

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA (COEME)  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANDRÉ FELIPE MARTINS XAVIER**

**ESTUDO PRÁTICO DO EFEITO MAGNETOCALÓRICO APLICADO  
PARA RESFRIAMENTO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2**

**GUARAPUAVA**

**2018**

**ANDRÉ FELIPE MARTINS XAVIER**

**ESTUDO PRÁTICO DO EFEITO MAGNETOCALÓRICO APLICADO  
PARA RESFRIAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Engenharia Mecânica (COEME), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Lúcia Ferreira  
Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva

**GUARAPUAVA**

**2018**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Guarapuava

Diretoria de Graduação e Educação Profissional - DIRGRAD  
Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME-GP  
Engenharia Mecânica



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ESTUDO PRÁTICO DO EFEITO MAGNETOCALÓRICO APLICADO PARA RESFRIAMENTO**

por

**ANDRÉ FELIPE MARTINS XAVIER**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 03 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Ana Lúcia Ferreira  
Prof<sup>a</sup> Orientadora

---

Raquel da Cunha Ribeiro da Silva  
Prof<sup>a</sup> Co-Orientadora

---

Eduardo Vicentini  
Professor

---

Aldo Przybysz  
Coordenador do curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha família, pela  
compreensão nos momentos de ausência  
e incansável apoio.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela fonte de energia vital, chamada vida.

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço aos meus pais e minha família, por ser minha base e meu alicerce em todos momentos que precisei de ajuda.

Ao meu irmão, um agradecimento especial, pela paciência e dedicação na transferência dos seus conhecimentos.

A minha companheira de jornada, pelo apoio e incentivo.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup> Ana Lúcia Ferreira e co-orientadora Prof<sup>a</sup> Raquel Cunha, por todo suporte e orientação na formação profissional e pessoal.

Ao Laboratório de Materiais e Manufatura Mecânica – Prof. Isaias da Silva, especialmente ao Professor Sergio Gama, pela doação do material utilizado e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos técnicos da UTFPR-Campus Guarapuava, pela ajuda na construção do protótipo.

Ao Laboratório 4Print, pela ajuda na fabricação das peças utilizadas.

Aos meus colegas de sala.

A coordenação do curso, pela cooperação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Ninguém baterá tão forte quanto a vida.  
Porém, não se trata de quão forte pode  
bater, se trata de quão forte pode ser  
atingido e continuar seguindo em frente. É  
assim que a vitória é conquistada.  
(BALBOA, Rocky)

## RESUMO

XAVIER, André Felipe Martins. **Estudo Prático do Efeito Magnetocalórico Aplicado para Resfriamento**. 2018. 75 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

O Efeito Magnetocalórico (EMC) corresponde ao aumento de temperatura de um material magnético quando este é submetido a um campo magnético externo, e da sua diminuição quando o campo é retirado, isto em condições adiabáticas. Visto que os refrigeradores magnéticos são baseados nesse efeito, são excelentes candidatos a refrigeradores do futuro, pois não carregam nenhuma substância nociva e, em fase mais avançada de elaboração, deverão ser também mais econômicos, já que eliminarão o processo de compressão de gases, grande consumidor de energia. Assim este trabalho teve como meta, a construção e caracterização de um protótipo à base de gadolínio que demonstrou o EMC, a fim de completar pesquisas acadêmicas e estudos futuros.

**Palavras-chave:** Efeito Magnetocalórico. EMC. Refrigerador Magnético. Gadolínio. Camada de Ozônio.

## ABSTRACT

XAVIER, André Felipe Martins. **Practical Study of the Magnetocaloric Effect Applied for Cooling**. 2018. 75 pages. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

The Magnetocaloric Effect (MCE) corresponds to the temperature increase of a magnetic material when it is subjected to an external magnetic field, and its decrease when the field is removed, in adiabatic condition. Since magnetic refrigerators are based on this effect, they are excellent candidates for future refrigerators because they do not carry any harmful substances and, at a later stage of preparation, should be economical, since they will eliminate the gas compression process, large consumer of energy. Thus, this work aimed at the construction and characterization of a prototype based on gadolinium that demonstrated the MCE in order to complete academic research and future studies.

**Keywords:** Magnetocaloric Effect. MCE. Magnetic Refrigerator. Gadolinium. Ozone layer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Primeiro Refrigerador elétrico doméstico. Fonte: [4].	13
Figura 2 – Aeronave de pesquisa equipada pela NASA. Fonte: [32].	15
Figura 3 – Gadolínio 99,9% de pureza. Fonte: Autor.	23
Figura 4 - Analogia entre um Ciclo de Compressão/expansão de gás e um ciclo de refrigeração magnética. Fonte: [35].	24
Figura 5 – Refrigerador magnético composto por um material magnetocalórico que se move de forma periódica, que gira através das linhas do campo magnético, como mostrado na figura. Quando a roda, composta pelo material magnetocalórico, passa pelos dois pólos magnéticos, ele aquece. Quando ela sai da zona magnética, esfria. (figura 6) Fonte: [34].	25
Figura 6 - Efeito Magnetocalórico. Fonte: [35].	25
Figura 7 - Motor de gadolínio pelo princípio de funcionamento o Ponto Curie. Fonte: [33].	26
Figura 8 - Convecção do ar. Fonte: [55].	26
Figura 9 - Modelo computacional da hélice que foi utilizada no protótipo. Fonte: Autor.	27
Figura 10 - Cortadora metalográfica CM 60, modelo Teclago. Fonte: Autor.	27
Figura 11 - Disco de Corte 8". Fonte: Autor.	28
Figura 12 - Arco de Serra. Fonte: [47].	28
Figura 13 - Torno (Morsa). Fonte: [48].	29
Figura 14 - Máquina de Afiar. Fonte: [49].	29
Figura 15 - Adesivo Selante Blister 50g Cinza – Selabond. Fonte: [50].	30
Figura 16 - Parte parcial do motor de gadolínio. Fonte: Autor.	30
Figura 17 - Ímã utilizado no trabalho. Fonte: [53].	31
Figura 18 - Isopor 5L, Papel Alumínio e EVA 1cm. Fonte: Autor.	31
Figura 19 - Redução de Cobre 28mm x 15mm. Fonte: Autor.	32
Figura 20 - Conexão das duas caixas, fonte fria do sistema. Fonte: Autor.	32
Figura 21 - Caixas de isopor revestidas com papel alumínio e EVA. Fonte: Autor.	33
Figura 22 – Dimensões do sistema desenhado no CAD, para conectar eletrodo no cooler. Fonte: Autor.	33
Figura 23 - Sistema visto no 3D. Fonte: Autor.	34
Figura 24 - Sistema impresso pela impressora 3D. Fonte: Autor.	34
Figura 25 – Cooler 12 volts, modelo AD0412HB-C56. Fonte: Autor.	34
Figura 26 - Sistema para reciclagem do ar. Fonte: Autor.	35
Figura 27 - Motor Silnik MDN3BC3DSN 0.5-6V 15mA. Fonte: Desconhecida.	35
Figura 28 – Vista lateral do motor de gadolínio acoplado com o Motor DC. Fonte: Autor.	36
Figura 29 – Vista superior do motor de gadolínio acoplado com o Motor DC. Fonte: Autor.	36
Figura 30 - Termômetro Digital. Fonte: [54].	37

Figura 31 – Parte externa da frente final do protótipo. M de Motor (Fonte Quente) e R de Refrigerador (Fonte Fria). Fonte: Autor. ....	37
Figura 32 - 2º Protótipo. Fonte: Autor.....	38
Figura 33 - Modelo do Motor de Passo. Fonte: Autor.....	38
Figura 34 - Ciclo da refrigeração magnética. Fonte: [56]. ....	39
Figura 35 - Projeto da hélice do 3º Protótipo. Fonte: Autor. ....	39
Figura 36 – Vista lateral do motor de gadolínio. Fonte: Autor. ....	40
Figura 37 - Vista superior do motor de gadolínio. Fonte: Autor. ....	40
Figura 38 – Cooler para circular o ar na parte interna do refrigerador. Fonte: Autor. ....	41
Figura 39 - Termômetro digital utilizado no 3º protótipo. Fonte: [57]. ....	41
Figura 40 – Ciclos termomagnéticos. Fonte: Autor. ....	50
Figura 41 – Ciclo utilizado no 3º protótipo. Fonte: [2]. ....	50
Figura 42 - Princípio de operação simples relacionado ao resfriador magnético é usado em um resfriador de roda do tipo poroso. Fonte: [34]. ....	57
Gráfico 1 - Relação entre o monóxido de cloro e o ozônio. Fonte: [32]. ....	16
Gráfico 2 - Ciclo de contato do ímã com o gadolínio 15s. Fonte: Autor. ....	46
Gráfico 3 - EMC do gadolínio com o sistema desligado por 1h. Fonte: Autor. ....	47
Gráfico 4 – Ciclo de contato do ímã com o gadolínio 2 minutos. Fonte: Autor. ....	47
Gráfico 5 - EMC do gadolínio com o sistema desligado por 2h. Fonte: Autor. ....	48
Gráfico 6 - Ciclo de contato do ímã com o gadolínio - 5 minutos. Fonte: Autor. ....	48
Gráfico 7 - EMC do gadolínio com o sistema desligado por 1h. Fonte: Autor. ....	49
Gráfico 8 - O ciclo Ericsson pode operar com regeneração de calor. No caso ideal, não ocorrem perdas de calor. Fonte: [13]. ....	51
Gráfico 9 – Gráfico para valores da entropia do gadolínio em diferentes campos magnéticos e temperaturas. Fonte: [51]. ....	53
Quadro 1 - Destruição da camada de ozônio pelo CFCs. Fonte: [46]. ....	17
Quadro 2 - EMC no processo adiabático e isotérmico. Fonte: [2]. ....	19

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista dos CFCs mais vendidos até perto de 1990 e respectivas aplicações. Fonte: [31]. .....	14
Tabela 2 – Analogia entre um Ciclo de Compressão/expansão de gás e um ciclo de refrigeração magnética. Fonte: [34].....	24
Tabela 3 – Ciclos utilizados no 3º protótipo. Fonte: Autor. ....	45
Tabela 4 – Valores médios das temperaturas referente aos 3 ciclos. Fonte: Autor. .	53
Tabela 5 – Valores das entropias referentes aos 3 ciclos. Fonte: Autor. ....	54
Tabela 6 – Valores das análises referentes aos 3 ciclos. Fonte: Autor. ....	54

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

### **LISTA DE ABREVIATURAS**

a.C.	Antes de Cristo
EMC	Efeito Magnetocalórico

### **LISTA DE SIGLAS**

AMR	Regenerador magnético ativo
CFC	Clorofluorcarbonetos
CTCS	Tetracloretos de carbono
DFA	Departamento de Física Aplicada
HCFC	Hidroclorofluorcarbono
HFC	Hidrofluorcarbonetos
PMR	Regenerador magnético passivo
SDOS	Substâncias destruidoras da camada de ozônio

### **LISTA DE ACRÔNIMOS**

NASA	National Aeronautics and Space Administration
EUA	Estados Unidos da América

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 TEMA .....	8
1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	8
1.2 OBJETIVOS .....	8
1.2.1 OBJETIVO GERAL .....	8
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	8
1.3 JUSTIFICATIVA .....	9
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	10
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>11</b>
2.1 HISTÓRIA DA REFRIGERAÇÃO .....	11
2.2 FLUIDOS REFRIGERANTES, CAMADA DE OZÔNIO E PROTOCOLOS .....	13
2.3 HISTÓRIA DO EFEITO MAGNETOCALÓRICO (EMC) .....	18
2.4 EXPLICAÇÃO DO EFEITO MAGNETOCALÓRICO (EMC) .....	18
2.5 PROTÓTIPOS DE REFRIGERADORES MAGNÉTICOS .....	20
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>23</b>
3.1 IDEALIZAÇÃO DO PROJETO .....	23
3.2 FABRICAÇÃO DA HÉLICE .....	26
3.3 CORTE DO GADOLÍNIO .....	27
3.4 JUNÇÃO DA HÉLICE COM O GADOLÍNIO .....	29
3.5 ESCOLHA DO ÍMÃ .....	30
3.6 RECIPIENTE .....	31
3.7 RECICLAGEM DO AR DA FONTE FRIA .....	33
3.8 1º PROTÓTIPO .....	35
3.9 2º PROTÓTIPO .....	37
3.10 3º PROTÓTIPO .....	38
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DO GADOLÍNIO DO PROTÓTIPO .....	42
4.2 1º PROTÓTIPO .....	43
4.3 2º PROTÓTIPO .....	44
4.4 3º PROTÓTIPO .....	45
4.5 ANÁLISE DO CICLO TERMOMAGNÉTICO DO PROTÓTIPO .....	49
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>56</b>
<b>6 TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>
<b>ANEXO A - Especificações Técnicas do Ímã</b> .....	<b>64</b>
<b>ANEXO B - Arduíno</b> .....	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 TEMA

Este trabalho terá como linha de pesquisa a construção e caracterização de um protótipo de refrigerador magnético, baseado no efeito magnetocalórico, que juntam as áreas da física, materiais, térmica, elétrica, eletrônica, projetos mecânicos, entre outras subáreas do curso de engenharia mecânica.

#### 1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este é um trabalho preliminar para a construção de um refrigerador magnético baseado nesse efeito. A questão seguinte é: Será possível construir um protótipo simples que demonstre o EMC, com os conhecimentos acadêmicos adquiridos no curso de Engenharia Mecânica?

### 1.2 OBJETIVOS

#### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é a construção de um protótipo de refrigerador magnético baseado no efeito magnetocalórico (EMC), a partir do qual se pretende levantar dados do protótipo à base de gadolínio para dar embasamento para trabalhos futuros.

#### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

**Objetivo Específico 1:** Estudar características do gadolínio;

**Objetivo Específico 2:** Fazer uma análise do ciclo termomagnético do protótipo;

**Objetivo Específico 3:** Construir um protótipo a base do gadolínio que demonstre o efeito magnetocalórico.

**Objetivo Específico 4:** Analisar os dados obtidos do dispositivo através da aquisição de dados.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A refrigeração moderna é quase inteiramente baseada em um ciclo de refrigeração de compressão / expansão. É uma tecnologia madura, confiável e de custo relativamente baixo. Ao longo dos anos todas as partes de um refrigerador convencional (isto é, compressor, trocadores de calor, refrigerante, embalagem e isolamento) foram consideravelmente melhoradas devido a esforços ampliados de pesquisa e desenvolvimento. Porém, os líquidos usados como refrigerantes são produtos químicos perigosos, enquanto outros eventualmente escapam para o ambiente contribuindo para o esgotamento da camada de ozônio e o aquecimento global, e, portanto, a refrigeração convencional, em última instância, promove tendências deletérias no clima global.

Já a refrigeração magnética é uma tecnologia emergente que tem o potencial de alta eficiência energética [27,28]. A alta eficiência surge porque os análogos às partes de compressão e expansão do ciclo de vapor são realizados pela magnetização e desmagnetização, respectivamente, de um material magnético [16].

A refrigeração magnética é baseada no efeito magnetocalórico (EMC), cuja origem é o acoplamento de um campo magnético com momentos magnéticos transportados por elétrons itinerantes ou localizados e quantificados em termos de temperatura e / ou mudanças de entropia.

O EMC reflete variações reversíveis da energia interna induzidas pelo campo e o efeito em si representa uma das propriedades mais básicas dos sólidos magnéticos [7,11 e 29]. A refrigeração magnética também possui algumas vantagens em relação a refrigeração convencional, dentre elas são [30]:

- a) Refrigeração Magnética é teoricamente 20% a 30% mais eficiente que a convencional [23];
- b) Reduz a utilização de combustíveis fósseis [23];
- c) Não utiliza gases nocivos à camada de ozônio, como os CFCs [23].

Pode-se perceber a importância dos dados, o que leva a uma justificativa favorável ao estudo deste tema.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, com a seguinte estrutura de tópicos:

- I. Capítulo 1: este capítulo engloba a introdução acerca do tema, delimitação do tema, objetivo geral e específico, justificativa da pesquisa, conjuntamente com a estrutura do trabalho.
- II. Capítulo 2: apresenta-se, de forma detalhada, a revisão da literatura sobre a história da refrigeração, a camada de ozônio, fluidos refrigerantes, protocolos estabelecidos, além da história e da explicação do efeito magnetocalórico. Por fim apresenta alguns autores que criaram protótipos de refrigeradores magnéticos.
- III. Capítulo 3: este capítulo apresenta a descrição da metodologia para a construção do protótipo.
- IV. Capítulo 4: este capítulo traz os resultados e discussões da construção do protótipo.
- V. Capítulo 5: este capítulo traz a conclusão.
- VI. Capítulo 6: este capítulo apresenta sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 HISTÓRIA DA REFRIGERAÇÃO

O homem modifica seus costumes de acordo com suas necessidades e, a conservação de alimentos e bebidas, com o objetivo de aumentar o prazo de consumo, foi sem dúvidas nenhuma, algo fundamental para a sobrevivência da espécie humana. A primeira forma de refrigeração de alimentos foi criada pelos árticos, que perceberam que seus alimentos duravam mais quando enterrados em buracos de gelo.

Desde a antiguidade várias civilizações, como Grécia, Egito, China, desenvolveram métodos distintos para manter os alimentos e bebidas, sob temperaturas baixas, utilizando gelo natural ou misturas de sal e neve. “... Pelo menos 2000 a.C., as pessoas usaram gelo para manter os alimentos frescos, baseando-se no princípio de que o gelo absorve o calor à sua volta, à medida que se liquefaz.” [1 p.282].

Os chineses foram os pioneiros em recolher e armazenar gelo e neve no inverno para serem utilizados no verão e, estes eram prensados e protegidos por palhas secas de cereais e de outros materiais isolantes e, armazenados em cavernas ou abrigos subterrâneos [2]. Já os egípcios que não dispunham de gelo natural, devido a desfavorável situação geográfica e climática de seu país, usavam vasos de barro. Estes por serem porosos permitem a passagem da água contida em seu interior e a evaporação faz baixar a temperatura do ambiente onde são armazenados.

