, RCP(T) representa a capacidade de refrigeração no processo adiabático, e é definido pelas seguintes equações:

$$RCP(T) = \Delta T_{ad(max)} * \Delta T_{FWHM} \quad (16)$$

Onde $\Delta T_{ad(max)}$ é o valor máximo de ΔT_{ad} para uma variação fixada de campo magnético (Aprea et al.,2015).

2.6 O Gadolínio

Por possuir a transição de fase magnética em temperaturas próximas às temperaturas de refrigeração convencional, o elemento químico gadolínio é amplamente usado em pesquisas e protótipos referentes a refrigeração magnética.

Segundo o relatório técnico sobre massas atômicas da IUPAC 2013, o elemento químico gadolínio, número atômico 64, possui massa atômica de 157,3 u (Melja et al. 2015), e sua transição de fase ferro-paramagnética é de segunda ordem.

De acordo com Dan'kov et al (1998), o gadolínio é a única terra rara que se ordena magneticamente em temperaturas próximas da ambiente, e é considerado um exemplo clássico de ferromagnético. A transformação de fase de paramagnético para ferromagnético é de segunda ordem. A grande intensidade do momento magnético do gadolínio é justificada pela presença de sete elétrons não pareados no subnível 4f.



Figura 2.7– Amostra de Gadolínio ultra pura, 12 gramas. Fonte: <http://images-of-elements.com/gadolinium.php>

Em experimentos realizados com diferentes amostras de gadolínio, Dan'kov et. al. (1995), foi encontrado o valor de 294 K para a transição ferro-paramagnético em campo magnético nulo. Experimentos realizados pelo grupo em 1998 também mostraram que a presença de impurezas nas amostras reduz a temperatura de mudança de fase e alargam a faixa de temperatura onde ocorre.

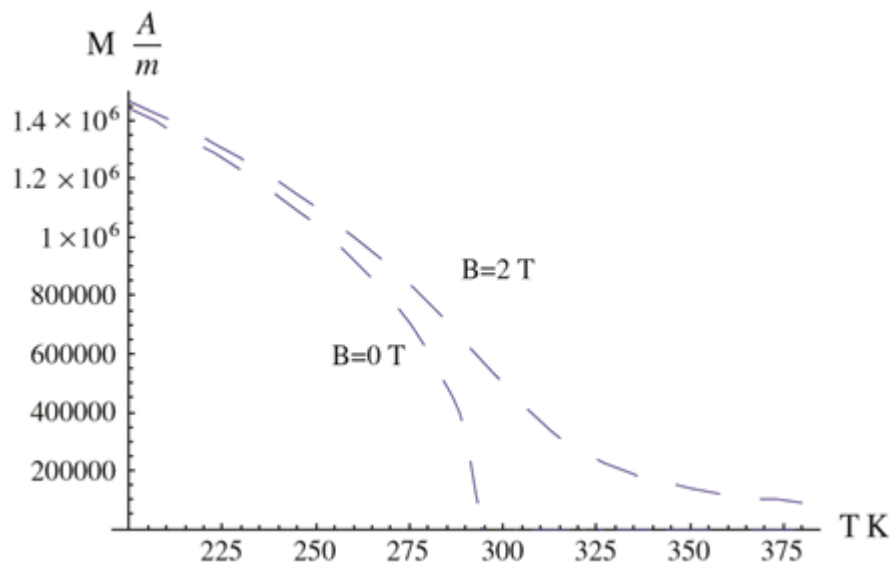


Figura 2.8 – magnetização do gadolínio. Fonte: Aprea et al. 2013

As figuras 2.7 e 2.8 mostram o comportamento da magnetização e do calor específico do gadolínio em função da temperatura para valores de campo magnético de 0 e 2 Teslas obtidos por Aprea et al (2013). Esses resultados foram obtidos utilizando a teoria do campo médio para descrever as propriedades termodinâmicas do gadolínio em sua fase ferromagnética. As soluções para as equações de magnetização foram obtidas a partir de um método numérico iterativo.

O valor máximo de calor específico a 0 T na figura 2.8 determina o início da transição de fase (descontinuidade no calor específico) comprovando o valor obtido por Dan'kov et al. em 1995. Com esses resultados, Aprea et al. (2013) foram capazes de simular computacionalmente diversas composições de AMRs utilizando diferentes MCMs como refrigerantes sólidos.

