

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA ELÉTRICA
RODRIGO FERREIRA DA CRUZ DIAS

DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR MAGNÉTICO: ESTUDO DE CASO

Varginha
2018

RODRIGO FERREIRA DA CRUZ DIAS

DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR MAGNÉTICO: ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas- UNIS como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Roberto Lazarino do Prado Mudesto.

Varginha

2018

RODRIGO FERREIRA DA CRUZ DIAS

DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR MAGNÉTICO: ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas- UNIS pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: 07 / 12 / 2018

Prof.: Esp. Silvio Bottrel Guimarães

Prof.: Esp. Roberto Lazarino do Prado Mudesto

Prof.: Me. Erick Akio Nagata

OBS.:

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda proteção, saúde e sabedoria, a minha mãe que sempre lutou para que eu pudesse realizar meus sonhos, meu pai pelo cuidado, minha família pelo apoio, especialmente a meu amado tio Epaminondas de Carvalho, responsável pela realização do meu objetivo de estar concluindo minha graduação. Agradecimentos especiais aos meus amigos Lucas Tavares dos Reis e Gustavo Luiz Luz pela parceria, meu grande amigo João Rafael Hercy dos Santos por ser um verdadeiro professor nesses 5 anos. Ao Professor e meu orientador Roberto Lazarino do Prado Mudesto pela paciência, dedicação e por sempre acreditar em meu trabalho.

“Se a princípio, a ideia não é absurda, então
não há esperanças para ela.”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar o estudo e avaliação da elaboração de um motor magnético, que se terá como principal fonte de energia o magnetismo presente em ímãs. Atualmente o magnetismo se torna cada vez mais uma área promissora para aplicações de tecnologias, sendo já empregado em sensores, motores elétricos, geradores, HDs, memórias spintrônicas e, mais recentemente na área da saúde. Para a elaboração do projeto será necessário o conhecimento da física clássica e moderna, seu conhecimento será utilizado para se obter melhor aplicabilidade dos conceitos do magnetismo, como por exemplo a maximização das interações magnéticas e os tipos de materiais mais adequados a serem utilizados. O protótipo será embasado nas configurações de motores magnéticos já existentes, onde se poderá ser observado os tipos de arranjos de motores e suas principais características distintas. Com a obtenção de resultados positivos neste projeto, sua implementação terá um impacto muito otimista em diversas áreas, sendo que a busca por equipamentos mais eficientes se torna prioridade em nossa sociedade, proporcionando menos consumo e impactos ao meio ambiente.

Palavras-chave: Magnetismo. Motor magnético. Campo magnético. Densidade magnética.

ABSTRACT

The objective of this work is to study and evaluate the design of a magnetic motor, which is the main source of energy of the magnetism present in magnets. Magnetism increasingly becomes a promising area for applications of technologies, since they are used in sensors, electrical generators, generators, HDs, spintronic memories and, more recently in the health area. The knowledge of empirical performance, the performance of magnetic performance and functional use of the standard of the physical use is the maximization of magnetic interactions and the type of materials the ideal used. The prototype is based on the configurations of existing magnetic motors, where the types of engine arrangements and their main characteristics can be observed. With the objective of obtaining positive results in this project, its implementation had a very optimistic impact in several areas, being that the.

Keywords: .Magnetism. Magnetic Motor. Magnetic field. Magnetic Density.

LISTA EQUAÇÃO

Equação 1	19
Equação 2	19
Equação 3	20
Equação 4	20
Equação 5	20
Equação 6	21
Equação 7	21
Equação 8	21
Equação 9	21
Equação 10	22
Equação 11	22
Equação 12	22
Equação 13	23
Equação 14	23
Equação 15	23
Equação 16	23
Equação 17	24
Equação 18	24
Equação 19	24
Equação 20	24
Equação 21	26
Equação 22	26
Equação 23	26
Equação 24	26
Equação 25	26
Equação 26	27
Equação 27	27
Equação 28	27
Equação 29	29
Equação 30	29
Equação 31	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Simetria de polos opostos.....	16
Figura 2: Linhas de campo magnético	17
Figura 3: Comportamento das linhas de campo magnético	18
Figura 4: Indicação do sentido do vetor magnético	19
Figura 5: Indivisibilidade de polos	22
Figura 6: Semelhança entre linhas de campo	25
Figura 7: Orientação magnética.....	25
Figura 8: Interação entre campos magnéticos	28
Figura 9: Suposto movimento perpetuo	28
Figura 10: Arranjo Howard Johnson.....	31
Figura 11: Motor Howard Johnson	31
Figura 12: Sistema propulsão Hartman.....	32
Figura 13:Configuração V-Gate	33
Figura 14: Configuração básica Keppe Motor	35
Figura 15: Motor com configuração V-Gate.....	38
Figura 16: Interação magnética motor V-Gate.....	38
Figura 17: Posição contra movimento	39
Figura 18: Arranjo magnético de atração.....	39
Figura 19: Posição contra movimento 2.....	40
Figura 20: Arranjo do motor.....	42
Figura 21: Polarização rotor-estator.....	43
Figura 22: Malha de precisão	44
Figura 23: Integral de superfície.....	45
Figura 24: Estrutura diamagnética e paramagnética	49
Figura 25: Estator.....	50
Figura 26: Rotor.....	51
Figura 27: Dispositivo de acionamento	51

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1: Potencial magnético escalar.....	46
Gráfico 2: Potencial magnético escalar no primeiro par de ímãs do rotor.....	46
Gráfico 3: Energia Magnética.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

MME – Ministério de Minas Energia

\vec{B} – Vetor densidade magnética

N – unidade newton

C – unidade coulomb (carga elétrica)

s – unidade de segundo

m – unidade de metro

q – carga elétrica

\vec{V} – vetor velocidade

\vec{F} – vetor força

θ – ângulo

i – intensidade

l – comprimento

r – raio

N – relação quantitativa

μ_0 – permeabilidade magnética no vácuo

S – superfície

ε – força eletromotriz

Δ – variação

\emptyset – fluxo magnético

t – tempo (s)

m – momento magnético

τ – torque

η – rendimento

P – potencia

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

FEMM – Finite Element Method Magnetics

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE O MAGNETISMO.....	15
2.1 Características dos ímãs.....	15
2.2 Tipos de materiais	16
2.3 Campo magnético (H)	17
2.4 Corrente elétrica e campo magnético	18
2.5 Lei Circuital de Ampère – Equação de Maxwell	19
2.6 Rotacional.....	20
2.7 Densidade e Fluxo magnético – Equação de Maxwell.....	21
2.8 Potencias magnéticos escalar e vetorial.....	23
2.9 Torque e momento magnético.....	23
2.10 Magnetização em materiais.....	25
2.11 Força sobre materiais magnéticos	26
2.12 Lei de Faraday.....	27
2.12.1 fem de movimento e fem transformador	28
2.13 Energia Magnética	29
3 MODELOS DE MOTORES MAGNÉTICOS	30
3.1 Motor Howard Johnson	30
3.2 Motor V-Gate	32
3.3 Keppe Motor	33
4 METODOLOGIA	37
4.1 Materiais utilizados	37
4.1.1 Ímãs de neodímio	37
4.2 COMSOL	38
4.3 Arranjo do motor magnético	38
4.4 Solução para posição contra movimento	40
5 MODELAGEM DO MOTOR MAGNÉTICO.....	42
5.1 Configurações de modelagem	42
5.2 Configurações geométricas	42
5.3 Aplicação física.....	43
5.4 Construção da malha	44
5.5 Obtenção de resultados	45
6 CONSTRUÇÃO DO MOTOR	49
6.1 Estrutura	49
6.2 Estator	49
6.3 Rotor.....	50
7 RESULTADOS	53
8 CONCLUSÃO.....	54
8.1 Continuidade da pesquisa	54
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Ministério de Minas Energia (MME), os motores são responsáveis pela maior fatia de consumo de energia nas indústrias do país, sendo que esse setor consome cerca de 43,7% de toda energia elétrica nacional, onde que 68% dessa energia é consumida pela força eletromotriz e 30% por motores elétricos. Se analisarmos o cenário mundial os resultados não serão diferentes, cerca de 7,4 TWh de energia é consumida por 300 milhões de motores espalhados pelo mundo, sendo esse consumo cerca de 40% da produção mundial de energia elétrica (ANEEL, 2015).

Considerando o custo de motores elétricos no período de 10 anos, temos que 96% do custo total é determinado pelo consumo de energia, sendo que apenas 4% é relativo a aquisição e manutenção do produto. Por este motivo muitos países estão elaborando programas de eficiência energética, onde se estabelece requisitos mínimos de eficiência para estes tipos de equipamentos (ANEEL, 2015).

Na tangente dessa busca, se encontra uma tecnologia “nova”, que necessita cada vez mais da procura por seu conhecimento e aplicação, esta tecnologia citada é relativa ao uso do magnetismo. Seu potencial se demonstra cada vez mais abundante. No seu princípio sua utilização foi fundamental para o desbravamento do novo mundo através do uso da bússola, com decorrer do tempo, sua utilização se tornou cada vez mais presente em nossa sociedade, sendo considerado um marco a descoberta da sua relação com a eletricidade por James Maxwell, e mais tarde sendo empregada no motor de indução por Nikola Tesla. Atualmente o magnetismo tem sido utilizado na fabricação de diversas tecnologias como em sensores, motores elétricos, geradores, HDs, memórias spintrônicas e, mais recentemente na área da saúde (JUNIOR, 2010).

O segmento de motores magnéticos, cujo objetivo é proporcionar a geração de torque através das interações magnéticas entre seus materiais. Este motor não pode ser confundido com os motores perpétuos que possuem objetivo completamente diverso e atualmente inaplicável. Os motores magnéticos buscam uma maior utilização da energia magnética interna dos ímãs, conseqüentemente tendo esta energia como sua principal fonte, teremos uma diminuição da dependência da utilização de energia elétrica ejetada a este motor, proporcionando assim uma maior eficiência do mesmo.

Tendo isto em vista, este trabalho terá como objetivo o estudo e elaboração de um motor magnético, onde possa ser estudado e analisado a sua construção e resultados, como torque, energia gerada e comportamento magnético, demonstrando a viabilidade do experimento.

Para a sua elaboração se faz necessária a abordagem de conceitos físicos do magnetismo que serão implementados em todo experimento, desde a utilização adequada de materiais, posicionamento correto dos ímãs permanentes e modelagem. Embasado nesse estudo do magnetismo, foi-se interligado os conceitos já conhecidos sobre motores magnéticos, apresentando os modelos existentes e suas características que serão reaproveitadas para o atual experimento.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE O MAGNETISMO

O magnetismo teve sua origem na antiga Grécia, mais precisamente na cidade de Magnésia, lá se foi observado os primeiros fenômenos do magnetismo através de um minério conhecido como magnetita, este minério possuía propriedades capazes de atrair e repelir objetos de ferro. Após alguns séculos o magnetismo começou a ser usado pelos chineses, sendo empregado na importantíssima invenção da bússola. Embora os conhecimentos elementares do magnetismo sejam conhecidos desde aquela época, somente no século XIX se foi descoberta sua relação com a eletricidade, se dando início a era do eletromagnetismo e sua revolução tecnológica provocada por esse ramo da física (PESSOA JUNIOR, 2010).

A ligação definitiva entre campo elétrico e magnético foi determinada pelo físico Hans Cristian Oersted, após treze anos de esforços, em 1820 descobriu que a eletricidade poderia produzir magnetismo. Há semelhanças e diferenças entre campos elétricos e magnéticos, assim como o campo elétrico (E) e densidade de fluxo elétrico (D) estão relacionados de acordo com $D = \epsilon E$, para meios matérias lineares, o campo magnético (H) e densidade de fluxo magnético (B) também estão relacionados de acordo com $B = \mu H$. Esta analogia é apresentada para se demonstrar que a maioria das equações obtidas em campos elétricos podem ser utilizadas para se obter equação correspondentes ao magnetismo (SHADIKU, 2004).

