



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA

*ANTE-PROJETO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA LINEAR A IMÃS  
PERMANENTES*

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2014

LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA

*ANTE-PROJETO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA LINEAR A IMÃS  
PERMANENTES*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Máquinas Elétricas

Orientador:

Professor Antonio Marcus Nogueira de Lima, Dr.

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2014

LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA

# ANTE-PROJETO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA LINEAR A ÍMÃS PERMANENTES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade  
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Máquinas Elétricas

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Antonio Marcus Nogueira de Lima, Dr.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a Idalva Lacerda e a José  
Geraldo, meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força que me foi dada.

Agradeço a minha família, que, mesmo a distância, encorajou-me e absorveu com compreensão meus momentos de impaciência.

Agradeço aos meus amigos pela extrema compreensão nos meus dias de ausência, e pelo suporte nos momentos de fragilidade.

Agradeço ao Professor Antonio Marcus pela orientação.



## RESUMO

Este trabalho apresenta métodos para cálculo de campo em uma máquina elétrica linear a ímãs permanentes. O uso de ímãs permanentes é uma alternativa para projetos de máquinas elétricas. Estes substituem os enrolamentos de campo das máquinas convencionais em aplicações que exijam alto rendimento. A maioria dos projetos de máquinas elétricas a ímãs permanentes considera um movimento mecânico primário do tipo rotativo. Neste trabalho será discutida uma nova forma de acionamento primário, que utiliza um movimento linear. Na esfera de máquinas primárias lineares, as mais utilizadas são os motores a pistão-livre ou motores de *Stirling*. Dentre as topologias encontradas na literatura, o gerador de curso curto ganhou destaque. As etapas do projeto contemplarão estudos comparativos e simulações. Os resultados das simulações revelam o comportamento do fluxo magnético ao longo da estrutura, bem como sua distribuição em função da posição da parte móvel da máquina.

**Palavras-chave:** Máquina elétrica, máquina elétrica linear, ímãs permanentes, gerador de curso curto.

## ABSTRACT

This work presents a way to simulate the behavior of magnetic field along a permanent magnet linear electric machine. The use of permanent magnets is an alternative to electric machines' designs. They replace the field windings of conventional machines in applications that require high performance. Most of designs of electric machines with permanent magnets considers a primary mechanical movement like rotary type. In this work is discussed a new form of primary actuator, which uses a linear motion. In the sphere of linear primary machines, the most used are the free - piston engines or Stirling engines. Among the topologies found in the literature, the short stroke generator gained prominence. The phases of the project will consider comparative studies and simulations. The simulation results show the behavior of the magnetic flux along the structure, as well as their distribution depending on the position of the movel part of the machine.

**Keywords:** Eletric machines, linear eletric machine, permanent magnet, short stroke generator.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Diagrama sequencial de etapas do projeto. ....  | 5  |
| Figura 2 - Orientação de fluxo em relação do eixo de movimentação parado – (a) Axial (b) Radial .....  | 11 |
| Figura 3 - Orientação de fluxo em relação ao eixo móvel - (a) Transverso (b) Longitudinal. ....  | 11 |
| Figura 4 – Ilustração da orientação de fluxo radial: orientação de fluxo mais comum em máquinas a ímãs permanentes. ....   | 12 |
| Figura 5 – Ilustração da orientação de fluxo axial: máquinas com diâmetro muito maior que o comprimento. ....  | 13 |
| Figura 6 – Orientação de fluxo transverso: sentido do movimento perpendicular ao plano onde as linhas de fluxo se fecham. ....   | 14 |
| Figura 7- Gerador linear de curso curto: representação do arranjo estator/parte móvel. ....  | 18 |
| Figura 8 – Curva característica dos ciclos de histerese normal e intrínseca de um ímã permanente ideal. ....   | 21 |
| Figura 9 - Condutor percorrido por uma corrente elétrica, gerando um campo magnético circular em sua volta. ....   | 27 |
| Figura 10 - Circuito magnético para um quarto da estrutura e o correspondente circuito magnético equivalente proposto. ....  | 29 |
| Figura 11 - Sistema mecânico usado na simulação do movimento linear. ....  | 31 |
| Figura 12 - Função de interpolação da Curva BH para o aço de médio carbono recozido. ....  | 36 |
| Figura 13 – Área cilíndrica de ar (em vermelho), que define as regiões de entreferro e as áreas de alta relutância. ....   | 36 |
| Figura 14 – Domínios correspondentes ao aço de médio carbono recozido onde serão calculado valores do potencial magnético. ....  | 37 |
| Figura 15 - Sistema de coordenadas cilíndricas. ....   | 38 |
| Figura 16 - Domínios definidos como ímãs permanentes onde será aplicada a relação constitutiva da densidade de fluxo magnético. ....   | 39 |
| Figura 17 – Geometria após o refinamento da malha e a divisão em pedaços infinitesimais. ....  | 40 |
| Figura 18 – Visão geral da distribuição da densidade de fluxo normatizado no estator do gerador. ....  | 41 |
| Figura 19 - Linhas de fluxo no estator. Vista do plano xy. ....  | 42 |
| Figura 20 - Influência dos ímãs inferiores na distribuição de fluxo, que contribui para o aumento da densidade de fluxo em certos pontos da geometria. ....                        | 43 |
| Figura 21 – Pontos onde o valor da densidade de fluxo chega a 1,7 T, pois sofrem influência dos ímãs inferiores, do estreitamento da peça ou da proximidade com o entreferro. .... | 44 |
| Figura 22 - Distribuição de fluxo para a posição 0 mm. ....  | 45 |
| Figura 23 - Distribuição de fluxo para a posição 22,5 mm. ....   | 46 |
| Figura 24 - Distribuição de fluxo para a posição 45 mm. ....   | 46 |
| Figura 25. Linha de corte na cor vermelha posicionada ao longo de um dos pólos do ímã para cálculo da distribuição de campo e de densidade de fluxo. ....                          | 48 |
| Figura 26. Comportamento do campo magnético ao longo da extensão de um dos pólos do ímã. ....  | 49 |
| Figura 27. Comportamento do fluxo magnético ao longo da extensão de um dos pólos do ímã. ....  | 50 |
| Figura 28. Linha de corte na cor vermelha posicionada ao longo de um dos pólos do ímã para cálculo da distribuição de campo e de densidade de fluxo na posição 22.5mm. ....        | 50 |
| Figura 29. Comportamento do campo magnético ao longo da extensão de um dos pólos dos ímãs para a posição de eixo 22.5mm. ....  | 52 |
| Figura 30. Comportamento da densidade de fluxo ao longo da extensão de um dos pólos dos ímãs para a posição de eixo 22.5mm. ....   | 53 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Especificações da máquina.....   | 15 |
| Tabela 2 - Principais características das classes de ímãs sinterizados [3]. ..... | 24 |
| Tabela 3 - Definição de parâmetros.....   | 38 |

# SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| Agradecimentos.....  | v    |
| Resumo.....  | vii  |
| Abstract.....  | viii |
| Lista de Ilustrações.....  | ix   |
| Lista de Tabelas.....  | x    |
| Sumário.....   | xi   |
| 1 Introdução.....  | 1    |
| 1.1 Objetivos.....   | 3    |
| 1.2 Carta de intenções.....  | 3    |
| 2 Tipos de Máquinas Elétricas.....                                 | 5    |
| 2.1 Máquinas síncronas.....  | 6    |
| 2.1.1 Princípio de funcionamento.....                              | 7    |
| 2.1.2 Operação como gerador.....                                   | 7    |
| 2.2 Máquinas de indução.....                                       | 8    |
| 2.2.1 Princípio de funcionamento.....                              | 9    |
| 2.3 Máquinas de ímãs permanentes.....                              | 10   |
| 2.3.1 Máquina de Ímã Permanente: Orientação de fluxo.....          | 10   |
| 2.4 Especificações da Máquina.....                                 | 14   |
| 2.5 Modelo proposto.....   | 15   |
| 2.5.1 Gerador Linear de curso curto.....                           | 17   |
| 3 Fundamentação teórica.....                                       | 19   |
| 3.1 Propriedades básicas do Magnetismo Permanente.....             | 19   |
| 3.1.1 Magnetização e ciclo de Histerese.....                       | 20   |
| 3.1.2 Energia nos processos de Magnetização e Desmagnetização..... | 22   |
| 3.2 Materiais Magnéticos Duros.....                                | 23   |
| 3.3 Materiais Magnéticos Macios.....                               | 25   |
| 3.4 Circuitos magnéticos.....                                      | 26   |
| 3.4.1 Equações do circuito magnético.....                          | 26   |
| 3.5 Circuito Magnético proposto.....                               | 28   |
| 3.6 Modelagem do Sistema Mecânico.....                             | 31   |
| 3.7 Modelo em elementos finitos.....                               | 33   |
| 4 Métodos.....   | 35   |
| 4.1 Decomposição do problema.....                                  | 35   |
| 5 Resultados.....  | 41   |
| 5.1 Distribuição de fluxo ao longo da posição do ímã.....          | 45   |
| 5.2 Variação de parâmetros ao longo da extensão do ímã.....        | 48   |
| 6 Conclusão.....   | 54   |
| Bibliografia.....  | 56   |



# 1 INTRODUÇÃO

O uso de ímãs permanentes de alta densidade energética (da ordem de 400 kJ/m<sup>3</sup>), que substituem os enrolamentos de campo, é uma alternativa para os projetos de máquinas elétricas. Tal fato se dá principalmente pela necessidade de produzir campos magnéticos confiáveis e de custo reduzido. Essas máquinas tem melhor rendimento que as máquinas com enrolamento de campo por que elas não têm perdas por excitação. Além disso, ímãs ocupam menos espaço que campos com enrolamentos, o que é uma vantagem significativa para tamanhos de armadura pequenos. A necessidade da produção de equipamentos eficientes na geração de energia é grande. Essa eficiência engloba desde os níveis de potência gerados até os impactos ambientais que estes causam. Máquinas de fluxo transverso, que usam ímãs como fonte de excitação, são boas opções para geração de energia. Podemos citar como vantagens de máquinas com ímãs permanentes:

- Geram fluxo magnético sem dissipação de energia elétrica;
- São, em geral, máquinas mais compactas;
- Alcançam níveis de eficiência de até 97%;

Como desvantagens:

- Custo de ímãs elevados, principalmente os de terras-raras;
- Risco de desmagnetização irreversível;
- Impossibilidade de controle de fluxo magnético.

A maioria dos projetos de máquinas de ímãs permanentes considera um movimento primário rotativo. Nesse trabalho, será discutida uma característica de movimento diferente. O movimento da parte móvel da máquina caracteriza-se como linear. O movimento rotativo apresenta dois graus de liberdade, fato que contribui para o aumento das vibrações mecânicas. O movimento linear atua em apenas um grau de liberdade, o que reduz as vibrações mecânicas no sistema de geração. Por esta razão, o movimento atuante do tipo linear foi o escolhido para este projeto. A desvantagem é a

dificuldade de gerá-lo. Dentre as máquinas que geram movimento linear, os motores de *Stirling*, ou de pistão-livre, ganham destaque. As vantagens desses motores para atuação como máquina de movimento linear são:

- Não possui mecanismos de manivela ou partes rotativas para gerar forças laterais, e, portanto, nenhuma lubrificação é necessária;
- Menos partes móveis o que reduz o custo de fabricação e possibilita períodos mais longos entre manutenções;
- Podem ser construídos em unidades totalmente vedadas, o que reduz a perda de gás e permite a operação em vários ambientes.

As desvantagens incluem:

- Oscilação não definida, determinada pela interação de todo o sistema, o que dificulta a modelagem matemática do movimento;
- Necessita técnicas de controle, como a utilização de peças mecânicas, que fixam as partes móveis e as deixam mecanicamente estáveis;

Há vários projetos de máquinas de ímãs permanentes e movimento linear em execução. Este trabalho escolheu como topologia base a máquina de curso curto. Tal máquina é projetada para funcionar acoplada a um motor de *Stirling*. Ela apresenta vantagem no que diz respeito à facilidade de construção, potência gerada de até 3kW e modelagem matemática avançada. Para cada tipo de aplicação, existe uma topologia específica, que melhor atende as especificações de custo, rendimento e funcionalidade.

A perspectiva de estudo de um sistema de conversão eletromecânica deste tipo é de grande contribuição. Trata-se de uma área não tão consolidada. Além disso, mostra-se de real importância quando se pensa, principalmente, em cenários futuros, onde as opções de geração de energia serão escassas.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de métodos para cálculo de campo em uma máquina elétrica linear a ímãs permanentes que será acoplada a um movimento linear.