No século XVIII um escocês chamado William Cullen (1710-1790) da Universidade de Glasgow, demonstra o primeiro processo de refrigeração artificial em 1748, no qual usou éter para demonstrar o efeito resfriante de um refrigerante. Porém, mais de cem anos se passaram antes que uma máquina de éter comprimido fosse empregada como refrigerador, assim sua descoberta não teve utilização prática [1].

Somente no início do século XIX, um americano chamado Oliver Evans (1755-1819), apresenta um sistema cíclico, unindo técnicas de evaporação e condensação em 1805, que propiciariam a primeira invenção de uma máquina cíclica de refrigeração, utilizando éter sulfúrico patenteada por Jacob Perkins (1766-1849) em 1834 [2].

Em seguida, outro americano chamado John Gorrie (1803-1855) cria uma máquina que utiliza compressão e expansão de ar, em 1844. Não satisfeito, o escocês James Harrison (1816-1893), que migrara para a Austrália em 1837, desenvolve uma máquina refrigeradora para uma fábrica de cerveja australiana, usando o princípio da compressão de vapor baseado em éter em 1856. Ele e o norte americano, Alexander Twining (1801-1884), estão entre os pioneiros da refrigeração comercial [1].

Já o francês Ferdinand Carré (1824-1900) cria um sistema onde um líquido volátil com amônia (amoníaco como substância refrigerante), circula em volta de uma caixa com ação de um compressor para manter o frio, em 1859 [1].

Mas a grande inovação acontece quando o talentoso engenheiro alemão Carl Von Linde (1842-1934), desenvolve a primeira máquina de refrigeração portátil (Compressor a vapor) em 1873, impulsionando novas ideias que revolucionaram a cadeia do frio no século XX, como a criação do controlador de temperatura e umidade para ambientes projetado por Willis Carrier (1876-1950) em 1902. “Aclamado por sua adaptação, Von Linde passou a se interessar pela construção de refrigeradores domésticos. Em 1891, chegou a vender 12 mil aparelhos para cidadãos particulares.” [3].

“Em 1916 os engenheiros Nathaniel Wales (1883 – 1974) e Alfred Mellows inventaram o primeiro refrigerador elétrico doméstico. Eles trabalhavam para a precursora da Frigidaire. Em setembro de 1918 a invenção foi lançada comercialmente na cidade de Detroit.” [4].



Figura 1 - Primeiro Refrigerador elétrico doméstico. Fonte: [4].

A empresa 'Frigidaire' foi criada em Fort Wayne, Indiana, como 'Guardian Frigerator Company'. No início de 1918 foi vendida para a 'General Motors' que mudou o nome para 'Frigidaire', o que durou até 1979, quando foi vendida para uma subsidiária da 'Eletrolux', a proprietária da marca hoje [4].

Realmente a refrigeração tinha mudado completamente o rumo da história e, estava em imersão total no mercado, prometendo um futuro promissor para a humanidade.

## 2.2 FLUIDOS REFRIGERANTES, CAMADA DE OZÔNIO E PROTOCOLOS

“Ao longo dos anos, diversas substâncias foram usadas como refrigerante, porém sempre com alguma desvantagem, como alta toxicidade ou inflamabilidade. ” [2 p.45].

“Apesar dos problemas com os refrigerantes, a demanda de refrigeração comercial e doméstica cresceu. O processo desenvolvido para atender à demanda do comércio precedeu a refrigeração doméstica em pelo menos 50 anos. ” [1 p.284].

Em 1928 o engenheiro americano Thomas Midgley (1889-1944) e Albert Henne (1901-1967) resolveram preparar várias moléculas diferentes contendo um ou dois átomos de carbono e um número variável de átomos de flúor e cloro em vez de átomos de hidrogênio, resultando os CFCs – compostos com cloro, flúor e carbono – não tóxicos, não inflamáveis, não corrosivos e sem odor, satisfazendo admiravelmente a

todos os requisitos técnicos para um refrigerante. A seguir uma passagem do livro: “*Os botões de Napoleão: As 17 moléculas que mudaram a história*”, que mostra claramente o quão seguro era o líquido CFC:

Midgley demonstrou a segurança de seus novos refrigerantes de maneira bastante sensacional em 1930, numa reunião da American Chemical Society, em Atlanta, na Geórgia. Derramou um pouco de CFC líquido num recipiente vazio e, enquanto o refrigerante fervia, pôs o rosto no vapor, abriu a boca e aspirou profundamente. Virando-se para uma vela previamente acesa, exalou o CFC lentamente, extinguindo a chama – uma demonstração notável e inusitada das propriedades não explosivas e não venenosas do clorofluorcarboneto [1, p.285].

Olhando dessa perspectiva, os CFCs eram os refrigerantes perfeitos e ideais, pois revolucionaram o ramo da refrigeração e se tornaram a base para uma enorme expansão da refrigeração doméstica. Na década de 1950, uma geladeira era considerada um aparelho comum nos lares do mundo desenvolvido. Os CFCs eram praticamente usados em diversas aplicações, como observado pela tabela 1, pois não reagiam com praticamente nada, eram os propelentes ideais. Assim em 1970, quase um milhão de toneladas de CFCs e compostos semelhantes eram produzidos anualmente [1].

NOME TRIVIAL	COMPOSTOS	FÓRMULA	UTILIZAÇÕES PRINCIPAIS
CFC-11	Triclorofluorometano	$CCl_3F$	Aerossóis, ar condicionado.
CFC-12	Diclorodifluorometano	$CCl_2F_2$	Aerossóis, refrigeração, ar condicionado, espumas.
CFC-113	Triclorotrifluoroetano	$C_2Cl_3F_3$	Solvente de componentes eletrônicos.
CFC-114	Diclorotetrafluoroetano	$C_2Cl_2F_4$	Refrigeração e aerossóis.
CFC-115	Cloropentafluoroetano	$C_2ClF_5$	Solvente e refrigeração.

**Tabela 1 - Lista dos CFCs mais vendidos até perto de 1990 e respectivas aplicações. Fonte: [31].**

Contudo, a excelente estabilidade dos CFCs, que os tornou tão populares e úteis, veio a se transformar, algumas décadas mais tarde, num grande quebra-cabeça para a humanidade [31].

Essas substâncias foram usadas sem restrição até 1974, quando o americano Sherwood Rowland e o mexicano Mario Molina descobriram que poderiam destruir a camada de ozônio na alta atmosfera, fato confirmado, em

1985, pela British Antarctic Survey. A descoberta de Molina e Rowland garantiu-lhes o Prêmio Nobel de Química em 1995 [2, p.45].

Então para comprovar a hipótese que evidencia o cloro como causador da destruição do ozônio, os cientistas, argumentaram que, se a decomposição dos CFCs, produzia monóxido de cloro, então os níveis de ozônio devem ser baixos onde os níveis de monóxido de cloro são altos e vice-versa [32]. “James Anderson foi capaz de obter estes dados críticos situando o seu instrumento de medição na asa de um avião voando através do buraco de ozônio da Antártica. ” [32]. A aeronave de pesquisa, mostrada na figura 2, especialmente equipada pela NASA, reuniu grande parte dos dados usados no estudo de James Anderson. A caixa na asa ao centro, contém o instrumento para medir concentrações na atmosfera superior do monóxido de cloro.



**Figura 2 – Aeronave de pesquisa equipada pela NASA. Fonte: [32].**

E como previsto foi verificado que onde o monóxido de cloro era elevado, o ozônio era baixo, reforçando assim a ligação entre a destruição do ozônio e o cloro [32]. O gráfico 1, mostra os dados recolhidos pela aeronave, relacionando assim, com a hipótese de Molina-Rowland.

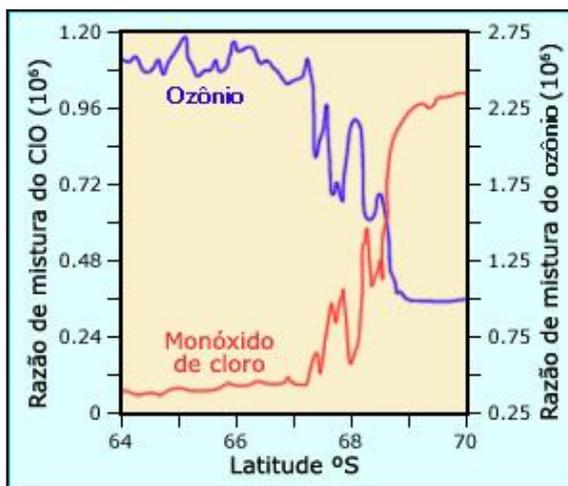


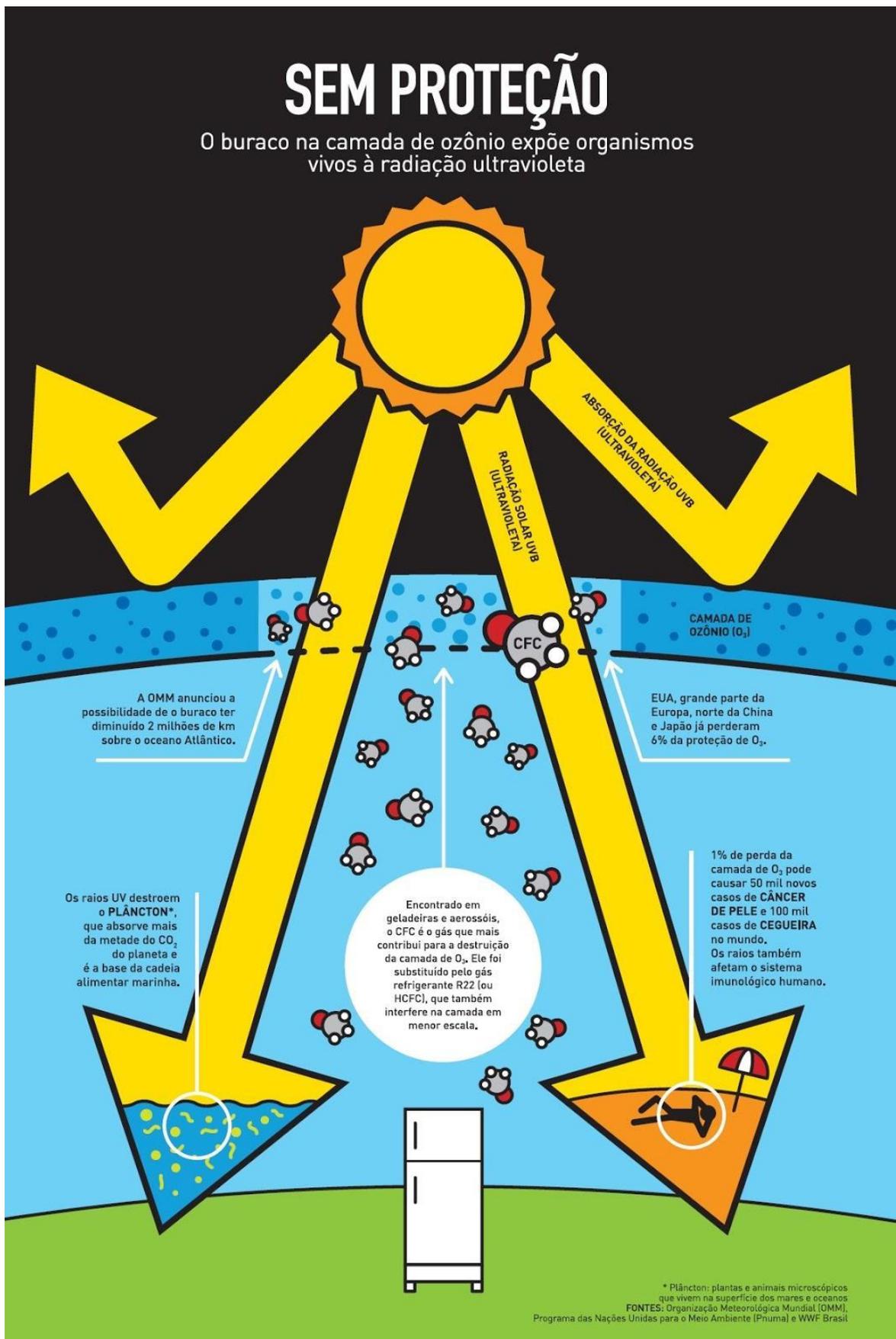
Gráfico 1 - Relação entre o monóxido de cloro e o ozônio. Fonte: [32].

A importância do ozônio para os seres vivos e para o meio ambiente está no fato que é o único gás que filtra a radiação ultravioleta do tipo B (UV-B), que é nociva aos seres vivos. Desta forma, a camada de ozônio age com uma espécie de escudo protetor [5].

A sentença dos gases CFCs veio com a assinatura dos protocolos de Montreal, em 1987, e de Kyoto, em 1997, por parte de diversos países, se comprometendo a reduzir emissão de gases causadores do efeito estufa e conseqüentemente do aquecimento global.

O Protocolo de Montreal é um tratado internacional visando a substituir as substâncias que demonstraram reagir quimicamente com o ozônio na parte superior da estratosfera, as Substâncias Destruidoras da Camada de Ozônio (SDOs), como os grupos Clorofluorcarbonos (CFCs), Halons, Tetracloretos de Carbono (CTCs) e Hidroclorofluorcarbono (HCFCs), emitidas em todo o globo, a partir dos processos de industrialização [6].

As fábricas de refrigeradores passaram a trocar então os CFCs pelo hidrofluorcarbono (HFC), também prejudicial à camada de ozônio, porém em menor intensidade [2].



Quadro 1 - Destruição da camada de ozônio pelo CFCs. Fonte: [46].

### 2.3 HISTÓRIA DO EFEITO MAGNETOCALÓRICO (EMC)

Olhando por todo esse contexto, a busca por novas tecnologias de refrigeração é de suma importância para desenvolvimento sustentável, eficiente e ecológico do planeta. A atual tecnologia usada em refrigeradores domésticos, ainda consome muita energia e requer o uso de CFC ou HFC, gases nocivos à camada de ozônio [2].

E umas das abordagens promissoras e que permite trazer uma revolução para os novos refrigeradores é baseada no efeito magnetocalórico (EMC). Esse interessante fenômeno foi descoberto em 1881 pelo físico alemão Emil Warburg (1846-1931), quando percebeu que um metal pode se aquecer ao ser aproximado de um forte ímã [7]. Logo após essa descoberta, Edison (1847-1931) e Tesla (1856-1943) [8], tentaram se beneficiar desse efeito ao usar motores de calor para produção de energia, porém não tiveram sucesso. Em 1918 Weiss e Piccard [9] explicaram o efeito magnetocalórico. Um tempo depois, Debye [10] e William Giauque (1895-1982) [11] propuseram um método de refrigeração magnética para baixas temperaturas físicas para obter temperaturas sub-kelvin.

A história das aplicações do EMC começou em 1933, quando Giauque e MacDougall [12] verificaram com sucesso o método por experiência. “Nesse ano, o físico canadense William Giauque (1895-1982) conseguiu, usando o EMC, conduzir materiais a temperaturas extremamente baixas (abaixo de 1K ou  $-272^{\circ}\text{C}$  [25]), o que lhe valeu o Prêmio Nobel de Química em 1949.” [2].

Desde a década de 1930, cinco décadas após a descoberta de Warburg, a refrigeração magnética tem sido uma técnica usada em temperaturas físicas baixas. Provou ser útil esfriar de alguns kelvin para alguns centésimos de kelvin, ou em aplicações muito habilidosas para alguns milésimos de kelvin [13].

### 2.4 EXPLICAÇÃO DO EFEITO MAGNETOCALÓRICO (EMC)

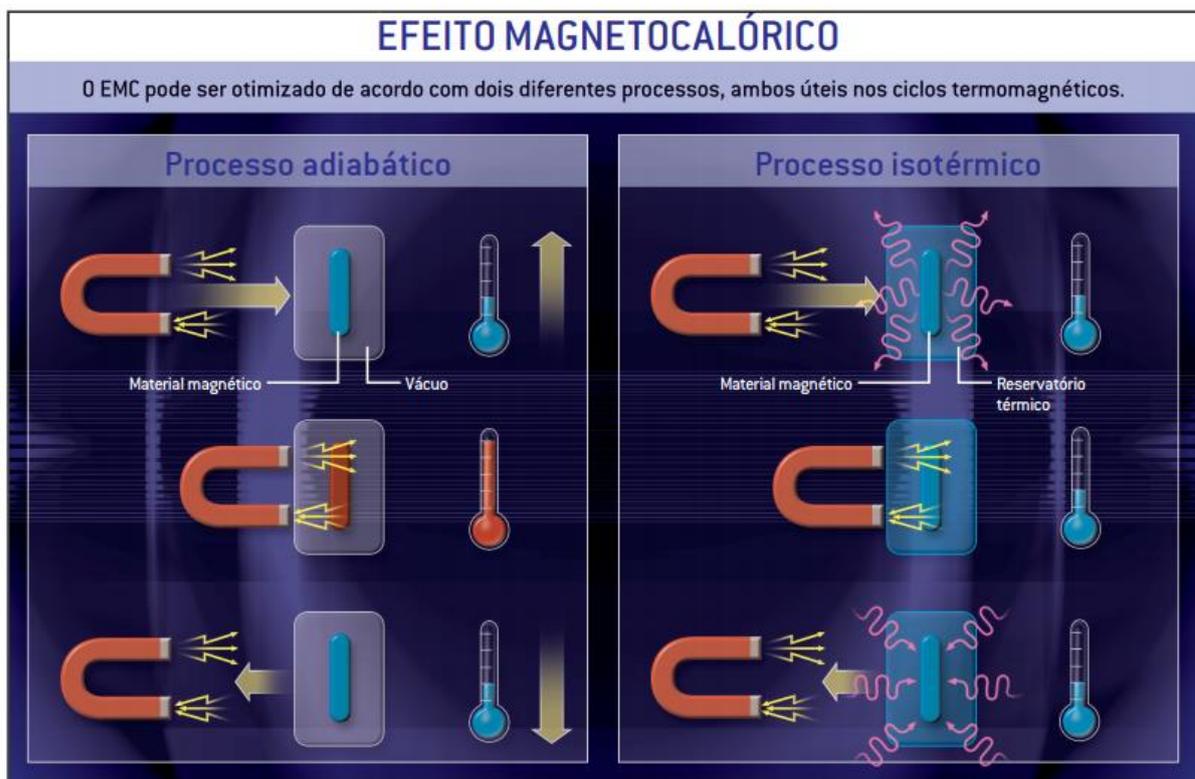
Um material em condições adiabáticas, quando sujeito a variação de um campo magnético externo, sofre aquecimento ou resfriamento e, essa resultância é chamado de Efeito Magnetocalórico (EMC) [23, 25]. Isso acontece porque o ordenamento dos spins atômicos faz com que a entropia magnética do sistema diminua [23].