2.1 Características dos imãs

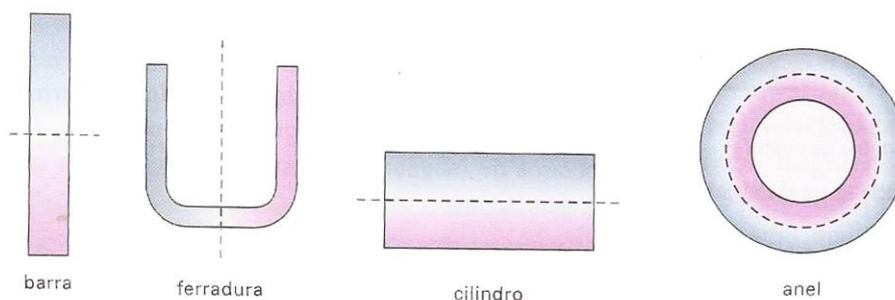
A utilidade dos imãs no estudo do magnetismo é importantíssima, onde que o campo magnético presente ao seu redor proporciona analogias e comprovações de teses. Por isso o estudo dos imãs é o ponto de partida desse estudo.

Os imãs são materiais ferromagnéticos com propriedades capazes de proporcionar e modificar o campo magnético em outros materiais. Estes imãs podem ser naturais ou artificiais, possuindo diversas formas geométricas, sendo que independentemente desta forma o imã terá que possuir dois polos distinto bem localizados, normalmente chamados de polo norte e sul. Os polos magnéticos estão localizados nas extremidades dos imãs, nesta região está presente a maior intensidade da força magnética, sendo que as forças magnéticas estão mais concentradas nos polos é possível concluir que a intensidade dessa força decresce em direção ao centro do imã. Na região central do imã se estabelece uma linha neutra, onde que as forças de atração magnética dos polos se anulam. A interação de polos distintos entre dois imãs proporciona uma reação entre si de forma singular, onde que as polaridades opostas se atraem e polaridades iguais

se repelem (HALLIDAY, 2012).

A forma geométrica de um ímã não é apenas a característica que define a posição dos polos magnéticos, esta localização também depende da forma de como adquiriu o seu magnetismo, sendo que os polos magnéticos sempre se opõem entre si em relação a um plano de simetria, conforme ilustrado na Figura 1 (GASPAR, 2009).

Figura 1 – Simetria de polos opostos



Fonte: (GASPAR, 2009).

Segundo Gaspar (2009), existem duas maneiras de um material adquirir magnetismo, sendo elas:

- a) Forma Natural: a posição magnética é definida a partir da orientação do campo magnético terrestre na região onde esse minério se solidificou.
- b) Forma Artificial: a posição dos polos é determinada pelo processo de magnetização utilizado, sendo um corpo inserido a um forte campo magnético.

2.2 Tipos de materiais

O comportamento magnético total do material pode variar amplamente, dependendo da estrutura do material, particularmente da sua configuração eletrônica. Existem materiais ferromagnéticos, paramagnéticos, diamagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos (MARK A., 2012).

Os materiais ferromagnéticos são aqueles propriamente ditos como magnéticos, matérias que ao serem submetidos a um campo magnético externo adquirem campo magnético no mesmo sentido do campo ao qual foram submetidos, onde que permanecera magnetizado mesmo após a retirada do campo magnético externo. Corpos desses materiais – ferro, níquel, cobalto e inúmeras ligas que os compõe – são sempre atraídos por ímãs (GASPAR, 2009).

Os tipos paramagnéticos também são atraídos por ímãs, porém com menos intensidade.

São materiais que possuem elétrons desemparelhados que ao serem submetidos a um campo magnético externo se alinham no sentido do mesmo, onde que está fraca interação é anulada ao se retirar o campo magnético presente. São exemplos desses materiais o paládio, platina, sódio, potássio e algumas ligas de ferro (GASPAR, 2009).

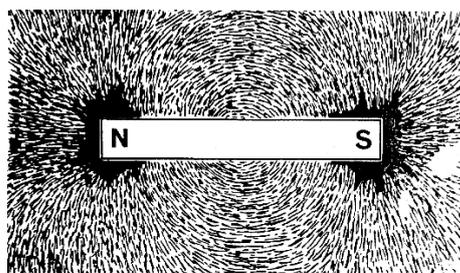
Corpos de materiais diamagnéticos são repelidos de forma fracamente por imãs. Na presença de um campo magnético externo esses materiais estabelecem em seus átomos um campo magnético em sentido contrário ao que foram submetidos, mas que desaparece assim que o campo externo é removido. Em razão desse comportamento, esse tipo de material não é atraído por imãs e sim repelidos, é um efeito fraco, característico da prata e do bismuto, embora esteja presente em toda composição de matéria, de forma praticamente imperceptível (GASPAR, 2009).

Os materiais antiferromagnéticos e ferrimagnéticos são semelhantes entre si, são de natureza mais complexa, que permite dar ao material que as possui formas de magnetização previamente projetadas para a constituição de componentes eletrônicos específicos. São exemplos desse material o manganês, ferrita e diversos óxidos de níquel, de cobalto e de zinco, entre outros (GASPAR, 2009).

2.3 Campo magnético (H)

A definição de campo magnético surgiu com o estudo do efeito que um imã produzia ao seu redor. Este efeito pode ser verificado na Figura 2, onde temos um experimento que demonstra as linhas de campo magnético de um imã, o experimento é feito por meio de limalhas de ferro imersas sobre o campo de um imã, nela podemos visualizar a influência do imã na região que ele está imerso (GASPAR, 2009).

Figura 2 – Linhas de campo magnético



Fonte: (GASPAR, 2009).

Estas linhas observadas equivalem às linhas de força do campo elétrico e podem ser

traçadas de forma análoga. O vetor campo magnético \vec{B} é em todos os pontos a tangente das linhas de campo magnético que passam no mesmo ponto (HALLIDAY, 2012).

No campo magnético o módulo força não possui mesma direção do vetor campo magnético, sendo assim as linhas que indicam a direção do vetor não indica a da força, daí a denominação linhas de campo e não linhas de força. Estas linhas de campo são contínuas sendo que o seu ciclo atravessa o ímã, fora do ímã essas linhas vão do polo norte para o sul e dentro do ímã vão do sul para o norte (HALLIDAY, 2012).

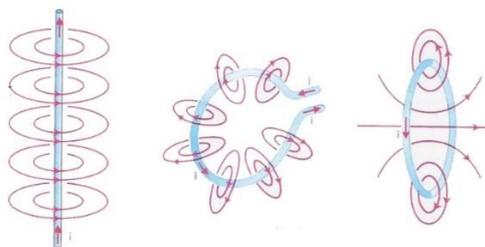
Na ação do campo magnético não se existe algo equivalente a partícula de prova do campo elétrico, mesmo que utilizemos algum ímã que interaja com esse campo não haveria equivalência com o campo elétrico, pois, em vez de sofrer apenas ação de uma única força, como acontece no campo elétrico, o ímã sofre a ação de duas forças iguais e opostas. Por isso um ímã inserido em um campo magnético tende a girar e se alinhar, sendo esse um conceito básico para a comutação de motores de indução (HALLIDAY, 2012).

2.4 Corrente elétrica e campo magnético

As experiências de Oersted mostraram que um condutor percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético ao seu redor. No experimento representado na Figura 6 demonstra que estas linhas de campo magnético são circunferências concêntricas, contidas em planos perpendiculares ao centro do condutor. O sentido dessas linhas pode ser obtido através de outra regra pratica conhecida como “regra do saco rolhas”, sendo com ela possível a determinação do sentido do vetor magnético (HALLIDAY, 2012).

Ao encurvar um condutor retilíneo percorrido continuamente por uma corrente elétrica com o objetivo de formar uma espira plana circular, observaremos que suas linhas de campo magnético irão tender a acompanhar a nova configuração do condutor (GASPAR, 2009).

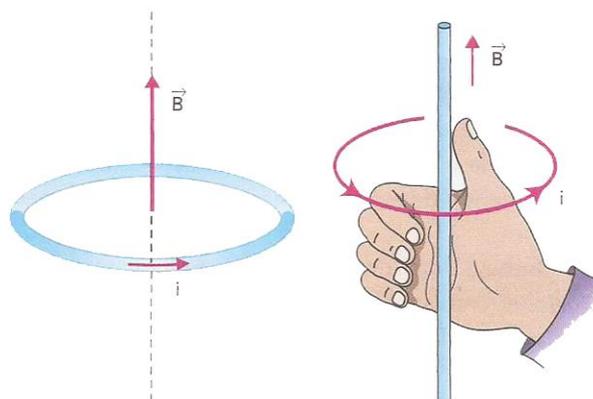
Figura 3 – Comportamento das linhas de campo magnético



Fonte: (GASPAR, 2009).

Por simetria, a linha que passa pelo centro da espira é uma linha de campo magnético e seu sentido pode ser obtido através de uma regra semelhante à do saca-rolha explicada anteriormente, onde que nesse caso o dedo polegar indica o sentido do vetor campo magnético e os demais dedos indicam o sentido do percurso das correntes. Veja a ilustração na Figura 4 (GASPAR, 2009).

Figura 4 – Indicação de sentido do vetor magnético.



Fonte: (GASPAR, 2009).

2.5 Lei Circuital de Ampère – Equação de Maxwell

A lei circuital de Ampère estabelece que a integral de linha da componente tangencial de H em torno de um caminho fechado é igual à corrente líquida I envolvida pelo caminho (SHADIKU, 2004).

$$\oint H \cdot \partial L = I \quad (1)$$

Quando a distribuição de corrente é simétrica a lei de Ampère é de fácil aplicação para se determinar H . Ao aplicarmos o teorema de Stokes ao lado esquerdo da equação obtemos a seguinte equação (SHADIKU, 2004).

$$I = \oint_L H \cdot \partial l = \int_S (\nabla \times H) \cdot \partial S \quad (2)$$

Sendo que:

$$I = \int_S J \cdot \partial S \quad (3)$$

Comparando as integrais de superfície nas equações anteriores, obtemos a terceira equação de Maxwell:

$$\nabla \times H = J \quad (4)$$

Sendo que a partir dessa equação se obtém um valor diferente de 0, isto é campo magnetostático não é conservativo (SHADIKU, 2004).

2.6 Rotacional

Em cálculo vetorial, rotacional é um operador que calcula, em uma superfície infinitesimal, o quanto os vetores de um campo vetorial se afastam ou se aproximam de um vetor normal a esta superfície. Assim, o rotacional corresponde a uma transformação linear de um campo de vetores em um outro campo vetorial, ou seja, a cada ponto do espaço aonde definimos o rotacional ele será dado por um vetor. Seu significado é empregado em diversos ramos da ciência, como eletromagnetismo e mecânica dos fluidos (SHADIKU, 2004).

O rotacional de qualquer vetor é um vetor, e qualquer componente do rotacional é dada pelo limite do quociente da integral de linha fechada do vetor em um caminho fechado em um plano normal ao da componente desejada pela área envolvida, à medida que o caminho tende a zero (HAYT, 2003).