## 1.2 CARTA DE INTENÇÕES

O projeto em questão é uma máquina de fluxo transverso, que converte a energia mecânica de um movimento linear, em elétrica. As atividades previstas pretendem alcançar os seguintes objetivos:

- Levantamento e a análise da bibliografia especializada, a fim de obter conhecimento sobre topologias já desenvolvidas;
- Ênfase nas formas atuais de concepção de máquinas de ímãs permanentes;
- Estudo comparativo entre modelos propostos, considerando vantagens e desvantagens, e escolha do que melhor atende as necessidades;
- Definir especificações que adequarão o modelo a nossa aplicação;
- Refinamento do modelo escolhido de forma a melhor atender as nossas necessidades;
- Simulações computacionais;
- Construção de um protótipo;
- Modelagem matemática do sistema mecânico que simulará o movimento linear;
- Construção do sistema mecânico para simulação do movimento;
- Construção de bancada de testes;
- Teste de comprovação de conceito.
- Estudo termodinâmico;
- Estudo de eficiência do sistema;
- Projeto de um sistema de controle;

O gerador irá funcionar em um sistema de frequência constante. A máquina primária consiste de um sistema de gás pressurizado que expande quando aquece, e contrai quando resfria. Um sistema de eixos acoplado a esse sistema possibilita a obtenção de um movimento de linear. Na fase de testes, esse movimento será simulado a partir de um sistema de um eixo a dois braços, para converter o movimento rotativo em linear. Uma vez definida a geometria do modelo, é possível dimensionar os circuitos magnético e elétrico do gerador.

O gerador deve ter peso compatível com o sistema ao qual será encaixado, dimensões não superiores a 20 cm, e expectativa de geração em torno de 1 kW. Na simulação do movimento, a frequência mecânica de operação deve ser próxima a 50 Hz. Tendo em vista tais objetivos, será levado em consideração o tipo de material usado na fabricação da estrutura, o tipo de ímã permanente acoplado a parte móvel, número de pólos do gerador, dimensionamento de fios, espessura do eixo móvel, dimensionamento do motor girante ao qual os eixos serão acoplados. Uma tabela de especificações será montada.

Definido esses parâmetros, é desenvolvida uma modelagem física para a estrutura. Com definição de domínios aos quais leis físicas serão aplicadas. Isto possibilitará uma simulação da máquina, utilizando um programa de análise por elementos finitos. A simulação nos ajudará a melhorar o modelo a partir de um estudo pormenorizada dos resultados. O conjunto de intenções para este trabalho segue os passos mostrados na Figura 1.



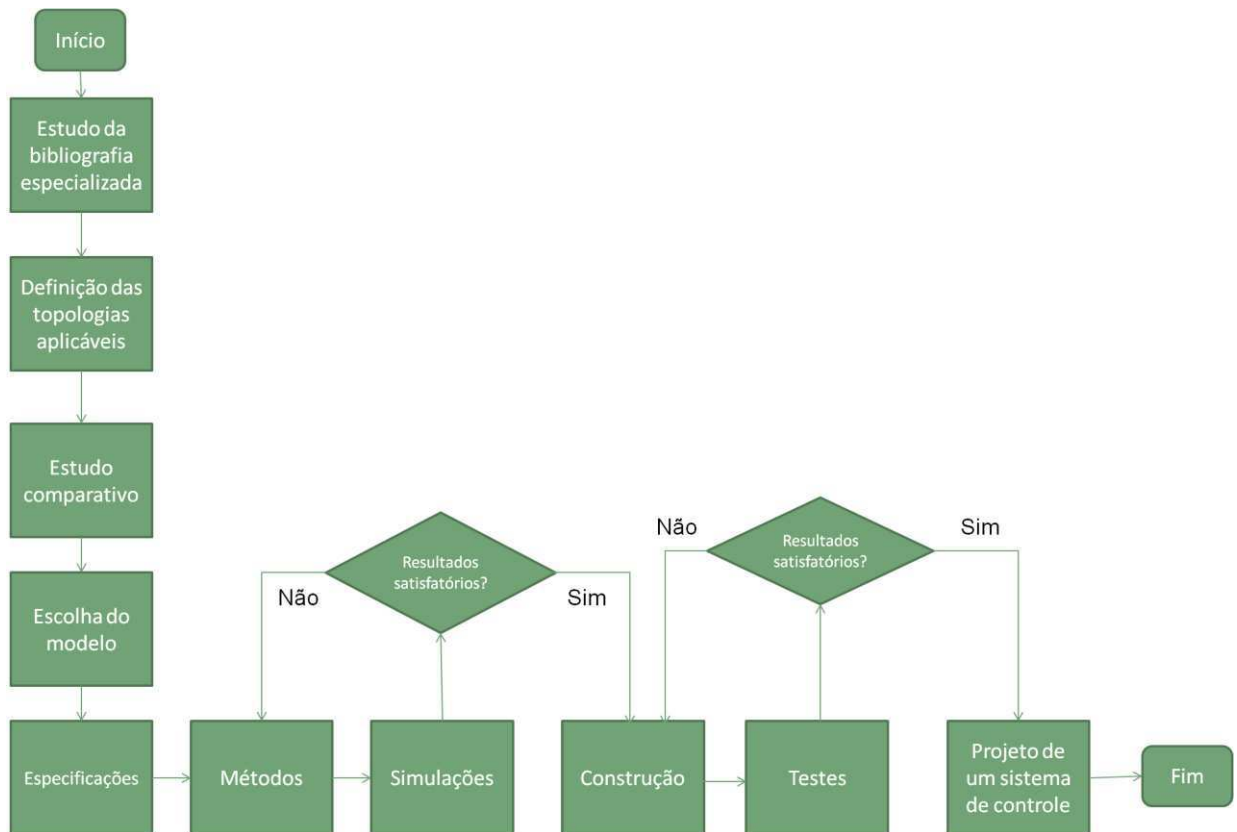


Figura 1 – Diagrama sequencial de etapas do projeto.

## 2 TIPOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Máquinas elétricas são dispositivos que usam o fenômeno da indução magnética no processo de conversão de energia. Existem vários tipos de máquinas elétricas, projetadas a partir do estudo prévio das fontes primárias que entregam à máquina energia mecânica para que seja transformada em energia elétrica. Todas as máquinas elétricas tem seu princípio de funcionamento baseado na *Lei de Indução de Faraday*, que descreve os processos de obtenção de força eletromotriz (tensão elétrica) a partir de um campo magnético variável.