O EMC é caracterizado por duas quantidades termodinâmicas: a variação da

entropia em um processo isotérmico e a variação da temperatura em um processo adiabático, em função da temperatura para uma dada variação de campo magnético, aplicado à amostra [25].

No processo adiabático, o material magnético é isolado do ambiente que o circunda com o uso de uma câmara de vácuo, de forma a não trocar calor com o ambiente. Assim, quando é submetido a um campo magnético externo, sua temperatura aumenta. De forma reversível, diminui até atingir seu valor inicial [2] (Quadro 2).

Já no processo isotérmico, em vez de isolado a vácuo, o material magnético está em contato com um reservatório térmico. Ele pode trocar calor, mas sua temperatura não se altera. É como a atmosfera onde vivemos: uma pequena troca de calor com o ar não interfere na temperatura global. Aqui, a temperatura do material magnético não se altera com a aproximação de um ímã, mas cede calor para o reservatório. Quando o ímã é afastado, o material magnético absorve calor do reservatório, mas continua na mesma temperatura [2] (Quadro 2).



Quadro 2 - EMC no processo adiabático e isotérmico. Fonte: [2].

Atualmente a grande dificuldade para a refrigeração magnética está na necessidade de campos magnéticos elevados, acima de 7 teslas, para obtenção de

uma capacidade de refrigeração satisfatória [25]. Normalmente, com um campo magnético de 2 teslas, aproximadamente 100 mil vezes o campo magnético da Terra e também um valor indicado para aplicações industriais ou domésticas, consegue variar a temperatura em 5°C de um material magnético [2,25,26].

Contudo, este valor é insuficiente para refrigerar e manter refrigerado, por exemplo, uma geladeira. Por esta razão, tornam-se necessários os chamados ciclos térmicos [2].

No ciclo termomecânico usado em refrigeradores comuns, um gás é sucessivamente descomprimido e comprimido, de forma a absorver o calor do interior da geladeira, para depois dispensá-lo no ambiente. Os ciclos termomagnéticos funcionam de forma análoga e utilizam regeneradores (como é o caso de muitos outros ciclos), dispositivos térmicos que servem para receber e fornecer calor durante o processo, viabilizando o ciclo [2].

Alguns protótipos de refrigeradores magnéticos, que serão descritos no próximo tópico, “estão baseados no chamado regenerador magnético passivo (PMR, na sigla em inglês), que utiliza, em cada ciclo, dois processos isotérmicos, enquanto outros estão baseados em um sistema ativo (AMR), com dois processos adiabáticos por ciclo.” [2].

## 2.5 PROTÓTIPOS DE REFRIGERADORES MAGNÉTICOS

A tecnologia de refrigeração magnética é considerada uma tecnologia verde, visto que além de eliminar a existência de gases poluentes, é produzida com menor perda de energia e elimina os ruídos existentes nos compressores. Com o potencial de substituir os sistemas convencionais de compressão de vapor, que atualmente trabalham com 40% de eficiência e usam principalmente os refrigerantes HCFC e CFC, os refrigeradores magnéticos podem atingir em torno de 50% a 60% de eficiência [13, 25, 26].

As demandas de energia do mundo para refrigeração e ar condicionado representam quase 20% do consumo de energia. A tecnologia de refrigeração principal, isto é, a compressão de vapor de um refrigerante de gás, mesmo que agora esteja maduro, é caracterizada por uma eficiência de exergia bastante baixa, (...) [14].

Tendo em vista o potencial dessa tecnologia, alguns pesquisadores e estudiosos, resolveram desenvolver protótipos para ver seu funcionamento.

O primeiro protótipo de refrigerador magnético para funcionar à temperatura ambiente foi desenvolvido em 1976 por Gerald Brown [2,15,16], da NASA.

Sua máquina funcionou baseada no ciclo PMR, onde, no estágio isotérmico, 7 tesla de campo magnético foram aplicados sobre 160 gramas de Gd, imersos em uma coluna contendo 400 mL de fluido (80% água e 20% álcool). Após 50 ciclos, a temperatura no topo da coluna chegou a 46°C, enquanto a temperatura na base da coluna atingiu a -1°C. Estava provado que se pode ter um refrigerador magnético à temperatura ambiente. O protótipo, porém, ainda era inviável para uso doméstico, porque usava um eletroímã caro e difícil de transportar [2].

Em 1987, Lance Kirol, no Laboratório Nacional de Engenharia de Idaho, EUA, desenvolveu outro protótipo de refrigerador magnético.

Sua máquina tipo PMR contava com 270 gramas de Gd, submetidos a 1 tesla fornecido por ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro. Após quatro ciclos, esse protótipo estabeleceu 11°C de diferença de temperatura entre os extremos do fluido regenerador [2].

Mais recentemente, em 1998, Carl Zimm e colegas, da Astronautics Corporation of America e do Laboratório de Amnes, EUA, projetaram a primeira geladeira magnética de "temperatura ambiente" - contendo ímãs permanentes - foi construída em 2001, utilizando bobinas supercondutoras e 3kg de Gd [2,17].

Com 5 tesla de campo magnético, esse protótipo conseguiu reduzir 11°C a temperatura do sistema. Com ciclos termomagnéticos durando 6 segundos, esse AMR pode funcionar durante 18 meses, sem necessidade de muitos reparos [2].

Os mesmos pesquisadores não pararam por aí, pois deram continuidade no estudo e construíram um protótipo bastante similar, mas usando ímãs permanentes de Nd-Fe-B [2]. Esse dispositivo conseguiu reduzir a temperatura de 25°C para 5°C, e foi patenteado em 2003 [17].

O desenvolvimento desses protótipos vai além das fronteiras norte-americanas. A Toshiba, em 2000, [18] desenvolveu um refrigerador magnético. "Utilizando 2kg de Gd, 1 tesla de campo magnético fornecido por ímãs permanentes de Nd-Fe-B e água com um determinado anticongelante para conseguir reduzir a temperatura de 28°C até -1°C." [2].

Posteriormente, foram registradas várias patentes que descrevem essa geladeira. Uma revisão desses refrigeradores magnéticos pode ser encontrada nas Refs. [19-21].

Atualmente no Brasil, pesquisadores do Grupo de Preparação e Caracterização

de Materiais do Departamento de Física Aplicada (DFA) da Unicamp, estão iniciando um projeto para a construção de um protótipo de refrigerador magnético, utilizando um metal puro denominado Gd e um eletroímã convencional. O equipamento servirá de base para desenvolvimento posterior que empregarão outros compostos e terão o eletroímã substituído por um ímã permanente [22].

Para dar o salto do laboratório às geladeiras domésticas, porém, a refrigeração magnética ainda enfrenta alguns desafios pragmáticos, como o custo dos materiais mais eficientes. As limitações tecnológicas para termos um refrigerador magnético em casa não são mais um problema de engenharia de refrigeração, mas sim de ciência dos materiais [2]. O metal gadolínio (elemento lantanídeo), elemento de número atômico 64, tem EMC máximo em torno de 21°C, número grande o suficiente para que se possa pensar em aplicações, especialmente em refrigeração [23]. Além disso, já foi usado em alguns protótipos de refrigeradores, como vimos anteriormente, tendo sucesso em seu funcionamento. O grande desafio está justamente no seu preço, “...um quilo do metal 99,9% puro pode custar US\$ 6500. O preço, porém, não é o único obstáculo. Metais lantanídeos oxidam com facilidade alterando seu potencial magnetocalórico.” [2].

“Um dos principais problemas encontrados para introduzir esta tecnologia no campo doméstico (linha branca) é o fato de precisar produzir grandes quantidades de material com alto grau de pureza e homogeneidade.” [23]. Por ser um tema que pode ter alto retorno financeiro, existem poucas publicações abordando este assunto [24], provavelmente por ser mantido em sigilo.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 IDEALIZAÇÃO DO PROJETO

Para construção do protótipo do refrigerador magnético a base de gadolínio, foi realizado uma visita ao pessoal da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), no Laboratório de Materiais e Manufatura Mecânica – Prof. Isaias da Silva. Além da recepção calorosa, muitos aprendizados foram adquiridos durante a visita. Assim foram doados, pelo professor Sérgio Gama e sua equipe, duas pedras do elemento químico gadolínio, com 99,9% de pureza, com massas de 152,0206 g e 116,0345 g.

Neste estudo prático foi utilizada somente uma pedra com a massa de 152,0206 g (figura 3).



**Figura 3 – Gadolínio 99,9% de pureza. Fonte: Autor.**

Primeiramente, o princípio físico da refrigeração magnética é análogo ao princípio de funcionamento da refrigeração convencional (tabela 2 e figura 4).

Etapa do Processo	Processo físico do sistema convencional.	Processo físico do sistema magnético.
1	Compressão	Aumento do Campo Magnético
2	Rejeição de calor	Rejeição de Calor
3	Expansão	Campo magnético diminuído.
4	Entrada de calor	Entrada de calor

Tabela 2 – Analogia entre um Ciclo de Compressão/expansão de gás e um ciclo de refrigeração magnética. Fonte: [34].

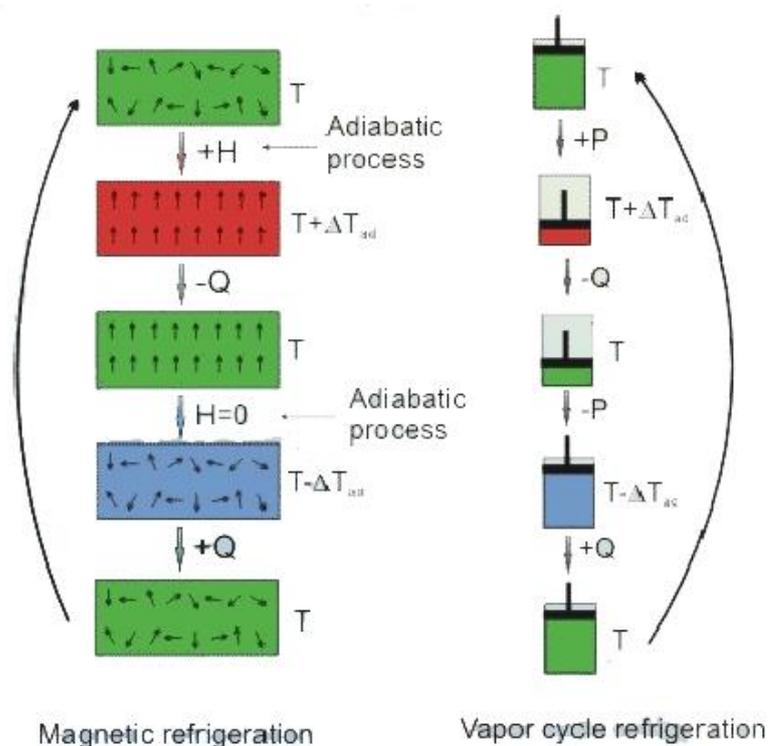
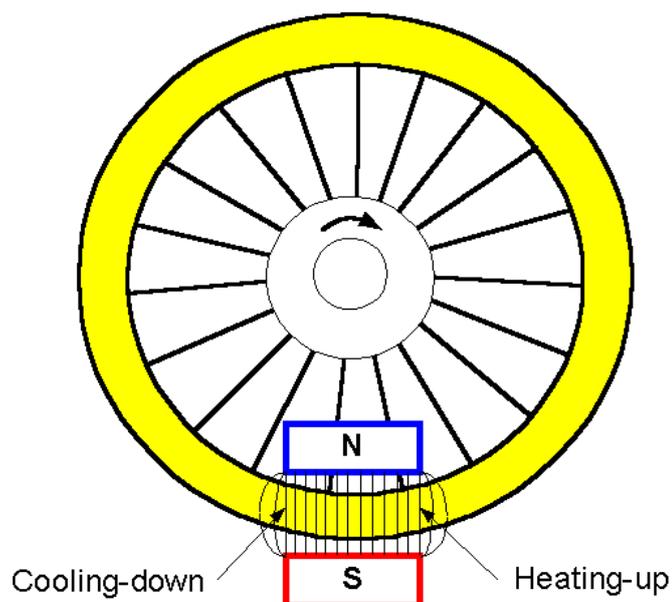
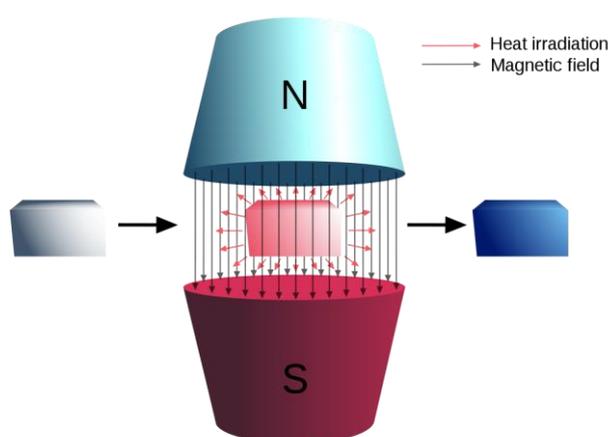


Figura 4 - Analogia entre um Ciclo de Compressão/expansão de gás e um ciclo de refrigeração magnética. Fonte: [35].

Então, foi idealizado um motor de gadolínio que operasse de forma periódica, por dentro e por fora do campo magnético, baseado num protótipo simples e eficiente de refrigerador magnético feito na Universidade de Ciências Aplicadas da Suíça Ocidental Yverdon-les-Bains (Suíça) (figura 5) [34].



**Figura 5 – Refrigerador magnético composto por um material magnetocalórico que se move de forma periódica, que gira através das linhas do campo magnético, como mostrado na figura. Quando a roda, composta pelo material magnetocalórico, passa pelos dois pólos magnéticos, ele aquece. Quando ela sai da zona magnética, esfria. (figura 6) Fonte: [34].**



**Figura 6 - Efeito Magnetocalórico. Fonte: [35].**

Um modelo pesquisado, de como seria construído o protótipo, pode ser observado na figura 7. Porém ele utiliza o princípio de funcionamento o Ponto Curie [36] para rodar o motor. O vídeo de funcionamento do motor de gadolínio pode ser visto pelo link nas referências [33]. Ele não é utilizado com finalidades de refrigeração.

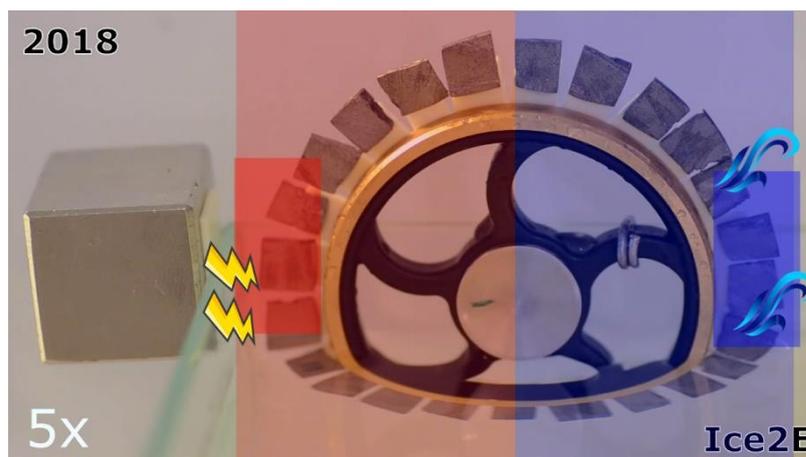


Figura 7 - Motor de gadolínio pelo princípio de funcionamento o Ponto Curie. Fonte: [33].

Onde teria a fonte de calor e fonte fria no mesmo ambiente, porém através de uma divisória semi-adiabática, pode destinar a fonte fria para outro recipiente pela convecção do ar, visto que o ar frio desce e o quente sobe (Figura 8).

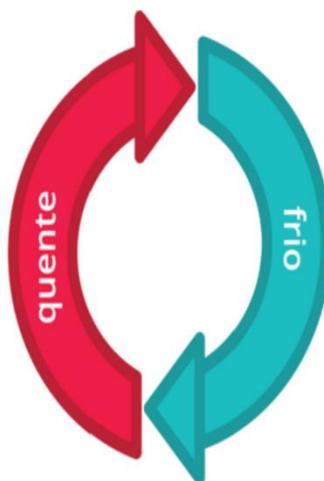


Figura 8 - Convecção do ar. Fonte: [55].

### 3.2 FABRICAÇÃO DA HÉLICE

Por meio da 4Print, laboratório de impressão 3D na UTFPR - Campus Guarapuava, foi projetada uma hélice com o diâmetro de 10 cm (figura 9). O modelo utilizado pode ser encontrado na referência [37].