Esta definição não se refere a um sistema particular de coordenadas, e possui a seguinte definição matemática:

$$(\text{rot } H)_N = \lim_{\Delta S_N \rightarrow 0} \frac{\oint H \cdot dL}{\Delta S_N} \quad (5)$$

Temos que ΔS_N é a área plana envolvida pela integral de linha fechada, e o índice N indica que a componente rotacional é normal a superfície e envolvida pelo caminho fechado. Ao aplicarmos a Equação (5) ao sistema cartesiano de coordenadas, obtemos a componente z dessa expressão calculando a lei circuital de Ampère em um caminho incremental de lados Δ_x e Δ_y (HAYT, 2003).

$$\text{rot } H = \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) a_x + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) a_y + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) a_z \quad (6)$$

A Equação pode ser representada de forma mais concisa pela definição de produto vetorial e operador vetorial.

$$\text{rot } H = \nabla \times H \quad (7)$$

A expressão usual para o rotacional H em coordenadas cilíndricas é expressa de seguinte forma:

$$\nabla \times H = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \frac{\partial H_\phi}{\partial z} \right) a_\rho + \left(\frac{\partial H_\rho}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) a_\phi + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho H_\phi)}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\rho}{\partial \phi} \right) a_z \quad (8)$$

Contudo pode-se descrever o rotacional como a circulação por unidade de área, sendo que o caminho fechado tende a zero e o rotacional é definido em um ponto. O rotacional do campo elétrico deve ser zero, pois não a circulação, porém o rotacional do campo magnético não é zero, pois a circulação de H por unidade de é a densidade de corrente pela lei circuital de Ampère (HAYT, 2003).

2.7 Densidade e Fluxo magnético – Equação de Maxwell

Segundo Shadiku (2004), temos que a densidade magnética (B) no espaço livre está relacionada à intensidade do campo magnético (H). Conforme a Equação (9).

$$B = \mu_0 H \quad (9)$$

Sendo a unidade de B webers por metro (Wb/m), e o nome dado a μ_0 é permeabilidade do espaço livre.

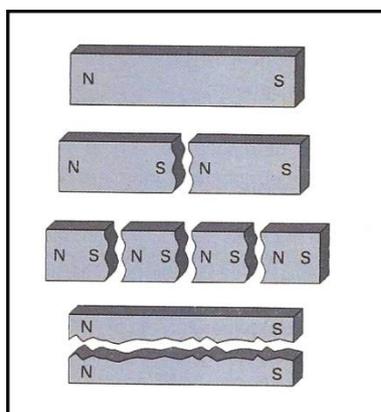
As linhas de fluxo magnético assumem uma direção na qual B é tangente em cada ponto, como por exemplo o posicionamento da agulha da bússola sobre a presença de um campo magnético. O fluxo magnético sobre uma superfície S é dada pela Equação (10), sendo o fluxo magnético (Ψ) dado por webers (Wb) e a densidade magnética é dada por Wb/m² ou Tesla (T)

(SHADIKU, 2014).

$$\Psi = \int_S B \cdot \partial S \quad (10)$$

Diferentemente das linhas de fluxo elétrico, as linhas de fluxo magnético sempre se fecham entre si mesmas, isto ocorre pelo fato de não ser possível ter um polo magnético isolado. Ao se fazer uma divisão de ímãs com objetivo de se obter um polo magnético isolado, iremos obter duas peças, sendo que em ambas se terá os polos norte e sul, conforme a Figura 5 (SHADIKU, 2004).

Figura 5 – indivisibilidade de polos



Fonte: (GASPAR, 2009).

Sabendo da inexistência de uma carga magnética isolada, o fluxo magnético através de uma superfície fechada deve ser zero, conforme a Equação (11) (SHADIKU, 2004).

$$\oint B \cdot \partial S = 0 \quad (11)$$

A Equação 11 é conhecida como lei da conservação do fluxo magnético, embora o campo magnetostático não seja conservativo, o fluxo magnético se conserva. Ao aplicarmos o teorema da divergência obtemos as seguintes equações (HAYT, 2003).

$$\oint_S B \cdot \partial S = \int_V \nabla \cdot B \partial v = 0 \quad (12)$$

ou

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (13)$$

Esta é a quarta equação de Maxwell, demonstra que as linhas de campo magnético são sempre contínuas.

2.8 Potenciais magnéticos escalar e vetorial

Considerando a existência de um potencial magnético escalar, denominado V_m , temos que seu gradiente negativo fornece a intensidade de campo magnético. Entretanto, o rotacional do gradiente de qualquer escalar é zero, se H for definido como gradiente do potencial magnético escalar, então a densidade de corrente deve ser nula na região na qual o potencial magnético escalar está definido (HAYT, 2003).

$$H = -\nabla V_m \quad (J = 0) \quad (14)$$

O potencial magnético vetorial (A) é utilizado em regiões onde a densidade magnética é zero ou diferente de zero, e sua definição é dada pela Equação 15. Por esta equação temos uma definição útil de A , cuja operação rotacional implica uma diferenciação em relação ao comprimento, sendo sua unidade webers por metro (Wb/m) (SHADIKU, 2004).

$$B = \nabla \times A \quad (15)$$

O fluxo magnético através de uma área pode ser dado pela Equação 10 e também pela nova Equação 16. Temos também que o campo magnético ser determinado por V_m ou A , sua escolha é dada pela natureza do problema, onde V_m pode ser usado somente em regiões livres de fonte (SHADIKU, 2004).

$$\Psi = \oint_L V_m \cdot \partial l \quad (16)$$

2.9 Torque e momento magnético

O torque sobre uma espira é o produto vetorial entre a força magnética e o braço de alavanca r . Esse conceito é de fundamental importância para o entendimento do comportamento de partículas carregadas em órbita, de motores de corrente contínua e de geradores. A equação do torque será dada a seguir, e sua unidade de torque é Newtons-metro (HAYT, 2003).

$$T = r \times F \quad (17)$$

Se a normal ao plano da espira faz um ângulo (α) com B , o torque sobre a espira é:

$$T = BIS \sin \alpha \quad (18)$$

O momento de dipolo magnético é o produto entre a corrente e a área da espira, sendo sua direção perpendicular à espira. O vetor unitário (a_n) é normal ao plano da espira e sua orientação é dada pela regra da mão direita, sua representação é dada na Equação 19 (HAYT, 2003).

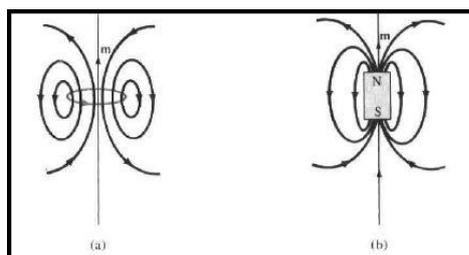
$$m = ISa_n \quad (19)$$

O torque sobre uma espira plana de qualquer formato é dado pela Equação 20, sua única limitação é que o campo magnético de ser uniforme. Seu torque sempre será na direção do eixo de rotação, sendo ele orientado de forma a diminuir o ângulo, uma vez que m e B estejam alinhados. Alcançando uma posição de equilíbrio, a espira é perpendicular ao campo magnético e o torque será zero, bem como a soma das forças da espira (SHADIKU, 2004).

$$T = m \times B \quad (20)$$

Um pequeno ímã permanente, pode também ser considerado como um dipolo magnético. Na representação feita pela Figura 6, pode-se observar que as linhas de campo magnético devido ao ímã são similares aquelas devido a pequena espira de corrente (SHADIKU, 2004).

Figura 6 – semelhança entre linhas de campo

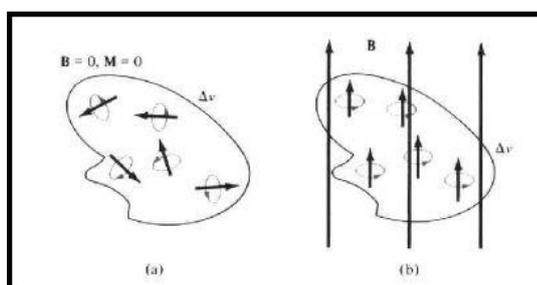


Fonte: (SHADIKU,2004).

2.10 Magnetização em materiais

Sabemos que a matéria é formada por átomos, sendo que cada átomo é constituído de elétrons que giram em torno de seu próprio eixo, e que orbitam em torno de um núcleo central positivo. Portanto, os dois movimentos eletrônicos geram campos magnéticos internos que são similares ao campo magnético produzido por uma espira de corrente. Sem um campo magnético externo aplicado ao material, a soma dos momentos magnéticos é zero devido à orientação randômica, porem quando um campo magnético é aplicado, os momentos magnéticos dos elétrons se alinham com o campo externo, tal momento magnético não é zero, conforme a Figura 7 (SHADIKU, 2004).

Figura 7 – orientação magnética.



Fonte: (SHADIKU, 2004).

A magnetização (M) dada em ampères por metro, é o momento do dipolo magnético por unidade de volume. Considerando um ímã de carga magnética isolada (Q_m) de comprimento l que indica a direção sul-norte, temos que o ímã tem um momento de dipolo igual a $Q_m l$. Quando o ímã está imerso em um campo magnético uniforme B , ele assume a seguinte equação (SHADIKU, 2004).

$$T = m \times B = Q_m l \times B \quad (21)$$

O torque tende alinhar o ímã com o campo magnético externo, sendo que a força que age sobre a carga magnética é dada pela Equação 22.

$$F = Q_m B \quad (22)$$

Em um meio material onde $M \neq 0$ e, como resultado, B muda, tal que temos uma nova representação de equação, onde que a Equação 23 se mantém para todos materiais, lineares ou não (SHADIKU, 2004).

$$B = \mu_0(H + M) \quad (23)$$

Para materiais lineares, M (A/m) depende linearmente de H , onde temos que χ_m é uma grandeza adimensional denominada suscetibilidade magnética do meio, é uma medida que determina o quão o material é susceptível ao campo magnético, esta relação é representada pela Equação 24 (SHADIKU, 2004).

$$M = \chi_m H \quad (24)$$

Se substituirmos a Equação 23 na Equação 24 temos que:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (25)$$

A grandeza de μ é denominada permeabilidade do material e é medida em henrys/metro. A grandeza μ_r é a razão entre a permeabilidade de um determinado material e a do espaço livre, sendo chamada de permeabilidade relativa do material (SHADIKU, 2004).

2.11 Força sobre materiais magnéticos

Para determinarmos a força que um campo magnético exerce sobre uma peça de material magnético iremos considerar o seguinte exemplo, um eletroímã feito de ferro com permeabilidade relativa constante, e uma bobina com N espiras percorridas por uma corrente I . Se desprezarmos perdas, o campo magnético no entreferro de ar é o mesmo que no interior do ferro. Para encontrar a força entre as duas peças de ferro, é necessário calcular a alteração na

energia total que resultaria se as duas peças fossem separadas em deslocamento diferencial (∂l). Este trabalho realizado para realizar este deslocamento é igual à variação de energia armazenada no entreferro de ar, onde S é a área de seção reta do entreferro e W_m a energia magnetostática. Surgirá também o fator 2 que irá contabilizar a contribuição dos dois entreferros de ar, e o sinal negativo indica que a força age no sentido de reduzir o entreferro (atração). Contudo temos a Equação 26 para representar esta teoria (SHADIKU, 2004).

$$-F \partial l = \partial W_m = 2 \left[\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} S \partial l \right] \quad (26)$$

Na Equação 26, temos que a força é exercida sobre a inferior e não na peça na qual está enrolada pela bobina percorrida por uma corrente. A força de tração através de um único entreferro pode ser obtida pela Equação 27, muito utilizada para o cálculo da força em dispositivos, como, relés e máquinas rotativas, e no processo de levitação magnética (SHADIKU, 2004).

$$F = -\frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (27)$$

2.12 Lei de Faraday

De acordo com os experimentos de Faraday, um campo magnético estático não produz fluxo de corrente, mas um campo magnético variante produz uma força eletromotriz (f_{em}) em um circuito fechado, o que ocasiona um fluxo de corrente. Sendo assim temos a dedução que o valor da força eletromotriz é igual à taxa de variação no tempo do fluxo magnético enlaçado pelo circuito, para esta teoria temos a seguinte Equação 28 (HAYT, 2003).