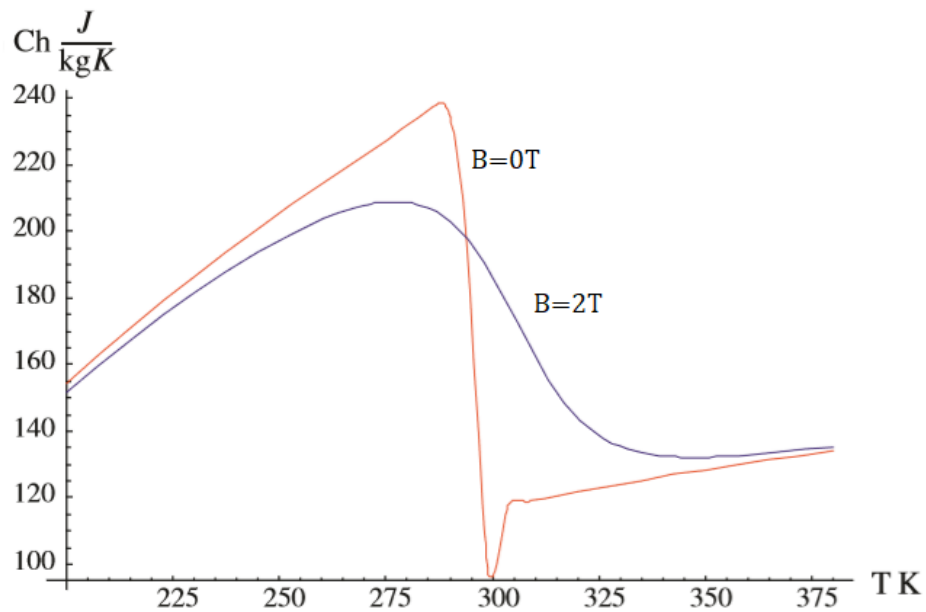


Figura 2.9 – Calor específico do gadolínio. Fonte: Aprea et al. 2013

2.7 O regenerador magnético

Introduzido pela primeira vez por Barclay em 1982, o ciclo magnético ativo de refrigeração conhecido como AMR, faz uso de um ciclo térmico diferente dos até então usados, o chamado ciclo Brayton (Barclay, 1982).

A figura 2.6 apresenta o ciclo Brayton completo. O ciclo consiste em duas transformações isentrópicas (magnetização e desmagnetização adiabáticas) e duas transformações em campo magnético constante (fluxo frio e fluxo quente). Dessa forma, o MCM opera entre os campos H_0 e H_1 e entre as temperaturas de alta T_H e de baixa T_c (Kitanovski e Egolf.,2005).

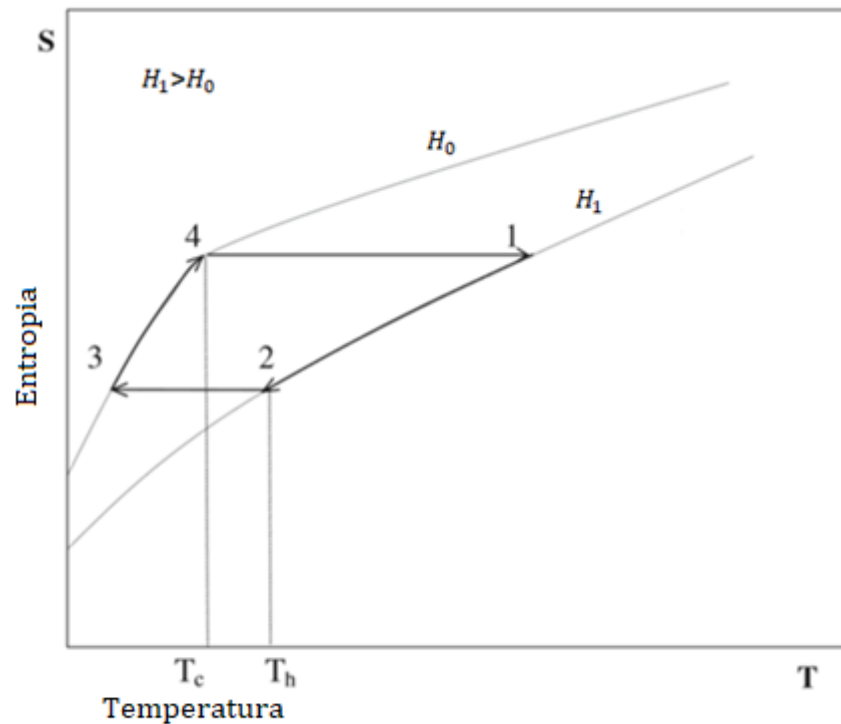


Figura 2.10– Ciclo Brayton magnético usando no AMR. Fonte: Aprea et al.(2013).

O AMR de Barclay é composto por um regenerador capaz de recuperar o calor da matriz de MCM, um trocador de calor de alta temperatura (HHEX), e o trocador de calor de baixa temperatura (CHEX), como mostrado na Fig.2.10. O AMR também usa um fluido secundário para transferência de calor da matriz de MCM para os trocadores de calor.

A figura 2.11 esquematiza as etapas do ciclo Brayton:

- ➔ De 4 para 1 ocorre a magnetização da matriz de MCM e a temperatura sobe de forma isentrópica.
- ➔ De 1 para 2, o fluxo de fluido de troca recupera o calor da matriz de MCM e o rejeita para o trocador de calor de alta a um campo magnético constante.
- ➔ De 2 para 3, o campo magnético externo é removido da matriz de MCM e a temperatura cai isentropicamente.
- ➔ De 3 para 4, o fluido de troca remove calor da frente fria e o rejeita para a matriz de MCM.