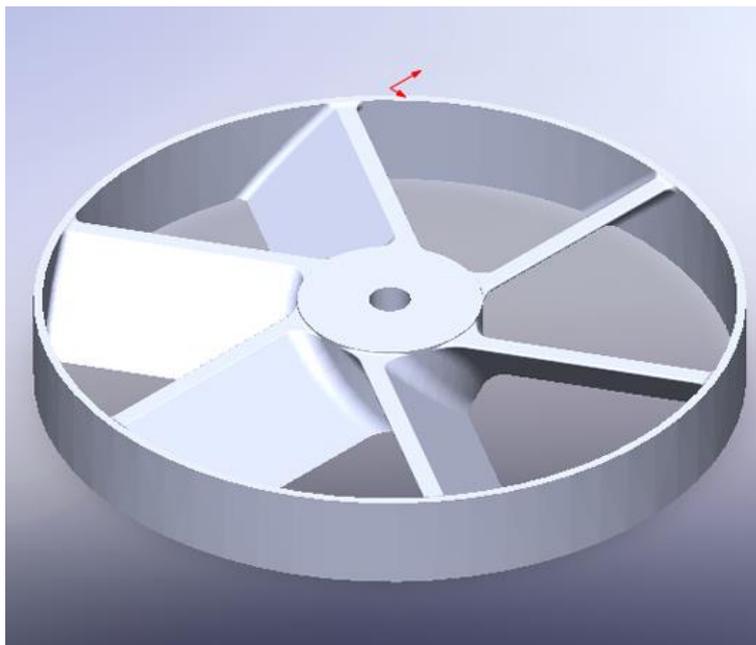


Figura 9 - Modelo computacional da hélice que foi utilizada no protótipo. Fonte: Autor.

### 3.3 CORTE DO GADOLÍNIO

Uma das partes mais difíceis do trabalho foi a questão da usinabilidade do gadolínio, pois tentou-se cortar nos formatos igual da figura 7, com a máquina cortadora metalográfica CM 60, modelo Teclago (figura 10) e com o disco de corte (figura 11), mas não obteve sucesso. Ocorreu muita faísca e fumaça, não resultando no corte da peça. Além do líquido refrigerante (água) oxidar e deixar sua estrutura mais resistente.



Figura 10 - Cortadora metalográfica CM 60, modelo Teclago. Fonte: Autor.



Figura 11 - Disco de Corte 8". Fonte: Autor.

Tentou-se contato com um grupo de pesquisa da UEPG, para realizar o processo de moagem de alta energia e sinterização para deixar no molde desejado, mas não foram encontrados profissionais disponíveis para caracterização do gadolínio, pois o efeito da moagem poderia modificar suas propriedades.

Então foi necessário realizar o corte da pedra, através do arco de serra (figura 12) com um torno morsa (figura 13), sem fluido de corte. Que apesar de trabalhoso e demorado, foi o método mais eficiente encontrado neste trabalho. A peça não foi usinada para evitar perda do material.



Figura 12 - Arco de Serra. Fonte: [47].



**Figura 13 - Torno (Morsa). Fonte: [48].**

Para afiar as pedrinhas de gadolínio cortadas, foi utilizada uma máquina de afiar (Figura 14).



**Figura 14 - Máquina de Afiar. Fonte: [49].**

### 3.4 JUNÇÃO DA HÉLICE COM O GADOLÍNIO

A colagem das pedras de gadolínio na hélice 3D, foi feita a partir de uma cola especial (figura 15).



**Figura 15 - Adesivo Selante Blister 50g Cinza – Selabond. Fonte: [50].**

Então o resultado parcial do trabalho, da junção da hélice feita em 3D com a colagem das pedrinhas do gadolínio pode ser visto na figura 16.



**Figura 16 - Parte parcial do motor de gadolínio. Fonte: Autor.**

### 3.5 ESCOLHA DO ÍMÃ

O ímã (figura 17) utilizado no trabalho foi escolhido por questões econômicas e baseado no trabalho da referência [23] que utiliza o mesmo campo magnético de 0,5 tesla, para a construção de um protótipo de refrigerador magnético. Mais detalhes das especificações técnicas do ímã podem ser vistos no anexo I.

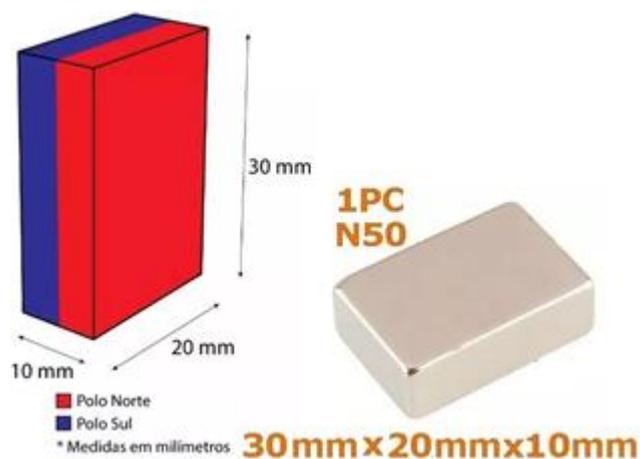


Figura 17 - Ímã utilizado no trabalho. Fonte: [53].

### 3.6 RECIPIENTE

O próximo passo foi ver um recipiente econômico onde ficaria o motor de gadolínio e outro recipiente para receber a fonte fria produzida pelo sistema. Além de garantir que haja isolamento térmico do ambiente interno. A construção do recipiente foi baseada nas referências [38, 39] com adaptações para este projeto.

Assim ele é composto por duas caixas de isopor de 5L, revestidas por papel alumínio (para não ter troca de calor por irradiação) e uma camada de 1 cm de EVA (figura 18), para evitar o máximo de dissipação térmica.

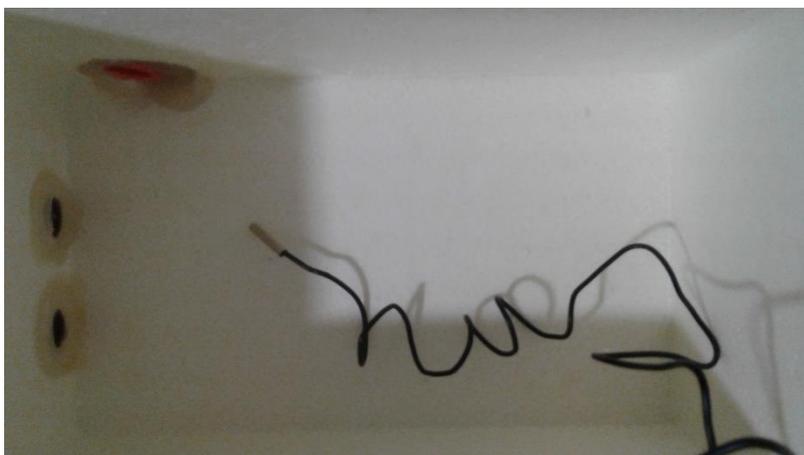


Figura 18 - Isopor 5L, Papel Alumínio e EVA 1cm. Fonte: Autor.

Para ter a passagem do ar frio do motor de gadolínio para a fonte fria, foi utilizado o processo de convecção, e para isso foram utilizados dois redutores de cobre (figura 19) para melhor transferência do calor, conexão das duas caixas (figura 20) de isopor e garantir que o ar frio só passe do isopor com o motor do gadolínio para o outro recipiente (fonte fria).



**Figura 19 - Redução de Cobre 28mm x 15mm. Fonte: Autor.**



**Figura 20 - Conexão das duas caixas, fonte fria do sistema. Fonte: Autor.**

O trabalho parcial do revestimento da caixa (figura 21), foi feito com cola quente e cola para EVA.



Figura 21 - Caixas de isopor revestidas com papel alumínio e EVA. Fonte: Autor.

### 3.7 RECICLAGEM DO AR DA FONTE FRIA

Foi criado um sistema de reaproveitamento do ar (figura 26), colocando um cooler 12 volts, modelo AD0412HB-C56 (figura 25), no sistema para ter a circulação, partindo da fonte fria para a fonte quente. Visto que é possível fazer um controle de temperatura bem mais eficiente, sem captar o ar externo [41]. Para isso, foi utilizado um eletroduto, fio de lã (isolante) e um sistema impresso na 3D para conectar o eletroduto no cooler (Figura 22, 23 e 24).

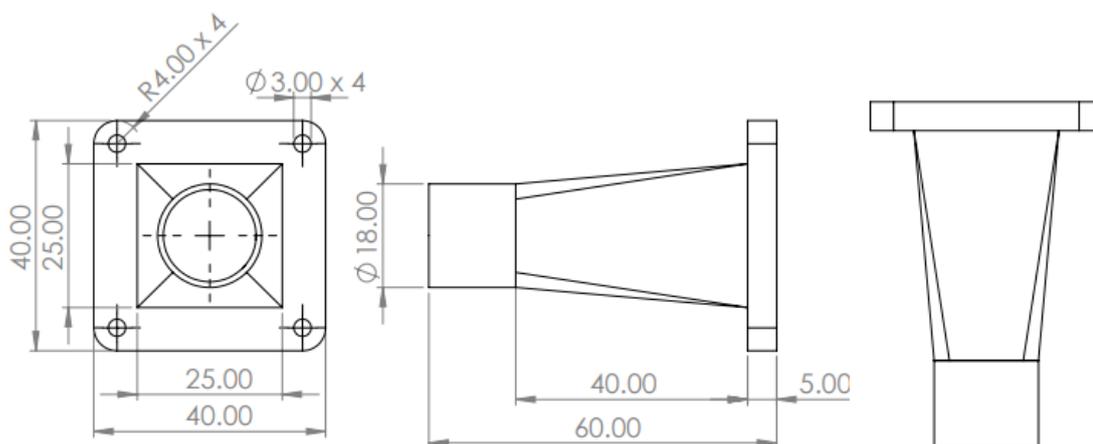


Figura 22 – Dimensões do sistema desenhado no CAD, para conectar eletroduto no cooler.  
Fonte: Autor.

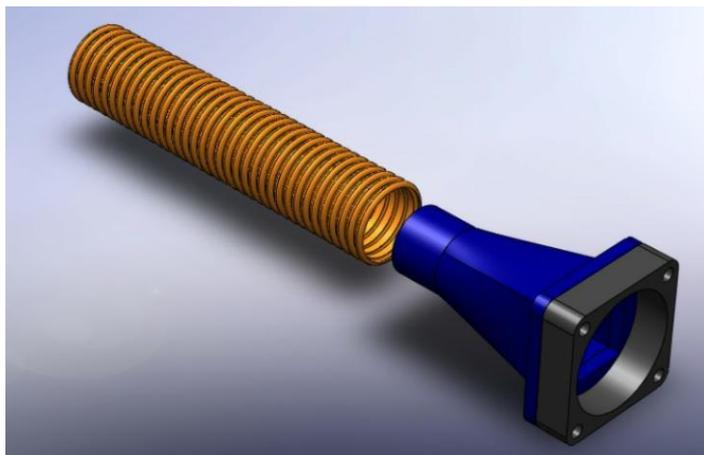


Figura 23 - Sistema visto no 3D. Fonte: Autor.



Figura 24 - Sistema impresso pela impressora 3D. Fonte: Autor.



Figura 25 – Cooler 12 volts, modelo AD0412HB-C56. Fonte: Autor.



**Figura 26 - Sistema para reciclagem do ar. Fonte: Autor.**

### 3.8 1º PROTÓTIPO

O motor de gadolínio não rotacionou pelo princípio do Ponto Curie como realizado no vídeo [33].

Então foi introduzido um pequeno motorzinho DC, extraído de um leitor de DVD (figura 27), para dar o torque necessário para o ciclo acontecer.

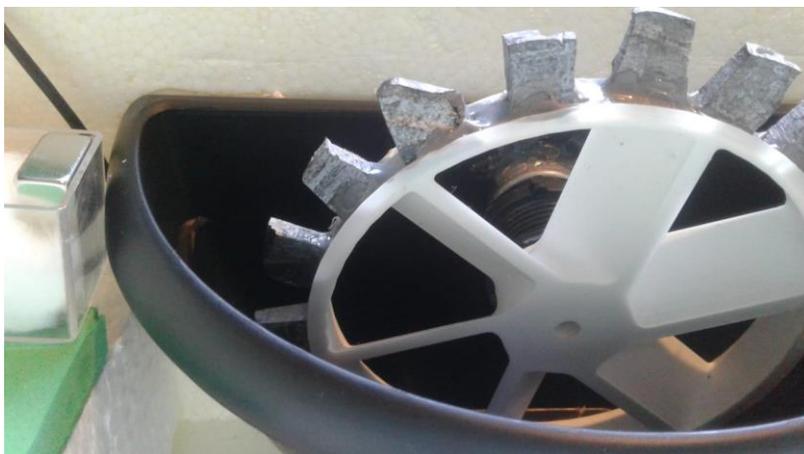


**Figura 27 - Motor Silnik MDN3BC3DSN 0.5-6V 15mA. Fonte: Desconhecida.**

Para alocar a hélice com o gadolínio dentro da caixa, foi utilizado um recipiente impresso na 3D, porém o mesmo acabou vazando o líquido, então como alternativa, foi utilizado um recipiente de planta, com as dimensões compatíveis à caixa de isopor.

Visto que o fluido de transferência de calor seria o ar, o recipiente de planta tinha a única função de alojar água no sistema, para diminuir a rotação do motorzinho DC.

Então a parte interna do refrigerador magnético com o motor de gadolínio, pode ser vista nas figuras 28 e 29.



**Figura 28 – Vista lateral do motor de gadolínio acoplado com o Motor DC. Fonte: Autor.**



**Figura 29 – Vista superior do motor de gadolínio acoplado com o Motor DC. Fonte: Autor.**

Foram utilizados dois termômetros digitais (figura 30), um para a fonte quente e outro para fonte fria, a fim de verificar os resultados do refrigerador magnético (figura 31).



Figura 30 - Termômetro Digital. Fonte: [54]



Figura 31 – Parte externa da frente final do protótipo. M de Motor (Fonte Quente) e R de Refrigerador (Fonte Fria). Fonte: Autor.

### 3.9 2º PROTÓTIPO

Pelos resultados obtidos do 1º protótipo, que serão discutidos no decorrer do trabalho, o motorzinho DC e o cooler estavam sendo fontes de calor no refrigerador, o que interferia na análise dos resultados. Então foram necessárias algumas adaptações para o 2º Protótipo (figura 32).

Retirou-se o motorzinho DC dentro do sistema, o recipiente de planta e desabilitou-se o sistema de reciclagem com o cooler. Assim foi introduzido um motor de passo (figura 33) para fora da caixa, com programação no arduíno UNO e um drive A4988 para controlar o tempo e grau da rotação. Logo teve uma precisão do contato do ímã com o gadolínio. O código do arduíno, juntamente com a ligação dos fios, pode ser visto com mais detalhes no anexo 2. O eixo de conexão da hélice com o motor de passo, foi um parafuso de 5 mm.



Figura 32 - 2º Protótipo. Fonte: Autor.



Figura 33 - Modelo do Motor de Passo. Fonte: Autor.

### 3.10 3º PROTÓTIPO

Apesar dos resultados do segundo protótipos terem sido melhor do que o primeiro, não se enquadrava teoricamente com um ciclo de refrigeração magnética (figura 34), pelo fato da fonte quente estar misturada com a fria. Assim foi desenvolvido um 3º protótipo (figuras 35, 36, 37 e 38) para separar essas fontes uma da outra, baseado em mais estudos dos artigos [34 e 45]. Foram reaproveitados alguns materiais do 2º protótipo.

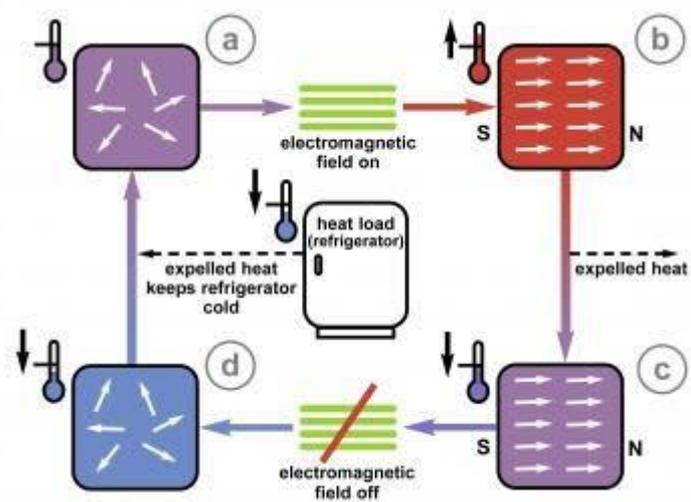


Figura 34 - Ciclo da refrigeração magnética. Fonte: [56].

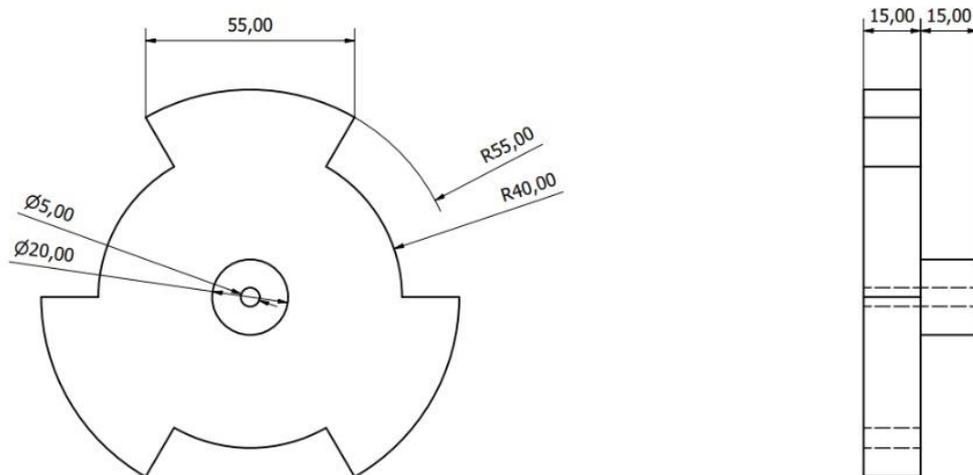


Figura 35 - Projeto da hélice do 3º Protótipo. Fonte: Autor.



Figura 36 – Vista lateral do motor de gadolínio. Fonte: Autor.