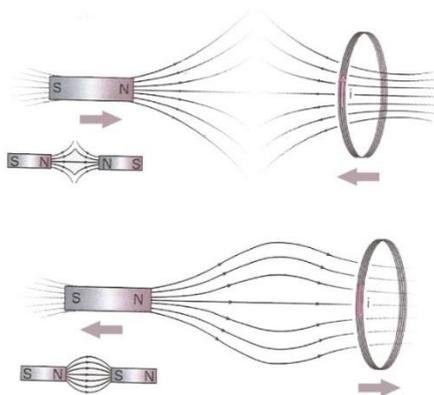
$$f_{em} = -\frac{\partial \lambda}{\partial t} = -N \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (28)$$

Na Equação 28 temos que N é o número de espiras e Ψ é o fluxo em cada espira. Sendo o sinal negativo representante da ação da tensão induzida que se opõe ao fluxo que lhe produziu. Essa propriedade é conhecida como lei de Lenz (HAYT, 2003).

Nesta lei se define que a força eletromotriz e a corrente induzida produzem um campo

magnético cujo sentido se opõe ao movimento do ímã. Podemos associar esse caso como se no lugar da espira aparecesse um outro ímã com mesma polaridade que o que se aproxima, fazendo que o seja repelido. Conforme a Figura 8 apresentada a seguir (FRANKLIN, 2005).

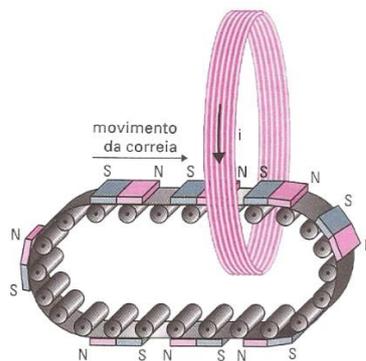
Figura 8 – Interação entre campos magnéticos.



Fonte: (GASPAR, 2009).

Esta lei pode ser entendida como consequência do Princípio da Conservação da Energia, pois se a corrente induzida favorecesse o movimento do ímã, teríamos que seria apenas necessário um pequeno empurrão para que o ímã fosse atraído para dentro de uma bobina. Desta forma, seria possível a construção de um motor perpetuo, como ilustrado na Figura 9.(GASPAR, 2009).

Figura 9 – Suposto movimento perpetuo.



Fonte: (GASPAR, 2009).

2.12.1 fem de movimento e fem transformador

Para campos variáveis no tempo, onde que o campo elétrico e o campo magnético estão

presentes e inter-relacionados, para esta situação temos a determinação da Equação 29.

$$f_{em} = \oint_L E \cdot \partial l = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot \partial S \quad (29)$$

A variação de fluxo com o tempo, presente na Equação 29, pode ser usado de 3 maneiras:

- a) Espira estacionaria presente em um campo magnético variável no tempo;
- b) Área de uma espira variável no tempo em um campo magnético estacionário;
- c) Espira e campo magnético variável no tempo.

2.13 Energia Magnética

Usando o potencial magnético escalar, pode-se desenvolver uma expressão de energia por métodos semelhantes ao usado em eletrostática. É conveniente pensar que nesta energia como estando distribuída através do volume de densidade de energia de J/m^3 , sendo a energia total armazenada em um campo magnético estacionário em que B está linearmente relacionado com H representada pela Equação 30 (HAYT, 2003).

$$W_H = \frac{1}{2} \int_v B \cdot H \partial v \quad (30)$$

Estes resultados são validos para meios lineares, porém pode ser utilizado para se calcular a força sobre materiais não-lineares, para isso se deve ser focado a atenção no meio linear, usualmente o ar.

Para maior aplicação de toda teoria física, se faz necessário também o conhecimento dos tipos de motores e arranjos magnéticos já existentes, sendo assim concluído os pilares para a elaboração do protótipo.

3 MODELOS DE MOTORES MAGNÉTICOS

Motores magnéticos são máquinas compostas por ímãs posicionados de forma que gerem movimento rotacional. O movimento primário gerado depende do tipo de projeto, a diversidade na busca pelo movimento possibilita o surgimento de diferentes características. Por se haver pouco desenvolvimento sobre essa tecnologia, existe-se uma série de possibilidades diferentes que possivelmente funcionem, podendo seu nível de elaboração variar de mais simples a alta grau de complexidade.

Algumas características são comuns no histórico de construção destes experimentos. Como o uso de materiais que não influenciem o campo magnético ou que sofra apenas insignificantes influencias, sendo essa neutralidade de extrema importância para a montagem da estrutura do dispositivo. Também não se deve haver interação entre os eixos e rolamentos com o campo magnético, sendo que eles sempre estarão imersos nesse meio, onde que serão alcançados por linhas de campo suficientes a ponto de influenciar no funcionamento e rendimento da máquina. A seguir serão apresentadas as teorias com os detalhes dos modelos de arranjos magnéticos e seus respectivos inventores.

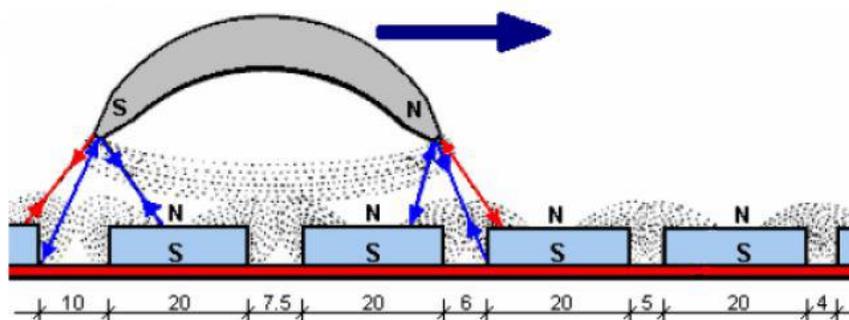
3.1 Motor Howard Johnson

O motor de Howard Johnson é conhecido como o motor que usa o comportamento natural do ímã permanente, que é por repulsão e atração para criar o movimento de rotação do motor. O motor de Johnson é direcionado para o método de utilização de rotações de elétrons não emparelhados em material ferromagnético como fonte de energia sem fluxos de elétrons em condutores normais. O fluxo magnético criado pelo ímã é controlado e concentrado para orientar as forças magnéticas para realizar trabalhos contínuos úteis (TENG, NEO YI, 2011).

Howard Johnson possui uma patente no Escritório de Patentes dos EUA (No. 4.151.431), nela é demonstrado a construção de um motor com funcionamento baseado somente na energia contida nos átomos de ímãs permanentes. O seu estudo aponta que o fluxo magnético de seu motor está sempre desequilibrado, produzindo assim uma contínua unidade rotacional (TENG, NEO YI, 2011).

A orientação da força magnética nos componentes do rotor e do estator é produzida por ímãs permanentes com uma adequada relação geométrica, responsável pelo necessário desequilíbrio no fluxo magnético. O arranjo magnético é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Arranjo Howard Johnson

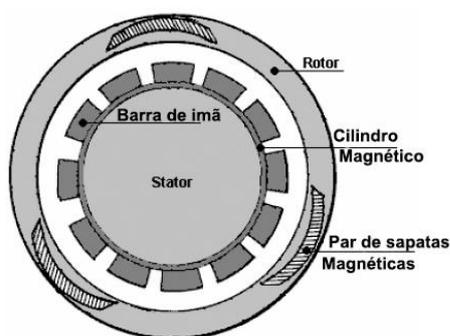


Fonte: (JOHNSON 2006).

A configuração acima mostra os efeitos magnéticos dramaticamente diferentes nos polos norte e sul dos ímãs da armadura. A Figura 10 demonstra a interação de forças magnéticas complexas que podem criar efeitos de desequilíbrio que move a armadura da direita para esquerda, onde que as linhas vermelhas representam as forças de atração e as linhas azuis a de repulsão. Além disso, os espaçamentos entre os ímãs não são de larguras constantes (JOHNSON, 2006).

Em sua patente ele descreve que os ímãs do rotor são unidos em pares escalonados, conectados por um garfo não magnético e que no estator os ímãs são envolvidos por um cilindro de mu-metal (material altamente condutor de fluxo magnético). Também informa que as dimensões dos ímãs do rotor são de 79,4mm de comprimento e do estator 100mm de comprimento, por 25,4 de largura e 6mm de profundidade. Temos também que os pares de ímãs não são ajustados a 120 graus de separação, mas que são escalonados ligeiramente para suavizar as forças magnéticas no rotor. Na Figura 11 temos uma ilustração deste motor (JOHNSON, 2006).

Figura 11 – Motor Howard Johnson.



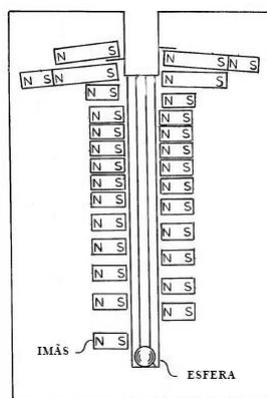
Fonte: (TENG, NEO YI, 2011).

3.2 Motor V-Gate

O motor V-Gate teve seu princípio baseado em alguns experimentos com disposição linear. Um dos principais estudos foi elaborado através de uma patente de um sistema de propulsão magnética, inventada por Emil T. Hartman. Esta patente é basicamente representada por duas filas de ímãs permanentes, dispostos de modo que a força do campo magnético entre os dois seja variada desde um mínimo no ponto de partida, até o máximo no seu ponto final.

Em sua patente (US 4,215,330) representada na Figura 12, Hartman descreve o seu sistema de propulsão em que uma bola de aço é propelida por um plano inclinado entre duas linhas de ímãs de barras permanentes, estando os referidos ímãs numa relação espaçada, onde que cada fila de ímã permanente possui um único sentido de polaridade. Os eixos magnéticos de cada um dos ímãs da primeira linha estão em relação escalonada com os eixos de ímãs opostos da segunda linha. O campo magnético que atua sobre a bola é configurado para que depois de atingir o topo do plano inclinado seja capaz de cair e sair do referido campo (HARTMAN, 1980).

Figura 12 – Sistema de propulsão Hartman



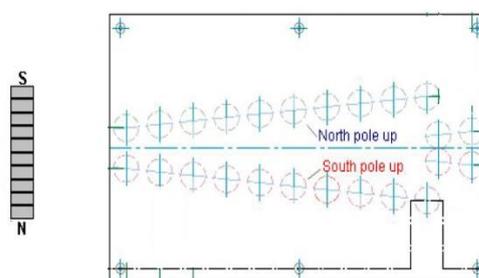
Fonte: (HARTMAN, 1980).

O arranjo ordenado de ímãs permanentes aumenta a intensidade do campo magnético em uma direção ascendente ao longo da base inclinada, onde que o espaçamento entre os eixos magnéticos adjacentes aumenta em relação a direção do movimento da bola. Ao inserir a bola de aço, se é formado um novo arranjo de fluxo magnético, onde que as ações mútuas dos campos dos ímãs separados e o campo induzido na bola ferromagnética é tal que produza um campo complexo que faz com que a bola passe a ser propelida até o plano inclinado e cair a partir do

final do mesmo (HARTMAN, 1980).

Desde o princípio se foi feito algumas modificações, onde que a bola de aço foi substituída por um ímã, e se ouve um entendimento de continuidade do sistema. O arranjo magnético representado na Figura 13, opera fazendo com que um ímã role ao longo da trilha e passe suavemente através da junção com o próximo conjunto de ímãs posicionado em formado de V. Podendo haver quantas continuidade de disposições em V forem necessárias para o experimento (KELLY J. PATRICK, 2017).