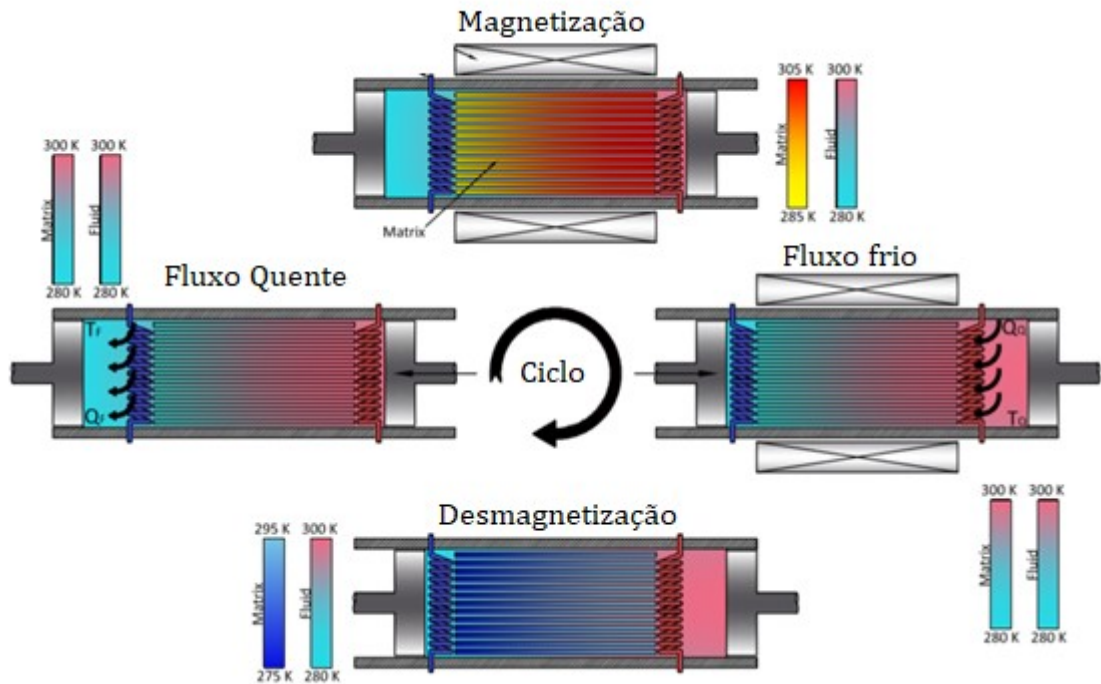


Figura 2.11– Descrição esquemática do processo termo-magnético. Fonte: Barbosa et. al. (2014)

2.8 O Campo Magnético

Como mostrado por Bahl e Nielsen (2009), a variação de temperatura adiabática na matriz ΔT_{ad} está relacionada com a intensidade do campo magnético, obtendo maiores valores de ΔT_{ad} quando a variação de campo sobre o MCM é maior.

Bahl e Nielsen também perceberam que os valores de ΔT_{ad} dependiam fortemente da orientação da amostra em relação ao campo magnético. No mesmo trabalho também foi evidenciada a dependência da variação temperatura adiabática com temperatura do MCM, sendo obtidos maiores valores de ΔT_{ad} nas proximidades da temperatura de Curie.

2.9 Quantificação de resultados

Em um ciclo de operação de um AMR, a curva característica do equipamento é obtida por uma relação entre o spam de temperatura e a carga térmica aplicada, como ilustrado na fig.2.9. (Gomez et. al. 2012).

O spam de temperatura representa a diferença de temperatura obtida entre os trocadores de calor, conforme a eq.17.

$$\Delta T_s = T_{HHEX} - T_{CHEX} \quad (17)$$

Em testes sem carga térmica aplicada, idealmente não há calor transferido para a fonte fria, assim toda energia despendida no AMR é usada para gerar o gradiente de temperatura entre as fontes quente e fria.

Em testes com carga térmica aplicada, é medida a capacidade de refrigeração do equipamento. Nesse tipo de ensaio, o AMR usa a energia fornecida para compensar os ganhos de temperatura no trocador de calor de baixa. A máxima capacidade frigorífica do equipamento é encontrada quando o valor de ΔT_s tende a zero (fig. 2.9), nessa situação toda energia é despendida removendo carga térmica da fonte fria, sem que haja geração de um gradiente de temperatura.

Outro parâmetro fundamental no ciclo do AMR é o fator de utilização φ , que relaciona capacidade térmica do fluido bombeado com a capacidade térmica do MCM.

O fator de utilização é um número adimensional definido conforme a Equação 18.

$$\varphi = \frac{\dot{m} C_p \tau}{M C_h(\mu_0=0)} \quad (18)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássico de fluido secundário, C_p é o calor específico do fluido secundário, τ é o tempo de circulação do fluido no regenerador durante as transformações isomagnéticas do ciclo Brayton, M é massa de MCM usado no regenerador e C_h é o calor específico do MCM à 0 T (Gomez et. al. 2012).

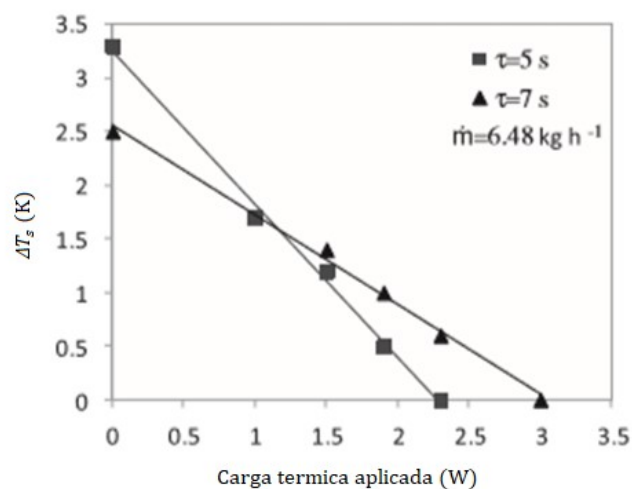


Figura 2.12– Spam de temperatura em função da carga térmica para diferentes frequências de operação. Fonte: Gomez et. al. (2012)

2.10 Analogia Entre Refrigeração Convencional e Magnética

Kitanoviki e Egolf (2006) fazem uma analogia entre as forças motriz parâmetro de ordenamento em sistemas de refrigeração por compressão de vapor e em refrigeradores magnéticos.

Tabela 2.1: Analogia entre refrigerações convencional e magnética. Fonte: Kitanoviki e Egolf (2006).