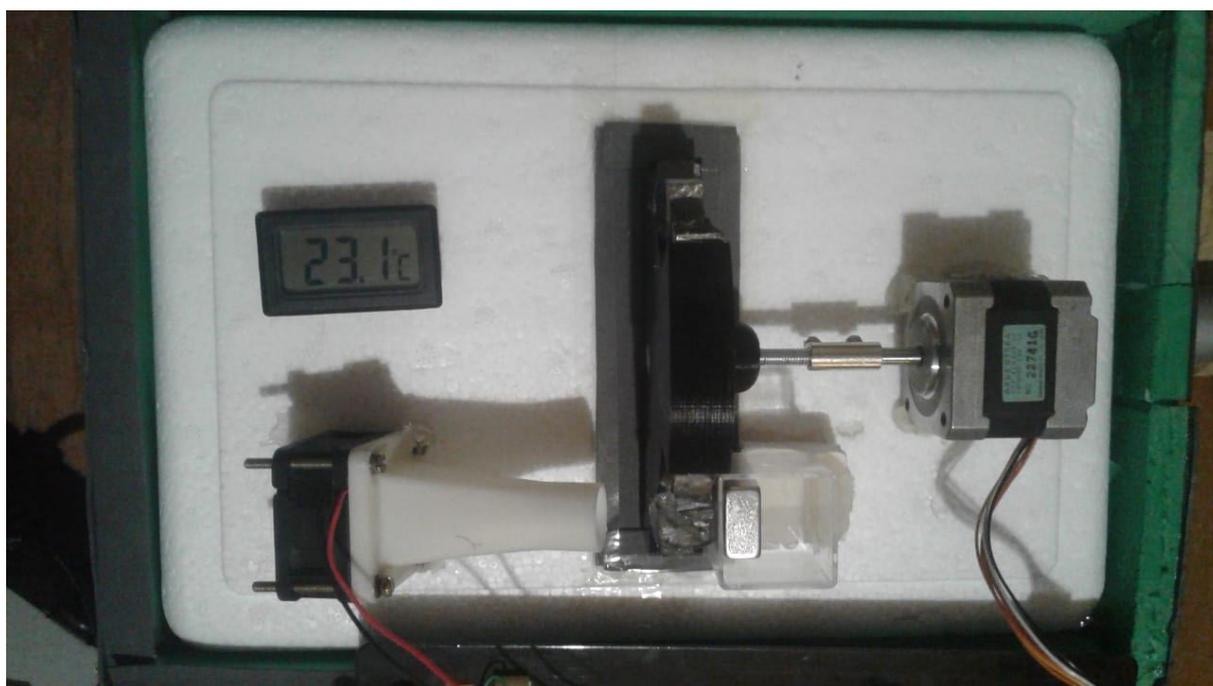


Figura 37 - Vista superior do motor de gadolínio. Fonte: Autor.



**Figura 38 – Cooler para circular o ar na parte interna do refrigerador. Fonte: Autor.**

Por fim escolheu-se um termômetro (figura 39) mais preciso para aquisição dos dados, que mede a temperatura externa e interna ao mesmo tempo.



**Figura 39 - Termômetro digital utilizado no 3º protótipo. Fonte: [57].**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DO GADOLÍNIO DO PROTÓTIPO

O gadolínio (Gd), elemento de número atômico 64, pertencente ao grupo dos Lantanídeos ou terras raras é um material com transição magnética de segunda ordem e com uma temperatura de Curie de aproximadamente 293 K. “É a única substância pura com um ponto Curie perto da temperatura ambiente e exibe um efeito magnetocalórico significativo numa alargada gama de temperatura [41].”

“O EMC pode ser medido diretamente ou pode ser obtido indiretamente através da medida de magnetização em função de campo e temperatura, ou do mesmo tipo de medida para o calor específico” [23]. Neste trabalho foram utilizadas técnicas diretas que envolvem as medições das temperaturas da amostra  $T_0$  e  $T_1$ , em campos magnéticos aplicados  $H_0$  e  $H_1$  e permitem apenas a medida de  $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ .

Determinado como a diferença entre  $T_0$  e  $T_1$ , para um dado  $T_0$  e  $\Delta H = H_1 - H_0$ . “As medidas diretas podem ser levadas a cabo usando técnicas de contato ou de não contato. No primeiro caso, o sensor de temperatura é colocado diretamente na amostra e no segundo caso, isso não acontece [23].” Nesse protótipo não teve contato do sensor de temperatura com a amostra.

Utilizando as técnicas de contato direto com o gadolínio foi observado uma variação de temperatura aproximadamente 1°C, com um campo magnético de 0,5 tesla.

As propriedades magnetocalóricas do Gd apresentam um  $\Delta T_{ad}$  máximo de aproximadamente 5,8 K, quando magnetizado de 0 a 2 tesla, através de medidas diretas de  $\Delta T_{ad}$  [41].

Para um campo aplicado de 7 T espera-se uma variação de 10°C para o gadolínio. Neste projeto, têm-se um campo magnético aproximado de 0,5 T, o que permite dizer que, “em condições adiabáticas, apresenta um aumento de temperatura do Gd da ordem de 1°C” [23].

“O Gd foi usado em muitos protótipos a temperatura ambiente devido ao seu efeito magnetocalórico relativamente grande e histerese baixa.” [41]

O gadolínio quando em contato com a água à temperatura ambiente, pode corroer-se, que afeta a longo prazo, o desempenho e a durabilidade de sua utilização

em um sistema de refrigeração [41]. Contudo adicionado  $NaOH$  à água, o problema da corrosão pode ser eliminado [43].

Durante o corte da pedra de gadolínio, apresentou difícil usinabilidade, apesar de ter estudos que falem que ele é maleável e dúctil [42, 44]. Quando adicionado um fluido refrigerante apresentou ainda mais resistência.

Outro fato observado no presente estudo que o gadolínio não reage no ar seco, mas vai manchar a um óxido branco escamoso no ar úmido que o protege de uma oxidação adicional [42].

A ideia inicial para girar o motor pelo princípio de funcionamento Curie é que o gadolínio é de natureza paramagnética acima de  $20^{\circ}C$  e é ferromagnético abaixo de  $20^{\circ}C$  [42].

#### 4.2 1º PROTÓTIPO

Foram feitos 3 testes em cada combinação que será descrita a seguir, a fim de verificar o seu funcionamento, assim anotou-se a média deles para descrever neste trabalho. Deixou-se um termômetro ligado na caixa com o motor de gadolínio e outro termômetro ligado na caixa que recebe a fonte fria, para obtenção dos resultados. O tempo estabelecido nos testes teve uma variação de 10 minutos, pois após isso o motorzinho DC começava a sobreaquecer, assim esperou-se um tempo até o motor esfriar para novos testes. O ímã ficou uma distância de 2 cm da pedra de gadolínio da hélice. As combinações analisadas foram as seguintes:

- A. Verificação do isolamento térmico com o ambiente externo das caixas por 1h.
- B. Somente o Cooler ligado por 10 minutos.
- C. Somente o motorzinho DC acoplado com a hélice de gadolínio (motor de gadolínio) ligado, sem a presença do ímã, por 10 minutos.
- D. Cooler mais motor de gadolínio, sem a presença do ímã por 10 minutos.
- E. Somente motor de Gadolínio, com a presença do ímã.
- F. Cooler mais motor de gadolínio, com a presença do ímã.

No caso A, foi esperado as caixas entrarem em equilíbrio térmico. Após uma hora de análise, percebeu-se que não houve variação de temperatura, significando que o sistema criado estava bem isolado termicamente.

No caso B, o Cooler mostrou boa circulação do ar dentro do sistema, porém elevou a temperatura da caixa com o Motor de gadolínio em  $1^{\circ}\text{C}$  e da fonte fria em  $0,9^{\circ}\text{C}$ .

No caso C, aumentou a temperatura da caixa com o motor do gadolínio em  $0,9^{\circ}\text{C}$ , porém permaneceu inalterada a caixa da fonte fria.

No caso D, aumentou a temperatura da caixa com o motor do gadolínio em  $1,1^{\circ}\text{C}$  e  $0,9^{\circ}\text{C}$  na fonte fria.

No caso E, teve um aumento da caixa do motor de gadolínio em  $0,3^{\circ}\text{C}$ , uma variação menor comparado ao caso C. A fonte fria permaneceu inalterada.

No caso F, os dados foram semelhantes ao caso D.

Apesar do caso E ter indicado um possível EMC do gadolínio, os dados sofreram interferência do motorzinho DC e cooler dentro do mesmo ambiente do motor de gadolínio com o ímã, pois estavam sendo fontes de calor também.

Além do tempo de funcionamento 10 minutos, o que foi muito pouco para uma análise de um refrigerador. E por fim o fator de controlar o contato do ímã com o gadolínio, que apesar de ter colocado água no recipiente para diminuir a rotação do motorzinho DC, o tempo de contato estava impreciso.

Assim foram necessárias algumas modificações no protótipo para ter resultados mais precisos.

### 4.3 2º PROTÓTIPO

Após ter controlado o ciclo do motor de gadolínio com um motor de passo, os resultados foram mais positivos referente ao primeiro protótipo. A programação foi elaborada para um ciclo completo durar 3 minutos, ou seja,  $18^{\circ}$  em cada rotação e 9 segundos para a próxima rotação.

Após 3 testes com duração de uma 1 hora, ou 20 ciclos completos, tempo bem superior ao primeiro protótipo, caiu a temperatura da fonte fria em média  $0,4^{\circ}\text{C}$  com desvio padrão de 0,1732.

O que significa que refrigerou a fonte fria, comprovando o EMC do gadolínio. Um valor positivo comparado ao trabalho [23] que não apresentou o EMC no dispositivo criado, porém um valor baixo comparado aos protótipos vistos na revisão da literatura, apesar de não especificarem o tempo de funcionamento.

Porém nosso sistema trabalha num regime em que a divisória não foi bem delimitada, pois misturou a fonte quente e fonte fria, o que dificultou a obtenção da medida da variação da temperatura esperada.

#### 4.4 3º PROTÓTIPO

Este protótipo se encaixa mais nos moldes da teoria estudada, pois tem a fonte fria separada da quente, dois trocadores de calor, um na parte externa e outro na interna. A caixa estava bem isolada termicamente, porém na transição de um ciclo para outro o processo era semi-adiabático.

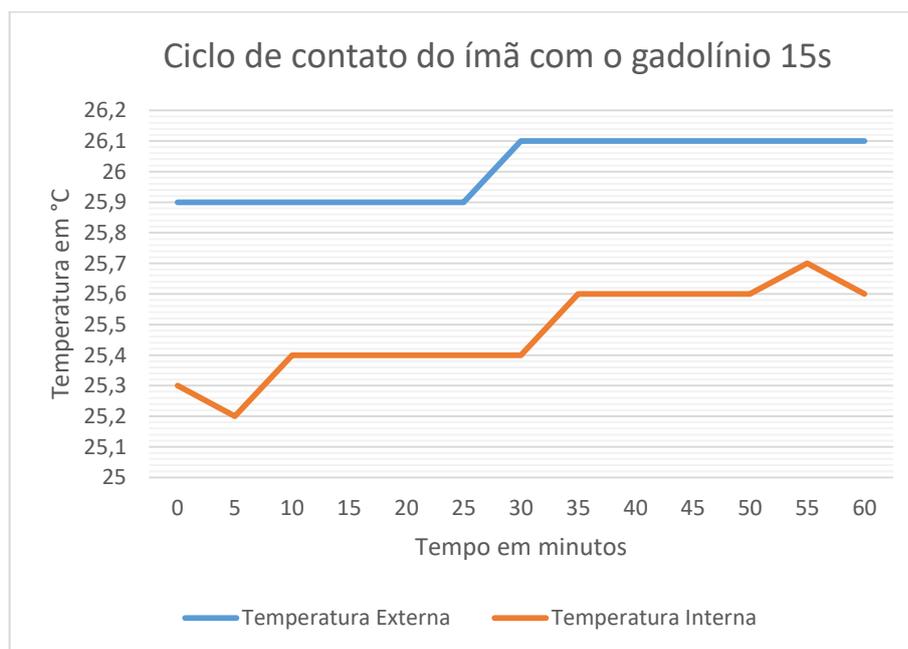
Assim foram feitos 3 testes (tabela 3), com diferentes tempos de rotação do ciclo, para ver a influência do tempo de contato do ímã com o gadolínio e sua variação da temperatura interna.

3º PROTÓTIPO		
CICLO DE 15s	CICLO DE 2min	CICLO DE 5min

Tabela 3 – Ciclos utilizados no 3º protótipo. Fonte: Autor.

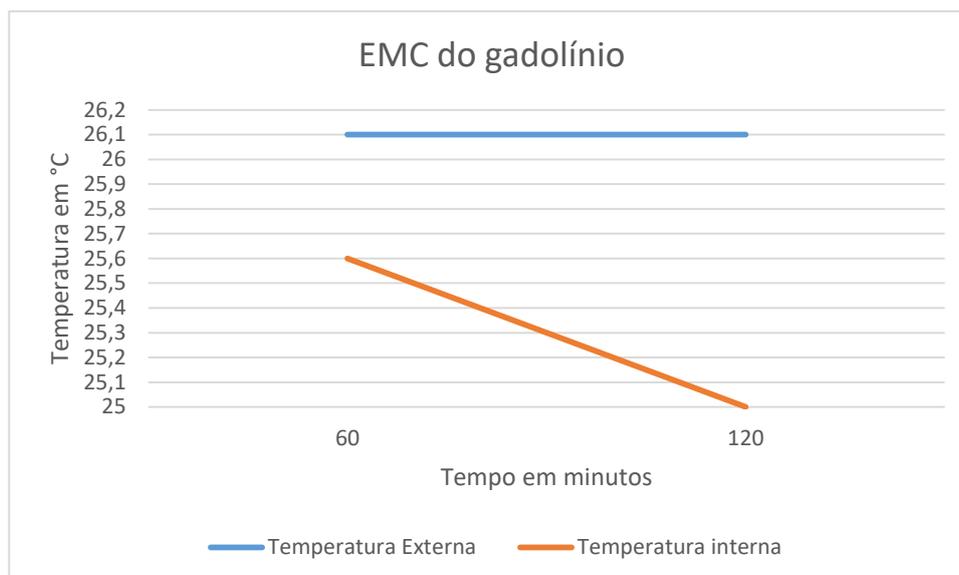
O primeiro teste foi feito com um ciclo de 15 segundos, ou seja, 15 segundos o ímã em contato com o gadolínio na parte externa (fonte quente) e 15 segundos o gadolínio sem contato com o ímã na parte interna (fonte fria). As temperaturas externas e internas foram anotadas de 5 minutos em 5 minutos. Os dados coletados

podem ser analisados no gráfico 2, indicando nos pontos 5 e 60 (eixo dos minutos), que enquanto a temperatura externa permaneceu constante, a temperatura interna decaiu, o que comprova o EMC do gadolínio, mas se obtém poucos pontos do EMC do gadolínio, devido ao fato que os trocadores de calor estavam dissipando o calor da fonte interna, na transição de uma rotação para outra, visto que essa transição é semi-adiabática.



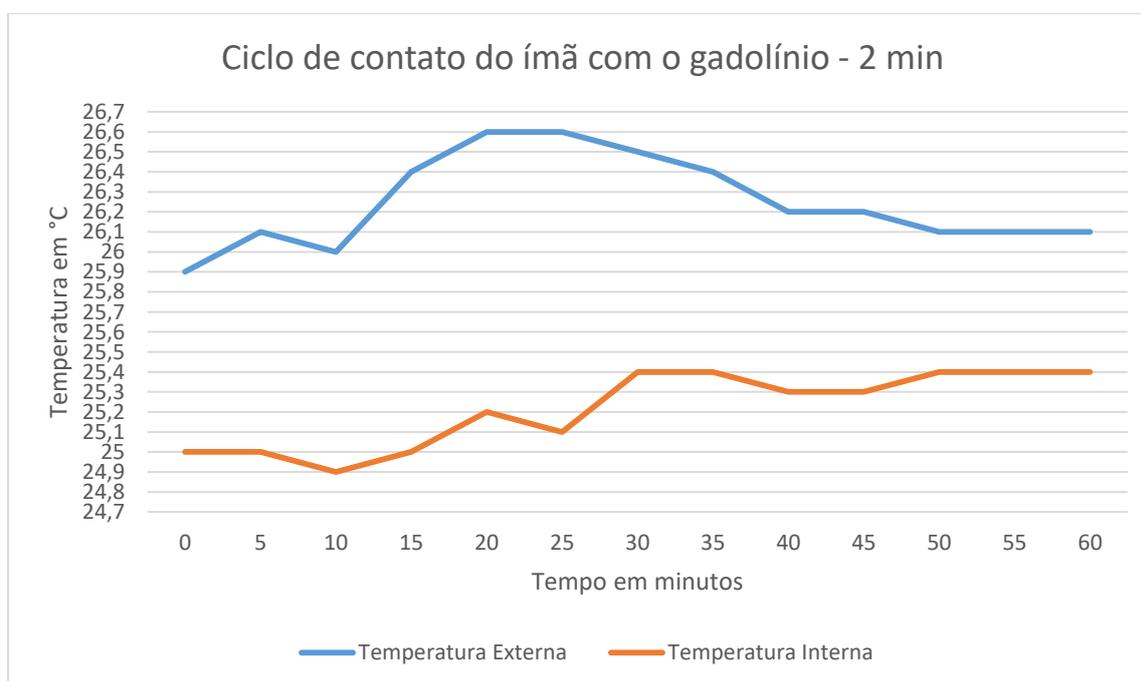
**Gráfico 2 - Ciclo de contato do ímã com o gadolínio 15s. Fonte: Autor.**

Dado observado, que após ter desligado o sistema por 1h e deixado o gadolínio isolado com a parte interna, a temperatura externa permaneceu constante 26,1°C e a temperatura interna caiu de 25,6°C para 25,0°C (gráfico 3). Comprovando de fato ser possível refrigerar um ambiente pelo EMC, apesar de ser um processo lento e gradativo.