Figura 13 – Configuração V-Gate



Fonte: (KELLY J. PATRICK, 2017).

Analisando as disposições anteriores e entendo o conceito de continuidade do movimento magnético se foi transferido esses pensamentos para um arranjo de um motor, criando assim o conceito de Motor V-Gate. Neste motor o arranjo em V que produz o gradiente da força do campo magnético é construído em seu rotor, sendo que essa disposição do rotor interaja com o estator, onde que existe apenas um principal ímã que se aproxima do rotor e induz o movimento rotacional do mesmo. As suas configurações se mantem com os experimentos anteriores, como por exemplo seu espaçamento e polaridade dos ímãs (KELLY J. PATRICK, 2017).

O grande problema enfrentado por esse modelo é o fato de que o movimento no momento de transição na passagem da dupla mais espaçada para a dupla menos espaçada ocorre uma considerável força contra o movimento, sendo assim necessário o estudo de algum dispositivo que faça que o movimento seja da forma mais adequada e continua.

3.3 Keppe Motor

O Keppe Motor é um motor elétrico altamente eficiente, que utiliza a ressonância

eletromagnética para otimização de seu trabalho. Este motor foi desenvolvido pelos engenheiros brasileiros Cesar Soós e Roberto Frascari, onde que a motivação e princípio inovador foi retirado da obra de outro brasileiro, o cientista Norberto da Rocha Keppe, autor da “A Nova Física da Metafísica Desinvertida”, escrita em 1996, na França (SILVA, 2013).

Em seus estudos Norberto Keppe discorda de teorias que afirmam que a energia é advinda da matéria. Segundo Keppe, Aristóteles formulou um princípio metafísico de forma invertida ao afirmar que o “ato viria da matéria”. Tendo este pensamento, Keppe formulou a metafísica desinvertida, onde concluiu que a matéria advém da energia e ambas não são equivalentes, sendo que a matéria simplesmente capta energia essencial e desprende energia secundária segundo a ressonância de sua estrutura interna (SILVA, 2013).

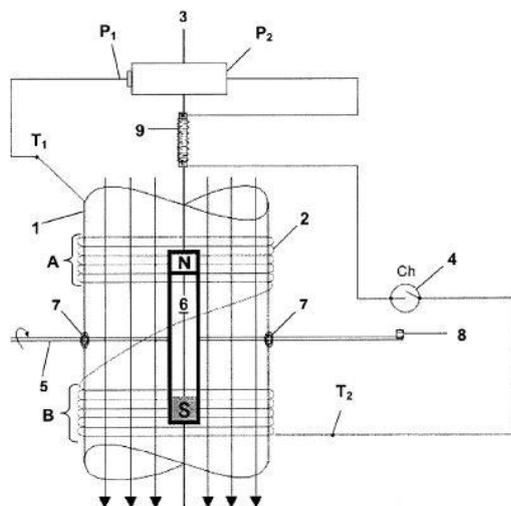
O conceito que permite o aumento considerável do desempenho do motor é denominado energia pulsada, com ela se é possível obter uma economia de 70% a 90% no consumo de energia elétrica, em comparação com motores convencionais. Para que isto ocorra é preciso alterar a sua fonte de alimentação, permitindo que o próprio motor interrompa sua alimentação de forma mais adequada (SILVA, 2013).

Para o funcionamento do Keppe Motor por meio de ressonância é necessário que ele trabalhe com o conjunto de aspectos de um motor e gerador. Basicamente temos que um rotor magnético de imã permanente gira no interior de bobinas estatoras, onde que no momento em que o imã é forçado a girar pela tensão aplicada na bobina (aspecto motor), ocasiona-se uma tensão adicional nos terminais da bobina do motor (aspecto gerador), aumentando assim a energia magnética armazenada na bobina. Tal energia em ressonância com a alimentação é determinada por pulsos de intervalos variáveis dirigidas pela própria configuração do Keppe Motor, sendo essa a característica responsável pela sua alta eficiência (SILVA, 2013).

O motor eletromagnético, objeto da presente invenção compreende uma estrutura que pode usar a energia essencial em sua integralidade. Além da energia gerada para alimentar o estator bobina durante a entrada de corrente elétrica, também captura e usa a energia de retorno derivada do colapso do campo magnético quando o fornecimento de energia é desligado e o magnético a energia da referida bobina de estator é drenada (KEPPE, 2013).

A seguir na Figura 14, temos a representação básica do modelo Keppe Motor presente em sua patente.

Figura 14 – Configuração básica Keppe Motor.



Fonte: (KEPPE, 2013).

Segundo a patente do Keppe Motor (US 8,546,985 B2), o motor é descrito como composto por um estator (1) constituído por uma bobina (2) feita com fios condutores cujos terminais T1 e T2, sendo eles respectivamente conectados aos polos positivos P1 e P2 negativos de uma fonte de alimentação (3), de modo que entre o terminal T2 e o polo negativo P2 existe um interruptor (4) corretamente posicionado na lateral e perto da extremidade do eixo (5) do rotor magnético (6). O referido eixo (5) está posicionado no centro e formando um ângulo reto com o corpo do estator (1), através dos mancais (7), de modo que dentro do corpo do dito estator (1), o eixo (5) suporta o rotor (6), que é composto por pelo menos um ímã manente (KEPPE, 2013).

De preferência, a bobina (2) é formada pelos enrolamentos de um duto de cobre ou alumínio, em dois setores que possuam o mesmo número de voltas, podendo ser axial ou radialmente posicionados separadamente um do outro. Na Figura14 mostra os setores A e B conectados entre si e separados ao redor do corpo do estator (1). O número de voltas de cada setor A e B da bobina (2) é ajustado de acordo com as especificações do projeto do motor em ordem para alcançar a ressonância do par rotor / bobina, dependendo as características e a potência desejadas. Na extremidade do eixo (5), fora do corpo do estator (1), um atuador (8) está posicionado corretamente para ligar e desligar o interruptor (4) quando o eixo (5) girar. O atuador (8) é um ímã permanente cujo campo magnético encontra-se em ângulo reto com o eixo de rotação (5). O comutador (4) é um comutador do tipo palheta que responde à presença de um referido campo magnético. Assim, quando o eixo (5) do rotor (6) roda, o referido o atuador (8) liga o Interruptor (4), abrindo e fechando o circuito elétrico do motor eletromagnético da

invenção, de modo a fornecer impulsos elétricos de corrente contínua para alimentar bobina do estator. Alternativamente, um eletroímã (9) pode ser posicionado para determinar os impulsos de alimentação da rede elétrica, fazendo com que os pulsos sejam gerados na posição exata rotação do rotor (6), empurrando-o ainda mais em seu movimento. O referido eletroímã (9) é de preferência feito de um laminado núcleo de aço silício envolvido por um número de voltas que gera um campo magnético para ajudar a incompatibilidade entre as polaridades e os polos magnéticos do rotor (6), fazendo com que eles se repelem (KEPPE, 2013).

Atualmente o Keppe Motor é aplicado e comercializado em ventiladores de teto, sendo ele um ventilador bivolt com a possibilidade de 3 variações de velocidade, alcançando apenas um consumo de 25 watts na velocidade máxima de 402 rpm. Segundo o INMETRO, a maioria dos ventiladores de tetos no mercado possui um gasto maior de 100 watts para gerar sua velocidade máxima, conseqüentemente o mesmo Instituto certificou o ventilador Keppe Motor com o Selo A, do PROCEL, reconhecendo-o como o aparelho mais eficiente do mercado, sendo com ele capaz de economizar até 90% de energia elétrica (SILVA, 2013).

Estes fatores que ocasionam esta eficiência serão amplamente utilizados no protótipo assim como os padrões de eficiência energética citadas futuramente.

4 METODOLOGIA

A partir dos estudos feitos nos capítulos anteriores foi se estabelecido os melhores parâmetros a serem seguidos para a elaboração do motor magnético. Nele será utilizado dados de todos modelos de motores estudados, podendo assim ser aproveitados todos seus parâmetros positivos para a solução de problemas.

4.1 Materiais utilizados

Sendo um motor de baixa potência as suas perdas por calor serão desprezíveis, de forma que poderá ser empregado matérias com menos resistência ao calor. Além disso, não possui perdas por histerese, pois não necessitava de núcleos de ferro-silício. Matérias diamagnéticos poderão ser utilizados para a construção de seu rotor, estator, mancais e toda sua parte estrutural. Com isto se terá uma gama maior de materiais que poderão ser utilizados, como o uso de madeira e plástico, sendo dispensado os cortes de chapas e manutenção com máquinas de cortes.

4.1.1 Imãs de neodímio

Na interação magnética, será utilizado imãs de neodímio, estes imãs também são chamados de “imãs de terras raras”, é um poderoso imã feito a partir de uma combinação de neodímio, ferro e boro ($Nd_2Fe_{14}B$). Esses imãs são muito poderosos em comparação a sua massa, mas também são mecanicamente frágeis e perdem seu magnetismo de modo irreversível em temperaturas acima de $120\text{ }^\circ\text{C}$. Devido ao seu custo mais baixo, têm substituído os imãs de samário-cobalto na maioria das aplicações, que são ligeiramente mais fracos e bem mais resistentes a temperatura. Sua intensidade pode ser medida pelo seu produto energético máximo, em megagauss-oersteds ($MGOe$), onde que ($1\text{ }MGOe = 7,957\text{ }kJ/m^3$) (ANGELO, 2005).

Imãs de neodímio vêm em diferentes graus, como N35, N42, N52 ou N42SH, esses valores correspondem ao desempenho do um material magnético definido pela sua curva de histerese. Para alcançar a mesma força do imã de neodímio usando imãs de cerâmica é necessário um volume 18 vezes maior do material comparado ao de neodímio (ANGELO, 2005).

Devido a essa capacidade de magnetização maior os imãs de neodímio serão empregados ao motor por oferecerem maior geração de torque entre rotor e estator.

4.2 COMSOL

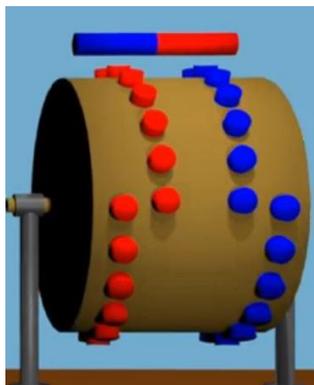
O COMSOL Multiphysics é um software de análise de elementos finitos, com simulações multifísicas. Sendo ele utilizado por engenheiros e cientistas para simular projetos, dispositivos e processos em todos os campos da engenharia, fabricação e pesquisa científica, sendo ele uma plataforma de simulação que engloba todos os passos no fluxo de trabalho de modelagem a partir de geometrias que definem, as propriedades dos materiais e da física que descrevem fenômenos específicos para resolver modelos de pós-processamento para a produção de resultados precisos e confiáveis (COMSOL, 2015).

Os produtos de interface possibilitam também integrar a simulação com outros softwares de engenharia e matemáticos utilizados no projeto de produtos e processos. Quando você desenvolve um modelo.

4.3 Arranjo do motor magnético

A configuração a ser utilizada no motor será a do modelo V-Gate, sua patente de construção linear se demonstra ser funcional, podendo ser aproveitada em um novo arranjo rotacional. Além disso sua montagem é mais prática e susceptível a modificações, podendo assim realizar diferentes estudos de arranjos em seu rotor e estator. Figura 15, representação do motor V-Gate.