Tomando como critério de análise o tipo de movimento mecânico em seu funcionamento, sugere-se que as máquinas possam ser classificadas rotativas ou de movimento linear. Cada uma dispõe das seguintes características:

- **Máquinas Rotativas:** É o tipo mais comum de máquinas elétricas. Estas máquinas possuem basicamente duas partes: uma parte fixa chamada *estator*, e uma parte móvel chamada *rotor*, que realiza um movimento rotativo e é montada sobre um eixo. Em geral, são classificadas como síncronas ou de indução.
- **Máquinas de movimento linear:** É o tipo mais raro de máquinas elétricas. Estas máquinas, assim como as máquinas rotativas, possuem basicamente duas partes: uma parte fixa chama estator e uma parte móvel, que realiza um movimento de *vai e vem*. Em quase todas as aplicações, são máquinas de ímãs permanentes.

Se levarmos em consideração o modo como o rotor da máquina é concebido, as máquinas elétricas podem ser classificadas, de maneira geral, como: máquinas síncronas, máquinas de indução e máquinas de ímãs permanentes.

## 2.1 MÁQUINAS SÍNCRONAS

Máquina síncrona convencional possui enrolamentos de campo, que são alimentados com corrente contínua. O rotor pode assumir duas formas: pólos lisos ou pólos salientes. São as máquinas mais usadas nas centrais hidrelétricas e termoelétricas. Tem como partes constituintes:

- **Rotor:** Parte girante da máquina. Pode ser constituído por um pacote de lâminas de um material ferromagnético. Enrolamentos constituídos de condutores de cobre, designado como enrolamento de campo, envolvem este material. A função do enrolamento é produzir um campo magnético constante para interagir com o campo produzido pelo enrolamento do estator. A tensão aplicada nesse enrolamento é contínua. A intensidade da corrente suportada por esse enrolamento é muito menor que o enrolamento do estator. O rotor pode conter dois ou mais enrolamentos, sempre em número par e todos conectados em série. Cada enrolamento será responsável pela produção de um

dos pólos do eletroimã. Tem como função apenas produzir um campo magnético para "excitar" a máquina, de forma que seja possível a indução de tensões nos terminais dos enrolamentos do estator.

- **Estator (Armadura):** Parte fixa da máquina, montada em volta do rotor de forma que o mesmo possa girar no seu interior. É constituído por um pacote de lâminas de um material ferromagnético. Os enrolamentos envolvem este material, ao longo da sua circunferência, e posicionado em ranhuras. Os enrolamentos do estator são alimentados por um sistema de tensões alternadas trifásicas. Pelo estator circula toda a energia elétrica gerada. Tanto a tensão quanto a corrente elétrica que circulam são bastante elevadas em relação ao campo (rotor).

### 2.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

As máquinas síncronas permitem a operação em dois modos: gerador ou motor.

### 2.1.2 OPERAÇÃO COMO GERADOR

Ao operar como gerador, a energia mecânica é fornecida à máquina pela aplicação de um torque e pela rotação do eixo/veio da mesma. A fonte de energia mecânica pode ser, por exemplo, uma turbina hidráulica, a gás ou a vapor. Para que a máquina síncrona seja capaz de efetivamente converter a energia mecânica aplicada no seu eixo, é necessário que o enrolamento de campo localizado no rotor da máquina seja excitado. Este enrolamento é alimentado por uma fonte de tensão contínua de forma que, ao girar o campo magnético gerado pelos pólos do rotor, tenham um movimento relativo aos condutores dos enrolamentos do estator. A corrente elétrica utilizada para alimentar o campo (enrolamento do rotor) é denominada corrente de excitação.

Devido a esse movimento relativo entre o campo magnético dos pólos do rotor, a intensidade do campo magnético que atravessa os enrolamentos do estator irá variar no tempo. Teremos, pela *lei de Faraday*, uma indução de tensões aos terminais dos enrolamentos do estator. Devido à distribuição e disposição espacial do conjunto de enrolamentos do estator, as tensões induzidas aos seus terminais serão alternadas.

### 2.1.2.1 Operação como Motor

Ao operar como Motor, a energia elétrica é fornecida à máquina pela aplicação de tensões aos terminais dos enrolamentos do estator. Os enrolamentos de campo do rotor são alimentados por uma fonte de tensão contínua. Como as tensões aplicadas aos enrolamentos do estator são alternadas, circulará nele correntes alternadas de mesma frequência que a tensão, essas correntes produzirão campos magnéticos também alternados que variam no tempo.

Devido à disposição espacial dos enrolamentos no estator, esses campos magnéticos variantes no tempo também irão circular pelo estator, de forma que o campo magnético resultante irá rodar em torno da circunferência do estator. A velocidade angular de rotação desse campo é proporcional à frequência da tensão alternada aplicada nos enrolamentos. Este campo que circula em torno da circunferência do estator também é conhecido como campo girante.

Assim, quando um dos pólos do campo magnético constante no tempo gerado pelo enrolamento de campo do rotor interagir com o campo girante resultante do estator, tentará alinhar-se com o pólo de sinal oposto. Como o pólo do campo girante do estator está a girar, surgirá no rotor um binário de forças que gerarão um torque de forma que o rotor gire e mantenha os campos do enrolamento de campo e o campo girante do estator alinhados. Com o surgimento do torque, o rotor girará seguindo o sentido e velocidade do campo girante do estator.

## 2.2 MÁQUINAS DE INDUÇÃO

É um motor de corrente alternada, que funciona a partir de um campo girante. Para conseguir esse campo, é necessário que haja vários enrolamentos ao redor de núcleos magnéticos no estator que formarão os pares de pólos de um eletroímã. São alimentados por um sistema trifásico a três fios, em que as tensões estão defasadas de  $120^\circ$  elétricos.

O estator é composto de chapas finas de aço magnético, tratadas termicamente ou de aço silício, para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese. Estas chapas têm o formato de um anel com ranhuras internas. Enrolamentos são alojados nelas, e, quando em operação, deverão criar um campo magnético no estator.

O rotor dessa máquina pode assumir dois tipos: rotor tipo gaiola ou rotor bobinado. Para as máquinas de indução com *rotor tipo gaiola*, não há enrolamento de campo, sendo estes substituídos por barras de material ferromagnético, colocadas nas ranhuras do rotor e curto-circuitadas nas extremidades. As correntes nas barras são induzidas pelo campo girante, daí vem o nome máquina de indução. Para as máquinas de indução com *rotor bobinado*, há enrolamentos de campo e as correntes também são induzidas a partir de campos girantes. Esta máquina possui conexões externas para os enrolamentos de campo, onde podem ser colocadas resistências que alteram o conjugado eletromagnético da máquina [1].