**Gráfico 3 - EMC do gadolínio com o sistema desligado por 1h. Fonte: Autor.**

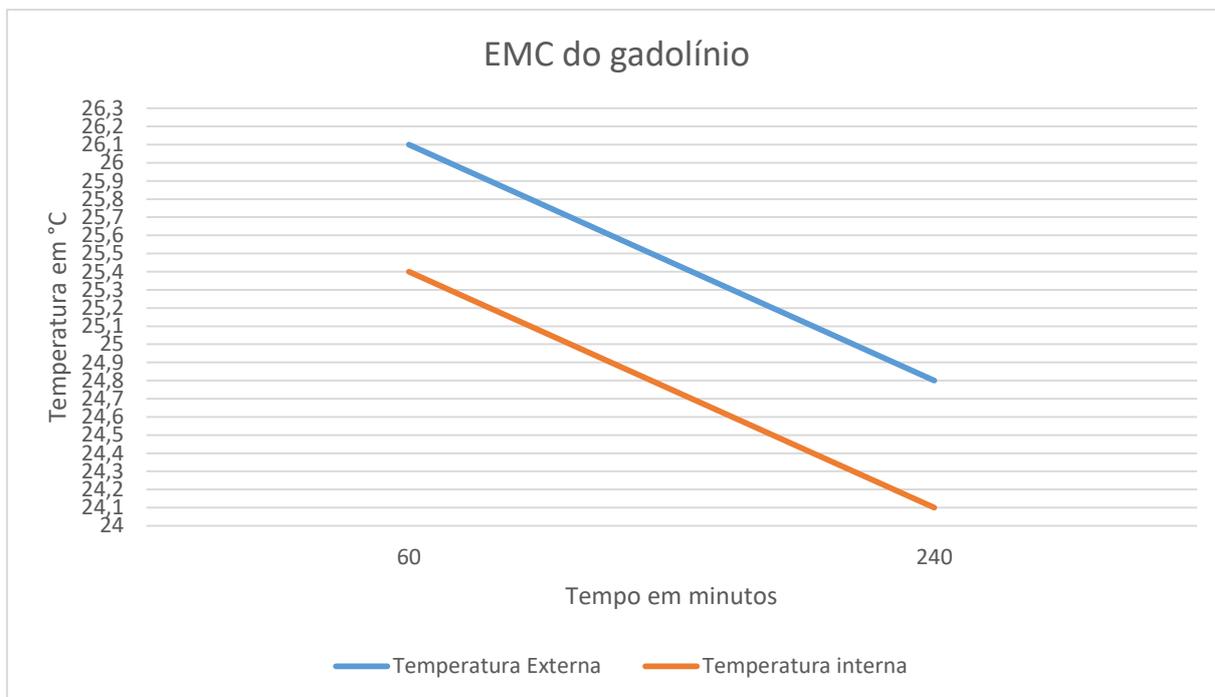
Com essa comprovação, resolveu-se fazer os próximos ciclos sem os trocadores de calor e com um tempo maior de rotação.



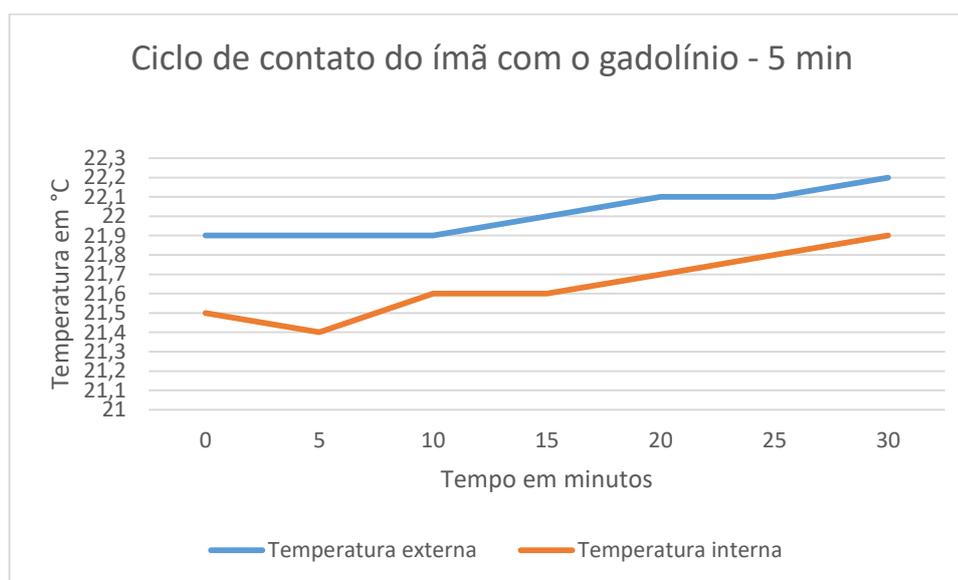
**Gráfico 4 – Ciclo de contato do ímã com o gadolínio 2 minutos. Fonte: Autor.**

No gráfico 4, utilizou um ciclo de 2 minutos, captando 3 pontos do EMC, nos minutos 10, 25 e 40. Pela análise do gráfico, acredita-se que o aquecimento do motor de passo possa estar influenciando no aquecimento da parte interna.

Dado observado, que após ter desligado o sistema por 2h e deixado o gadolínio isolado com a parte interna, a temperatura externa caiu de 26,1°C para 24,8°C e a temperatura interna caiu de 25,4°C para 24,1°C (gráfico 5), idem análise do gráfico 3.



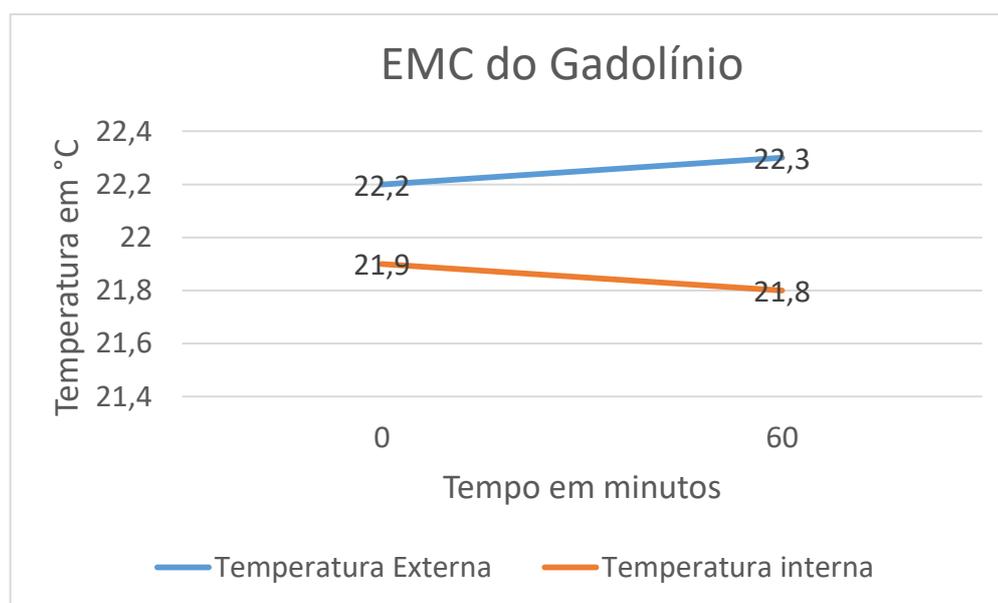
**Gráfico 5 - EMC do gadolínio com o sistema desligado por 2h. Fonte: Autor.**



**Gráfico 6 - Ciclo de contato do ímã com o gadolínio - 5 minutos. Fonte: Autor.**

No gráfico 6, só detectou 1 ponto do EMC, no ponto 5 (eixo dos minutos). Mostrando que o ciclo de contato do ímã com o gadolínio por 5 minutos não foi eficiente, por estar elevando a temperatura interna.

Dado observado que após desligado o sistema por 1h, a temperatura externa aumentou em 0,1°C e a interna caiu em 0,1°C, respectivamente, 22,3°C e 21,8°C (Gráfico 7).



**Gráfico 7 - EMC do gadolínio com o sistema desligado por 1h. Fonte: Autor.**

Espera-se obter valores mais altos por meio de procedimentos de otimização de inúmeros parâmetros, como: velocidade de rotação da roda, a velocidade dos fluídos, as propriedades magnéticas, etc. A eficiência do sistema é geralmente conectada à intensidade do campo magnético [34].

No tópico 6 (trabalhos futuros), encontra-se um projeto simples e mais eficiente para construção de um novo protótipo de refrigerador magnético.

#### 4.5 ANÁLISE DO CICLO TERMOMAGNÉTICO DO PROTÓTIPO

Como abordado na revisão da literatura (página 19, 1º e 2º parágrafo), o EMC pode ser otimizado de acordo com dois diferentes processos, ambos úteis nos ciclos termomagnéticos (figura 40).

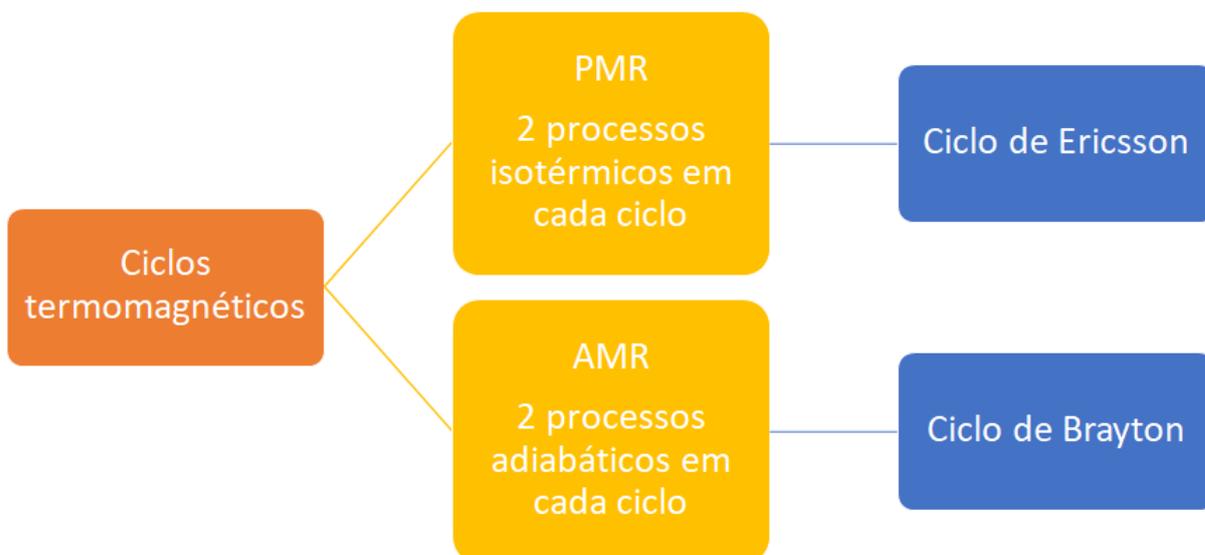


Figura 40 – Ciclos termomagnéticos. Fonte: Autor.

Assim pela análise dos ciclos termomagnéticos [2, 13, 29 e 34], esse 3º protótipo se encaixa no processo isotérmico (quadro 2) e no PMR – Ciclo de Ericsson.

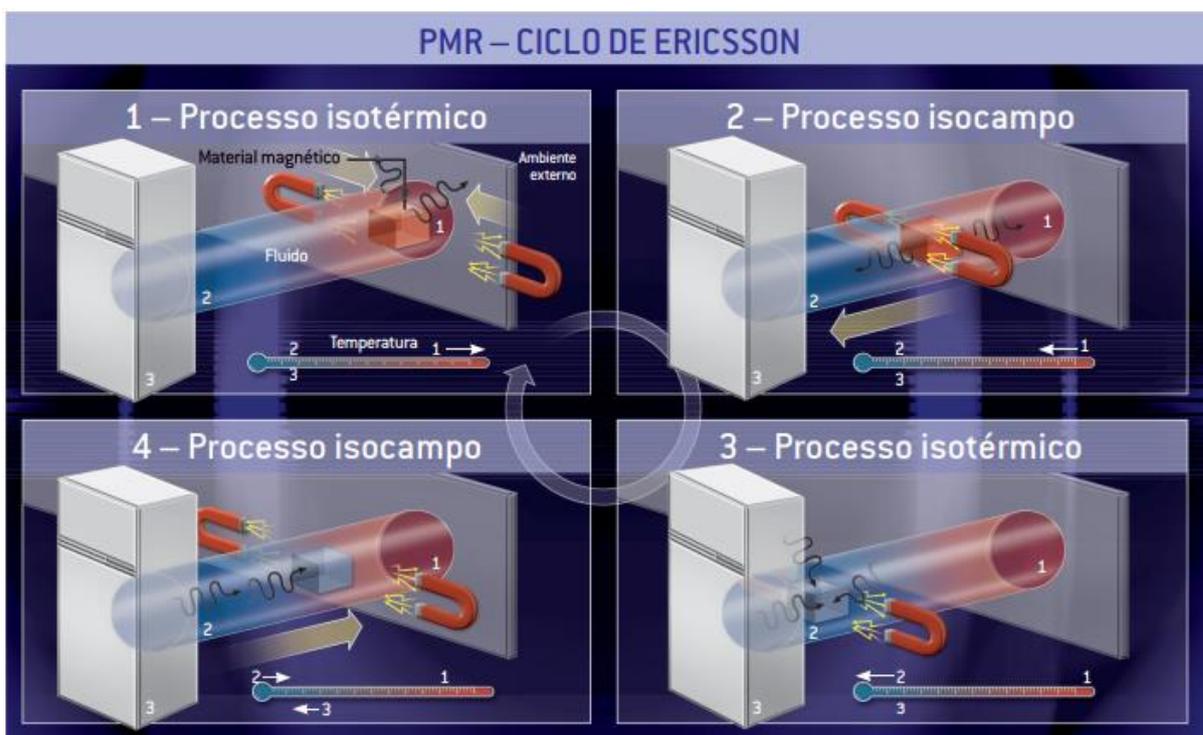
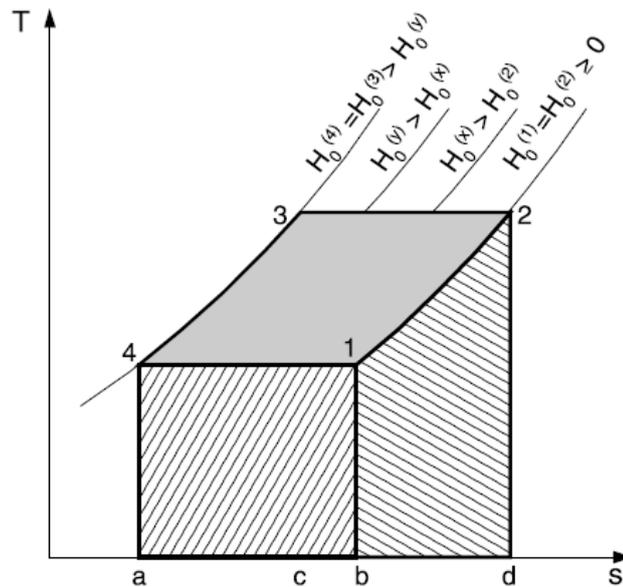


Figura 41 – Ciclo utilizado no 3º protótipo. Fonte: [2].

Uma máquina baseada no ciclo Ericsson (figura 41) opera ao longo de duas isotermas e duas linhas de campo isomagnéticas (gráfico 8). Este processo requer

regeneração de calor. Durante o campo isomagnético processo (1–2) o calor é absorvido pela regeneração a partir do lado oposto (3–4). Portanto, na regeneração ideal – a área (2-1 – b – d), representando a absorção de energia térmica do material magnetocalórico deve corresponder a (3–4 – a – c), representando a extração de calor do material refrigerante. A regeneração só pode ser conduzida por uma diferença de temperatura. A transferência de calor representa um processo irreversível e, portanto, diminui a eficiência da máquina Ericsson. Uma alteração simultânea do campo magnético e absorção de calor, ou rejeição, leva à processos isotérmicos (2–3) e (4–1). A área (1–2–3–4) representa o trabalho necessário para o ciclo de Ericsson e a área (1–4 – a – b) é idêntica à energia de resfriamento [13].



**Gráfico 8 - O ciclo Ericsson pode operar com regeneração de calor. No caso ideal, não ocorrem perdas de calor. Fonte: [13].**

Pela temperatura na magnetização e demagnetização isotérmica ser constante, ela não será uma função da entropia específica, então a energia do resfriamento é dada por:

$$q_c = T^{(1)}[s^{(1)} - s^{(4)}] = (1)$$

$$= T^{(1)}[s(T^{(1)}, H_0^{(1)}) - s(T^{(4)}, H_0^{(4)})], T^{(4)} = T^{(1)} (2)$$

De maneira análoga, o calor específico rejeitado do sistema é determinado:

$$q_r = T^{(2)}[s^{(3)} - s^{(2)}] = \quad (3)$$

$$= T^{(2)}[s(T^{(3)}, H_0^{(3)}) - s(T^{(2)}, H_0^{(2)})], T^{(3)} = T^{(2)} \quad (4)$$

Das equações feitas em detalhes na referência [13], têm-se que o trabalho é:

$$w_1 = [h_1^{(1)} - h_1^{(4)}] - T^{(1)}[s^{(1)} - s^{(4)}] + [h_1^{(3)} - h_1^{(2)}] - T^{(2)}[s^{(3)} - s^{(2)}] \quad (5)$$

Assim o  $COP$  do ciclo de Ericsson é obtido por:

$$COP_{Ericsson} = \frac{q_c}{w_1} \quad (6)$$

Substituindo as equações (1) e (5) na equação (6), fica:

$$COP_{Ericsson} = \frac{T^{(1)}[s^{(1)} - s^{(4)}]}{[h_1^{(1)} - h_1^{(4)}] - T^{(1)}[s^{(1)} - s^{(4)}] + [h_1^{(3)} - h_1^{(2)}] - T^{(2)}[s^{(3)} - s^{(2)}]} \quad (7)$$

Introduzindo a entalpia específica [13], obtém-se que:

$$h_1^{(2)} - h_1^{(1)} = h_1^{(3)} - h_1^{(4)} \quad (8)$$

Substituindo a equação (8), na equação (7), têm-se:

$$COP_{Ericsson} = \frac{T^{(1)}[s^{(1)} - s^{(4)}]}{-T^{(1)}[s^{(1)} - s^{(4)}] - T^{(2)}[s^{(3)} - s^{(2)}]} \quad (9)$$

Estudando o seguinte limite:

$$\lim_{T^{(2)} \rightarrow T^{(1)}} COP_{Ericsson} = \frac{T^{(1)}}{T^{(2)} - T^{(1)}} \quad (10)$$

Devido  $s^{(2)}$  se aproximar  $s^{(1)}$  e  $s^{(3)}$  tende para  $s^{(4)}$ , de modo que os parênteses da equação (9) se cancelam. Dentro deste limite o trabalho executado desaparece e o  $COP$  torna-se infinitamente grande.