Figura 15 – Motor com configuração V-Gate

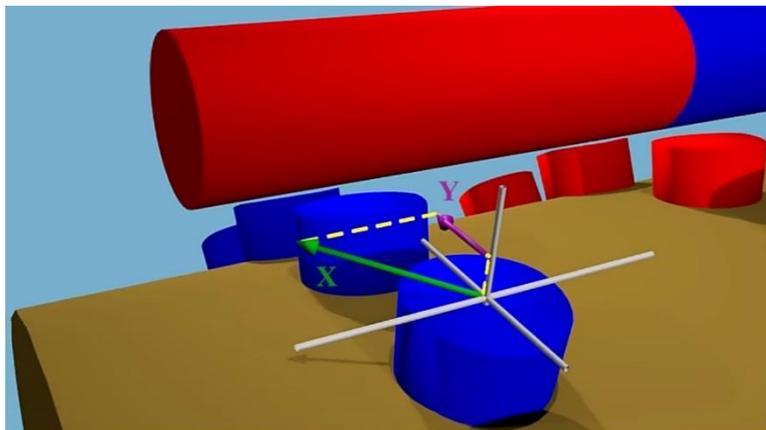


Fonte: (O autor).

Da teoria estudada temos que as extremidades dos polos dos ímãs é a localização onde há maior densidade de campo magnético, com este fenômeno é que o rotor trabalha, sendo que com o decorrer do seu movimento rotacional os espaçamentos entre os seus eixos magnéticos

adjacentes do rotor aumentam e que conseqüentemente proporciona uma maior proximidade entre os polos extremos do rotor e estator. Temos a progressão deste movimento representada na Figura 16.

Figura 16 – Interação magnética Motor V-Gate

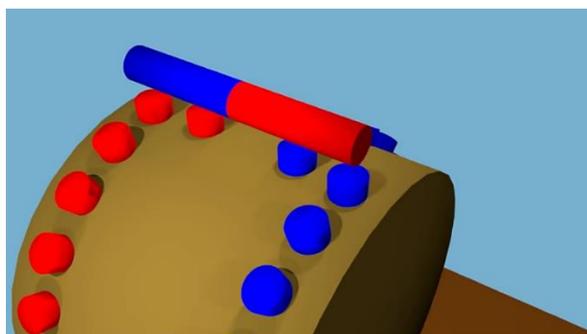


Fonte: (O autor)

Na figura 16 temos representando no vetor X a força de atração entre os polos dos ímãs, onde que o arranjo do rotor proporciona uma maior força de atração com o seguinte ímã posicionado de forma mais próxima do polo do estator, dando assim origem ao vetor Y que demonstra a direção do movimento.

Foi identificado um problema no movimento contínuo do rotor, onde está localizado entre a transição do maior e menor espaçamento do eixo do V, neste momento a proximidade entre os dois pares de ímãs proporciona uma força de interação muito grande entre o rotor e estator, sendo assim impossível a próxima configuração de ímã superar esta força. Posição ilustrada na Figura 17.

Figura 17 – Posição contra movimento

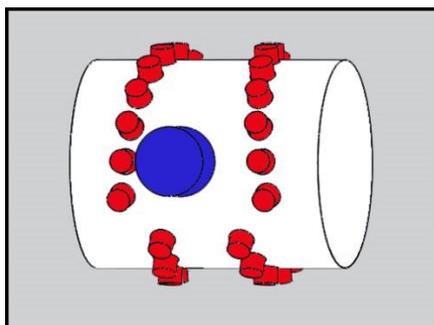


Fonte: (O autor)

Outra possibilidade de arranjo foi observada através de forma empírica, nesta

configuração se terá mudanças no posicionamento e polaridade dos ímãs. Seu arranjo representado na Figura 18, terá como principal interação a força de atração entre os ímãs, onde que o estator será posicionado no centro do eixo horizontal do rotor, com isto teremos que a partir do sentido do movimento de rotação se terá uma aproximação dos polos, conforme se diminui a distancia entre os pares do ímãs do arranjo em v.

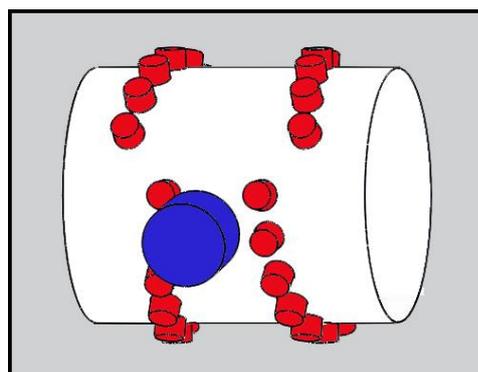
Figura 18 – Arranjo magnético de atração



Fonte: (O autor).

Com o aumento da proximidade dos polos se terá uma progressão da interação, porém conforme o arranjo anterior se terá um ponto de máxima interação, que impossibilita o próximo par superar está valor e dar continuidade ao movimento, esta posição esta representada na Figura 19.

Figura 19 – posição contra movimento 2



Fonte: (O autor).

4.4 Solução para posição contra movimento

Com uma ideologia semelhante ao Keppe Motor, o problema que ocorre no motor V-Gate terá sua solução dada pela elaboração de um sistema de ressonância. Sua configuração

terá o objetivo de neutralizar a densidade de campo magnético no momento de interação contra o movimento, proporcionando assim uma continuidade no movimento.

Esta neutralização será feita através de um mecanismo que irá aumentar o entreferro do rotor com o estator. Posicionado no momento exato da força contra movimento, estará um atuador que irá fazer o chaveamento responsável pela movimentação do mecanismo.

5 MODELAGEM DO MOTOR MAGNÉTICO

Esta modelagem foi realizada no software COMSOL, com o âmbito de comprovar o princípio de funcionamento do motor magnético, assim como a realizar variações de interação entre rotor e estator. Nesta modelagem foi-se utilizado todos os conceitos teóricos presentes nesse trabalho, como a aplicação das equações e configurações de motores já existentes.

Para o entendimento completo da modelagem, será feita uma divisão em tópicos com cada procedimento distinto de forma progressiva.

5.1 Configurações de modelagem

Os primeiros passos para se iniciar a modelagem é definir em quais dimensões, conceitos físicos e tipos de estudos será feito em sua modelagem. Com o propósito de conseguir uma maior fidelidade de resultados, a modelagem de suas peças será realizada em dimensão 3D.

O conceito físico aplicado será o de Interface de Maquinas Magnéticas Rotativas, é utilizado para o design e análise de motores e geradores. A modelagem estacionária e no domínio do tempo é suportada em 2D e 3D. A interface física resolve as equações de Maxwell formuladas usando uma combinação de potencial vetorial magnético e potencial escalar magnético como variáveis dependentes, conforme apresentado no capítulo 2 do trabalho.

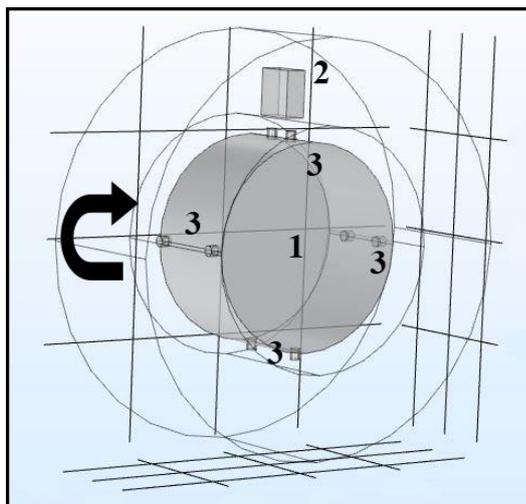
O tipo de estudo realizado será o denominado Estudo Dependente do Tempo, é usado quando as variáveis de campo mudam ao longo do tempo. Como por exemplo pode ser aplicado em eletromagnetismo, podendo ser usado para calcular campos eletromagnéticos transientes, incluindo propagação de ondas eletromagnéticas no domínio do tempo.

5.2 Configurações geométricas

Como já dito anteriormente, o processo de modelagem será realizado em 3D, e a definição de matérias será aplicada em cada peça construída.

O arranjo do motor foi desenvolvido com objetivo de demonstrar a sua progressão de densidade magnética conforme sua rotação, para isso foi-se atribuído um numero menor de ímãs ao rotor, sendo esses suficientes para comprovar esta variação de densidade magnética, sendo este arranjo representada a seguir na Figura 20.

Figura 20 – arranjo do motor



Fonte: (O autor).

Na Figura 20, temos representado o rotor (1), estator (2) e ímãs do rotor (3). No rotor (1) foi-se atribuído o material cujo propriedade principal é baixa permeabilidade magnética, sendo assim nele empregado um material com caracterizas equivalentes ao nylon. O estator (2) é representado por apenas um ímã permanente, cujas as característica magnéticas serão apresentadas mais tarde neste projeto. Os ímãs do rotor (3) obedecem a teoria de posicionamento do motor V-Gate, onde que na progressão de rotação a distancia entre os pares de ímãs se torna cada vez menor, sua direção de polaridade é a mesma em todos pares de ímãs, e será apresentada a seguir.

5.3 Aplicação física

A rotação é modelada usando uma interface física pronta para máquinas rotativas. A parte central da geometria, contendo o rotor e parte do entreferro, é modelada como girando em relação ao seu próprio eixo, cujo velocidade foi definida com um parâmetro de 600 rpm. O rotor e o estator são criados como dois objetos de geometria separados, seu acoplamento é feito automaticamente, as peças podem ser gradeadas de forma independente, e permite uma descontinuidade no potencial magnético escalar na interface entre as duas geometrias dos objetos. O problema do rotor é resolvido em um sistema de coordenadas rotativas onde o estator é fixo, e os valores requeridos serão retirados em um sistema de coordenadas que é fixado em relação ao estator.

Para se atribuir propriedades magnéticas aos matérias se é utilizado a ferramenta de Conservação de Fluxo Magnético, que resolve problemas magnetostáticos onde não existem

correntes elétricas, a partir de formulações utilizando o potencial magnético escalar. Sendo assim, em uma região livre de corrente, temos a Equação 4 é igual a zero, isto implica que o potencial magnético escalar (V_m), pode ser definido a partir da Equação 14, que é análoga a definição do potencial elétrico para campos elétricos estáticos. Usando a relação constitutiva dada pela Equação 23, a Equação 13 se torna a Equação 31, representada a seguir (COMSOL, 2015).

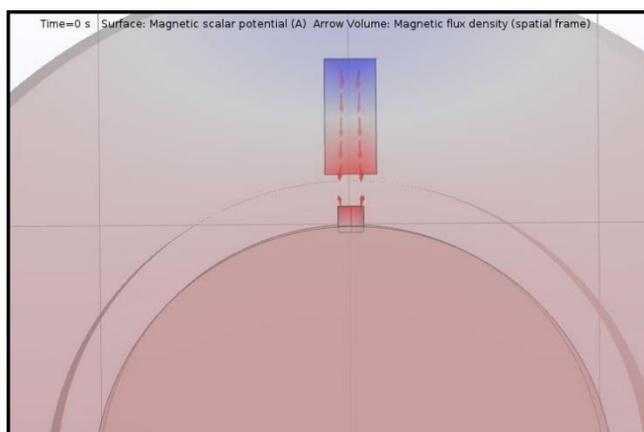
$$-\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 M) = 0 \quad (31)$$

O COMSOL utiliza desta equação para modelar problemas sem atribuição de correntes elétricas.

Para a definição magnética do ambiente onde está inserido o motor, é necessário definir sua relação constitutiva, sendo nela empregado a opção de Permeabilidade Relativa, representada pela Equação 25.

Para configuração dos ímãs do rotor e estator se deve definir sua relação constitutiva, nesta configuração será aplicada o termo de Magnetização, representado pela Equação 23. Neste momento também definimos o valor de magnetização (A/m) e a direção de magnetização dos ímãs, sendo ela sempre voltada para que gere uma força de repulsão entre os ímãs do rotor com o do estator, conforme representado na Figura 21.

Figura 21 – polarização rotor-estator



Fonte: (O autor).