### 2.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

As correntes no estator produzem um campo girante. O rotor é, então, imerso nesse campo. Nos condutores do rotor, são induzidas forças eletromotrizes. Essas f.e.m induzidas dão origem as correntes de valor igual ao quociente da força eletromotriz pela respectiva impedância. Um conjugado motor é produzido quando as correntes reagem sobre o campo girante. Com isso, o rotor gira no mesmo sentido do campo. A velocidade síncrona nunca pode ser atingida. Isto é, a velocidade do rotor nunca pode atingir a velocidade do campo girante. Caso a velocidade síncrona seja atingida, os condutores do rotor não recebem variação de fluxo em seus núcleos, não se produzindo correntes induzidas. Quando em operação sem carga, o rotor gira com velocidade próxima à síncrona. Com carga, o rotor se atrasa mais em relação ao campo girante. Neste caso, correntes maiores são induzidas para desenvolver o conjugado necessário.

O parâmetro escorregamento,  $s$ , expressa a diferença relativa entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona em um motor de indução. É definido como:

$$s = \frac{n - n_r}{n} \quad (2.1)$$

Onde:

$s$ : Escorregamento;

$n$ : Velocidade síncrona;

$n_r$ : Velocidade do rotor.

A frequência da corrente no rotor é o produto do escorregamento pela frequência no estator:

$$f_s = s \times f \quad (2.2)$$

Onde:

$f$ : Frequência do estator;

$f_s$ : Frequência da corrente no rotor.

## 2.3 MÁQUINAS DE ÍMÃS PERMANENTES

Neste tipo de máquina não há enrolamento de campo, que são substituídos por ímãs permanentes de alta capacidade. Dependendo da topologia da máquina, os ímãs podem ser fixados na parte móvel da estrutura, ou podem se mover isoladamente. Essa máquina dispensa o uso de escovas ou fontes de excitação externa, o que reduz manutenções e aumenta o rendimento. Além disso, há uma redução considerável nas perdas por efeito *Joule* quando comparado aos outros tipos de máquinas elétricas.

O alvo desse trabalho é o projeto de uma máquina elétrica que tenha um movimento mecânico característico no seu processo de funcionamento como sendo do tipo linear. Não deve haver excitação externa na máquina e que sua parte móvel seja concebida a partir da fixação de ímãs permanentes.

### 2.3.1 MÁQUINA DE ÍMÃ PERMANENTE: ORIENTAÇÃO DE FLUXO

No que concerne à orientação do fluxo resultante na estrutura de uma máquina elétrica de ímãs permanentes, é possível encontrar duas características básicas:

- Em relação ao eixo de movimentação parado, a orientação do fluxo no entreferro pode ser: *radial* ou *axial* [3].

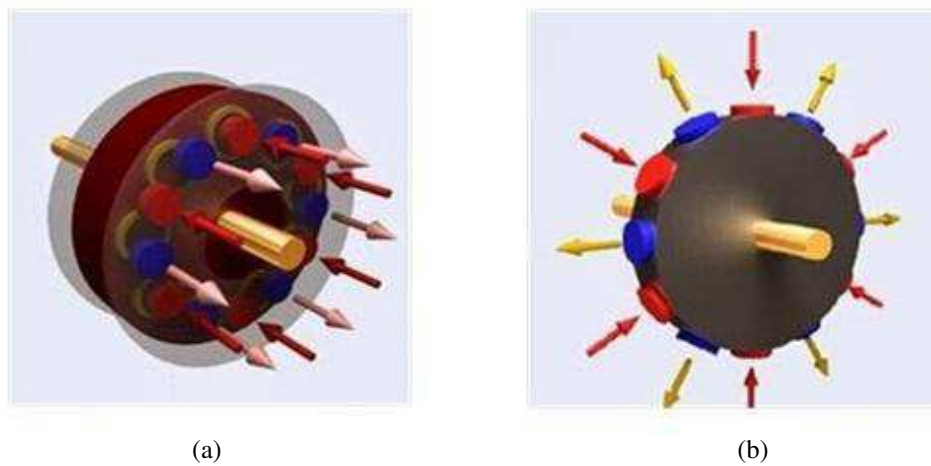


Figura 2 - Orientação de fluxo em relação do eixo de movimentação parado – (a) Axial (b) Radial

- Em relação à direção de movimento da parte móvel, a orientação do fluxo no estator pode ser: *transverso* ou *longitudinal* [3].

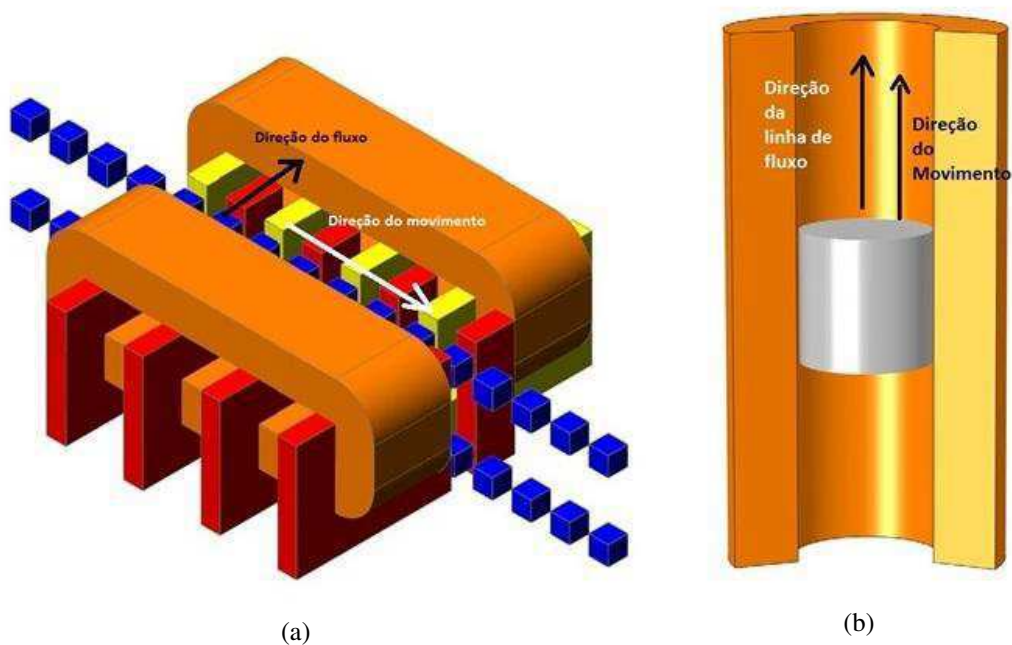


Figura 3 - Orientação de fluxo em relação ao eixo móvel - (a) Transverso (b) Longitudinal.