Variavel	Refrigeração convencional	Refrigeração magnética
Força Motriz	<i>Pressão P</i>	Campo H_0
Parâmetro de Ordem	<i>Volume específico v</i>	<i>Magnetização M</i>
Trabalho no Sistema Fechado	$dw^{ext} = -pdv$	$dw^{ext} = -\mu_0 H_0 dM$
Trabalho no Sistema Aberto	$dw^{ext} = vdp$	$dw^{ext} = \mu_0 M dH_0$

2.11 Tabela Bibliográfica

Após estudar uma grande quantidade de trabalhos, foi confeccionada a Tabela 2.2 com objetivo de facilitar a busca por trabalhos que abordem temas específicos dentre todos estudados.

Tabela 2.2: Tabela bibliográfica

Tabela Bibliografica			
Autor	Objetivo	Conclusão	Observações
C. Aprea, A. Greco, A. Maiorino (2013)	Simular a performance de um AMR com materiais FOMT e SOMT	O desempenho energético dos materiais FOMT são idealmente sempre melhores que os SOMT, e esses apresentam desempenho	Diferenciação entre FOMT e SOMT na introdução
C. Aprea, A. Greco, A. Maiorino (2015)	Simular o comportamento de MCM na forma de terras raras e de metais de transição	Os Materiais esperados apresentaram melhor desempenho, sugestão de material alternativo	Diferenciação entre FOMT e SOMT na introdução. Modelagem matemática
O. Ekren, A. Yilanci, M.A.Ezan, M. Kara, E.Biyik (2016)	estudar refrigeração magnética em termos do span de temperatura usando gadolínio e água e etilenoglicol como HTF	Os Materiais esperados apresentaram melhor desempenho, sugestão de material alternativo	Comparação de resultados experimentais com simulados
Jader Barbosa Jr., Jaime Lozano, Paulo Trevisoli (2014)	Demonstrar o trabalho do laboratório	-	Dedução das equações de forma simplificada.
V. K. Pecharsky, K. A. Gschneider, A. O. Pecharsky, A. M. Tishin (2001)	Estudar o comportamento do Cp frente a dependência da temperatura e campo magnético constante	Pode-se prever a temperatura de pico do MCE conhecendo-se o calor Cp,h(T) para dois valores diferentes de campo magnético	-
Andrej Kitanovski, Peter Egolf (2004)	Apresentar a termodinâmica envolvida na refrigeração magnética cíclica	-	Dedução completa das equações que descrevem o fenômeno
B. Kaeswurm, K. Friemert, K. P. Skokov, O. Gutfleisch (2016)	Medir efeito magnetocalorico em cementsita proximo a sua temperatura de Curie	O efeito magnetocalorico existe proximo a temperatura de Curie, porem com menor intensidade se comparado ao gadolínio	Sugestão para estudos futuros
S. Yu. Dan'kov, A. M. Tishin, V. K. Pecharsky, K. A. Gschneider (1997)	Avaliar o efeito magnetocalorico no gadolínio usando quatro técnicas diferentes	A presença de impurezas influencia nas propriedades da amostra diminuindo a temperatura de Curie	-

Tabela Bibliográfica

Autor	Objetivo	Conclusão	Observações
Osmann Sari, Mohamed Bailli (2013)	Comparar refrigeração magnética e refrigeração convencional	Refrigeração magnética é uma alternativa viável	Artigo introdutorio
C. R. H. Bahl, K. K. Nielsen (2009)	Discutir a importância de se incluir os efeitos de demagnetização ao se considerar as propriedades magnetocalóricas do gadolínio	-	-
Paulo, V. Trevizoli, Jader P. Barbosa Jr, Pablo A. Oliveira, Fábio C. Canesin, Rogério T. S. Ferreira (2012)	Discutir a importância de se incluir os efeitos de demagnetização ao se considerar as propriedades magnetocalóricas do gadolínio	-	-
J. Romero gómez, R. Ferreira Garcia, J. Carbia Carril, M. Romero Gómez (2013)	Analisar um prototipo de refrigerador magnético	-	Descrição completa do prototipo
Paulo, V. Trevizoli, Jader P. Barbosa Jr, Rogério T. S. Ferreira (2011)	Analisar um prototipo de refrigerador magnético	-	-
WARBURG, E. G. (1881)	-	-	Primeira publicação do efeito magnetocalórico
C. Aprea, A. Maiorino (2010)	desenvolver um modelo pratico que preveja o desempenho e a eficiencia de um AMR usando gadolínio	o modelo consegue prever a capacidade frigorífica, o consumo e o COP	-
M.A. Benedict, S.A. Sherif, D.G. Beers, M. Schroeder (2016)	usar modelos matematicos para prever o MCE em FOMT	os modelos matematicos e numericos apresentam boa correlação com os modelos numericos	-

Tabela 2.2: Tabela bibliográfica (continuação)

Tabela 2.2: Tabela bibliográfica (continuação)