Assim foram calculados os valores médios das temperaturas  $T^{(1)}$ ,  $T^{(2)}$ ,  $T^{(3)}$  e  $T^{(4)}$ , referente aos gráficos 2,4 e 6, para os 3 ciclos (tabela 4).

$T_{med} (^{\circ}\text{C})$ /Ciclo	Ciclo 15s	Ciclo 2min	Ciclo 5min
$T_{ext} = T^{(2)} = T^{(3)}$	26,00769	26,24615	22,01429
$T_{int} = T^{(4)} = T^{(1)}$	25,44286	25,21538	21,64286

Tabela 4 – Valores médios das temperaturas referente aos 3 ciclos. Fonte: Autor.

Pelo material referencial [51], encontra-se os valores das entropias do gadolínio para diferentes campos magnéticos e temperaturas (gráfico 9).

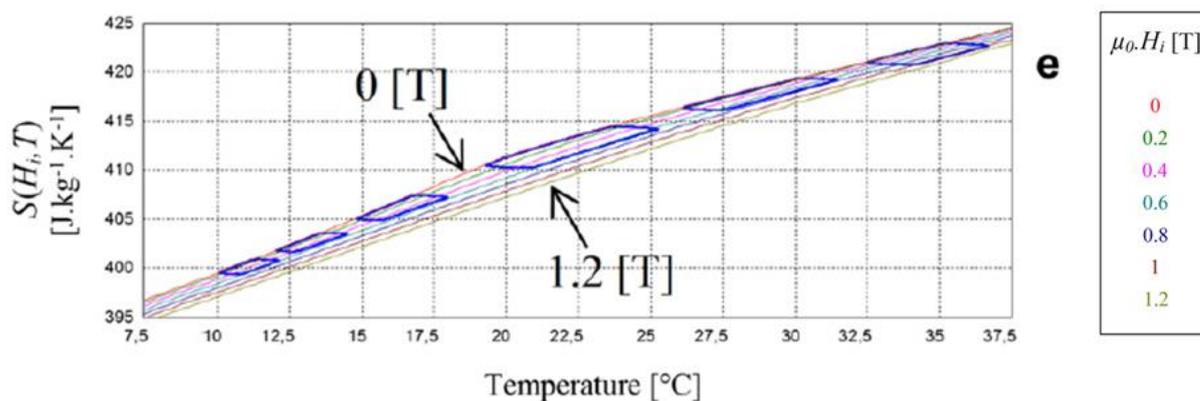


Gráfico 9 – Gráfico para valores da entropia do gadolínio em diferentes campos magnéticos e temperaturas. Fonte: [51].

Interpolando os valores do gráfico 9 para os valores das temperaturas e do campo magnético nesse trabalho, obtém-se os resultados das entropias, encontrados na tabela 5.

$S(H_i, T)$ [J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]/Cicl o	Ciclo 15s	Ciclo 2min	Ciclo 5min
$s^1$	415,7657	415,6292	413,3143
$s^2$	416,1046	416,2477	413,6113
$s^3$	414,5077	414,7462	412,2229
$s^4$	413,9429	413,7154	411,6286

Tabela 5 – Valores das entropias referentes aos 3 ciclos. Fonte: Autor.

Então substituindo os valores das temperaturas médias e das entropias, nas equações (1), (3), (6) e (10). Foram obtidos os resultados do  $COP$ ,  $q_c$ ,  $q_r$  e  $w_1$  (tabela 6).

Análises/Ciclo	Ciclo 15s	Ciclo 2min	Ciclo 5min
$COP$	528,3764	289,3132	793,2662
$q_c(\frac{J}{kg})$	544,0184	570,7389	496,6830
$q_r(\frac{J}{kg})$	-477,4930	-449,3300	-409,6180
$w_1(\frac{J}{kg})$	1,0296	1,9727	0,6261

Tabela 6 – Valores das análises referentes aos 3 ciclos. Fonte: Autor.

O COP muito elevado não é viável comercialmente. Esses resultados são referentes a um trabalho experimental. O COP também é inversamente proporcional as diferenças de temperaturas  $T^{(2)} - T^{(1)}$ . O ciclo de 2min apresentou melhor energia de resfriamento do que o ciclo de 15s e o ciclo de 5min. O ciclo de 15s tem uma maior

velocidade, logo menor tempo de contato que os ímãs agem sobre uma determinada região do gadolínio, e isto implica num menor efeito na temperatura do sistema [23]. Já para aplicações de motores termomagnéticos, o tempo de 260s (aproximadamente 5min), é longo. Deve-se buscar minimizar o período de troca térmica [52].

## 5 CONCLUSÃO

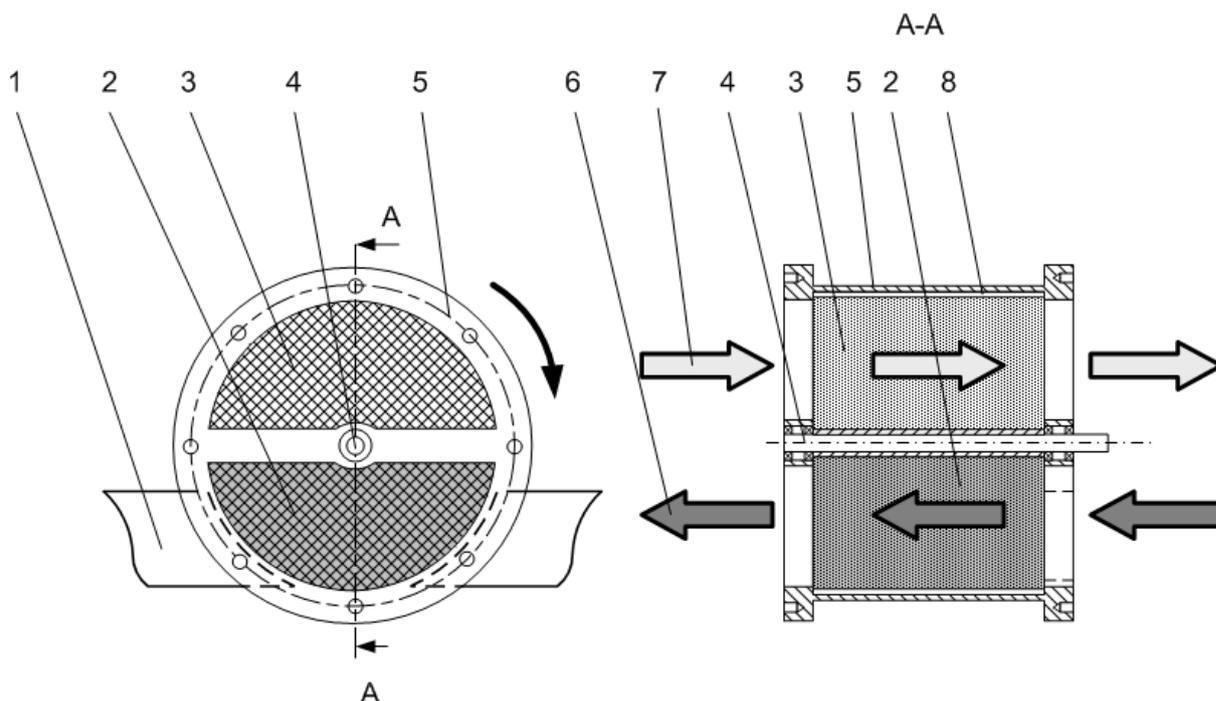
Verificou-se o EMC no 3º protótipo através da adaptação do projeto. Os resultados do 3º protótipo foram positivos comparado ao 1º e 2º protótipos e a outro trabalho [23], porém um valor baixo comparado aos protótipos vistos na revisão da literatura, apesar de não especificarem o tempo de funcionamento, do contato com o ímã com o gadolínio, que foi abordado nesse trabalho. Mas o ciclo de 2min apresentou melhores resultados do que os ciclos de 15s e 5min. Pelo sistema ser semi-adiabático dificultou na obtenção de resultados mais positivos.

Por outro lado, durante o projeto lidou-se com diversas áreas do conhecimento da engenharia como física, materiais, térmica, elétrica, eletrônica, projetos mecânicos, entre outras subáreas do curso de engenharia mecânica. O que foi muito rico para formação acadêmica.

Embora o fator tempo tenha sido uma dificuldade, pois cada área do conhecimento requer muito estudo e dedicação, o principal objetivo desse projeto foi atendido que foi a construção de um protótipo que comprove o Efeito Magnetocalórico.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Uma sugestão para um próximo trabalho e construção de um novo protótipo, é isolar bem as duas fontes uma da outra, por um círculo completo de gadolínio, com um campo magnético superior à 0,5 tesla. Segue o modelo do refrigerador magnético suíço para referência (figura 42).



**Figura 42 - Princípio de operação simples relacionado ao resfriador magnético é usado em um resfriador de roda do tipo poroso. Fonte: [34].**

1. Ímã;
2. Roda (Parte Quente)
3. Roda (Parte Fria)
4. Eixo de Rotação;
5. Caixa com Flanges;
6. Fluido do trabalho aquecido;
7. Fluido do trabalho refrigerado;
8. Espaço entre o corpo e a roda;

Segue o princípio de funcionamento dele:

O ímã é colocado no semi-espaço inferior que circunda a roda porosa. Desta forma, a roda gira  $180^\circ$  dentro do campo magnético. Depois que ele sai da metade superior, onde o campo magnético é zero e resfriamento ocorre. Em seguida, o fluido no topo (que flui da esquerda para a direita) é resfriado. Por outro lado, o fluido que flui através da metade inferior é aquecido. Se a vazão superior, que é resfriada, é enviada, por exemplo, para uma vitrine para supermercados, é obtida uma máquina de refrigeração. Por outro lado, se o fluido da parte inferior, que é aquecida, é enviado para um sistema de aquecimento, uma bomba de calor é obtida (para um estudo de viabilidade, ver [34]).

Outros tópicos para serem aprofundados também:

- Estudar a usinabilidade do gadolínio;
- Estudar o formato do gadolínio para melhor eficiência do EMC;
- Estudar o tempo de contato do ímã com o gadolínio para melhor eficiência do EMC;
- Estudar distância e outras variáveis do campo magnético no gadolínio;
- Testar outros fluídos de transferência de calor;
- Adaptar projeto com uma divisória adiabática mais eficiente.

## REFERÊNCIAS

- [1] LE COUTEUR, P.; BURRESON, J. **Os botões de Napoleão: as 17 moléculas que mudaram a história**. Trad. Maria Luiza X. de A. Borges. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2006. 343 p. ISBN: 978-85-7110924-7.
- [2] REIS, M. **Troca de calor pelo efeito magnetocalórico é a base dos refrigerantes do futuro, mais ecológicos e econômicos**. Aquecimento Global, Scientific American Brasil, Edição 34, Páginas 44-49, Março de 2005.
- [3] **A GELADEIRA**. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/comportamento/a-geladeira/>>. Acesso em: 19 nov. 2017.
- [4] COSTA, L. **História da Refrigeração**. Disponível em: <<https://stravaganzastravaganza.blogspot.com/2011/03/historia-da-refrigeracao.html>>. Acesso em 09/12/18.
- [5] **FAQS - Clima - Proteção da Camada de Ozônio**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/perguntasfrequentes?catid=14>>. Acesso em: 19 nov. 2017.
- [6] DA SILVA, D.H. (2009). **Protocolos de Montreal e Kyoto: Pontos em comum e diferenças fundamentais**. *Revista Brasileira de Política Internacional*, 52(2), 155–172.
- [7] WARBURG, E. **Magnetische Untersuchungen über einige Wirkungen der Koerzitivkraft**, Ann Phys 13 (1881) 141–164.
- [8] ROSENSWEIG, R.E. **Ferrohydrodynamics**, Dover Publications, Mineola, NY, 1997.
- [9] WEISS, P.; PICCARD, A. **Sur un nouveau phénomène magnétocalorique**, Compt Rend Ac Sci 166 (1918) 352.
- [10] DEBYE, P. **Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur**, Ann Phys 81 (1926) 1154–1160.
- [11] GIAUQUE, W.F. **A thermodynamic treatment of certain magnetic effects. A proposed method of producing temperatures considerably below 18 absolute**, J Am Chem Soc 49 (1927) 1864–1870.
- [12] GIAUQUE, W. F.; MACDOUGALL, D. P. **Attainment of temperatures below 18 absolute by demagnetization of Gd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·8H<sub>2</sub>O**, Phys Rev Lett 43 (9) (1933) 768.
- [13] KITANOVSKI, A.; EGOLF, P.W. (2006). **Thermodynamics of magnetic refrigeration**. *International Journal of Refrigeration*, 29(1), 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.04.007>

- [14] KITANOVSKI, A.; PLAZNIK, U.; TOMC, U.; POREDOS, A. (2015). **Present and future caloric refrigeration and heat-pump technologies**. *International Journal of Refrigeration*, 57, 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.06.008>
- [15] BROWN, G. V. **Magnetic heat pumping**. US Patent 4.069.028; 1978.
- [16] BROWN, G. V. **Magnetic heat pumping near room temperature**, *J Appl Phys* 47 (1976) 3673–3680
- [17] ZIMM, C.B.; STERNBERG, A.; JASTRAB, A.G.; BOEDER, A.M.; LAWTON, L.M.; CHELL, J.J. **Rotating bed magnetic refrigeration apparatus**. US Patent 6.526.759.4; 2003.
- [18] HIRANO, N. (2002). «**Development of magnetic refrigerator for room temperature application**». *AIP Conference Proceedings* 613. p. 1027. [doi:10.1063/1.1472125](https://doi.org/10.1063/1.1472125).
- [19] YU, B.F.; GAO, Q.; ZHANG, B.; MENG, X.Z.; CHEN, Z. **Review on research of room temperature magnetic refrigeration**, *Int J Refrigeration* 26 (2003) 1–15.
- [20] TISHIN, A.M.; SPICHKIN, Y.I. **The magnetocaloric effect and its applications, Series in Condensed Matter Physics**, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003.
- [21] PECHARSKY, V.K.; GSCHNEIDNER, K.A. **Magnetocaloric effect and magnetic refrigeration**, *J Magn Magn Mater* 200 (1999) 44–56.
- [22] **BRASIL poderá fabricar refrigeradores magnéticos**. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010115030811>> . Acesso em: 19 nov. 2017.
- [23] DANTAS, A. **Projeto: Construção e caracterização de um protótipo refrigerador magnético utilizando o efeito magnetocalórico**, 2006, UNICAMP, Brasil.
- [24] BOHIGAS, X.; MOLINS, E.; ROIG, A.; TEJADA, J.; ZHAGG, X. X. *IEEE Trans. Magn.* 36, 538 (2000)
- [25] HINGEL, F. **Contribuição para estudo do efeito magnetocalórico inverso**, 2009 Universidade Federal Fluminense Rio de Janeiro, Brasil.
- [26] GRANGEIA, D. F. **Dissertação de Mestrado**, UERJ (2005).
- [27] REID, C.E.; BARCLAY, J.A.; HALL, J.L.; SARANGI, S. **Selection of magnetic materials for an active magnetic regenerative refrigerator**, *J. Alloys Compd.* 207 (1994) 366 e 371.
- [28] BRUCK, E. Developments in magnetocaloric refrigeration, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38 (2005) R381e R391

- [29] ROMERO, G.J.; FERREIRO, G.R.; DE MIGUEL, C.A.; ROMERO, G.M. (2013). **Magnetocaloric effect: A review of the thermodynamic cycles in magnetic refrigeration.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.027>
- [30] PECHARSKY, V.K. “**Thermodynamics of the magnetocaloric effect**”, **Curso “O Efeito Magnetocalórico – Refrigeração Convecional e Magnética**”, 17 a 26/01/2005, IFGW, Unicamp, Brasil
- [31] LOPES, D.C.G. **Ozono na estratosfera.** Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/DoraCristinaGuedesLopes/ozono-na-estratosfera>>. Acesso em: 19 nov. 2017.
- [32] **EVIDÊNCIA atmosférica.** Disponível em: <<http://saber-ciencia.tecnico.ulisboa.pt/artigos/buraco-do-ozono-11.php>>. Acesso em: 19 nov. 2017.
- [33] XAMA'IMHAON360. **Gadolinium Curie Spinner.** 2018. (04m10). Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=FI6LMGatl3s> >. Acesso em: 11 nov. 2018.
- [34] EGOLF. Peter W. **Un prototipo semplice ed efficiente di refrigeratore magnetico.** Disponível em: <<http://www.centrogalileo.it/nuovapa/Articoli%20tecnici/INGLESE%20CONVEGNO/XI%20Convegno%20English/2%20SESSIONE/Egolf%20UNIV%20SVIZZ.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2018.
- [35] OLIVEIRA. Juliana Harmatiuk. **Efeito Magnetocalórico.** Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/JulianaHarmatiuk/efeito-magnetocalrico>>. Acesso em: 18 nov. 2018.
- [36] CONSALTER. Daniel Martelozo. **Motor de Curie.** Disponível em: <[https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem\\_2\\_2006/DanielM\\_FauthRF2.pdf](https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem_2_2006/DanielM_FauthRF2.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2018.
- [37] JERID. **Cordless drill boat propeller.** Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/thing:496436>>. Acesso em 18 nov. 2018.
- [38] TECMUNDO. **Como fazer um ar-condicionado caseiro gastando pouco [Área 42].** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=KGzAiPLUUt0&t=204s>>. Acesso em 18 nov. 2018.
- [39] MANUAL DO MUNDO. **Como fazer uma geladeira caseira que chega a 5,6°C (geladeira Peltier).** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=O7NuMwVCdt0>>. Acesso em 18 nov. 2018.
- [40] GÓMEZ, J. Romero et al. Magnetocaloric effect: A review of the thermodynamic cycles in magnetic refrigeration. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 17, p.74-82, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.027>.