A Figura 2 ilustra a orientação de fluxo para o caso radial e o axial. A Figura 3 ilustra a orientação de fluxo para o caso transverso e longitudinal. A partir das combinações das orientações de fluxo que consideram tanto o movimento da parte

móvel como o eixo da máquina, é possível classificar o fluxo na máquina como transverso, radial ou axial.

Cada classificação de fluxo empregado em máquinas de ímãs permanentes possui peculiaridades importantes e que merecem ser destacadas, tais como:

- **Fluxo radial:** Nesse tipo de orientação de fluxo o rotor é geralmente interno, e os ímãs são distribuídos na sua superfície. Não é favorável em aplicações com grande número de pólos, pois o reduzido espaço entre os ímãs leva a um elevado fluxo de fuga e à saturação do ferro. O fluxo gerado pelos ímãs atravessa o entreferro, enlaça as bobinas passando pelo núcleo do estator, e retorna ao rotor através do entreferro. Geralmente, o rotor nesse tipo de configuração não possui enrolamentos, fazendo com que o fluxo seja praticamente constante, o que gera baixas perdas. É a orientação de fluxo mais comumente encontrada em máquinas de ímãs permanentes [4]. Um exemplo de máquina com essas características pode ser vista na Figura 4.

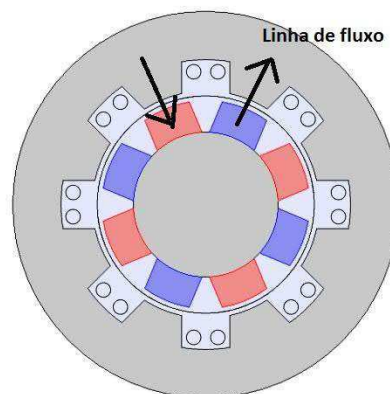


Figura 4 – Ilustração da orientação de fluxo radial: orientação de fluxo mais comum em máquinas a ímãs permanentes.

- **Fluxo axial:** Tem como principal desvantagem o não balanceamento das forças axiais entre o ferro do estator e os ímãs permanentes. Nesse tipo de configuração não há como definir um diâmetro fixo para o entreferro, já que este fica em uma posição perpendicular ao eixo. Em



comparação ao caso radial, é necessário menos ferro para conduzir o fluxo até o núcleo do estator, o que gera uma maior densidade de potência. Geralmente, máquinas com essa orientação de fluxo possuem seu diâmetro muito maior que o comprimento, e são ideais em aplicações que exigem alto torque em baixas velocidades [4]. Um exemplo de máquina com essas características pode ser vista na Figura 5.

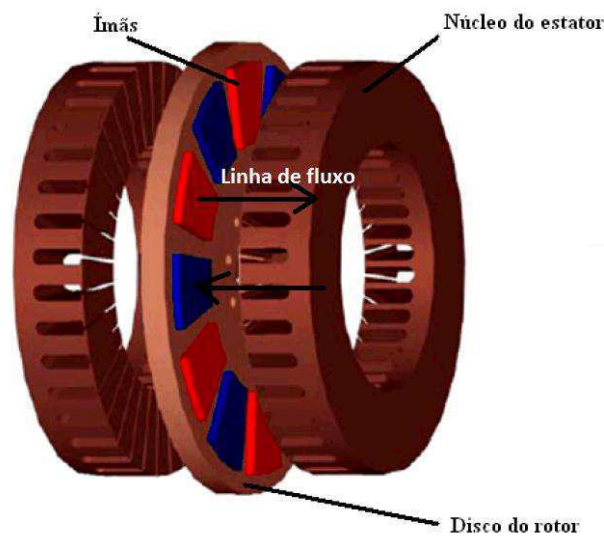


Figura 5 – Ilustração da orientação de fluxo axial: máquinas com diâmetro muito maior que o comprimento.

- **Fluxo Transverso:** Nesse tipo de configuração, a direção do movimento é perpendicular ao plano aonde o fluxo vai se fechar (estator). As máquinas que operam a partir de um movimento linear são as que mais utilizam essa topologia. É a forma mais eficaz de aproveitamento de fluxo nesses casos. Em casos de máquinas rotativas, a construção torna-se bastante complexa, com percursos de fluxo tridimensionais, além do baixo aproveitamento de fluxo enlaçado e fator de potência não ideal. A principal vantagem reside no fato das dimensões dos circuitos magnéticos e elétricos serem independentes, ou seja, o espaço disponível para enrolamentos é independente do número de pólos e do dimensionamento do entreferro. Outra vantagem é a baixa perda por efeito Joule, já que todas as partes dos



Tabela 1 - Especificações da máquina.

| Descrição                   | Valor  |
|-----------------------------|--|
| Potência                    | ~1kW   |
| Eficiência                  | ~95%   |
| Frequência do movimento     | ~50Hz  |
| Comprimento do curso do ímã | ~45 mm   |
| Material do estator         | Aço laminado                                   |
| Material da parte móvel     | Aço laminado                                   |
| Ímã                         | $\mu_r = 1.05; B_r = 0,84 \text{ T}$           |
| Material do enrolamento     | Cobre; $\sigma = 5.77 \times 10^7 \text{ S/m}$ |
| Peso                        | ~6,5 kg  |
| Comprimento/espessura total | ~30 mm   |
| Largura/Raio                | ~140 mm  |

## 2.5 MODELO PROPOSTO

Buscou-se na literatura projetos de modelos que atendessem nossas necessidades. O modelo escolhido tem o requisito de uma máquina monofásica.

Foi feita uma avaliação comparativa das configurações disponíveis e quatro se destacaram por apresentar características que atendem as nossas necessidades. São elas:

- Topologia 1: sistema de geração que funciona a partir de um motor de pistão livre. Na forma como foi projetada, essa máquina obtém níveis de potência gerada de até 25kW, e é aplicável em frequências constantes. Possui um peso de 80 kg, e se mostrou um projeto caro. As características de peso, aliada ao custo do projeto e ao fato de que ele é

projetado para funcionar em frequências constantes, fizeram com que esse modelo fosse descartado.