Tabela Bibliográfica			
Autor	Objetivo	Conclusão	Observações
M. Balli, O. Sari, C. Mahmed, Ch. Besson, Ph. Bonhote, D. Duc, J. Forchelet (2012)	apresentar um novo refrigerador magnetico reciproco utilizando imãs permanentes	-	-
M.A. Benedict, S.A. Sherif, M. Schroeder D.G. Beers (2016)	investigar a importancia do design do regenerador e MCM no desempenho do refrigerador	intensidade do campo magnetico, e tamanho da particula tem importancia chave no desempenho.	Uso de MMM para representar materiais FOMT
S. Y. Danil'kov, Yu.I. Spichkin, A.M. Tishin (1995)	investigar magnetização e variação de entropia magnetica proximo à mudança de fase magnetica nos elementos Gd Tb Dy	encontrada $T_c=294$ K para o gadolinio	-
Mehmet Akif Ezan Orhan Ekren b, Cagri Meitin, Ahmet Yilanci, Emrah Biyik, Salih Murat Kara (2016)	Analisar numericamente um AMR usando software comercial	-	-
M.A. Benedict, S.A. Sherif, M. Schroeder, D.G. Beers (2016)	uso de modelo numerico para representar as propriedades termodinamicas dos MCM que apresentam FOMT	-	Uso de MMM para representar materiais FOMT
Sardinha, F. C. (2008)	medir a variação de entropia magnetica nas igas Heusler não-estequiometricas Ni ₅₄ [Mn(1-x)Fe _x] ₁₉ Ga ₂₇	-	discertação de mestrado em portugues

CAPÍTULO 3

PROJETO DO AMR

Para o projeto do AMR, o MCM selecionado foi o gadolínio, pela vasta literatura desenvolvida em seu uso como MCM. O fluido de transferência escolhido foi água pelo baixo custo e por ter suas propriedades termodinâmicas já amplamente estudadas. O modelo de AMR escolhido foi o modelo recíproco operando segundo o ciclo Brayton devido a simplicidade e o vasto estudo desenvolvido desde sua primeira aparição.

3.1 Células de gadolínio

Para o projeto será usado 90 gramas de gadolínio divididos em 9 placas 0,9 mm de espessura, 10 mm de altura e 150 mm de comprimento. Em sua disposição, as 9 placas formarão 8 células. E as células, por sua vez, formarão a matriz de gadolínio por onde o fluido intermediário circulará.

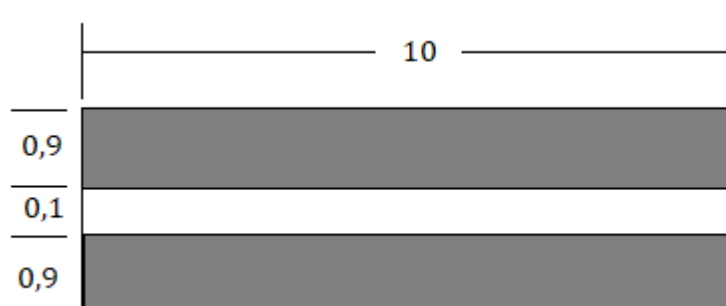


Figura 3.1 – Célula de gadolínio.

As dimensões da placa foram escolhidas de modo a permitir uma maior área de contato entre o fluido e a matriz de gadolínio, otimizando assim a transferência de calor.

A matriz formada possuirá 13350 mm³ de volume total, com uma porosidade de 8,9% e uma área total de contato com o fluido intermediário de 24000 mm².

3.2 O Campo magnético

O campo variável será produzido por um pistão pneumático que irá imergir e retirar a matriz do campo gerado por 8 ímãs de Nd₂Fe₁₄B conhecidos popularmente como ímãs de neodímio nas seguintes dimensões 40x20x20 mm.



Figura 3.2 – Ímã de neodímio 40x20x20. Fonte: polomagnético.com.br

3.3 Sistema de Bombeamento de fluido intermediário

O sistema é composto por uma bomba e por duas válvulas de duas vias que comandam o fluxo para o trocador de calor de alta ou para o de baixa conforme as etapas do ciclo Brayton.

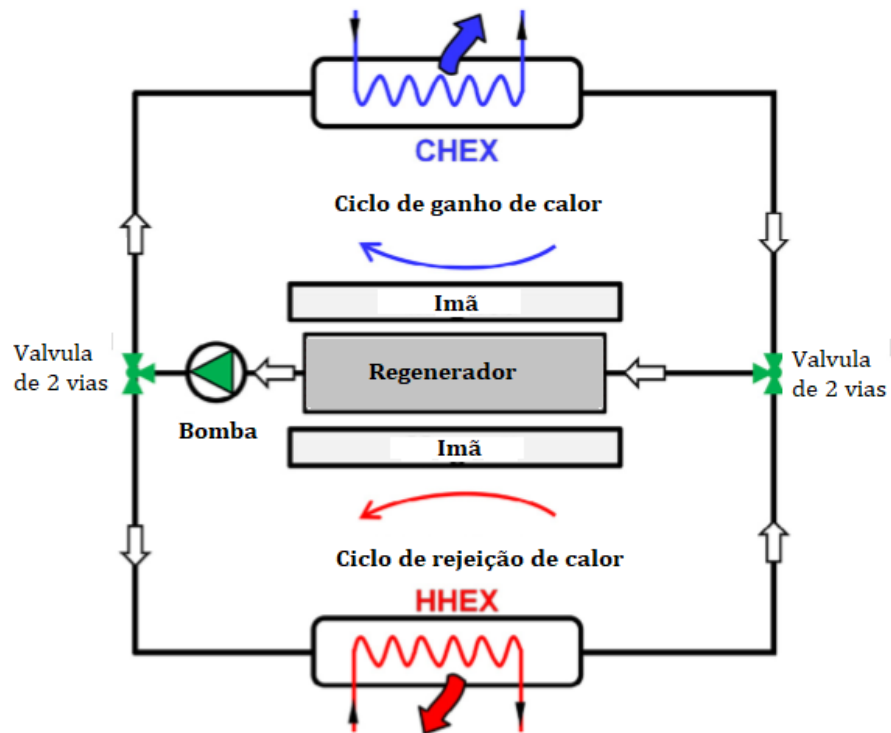


Figura 3.3– Representação esquemática do AMR. Fonte: Ezan et al. (2016) adaptada

Para que o AMR opere na frequência de 1Hz e para que a matriz esteja sempre preenchida com fluido de troca, estima-se que bomba opere com um fluxo mássico de $1,05 \times 10^{-3}$ kg/s ou 3,78 kg/h.