- [41] FERNANDES, Nuno Alexandre Dias. **Aplicações do efeito magnetocalórico: design e automatização de dispositivos.** 2007. 47 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Física, Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2007. Disponível em: <[http://magnetocaloric.web.ua.pt/files\\_cv/MSc\\_Nuno.pdf](http://magnetocaloric.web.ua.pt/files_cv/MSc_Nuno.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2018.
- [42] TOP MOST 22. **Gadolinium: Facts & Uses | Things made from Gadolinium | is Gadolinium Radioactive?** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=mxZEEzfJTzY>> Acesso em 18 nov. 2018.
- [43] Z.Y. Zhang, Y. Long, R.C. Ye, Y.Q. Chang, W. Wu, **Corrosion resistance of magnetic refrigerant gadolinium in water.** First International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, (2005), 27-30, Montreux, Switzerland.
- [44] KAWA. Luciane. **Gadolínio (Gd) – (Terras raras).** Disponível em: <<http://professoralucianekawa.blogspot.com/2014/12/gadolinio-gd-terras-raras.html>>. Acesso em 18 nov. 2018.
- [45] LAUREANDO; TONELLATO, Giulio. **Refrigerazione magnetica: basi teoriche e applicazioni pratiche.** 2016. 75 f. Tese (Doutorado) - Curso de Corso di Laurea In Ingegneria Dell'energia, Dipartimento di Ingegneria Industriale Dii, Universita' Degli Studi di Padova, Pádua, 2017. Disponível em: <[http://www.pianetachimica.it/didattica/documenti/Tesi\\_Refrigerazione\\_Magnetica\\_Tonellato\\_Giulio.pdf](http://www.pianetachimica.it/didattica/documenti/Tesi_Refrigerazione_Magnetica_Tonellato_Giulio.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2018.
- [46] BARROS, R. **Contra os perigos da camada de ozônio!** Disponível em: <<http://oquevaipelomundo.blogspot.com/2013/04/contra-os-perigos-da-camada-de-ozonio.html>>. Acesso em: 09 dez. 2018.
- [47] LOJA DO MECÂNICO. **Arco de Serra Fixo 12 Pol – STARRETT-140.** Disponível em: <<https://www.lojadomecanico.com.br/produto/15554/2/562/arco-de-serra-fixo-12-pol---starret-140-starret-140>>. Acesso em: 09 dez. 2018.
- [48] MERCARDO LIVRE. **Torno (Morsa) Bancada Profissional Nº 6 Metalcava.** Disponível em: <[https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-928307565-torno-morsa-bancada-profissional-n-6-metalcava-\\_JM?quantity=1](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-928307565-torno-morsa-bancada-profissional-n-6-metalcava-_JM?quantity=1)>. Acesso: 09 dez. 2018.
- [49] MERCARDO LIVRE. **Máquina De Afiação Alicates de Culticula, tesoura Etc.** Disponível em: < [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-817471044-maquina-de-afiar-alicates-de-culticulatesoura-etc-\\_JM?quantity=1&variation=23133525374](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-817471044-maquina-de-afiar-alicates-de-culticulatesoura-etc-_JM?quantity=1&variation=23133525374) >. Acesso: 09 dez. 2018.
- [50] UNIVERSO DAS FERRAGENS. **Adesivo Selante Blister 50gr Cinza – Selabond.** Disponível em: < <https://www.universodasferragens.com.br/produto/3718-adesivo-selante-cinza-50-gramas--selabond> >. Acesso em: 09 dez. 2018.
- [51] RISSER, M. et al. **Improvement and application of a numerical model for optimizing the design of magnetic refrigerators.** International Journal Of Refrigeration, [s.l.], v. 36, n. 3, p.950-957, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.10.012>.

[52] BESSA, C. V. X. **Métodos Analíticos para o Cálculo de Desempenho de Motores Termomagnéticos do Tipo Tesla / C. V. X. – Versão Corrigida – São Paulo. 205p.**

[53] MERCADO LIVRE. **Ímã De Neodímio N50 30x20x10mm Bloco 4300 Gauss Ima Neodimio** . Disponível em: < [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-724777601-im-de-neodimio-n50-30x20x10mm-bloco-4300-gauss-ima-neodimio-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-724777601-im-de-neodimio-n50-30x20x10mm-bloco-4300-gauss-ima-neodimio-_JM)>. Acesso em: 09 dez. 2018.

[54] MERCADO LIVRE. **Medidor Temperatura Chocadeira Digital Sensor Externo**. Disponível em: < [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-697209588-medidor-temperatura-chocadeira-digital-sensor-externo-\\_JM?quantity=1](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-697209588-medidor-temperatura-chocadeira-digital-sensor-externo-_JM?quantity=1)>. Acesso em: 09 dez. 2018.

[55] PINSETA, P. D. **Plano de Aula – Propagação de calor por convecção térmica**. Disponível em: < <https://novaescola.org.br/plano-de-aula/1878/propagacao-de-calor-por-conveccao-termica>>. Acesso em: 09 dez. 2018.

[56] CARLOS. **Refrigeração Magnética**. Disponível em: < <https://www.blogdoprofessorcarlao.com.br/2010/01/refrigeracao-magnetica.html?m=0>>. Acesso em: 09 dez. 2018.

[57] TECNO LOJA DIGITAL. **Termômetro Digital para Máxima e Mínima -10°C à +50°C Interna Incoterm 7427.02.0.00**. Disponível em: < <https://www.tecnoferramentas.com.br/termometro-digital-para-maxima-e-minima-int-ext-com-alarme-incoterm-7427-02-0-00/p>>. Acesso em: 09 dez. 2018.

## **ANEXO A - Especificações Técnicas do Ímã**

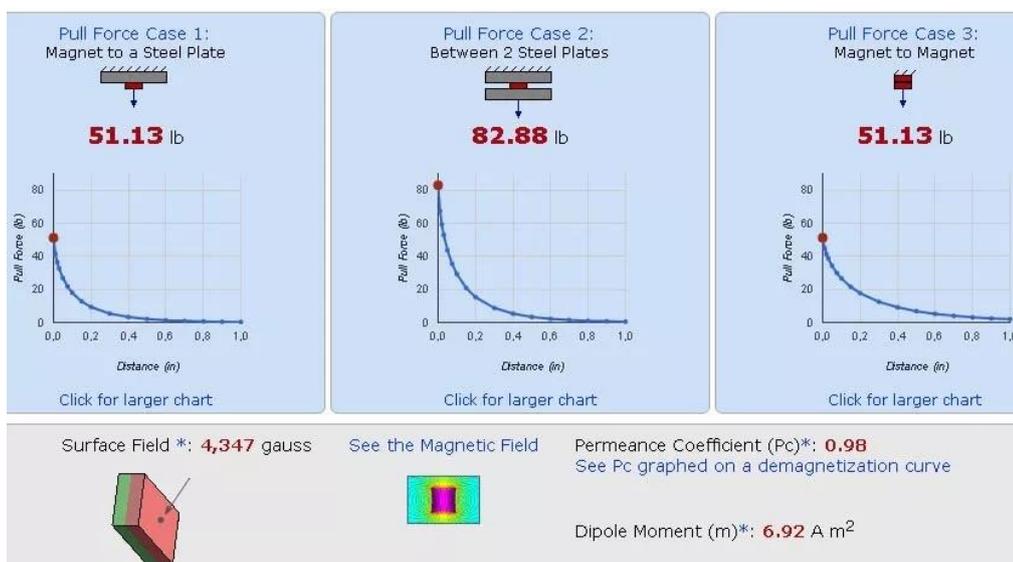
- Bloco Maciço Retangular de Aproximadamente 30mm X 20mm x 10mm
- Produto Mecanicamente Frágil
- Revestimento: Níquel
- Grade Magnética: N50
- Campo Magnético na Superfície: 4350 gauss (+-5%)
- Magnetização: Axial
- Máx.temperatura: 80° C
- Quantidade: 1 peça

Ímã ferro boro também chamado de ímã de Neodímio ou terras-raras é um poderoso ímã feito a partir de uma combinação de neodímio, ferro e boro —  $Nd_2Fe_{14}B$ .

Esses ímãs são muito poderosos em comparação a sua massa, mas também são mecanicamente frágeis e perdem seu magnetismo de modo irreversível em temperaturas acima de 80°C.

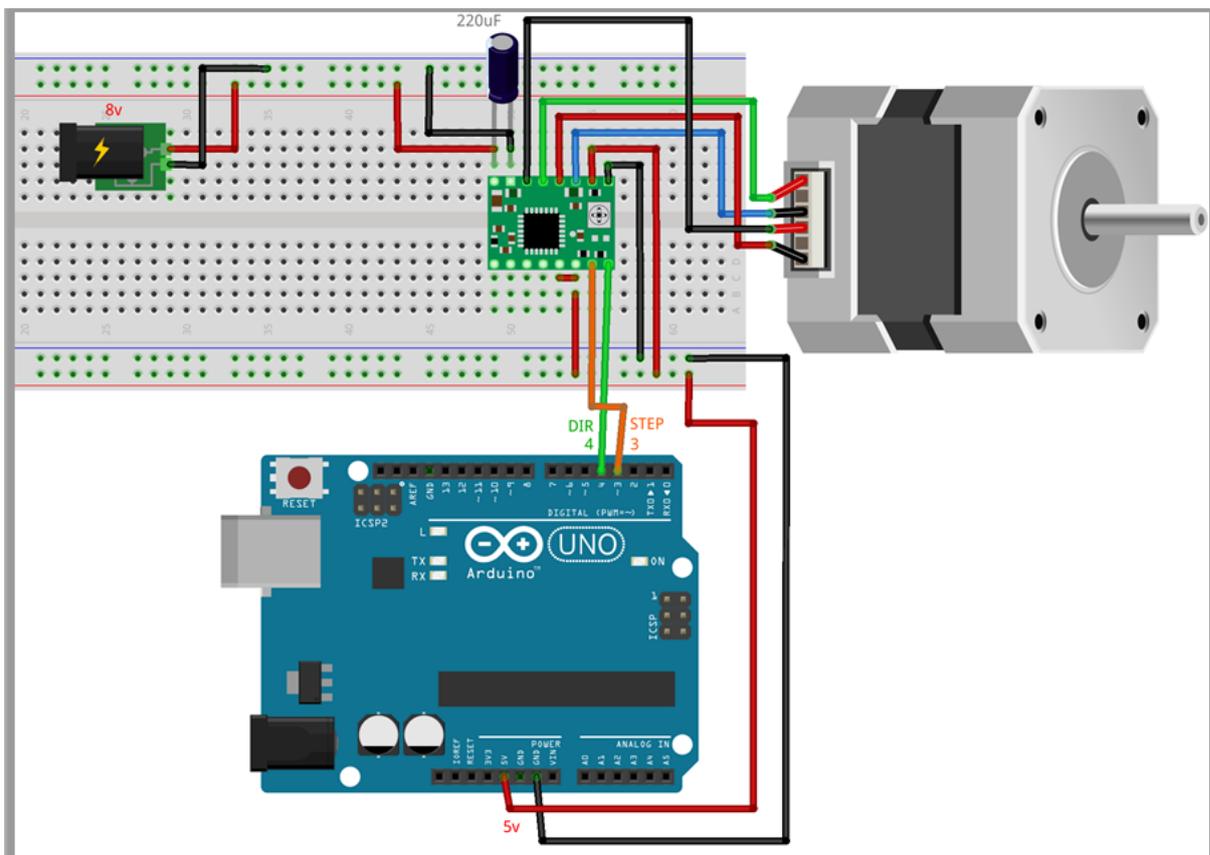
Usados em muitos tipos de motores elétricos e discos rígidos, os ímãs de  $Nd_2Fe_{14}B$  são também muito populares com curiosos. Um pequeno ímã pode possuir propriedades incríveis.

Por serem feitos de pós e folheações, os ímãs são muito frágeis e podem quebrar, ou se sujeitos a impactos com outro ímã e impactos com outras superfícies.

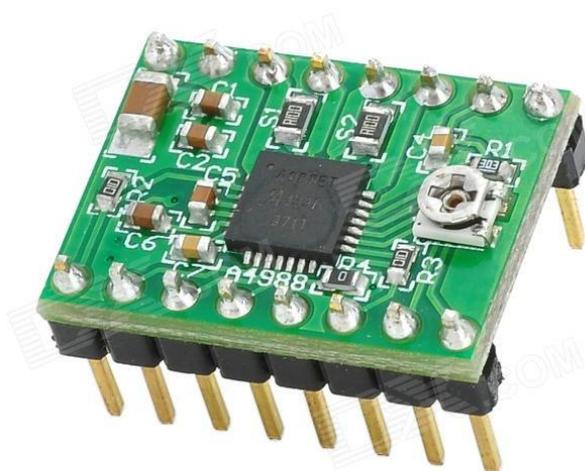


**ANEXO B - Arduíno**

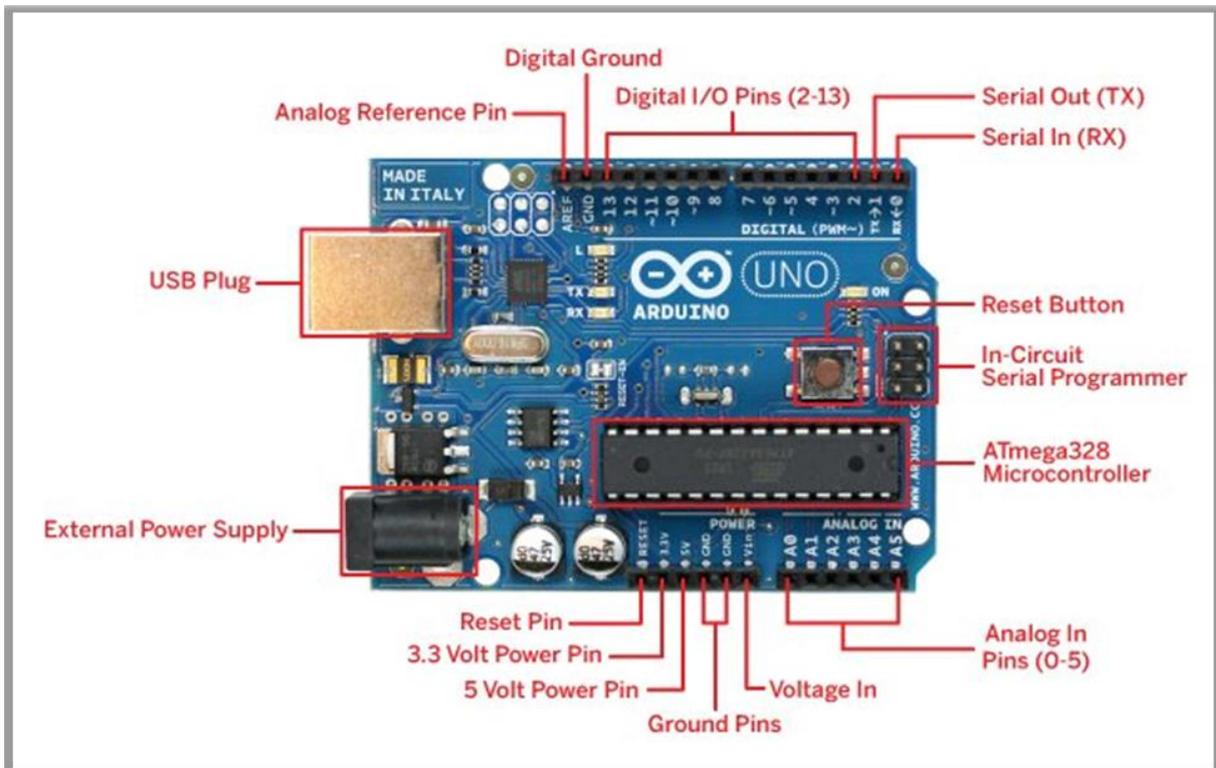
## Montagem



## Driver de Passo A4988



## Datasheet



## Código utilizado

```
// define números de pinos do driver no arduino
const int stepPin = 3;
const int dirPin = 4;

void setup () {
  // Define os dois pinos como Saídas
  pinMode (stepPin, OUTPUT);
  pinMode (dirPin, OUTPUT);
}

void loop() {
  // permite que o motor se mova em uma direção particular
  digitalWrite(dirPin, HIGH);
  // faz 200 pulsos para fazer uma rotação de ciclo completo
  for(int y = 0; y < 2 ; y++) {
```

```
for(int x = 0; x < 66; x++) {  
    digitalWrite(stepPin,HIGH);  
    delayMicroseconds(10000);  
    digitalWrite(stepPin,LOW);  
    delayMicroseconds(10000);  
}  
delay(15000);  
}  
for(int x = 0; x < 68; x++) {  
    digitalWrite(stepPin,HIGH);  
    delayMicroseconds(10000);  
    digitalWrite(stepPin,LOW);  
    delayMicroseconds(10000);  
}  
delay(15000); //1 segundo de delay para inverter a direção  
}
```

Foram alterados o valor do delay, para cada teste dos ciclos.

Mais detalhes podem ser vistos no site:

<https://www.fernandok.com/2017/12/motor-de-passo-com-arduino-e-o-driver.html>