- Topologia 2: também funciona em um sistema de pistão livre. Na forma como foi projetada, essa máquina obtém níveis de corrente de até 7 A, e de potência gerada de até 7kW. Funciona em frequências mecânicas altas (100 Hz). O projeto inicial deste gerador considera uma estrutura trifásica, a alteração para monofásico implica em grandes mudanças. Além disso, a modelagem matemática é quase inexistente. Estes fatos fizeram com que o modelo fosse descartado.
- Topologia 3: essa topologia tem como principal diferença a disposição dos ímãs na estrutura, que estão localizados no estator e não na parte móvel. Na forma como foi projetada, essa máquina gera tensões de no máximo 4 V. Projetado para frequências de oscilação muito baixas. A topologia favorece a dispersão das linhas de fluxo na estrutura, o que reduz sua eficiência. Projeto caro para níveis de potência gerada baixos, e por isso foi descartado.
- Topologia 4: nesse gerador os ímãs estão sempre em contato com o circuito magnético. A topologia propicia o aumento do número de pólos, e o conseqüente aumento da geração, a depender da aplicação. A distribuição de fluxo é simétrica ao longo da estrutura, o que facilita uma modelagem física. No modo como foi projetado, alcança níveis de potência gerada de até 3,5 kW. Projeto inicial para esta máquina elétrica considera um arranjo monofásico. Tais fatos fizeram com que esse gerador fosse escolhido para ser tratado neste trabalho.

As especificações expostas na sessão anterior serviram de base para a decisão. Dentre as topologias estudadas, o gerador linear de curso curto se destacou por apresentar característica que melhor casam com as especificações pretendidas, sendo ela o objeto de estudo deste trabalho. Esta estrutura utiliza uma orientação transversal de fluxo no núcleo do estator, e uma orientação radial do entreferro de ar.

### 2.5.1 GERADOR LINEAR DE CURSO CURTO

O modelo escolhido trata-se de um *gerador linear de curso curto*. Tem como principal característica o comprimento do curso dos ímãs permanentes curto, estrutura tubular e a orientação transversal. O projeto deste gerador não tem designação específica, podendo ser acoplado a qualquer sistema de geração que promova um movimento linear. O ímã está sempre em contato com o circuito magnético, em um deslocamento relativamente curto, o que permite a operação em frequência mecânica industrial. O ímã está sempre em contato magnético com o estator, fato que reduz a quantidade de fluxo disperso, e aumenta a eficiência da máquina.

A parte móvel é constituída por ímãs de magnetização radial, presos em um eixo de material ferromagnético. A estrutura permite modificações na parte móvel, existindo variantes do modelo, com a parte móvel constituída apenas pelos ímãs. O estator da máquina é constituído por uma peça de material ferromagnético, vazada, inicialmente, em quatro posições, possibilitando os enrolamentos das bobinas. Esta configuração pode ser alterada. Pode-se aumentar o número de posições vazadas, e, conseqüentemente, de bobinas. Estas operações permitem, de acordo com a aplicação, promover uma maior ou menor potência gerada [10]. As bobinas serão ligadas em série, o número de voltas nos enrolamentos vai depender da potência que se quer gerar, e são enroladas quando a estrutura estática é construída. O gerador é ilustrado na Figura 7.

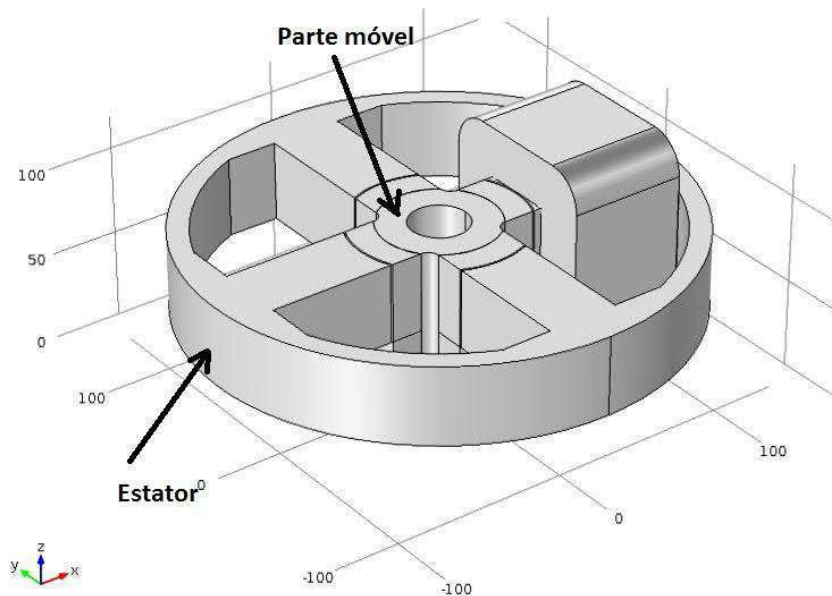


Figura 7- Gerador linear de curso curto: representação do arranjo estator/parte móvel.

Considerando que todas as estruturas físicas são tridimensionais, alguns cuidados devem ser tomados quando se representa um problema em somente duas dimensões. O corte efetuado no mecanismo que se quer analisar deve ser apropriadamente escolhido. Tem-se que decidir se os efeitos de borda podem ser desprezados ou têm que ser levado em consideração através de fatores de correção ou modelagem de parâmetros concentrados que os representem. O caso em questão não se adéqua a uma simulação bidimensional, por se tratar de uma estrutura sem simetria axial. Em contrapartida, a distribuição de fluxo é simétrica em toda a peça do estator. Tal fato ajuda na implementação computacional, já que permite a criação de condições de fronteiras de simetria para isolamento e blindagem magnética que reduzem o esforço numérico. Uma modelagem em 2D desconsideraria a influência dos ímãs inferiores na distribuição de fluxo total na peça, o que levaria a erros no cálculo de fluxo final.

O entreferro é projetado para ser relativamente estreito, cerca de 1 mm, o que contribui para a diminuição da relutância no circuito magnético equivalente, e o consequente aumento da eficiência.