5.4 Construção da malha

O conceito básico é a subdivisão do modelo matemático em componentes não

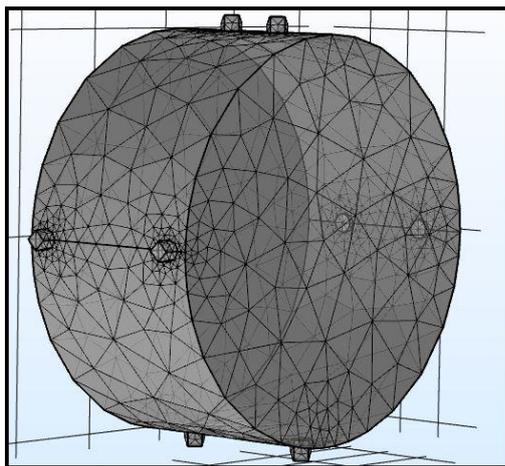
sobrepostos chamados elementos. A resposta de cada elemento é expressa por funções desconhecidas e a resposta de todo o modelo é então considerada aproximada pela montagem da coleção de todos os elementos. Portanto, elemento finito requer discretização do domínio. Fazemos a malha de modo que, teríamos representação nodal da geometria e representação funcional do domínio. O refino é necessário por duas razões principais, geométrica e matemática.

A razão geométrica se dá pelo fato de não se ter um elemento linear, como por exemplo, em um círculo que se deseja representá-lo usando linhas retas. Obviamente, o resultado será mais próximo do círculo real, se você usar um número maior de linhas menores.

Matematicamente obtemos a solução somente nos pontos da malha. Para obter a solução no elemento inteiro, se é utilizado funções definidas em partes bem comportadas para interpolar os pontos de integração. Em uma função de forma quadrática e elementos muito grandes, ao passar de um nó para outro nó, talvez não se consiga capturar toda a transição. No entanto, se você tiver elementos menores com as mesmas funções de forma graduada, terá uma representação melhor.

Para obter uma computação precisa, é necessária uma malha particularmente fina. Sendo assim, faz sentido usar uma malha fina no ímã, pois é onde o campo magnético será o mais forte, conforme demonstrado na Figura 22.

Figura 22 – malha de precisão



Fonte: (O autor).

5.5 Obtenção de resultados

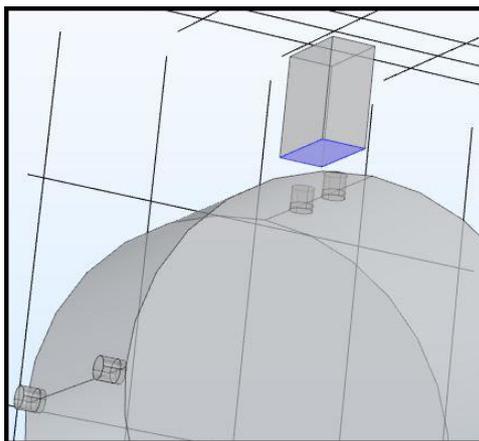
A ramificação Resultados na árvore do modelo COMSOL Multiphysics contém

ferramentas para pós-processamento e análise dos resultados de suas simulações, incluindo animações de visualizações e análise de dados. Pode-se integrar ou calcular a média, o máximo ou o mínimo de qualquer quantidade de cálculo de derivadas, como taxas totais de fluxo, indutâncias e forças de reação. A ferramenta Valores Derivados para definir avaliações de resultados numéricos, em um ponto ou quantidades integradas.

Para todos os valores derivados, você também pode aplicar um operador em uma série de dados (de um estudo paramétrico ou dependente do tempo) para calcular, por exemplo, a média temporal de uma quantidade em um ponto do domínio para o qual uma solução dependente do tempo é computada.

Para o cálculo dos resultados do motor magnético foi utilizado a ferramenta de Integral de Superfície, através desta ferramenta foi possível calcular a variação do potencial magnético escalar em uma determinada área. Sendo esta área representa pela cor azul na Figura 23.

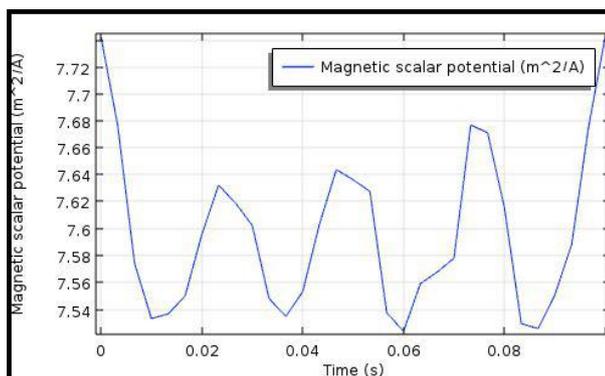
Figura 23 – área superfície



Fonte: (O autor).

Os resultados obtidos com a integração desta superfície são demonstrados no Gráfico 1, e a partir dele é possível visualizar a progressão dos valores de pico de potencial escalar magnético entre os pares dos ímãs do rotor com o estator ao decorrer do tempo, onde que temos que seu valor fornece a intensidade de campo magnético (equação 14) ou o fluxo magnético dado pelo potencial escalar magnético (equação 16).

Gráfico 1 – potencial magnético escalar

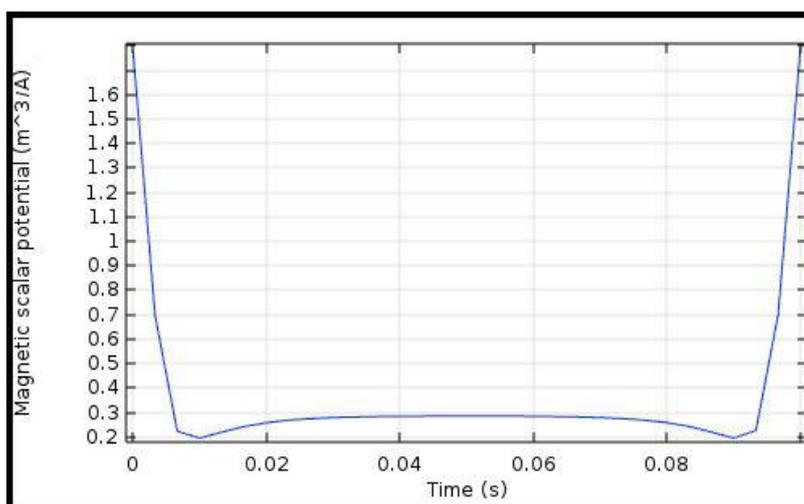


Fonte: (O autor).

Pelo Gráfico 1 observamos que intervalos próximos aos tempos 0, 0.02, 0.05 e 0.07 são os momentos exatos onde ocorre a relação magnética entre os ímãs do motor com estator. O maior valor de interação entre estator e rotor está presente no momento inicial e final da rotação do motor, sendo assim impossível que o próximo par de ímãs consiga ultrapassar este valor de interação, impossibilitando a continuidade do movimento.

Para se visualizar o potencial magnética escalar dos ímãs com o decorrer do tempo, foi-se integrado o volume da peça do ímã, e se obteve os seguintes valores apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – potencial magnético escalar no primeiro par de ímãs do rotor

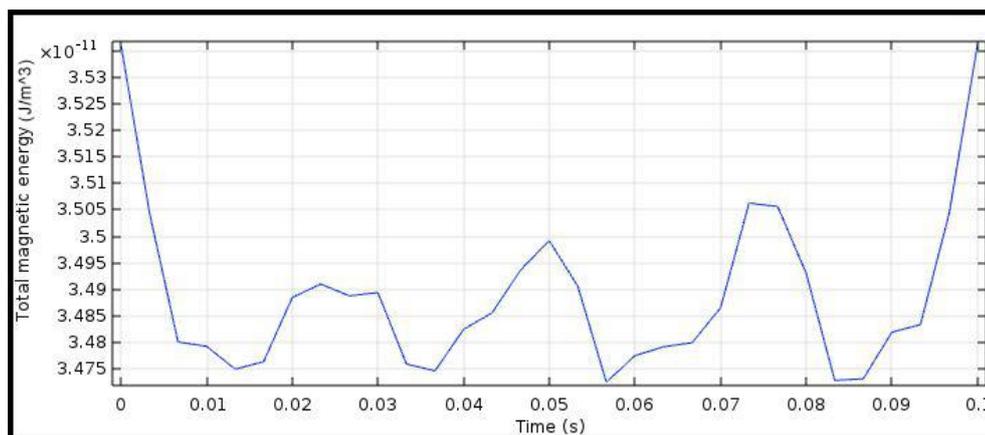


Fonte: (O autor).

No Gráfico 2 observamos as variações de valores do primeiro par de ímãs do rotor, pode ser visto seu maior valor de potencial magnético escalar durante o intervalo em que se está relacionado com o ímã do estator.

Através da equação 30 e das formulações do Comsol, pode ser demonstrado a evolução de energia magnética envolvida entre estator e rotor, onde seu valor representa a interação entre os ímãs, podendo ela ser de caráter repulsivo ou atrativo. Seus valores serão representados no Gráfico 3.

Gráfico 3 – energia magnética



Fonte: (O autor).

No Gráfico 3 temos a visualização do aumento do valor de energia de interação entre os ímãs do rotor e estator conforme a evolução do tempo, sendo seu ápice ocorrendo no momento de transição inicial e final de rotação.

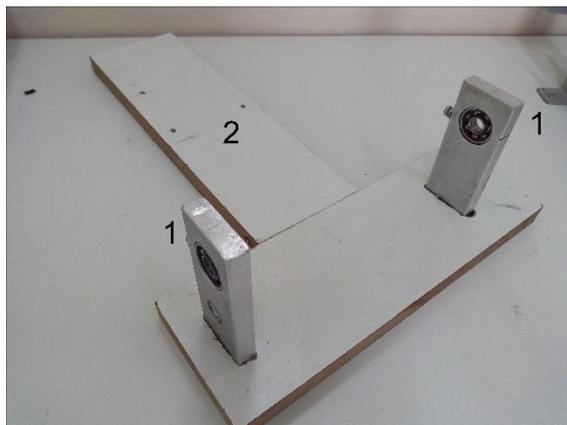
6 CONSTRUÇÃO DO MOTOR

Para a elaboração desta etapa será considerada toda teoria exposta anteriormente, com o objetivo de se ter o melhor funcionamento e menos perdas possíveis no motor. Para melhor demonstração a construção será dividida em etapas, apresentadas nos próximos subtópicos.

6.1 Estrutura

Na construção da parte estrutural se foi observado a importância da utilização de materiais com baixa interação magnética, que não influenciasse de nenhuma forma a rotação do motor. Materiais diamagnéticos e paramagnéticos foram amplamente utilizados neste requisito, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Estrutura diamagnética e paramagnética



Fonte: (O autor).

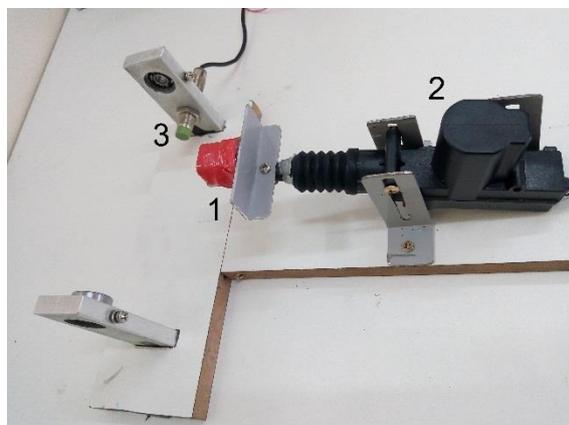
Na Figura 24 temos representado os seguintes materiais. Mancais (1), peça de alumínio responsável pelo suporte do rotor. Base de madeira (2), estrutura responsável pelo posicionamento e fixação dos mancais e estator.