3.4 Temperatura dos Trocadores de calor

O projeto em questão foi planejado para execução de ensaios de carga térmica e de span de temperatura, portanto a temperatura do trocador de calor de baixa temperatura é uma variável a ser avaliada durante os ensaios, quanto a temperatura do trocador de calor de alta temperatura, será a temperatura ambiente, que em Uberlândia varia anualmente conforme ilustrado na fig. 3.5 em graus Celsius.

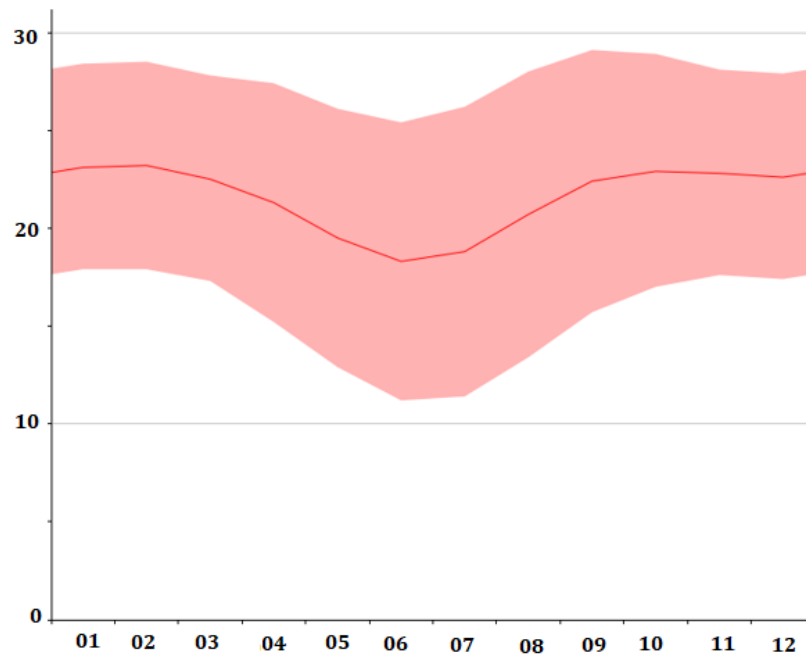


Figura 3.4– Variação de temperatura anual em Uberlândia. Fonte: climate-data.org

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DA LITERATURA

Durante a revisão bibliográfica foram selecionados dois trabalhos em AMRs semelhantes para comparação com os futuros resultados da bancada em projeto.

4.1 Trabalho 1 (Gómez et al. 2013)

Os parâmetros apresentados na Tabela 4.1, e os resultados na Tabela 4.2 foram obtidos por Gomez et al. (2013) utilizando um AMR recíproco com 2 matrizes contendo 180 g de gadolínio operando alternadamente. O AMR utilizado no trabalho também continha um sistema de compensação de forças visando reduzir o trabalho gasto durante as etapas de magnetização e desmagnetização.

Tabela 4.1: Parâmetros de operação do Trabalho 1.

<i>Parâmetro Analisado</i>	
$\tau(s)$	5 / 7
$\Delta H (T)$	1
<i>Massa de MMC (kg)</i>	0,18

Tabela 4.2: Valores de ΔT_s para diferentes utilizações Trabalho 1.

Utilização	$\Delta T_{span\ max}$ (K)	τ(s)
0,82	2,50	5,00
0,85	3,00	5,00
0,91	3,50	5,00
1,10	3,30	5,00
0,85	2,68	7,00
1,15	2,89	7,00
1,28	2,78	7,00
1,53	2,49	7,00

Após a realização dos experimentos, Gomez et al. (2013) encontraram um valor máximo sem carga térmica aplicada de $\Delta T_s = 3,5\ K$ para um fator de utilização de 0,91 e com $T_{HHEX}=296\ K$. A capacidade frigorífica máxima foi de 3 W com um fator de utilização de $\varphi = 1,5$. Cálculos preliminares com base nos resultados também mostraram que aproximadamente 90% da energia mecânica utilizada nas etapas de magnetização e desmagnetização pode ser reduzida com o design de equipamento proposto.

Apesar dos resultados modestos quando comparados a outros já publicados, Gomez et al. consideraram que o protótipo construído cumpriu com as metas iniciais de reduzir as forças envolvidas nas etapas de magnetização e desmagnetização, refrigeração constante e redução de dimensões nos ímãs.

Os pesquisadores apontaram como possíveis causas para os resultados pouco expressíveis os seguintes pontos: a baixa frequência de operação do AMR e a influência da condução de calor longitudinal as placas de Gd. Considerou-se o número de folhas de gadolínio na matriz insuficientes para transferência de calor durante o fluxo de fluido de transferência, assim grande parte da capacidade frigorífica foi perdida por condução na armadura do regenerador, sobretudo para valores reduzidos de número de Reynolds.

4.2 Trabalho 2(Trevizoli et al. 2011)

Na Tabela 4.3 estão apresentados os parâmetros de projeto utilizados por Trevizoli et al. (2011) em um AMR recíproco composto por uma matriz de gadolínio contendo 154 g de MCM. Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados obtidos no equipamento.