6.2 Estator

O estator é representado por um ímã (1) de maior dimensão acoplado ao sistema mecânico (2) responsável pelo aumento do entreferro entre o rotor e estator, conforme a Figura 25. Através de testes empíricos, se obteve que a inclinação do estator referente ao centro do rotor se demonstrou um fator predominante na aceleração do rotor, sendo que seu

posicionamento ideal é fazendo um ângulo de 12° com a base de sua estrutura.

Figura 25 – Estator



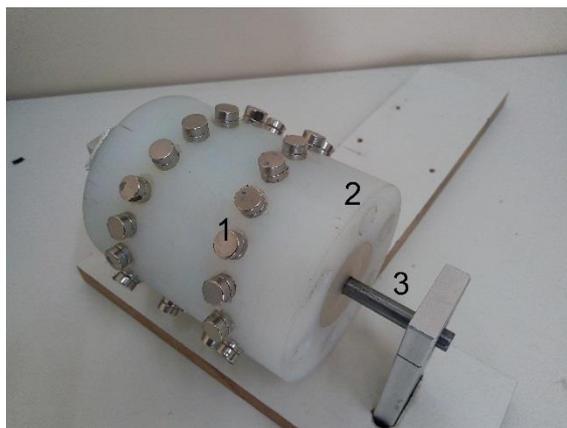
Fonte: (O autor).

O mecanismo aplicado é acionado por um circuito no momento exato da posição contra movimento. O circuito empregado é representado por um sensor indutivo (3) capaz de reagir a proximidade de objetos metálicos, esse sensor é responsável por enviar informações do posicionamento correto em que o relé deve atuar. O relé irá chavar a alimentação de 12V do motor, sendo este motor representado por uma trava elétrica.

6.3 Rotor

Na estrutura do rotor temos o seu eixo de ferro ao centro do cilindro feito de material nylon. O eixo de ferro é propício a perdas por efeito Foucault e histerese, por isto existe uma vasta camada de nylon em sua volta. As propriedades diamagnéticas do nylon têm grande aplicação, além de isolar o eixo do rotor, impossibilita a imersão do campo magnético para dentro da estrutura do rotor, minimizando a interações entre os pares de ímãs do rotor. Temos o rotor representada na Figura 26.

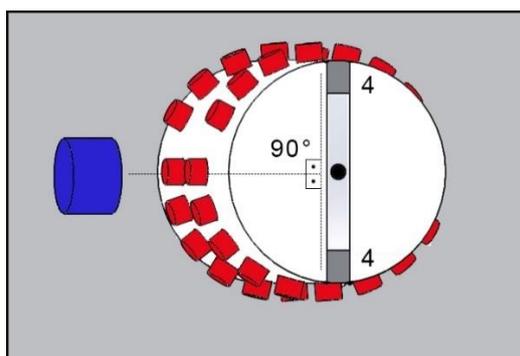
Figura 26 – Rotor



Fonte: (O autor).

Temos representado nas Figuras 26 e 27 o cilindro de nylon (3), eixo (2), arranjo de ímãs (1) e dispositivo de acionamento (4). O cilindro de nylon (2) responsável pela neutralização da permeabilidade magnética em locais indesejados, possui 4,5cm de raio e 11cm de comprimento. O eixo do rotor possui 18cm, e suas extremidades está ligada a rolamentos responsáveis pela maximização da rotação do rotor. Como apresentado anteriormente o arranjo dos ímãs (3) utilizado será o do modelo V-Gate, porém será desenvolvido por dois arranjos em V, tendo assim dois picos magnéticos durante uma rotação. A interação magnética aplicada entre rotor e estator será a de força de atração, esta escolha e a de aplicar dois arranjos em V, foi feita de modo empírica, onde se foi visualizado maior interação nesta disposição. O dispositivo de acionamento (4) é responsável pelo acionamento do sensor magnético, na etapa de teste este dispositivo foi desenvolvido para que se possível o deslocamento de sua posição, para que assim, de forma empírica fosse feito testes de melhor posição de acionamento. Após esta etapa o melhor posicionamento identificado foi o de exatamente 90° em relação a posição de contra movimento, conforme demonstrada na ilustração da Figura 27.

Figura 27 – Dispositivo de acionamento



Fonte: (O autor).

Os ímãs do rotor possuem 10mm de diâmetro e 5 de comprimento, a distancia entre cada par de ímãs foi distribuída de forma linear, onde que possui 15,88mm de distância entre os centros dos ímãs. A distancia horizontal entre os ímãs dos pares vão diminuindo de forma linear com um valor de 4mm.

7 RESULTADOS

Após o desenvolvimento da construção do motor, foi possível visualizar o funcionamento do arranjo V-Gate linear aplicado a um rotor, comprovando assim a teoria da modelagem e seu funcionamento. A solução para o instante de contra movimento existente na configuração, pode ser resolvida com o mecanismo e circuito aplicado, porém com ressalvas relativas à sua eficiência.

O circuito juntamente com mecanismo da trava elétrica obteve um consumo de 8W, sendo nele ejetado uma baixa corrente de 500mA, as ressalvas citadas anteriormente são relativas ao mecanismo de afastamento do estator e não ao circuito em si. Com a evolução da aceleração do rotor o mecanismo empregado não foi capaz de entrar em sincronismo com a rotação do rotor e acionamento do sensor indutivo aplicado. Apresentando assim falhas ao momento exato de retirada do estator, impossibilitando o progresso da aceleração do rotor.

O estudo feito sobre os materiais utilizadas se demonstrou correto, pois não se ouve interações que obstruísse o movimento do rotor e nenhum tipo de aquecimento se foi constatado.

A velocidade obtida foi medida através do tacômetro da Minipa, modelo MDT-2238A, composto por microprocessador dedicado com base de tempo a cristal. O valor medido no cilindro de nylon do rotor foi de 430 rpm.

Com esta falha no mecanismo, se foi constatado de forma empírica um baixo torque, sendo ele insuficiente para uma geração de energia a partir de um gerador acoplado em seu eixo. Sendo que mesmo se houvesse tal medida, ela seria irreal com o verdadeiro potencial do motor, pois seu baixo valor se daria pela ineficiência do mecanismo aplicado.

8 CONCLUSÃO

O estudo sobre motores magnéticos demonstrou possuir um grande potencial e complexibilidade. A teoria sobre o magnetismo e histórico de arranjos magnéticos utilizados para geração de energia mecânica, teve grande importância e utilização no desenvolvimento deste projeto. O conhecimento das equações magnéticas empregadas ao software COMSOL, tornou-se possível a demonstração da interação magnética entre rotor e estator do arranjo V-Gate. Os pensamentos aplicados nos modelos de motores citados foi amplamente utilizado no desenvolvimento do motor, a possível modelagem e variação das linhas de campo magnéticos apresentada no modelo Howard Johnson foi aplicada no posicionamento dos ímãs do rotor e estator, sendo visualizado facilmente de forma empírica, através da obtenção de maior interação magnética ao se posicionar o ímã do estator de forma não linear com o sistema. A ideologia do Keppe Motor, onde se utilizava a ressonância para se ter continuidade do movimento de rotação do seu motor, foi gatilho para a criação do mecanismo de aumento de entre ferro aplicado ao sistema.

Toda a parte teórica e desenvolvimento pode ser demonstrada com êxito neste trabalho, bem como o funcionamento do arranjo V-Gate, em que foi apontado no resultado que o defeito está localizado ao mecanismo contra movimento aplicado, sendo assim validado a necessidade da continuidade de um estudo mais específico na parte mecânica empregada.

Atualmente existe-se pouquíssimos estudos relacionados a motores magnéticos, conseqüentemente a pouco incentivos relacionados ao mesmo. Como já dito anteriormente o magnetismo tem sua aplicação cada vez maior ao mercado de tecnologias de áreas distintas, porém seu conhecimento ainda é escasso no desenvolvimento de motores magnéticos, em que com um incentivo maior se poderia ter um maior estudo sobre a eficácia desse sistema, podendo ele ser responsável por gerar uma energia limpa e eficiente.

Acredita-se que este estudo tenha contribuído, de maneira significativa, com divulgação de motores magnéticos e também com a melhoria de conhecimentos técnicos do autor. Este trabalho pode ser usado para que novas pesquisas sejam realizadas ou novas aplicações práticas de motores magnéticos sejam identificadas e demonstradas por profissionais da área. Esta pesquisa pode ainda, ser utilizada por outros setores para orientar suas práticas de aquisição e disseminação do conhecimento. O referencial teórico servirá de base para a gestão do conhecimento sobre os motores magnéticos.

8.1 Continuidade da pesquisa

Tendo todo o desenvolvimento e funcionamento comprovado do arranjo magnético do motor neste trabalho, futuramente se poderá ter o foco maior voltado para a elaboração de um mecanismo eficaz, estudo de geração e eficiência do arranjo V-Gate.

Uma possível solução seria a aplicação de um sistema de controle sobre um motor DC, tendo assim uma eficácia maior no controle e sincronia de velocidade do movimento do estator. Podendo ser também desenvolvido um circuito que aproveite da variação do movimento de rotação dos ímãs para ser utilizado na realimentação do próprio sistema.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Projeto prioritário de eficiência energética**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656831/14944744/Chamada+PEE+Priorit%C3%A1rio+002+-+2015.pdf/1782b9cb-6c10-46c0-ae99-3a7add9d9fa2>>. Acesso em: 05 de Nov de 2018.
- ANGELO, D. Johnson **Estudo das propriedades e microestruturas de ímãs permanentes de terras raras e metais de transição preparados pelo processo de decrificação hidrogênio**. 2005. 171 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- COMSOL. **Rotating Machinery 3D Tutorial**. Disponível em: <<https://br.comsol.com/model/rotating-machinery-3d-tutorial-10437>>. Acesso em: 06 de Nov de 2018.
- FRANKLIN, J. **Classical electromagnetism**. 1. ed. San Francisco: Addison-Wesley, 2005.
- GASPAR, Alberto. **Física**. São Paulo: ática, 2005.
- HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física: Eletromagnetismo**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- HARTMAN, T. **Permanent magnet propulsion system**. U.S. Patent n. 4,215,330, julho, 1980.
- H.R. Johson. **The secret world of spintronics**, Virginia, v.1, p.1-45, jun 2006.
- HAYT JR., William H.; BUCK, Jhon A.. **Eletromagnetismo**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC. 2003. 350 p.
- KELLY J. Patrick. Pratical Guide to ‘Free Energi’ Devices, v. 1, p. 42-89, set 2017. Disponível em: <<http://www.free-energy-info.tuks.nl/>>. Acesso em: 05 nov. 2018.
- KEPPE et al. **Electromagnetic motor and equipment to generate work torque**. U.S Patent. n. 8,546,985 B2, outubro, 2013.
- MARK, A; JERRY, B. **Classical electromagnetic radiation**. 3. ed. CIDAADÉ: Dover Publications, 2012.
- N. O. SHADIKU, Metthew. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman. 2004. 678 p.
- PESSOA JUNIOR, Osvaldo. **Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo**. Sci. Viga. São Paulo, v. 8, n. 2, p. 195 – 212, jun de 2010.
- RAMOS, Mario Cesar. **Implementação de motores de alto rendimento em uma indústria de alimentos: Estudo de caso**. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado em energia) – Universidade de São Paulo, SP, 2005.

SILVA, M Jose. **Keppe Motor**: Uma inovação tecnológica para a indústria. 2013. 45 f. Tese (Trabalho de conclusão de curso em Mecatrônica) - POLIMIG, Escola politécnica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

TENG, Neo Yi. **Investigation on the free energy magnet motors**, Kuala Lumpur, v. 1, p. 1-110, mai 2011.