Tabela 4.3: Parâmetros de projeto Trabalho 2.

<i>Parâmetro Analisado</i>	
$\Delta H (T)$	1,22
<i>Massa de MMC (kg)</i>	0,154
<i>Vazão mássica (kg/h)</i>	6,45 / 9,76 / 14,90

Tabela 4.4: Valores de ΔT_{ad} para diferentes utilizações Trabalho 2

<i>Utilização</i>	<i>$\Delta T_{span max} (K)$</i>
0,74	2,25
0,49	3,00
0,33	3,20

Trevizoli et al. (2011) encontraram um valor máximo de $\Delta T_s = 4,4 K$ para um fator de utilização de $\varphi = 0,4$ e com $T_{HHEX} = 296,15 K$. Nos testes com carga térmica aplicada, a potência de refrigeração máxima obtida foi de 3,9 W para um fator de utilização de 0,9 e $T_{HHEX} = 296,15 K$. Os pesquisadores concluíram que valores maiores de ΔT_s são obtidos quando o perfil de temperatura do refrigerante sólido acompanha as temperaturas de pico de ΔT_{ad} nas etapas de magnetização de desmagnetização.

Também para um fator de utilização $\varphi = 0,4$ foram encontrados o valor máximo para o ΔT no regenerador, e o menor valor de T_{CHEX} , em uma faixa de utilização entre 0,2 e 0,8. Os autores justificaram esse comportamento com base na variação de fluxo mássico. Para pequenos valores de utilização ($\varphi = 0,2$), baixo valor de vazão mássica ($\dot{m} = 4,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$), não é suficiente para promover grandes taxas de transferência de calor, assim sendo, a cada ciclo de operação o fluido intermediário não é capaz de remover calor da matriz de forma eficiente. Já para valores de utilização maiores que $\varphi = 0,4$, as altas taxas de transferência de calor fazem com que o fluido chegue ao CHEX em temperaturas maiores, prejudicando a eficiência do regenerador.

Ainda com o aumento do fator de utilização, foi observado uma menor diferença entre T_{HHEX} e a temperatura do fluido quente que deixa o regenerador. Trevizoli et al. (2011) também atribuem essa tendência às condições menos favoráveis de troca de calor e ao aumento da temperatura no CHEX.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou uma revisão bibliográfica profunda sobre os principais trabalhos relacionados ao uso de gadolínio em AMRs na literatura. Os resultados encontrados na literatura foram considerados modestos, porém suficientes para provar que a refrigeração magnética tem potencial para substituir a refrigeração convencional. Esses resultados encorajam a pesquisa na área de refrigeradores magnéticos, sobretudo no que diz respeito a otimização da troca de calor e minimização de perdas nos sistemas existentes.

O elevado custo dos MCMs ainda é uma barreira a ser ultrapassada. Durante a revisão bibliográfica foram encontrados diversos candidatos a substitutos do gadolínio, seja por possuírem capacidades magnetocalóricas mais expressivas, seja pelo menor custo. Uma vez ultrapassada essa barreira, esperasse uma maior difusão da tecnologia em ambientes não acadêmicos.

A revisão bibliográfica também permitiu que fosse proposto um esboço de projeto de um AMR recíproco. Que atuará como ponto de partida para trabalhos futuros.

Para continuidade do presente trabalho, faz-se necessária ampliação e atualização da pesquisa bibliográfica, visto que o uso de refrigeradores magnéticos tem sido tema recorrente de diversos grupos de pesquisa, sobretudo nas áreas de desenvolvimento de novos MCMs e no seguimento de projeto e otimização de AMRs.

Fica, ainda, como sugestão a construção do AMR e a realização de ensaios com diferentes MCMs para comparação com os resultados apresentados no capítulo 4. Também fica como sugestão o desenvolvimento de uma rotina computacional capaz de simular a performance do AMR e validá-la com os resultados experimentais.

Seria interessante, também, a realização de um estudo sobre a influência do campo magnético no escoamento de fluidos com partículas nanométricas em suspensão, e o posterior uso de nanofluidos como fluido de transferência no AMR.

Por fim, a longo prazo, sugere-se a utilização do MCM na forma de suspensão nanométrica visando eliminar componentes do sistema, otimizar a troca de calor de forma geral e diminuir o trabalho gasto durante o ciclo, aumentando assim, o COP geral do sistema

Referencias Bibliograficas

Apra, C., Greco, A., Maiorino, A., Masselli, C. **A comparison between rare earth and transition metals working as magnetic materials in an AMR refrigerator in the room temperature range.** 6 de setembro 2015. Applied Thermal Engineering 91 (2015) 767-777.

Apra, C., Greco, A., Maiorino, A. **The use of the first and second order phase magnetic transition alloys for an AMR refrigerator at room temperature: A numerical analysis of the energy performances.** 21 de março 2013. Energy Conversion and Management 70(2013).

Apra, C., Maiorino, A. **A flexible numerical model to study an active magnetic refrigerator for near room temperature applications.** Fevereiro 2010. Applied Energy 87 (2010).

Bahl, C. R. H. and Nielsen, K. K. **The effect of Demagnetization on the Magnetocaloric Properties of Gadolinium.** 9 de janeiro 2009. Journal of applied Physics 105, 013916 (2009).

Balli, M., Sari, O., Mahmed, C., Besson, Ch., Bonhote, Ph., Duc, D., Forchelet, J. **A pre-industrial magnetic cooling system for room temperature application.** Maio 2012. Applied Energy 98 (2012)

Barbosa Jr, J., Lozano, J. Trevizoli, P., **Magnetocaloric Refrigeration Research at inct in cooling and Thermophysics.** 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Novembro 2014. Belem, Pa, Brazil.

Barclay J. A. **The Theory of an Active Magnetic Regenerative Refrigerator.** 1982. (NASA STI/Recon Technical Report N83, 34087).

Benedict, M. A., Sherif S. A., Beers, D. G., Schroeder, M. **A new model of first-order magnetocaloric materials with experimental validation.** 5 de julho 2016. International Journal of Refrigeration 70 (2016) 138–147.

Benedict, M.A., Sherif S.A., Beers, D.G., Schroeder, M. **Experimental impact of magnet and regenerator design on the refrigeration performance of firstorder magnetocaloric materials.** Outubro 2016. International Journal of Refrigeration 74 (2017a).

Benedict, M.A., Sherif S.A., Beers, D.G., Schroeder, M. **The impact of magnetocaloric properties on refrigeration performance and machine desing(2016).** Dezembro 2016. International Journal of Refrigeration 74 (2017b).

Dan'kov, S. Y., Spichkin, Yu. I., Tishin, A. M. **Magnetic entropy and phase transitions in Gd, Tb, Dy and Ho.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials 152 (1996) 208-212.

Dan'kov. S. Y., Tishin, A. M., Pecharsky, V. K., Gschneider Jr, K. A. **Magnetic phase transition and the magnetothermal properties of gadolinium.** Physical Review B volume 57, number 6. 1 Fevereiro 1998.

Ekren, O., Yilanci, A., Ezan, M.A., Kara, M., Biyik, E. **Performance Assessment of a Near Room Temperature Magnetic Cooling System.** 3rd International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2016, 7-11, setembro 2016, Barcelona, Espanha.

Ezan A. M., Ekren O., Metin C., Yilanci, A., Biyik E., Kara S. M. **Numerical Analysis of a Near-Room-Temperature Cooling System.** 29 de dezembro 2016. International Journal of Refrigeration 75 (2017). 262-275.

Gomez, J.R., Garcia, R. F., Carril, J. C., Gomez, M.R. **Experimental Analysis of a Reciprocating Magnetic Refrigeration Prototype.** 10 de fevereiro 2013. International Journal of Refrigeration 36 (2013) 1388 – 1398.

Kaeswurm, B., Friemert, K., Gürsoy, M., Skokov, K.P., Gutfleisch, O. **Direct Measurement of the Magnetocaloric Effect in Cementite.** 27 de fevereiro 2016. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 410 (2016) 105-108.

Kitanovski, A. and Egolf, P. W., **Thermodynamics of Magnetic Refrigeration.** 19 de Agosto de 2005. International Journal of Refrigeration 29 (2006), 3-21.

Meija, J., Coplen, T. B., Berglund, M., Brand, W. A., De Bièvre, P., Gröning, M., Holden, N. E., Irrgeher, J., Loss, R. D., Walczyk, T., Prohaska, T. **Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report).** Pure and Applied Chemistry 88, 2016.

Nussenzveig, H. M. **Curso de Física básica – vol 2 – 4^a ed .** São Paulo: Blucher, 2002.

Pecharsky, V. K, Gscheidner Jr., K. A. **Giant Magnetocaloric Effect in Gd₅(Si₂Ge₂).** Physics Review letter 78.(1997)

Pecharsky, V. K, Gscheidner Jr., K. A., Pecharsky, A. O. and Tishin, A. M. **Thermodynamics of the Magnetocaloric Effect.** 17 de setembro 2001. Publicado em Physical Review b, volume 64, 144406.

Phan, M. H. and Yu, S. C. **Review of the magnetocaloric effect in manganite materials.** J. Magn. Mater. 308(2). 2007. 325-340.

Sardinha, F. C. **O Efeito magnetocalórico nas ligas heusler Ni₅₄[Mn(1-x)Fex]₁₉Ga₂₇**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas. 2008

Sari, O. and Balli, M. **From conventional to Magnetic Refrigeration Technology**. 26 de outubro 2013. Publicado em International Journal of Refrigeration 37.

Stoecker, W. F., Saiz Jabardo, J. M. **Refrigeração industrial**. Editora Edgard Blücher. 2ª edição. São Paulo, 2002.

Swalin, Richard A. **Thermodynamics of Solids**. Nova York: ed John Wiley & Sons, Inc. 1962. p.67.

Trevizoli, P.V., Barbosa Jr, J.P., Oliveira, P.A., Canesin, F.C., Ferreira, R.T.S., **Assessment of demagnetization phenomena im teh performance of an active magnetic regenerator**. Fevereiro 2012. International Journal of Refrigeration 35 (2012).

Trevizoli, P. V., Barbosa Jr, J. B., Ferreira, R. T. S. **Experimental evaluation of a Gd-based Linear reciprocating active magnetic regenerator test apparatus**. 12 de maio 2011. International journal of refrigeration 34. (2011). 1518-1526.

WARBURG, E. G. **Magnetische Untersuchungen**. Über einige Wirkungen der Coerzitivkraft. Annalen der Physik (Leipzig), v. 13, p. 141-164, 1881.

S. Yu. Dan'kov, A. M. Tishin, V. K. Pecharsky, K. A. Gschneider. **Magnetic Phase Transitions and the Magnetothermal Properties of Gadolinium**. PHYSICAL REVIEW B, Volume 57, número 6. 01 de fevereiro 1998.