O projeto inicial prevê a construção de um gerador monofásico. O modelo trifásico pode ser obtido a partir do aumento do número de estruturas estatóricas. Gera algo em torno de 3,5 kW de potência em uma frequência de 50 Hz, a depender do número de bobinas e voltas de enrolamento [10]. O projeto inicial dimensionou o

comprimento/espessura da estrutura com cerca de 9 mm, alterações nesse parâmetro são de fácil execução. A construção do estator é fácil, consistindo apenas de uma peça metálica vazada em posições dispostas ao longo da estrutura. A máquina conta com tamanho e peso excelentes, com possibilidade de réplica de peças, que leva ao aumento da capacidade de geração. Bobinas simples, em formato padrão. Além de tudo, há vários trabalhos publicados sobre essa estrutura, o que facilita no momento de dimensionar certas alterações que possam trazer melhorias à máquina.

De posse do modelo escolhido, o próximo passo é descrever a teoria que o rege. A partir do conhecimento da geometria e de expressões para o cálculo de fluxo magnético, derivou-se um circuito magnético equivalente. Sabendo-se que o movimento da máquina primária é linear, modelou-se um sistema mecânico para geração deste movimento. Depois houve o acoplamento das duas modelagens baseado na variável de interesse, que é a tensão induzida nos terminais de uma bobina enrolada na peça.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No decorrer desta seção serão apresentadas algumas considerações sobre a física que rege os processos de geração de energia elétrica. Isto engloba a demonstração de fórmulas, circuitos magnéticos e elétricos equivalentes, curvas no domínio do tempo e tudo que possa contribuir para a modelagem do modelo em estudo.

#### 3.1 PROPRIEDADES BÁSICAS DO MAGNETISMO PERMANENTE

Os ímãs permanentes possibilitam a exploração de novas configurações de máquinas elétricas e potenciam o rendimento por eliminação das perdas de excitação. Os mecanismos de magnetização são determinados em nível atômico pelos movimentos orbital e *spin* de um elétron. Em níveis multiatômicos, o magnetismo depende diretamente do momento de dipolo magnético, um vetor que, em presença de um campo magnético, relaciona-se através de um torque no ponto em que se situa o elemento. Se os momentos dos dipolos entre átomos não interagem de forma significativa, o material

se comporta como *paramagnético*; caso exista uma interação forte entre eles, o que leva a um alinhamento espontâneo entre os mesmos, o matéria é *ferromagnético*.

### 3.1.1 MAGNETIZAÇÃO E CICLO DE HISTERESE

Nos materiais ferromagnéticos, o alinhamento espontâneo dos momentos dos dipolos magnéticos ( $m_m$ ) em volumes elementares ( $\Delta v$ ), origina domínios com uma magnetização  $\mathbf{M}$ , dada por:

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum m_m}{\Delta v} \quad (3.1)$$

A magnetização espontânea produz uma polarização magnética ( $\mathbf{P}_m$ ), igual à indução magnética ( $\mathbf{B}$ ) na ausência de campos externos, ou seja,  $\mathbf{P}_m = \mu_0 \mathbf{M}$ . Do ponto de vista microscópico, o material é magnetizado quando um campo magnético externo de amplitude suficiente é aplicado ao material, originando a rotação dos domínios e o alinhamento destes na direção do campo. A indução magnética total devido a  $\mathbf{M}$  em um campo magnético externo  $\mathbf{H}$ , é expresso por:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{M} + \mathbf{H}) \quad (3.2)$$

Para materiais magnéticos lineares, homogêneos e isotrópicos,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{H}$  são paralelos ou antiparalelos, o que permite a utilização da fórmula (3.2) na sua forma escalar.

Quando se aplica um campo magnético ao material completamente desmagnetizado, a indução magnética cresce até o valor de saturação ( $\mathbf{B}_s$ ), definindo a primeira curva de magnetização. Se o campo magnético for gradualmente reduzido à zero, a indução irá diminuir até o valor de *remanência* ( $\mathbf{B}_r$ ), igual à polarização  $\mathbf{P}_m$ . Invertendo a direção do campo magnético e aumentando-o em valor absoluto, a indução magnética anula-se para uma intensidade do campo igual a  $\mathbf{H}_c$ , denominado *campo coercitivo*. Aumentando mais o campo na mesma direção, magnetiza-se o material até a saturação com polaridade oposta. Reduzindo novamente o campo magnético até zero, obtém-se a indução de remanência com a polaridade oposta a anterior. Revertendo



novamente a direção do campo magnético, o material é magnetizado até a sua polaridade original ( $B_s$ ), completando o ciclo de histerese representado na Figura 8. O eixo do campo magnético está normalizado pelo fator de permeabilidade no vácuo,  $\mu_0$  [3].

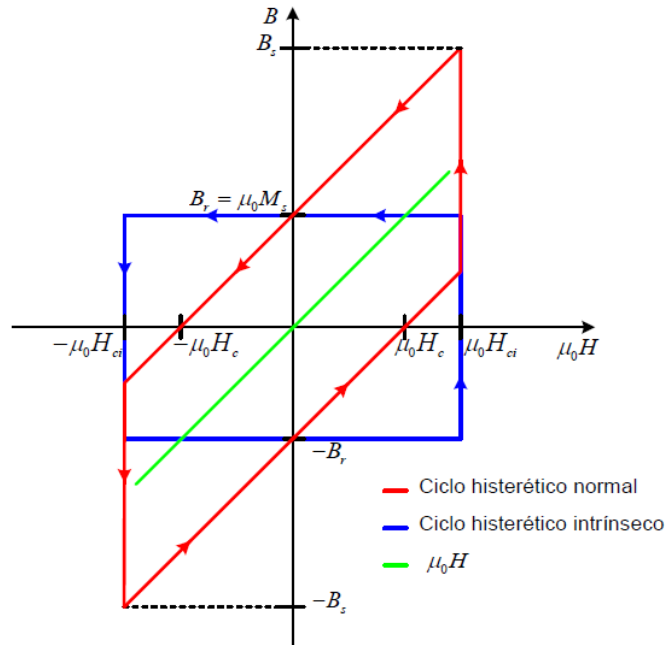


Figura 8 – Curva característica dos ciclos de histerese normal e intrínseca de um ímã permanente ideal.

O ciclo de histerese normal reporta a indução magnética, que pode ser medida em função do campo magnético aplicado. Na ausência de material magnético, o mesmo campo produziria uma indução magnética no vácuo dada por  $\mu_0 \mathbf{H}$ . A indução magnética total é, assim, a soma da indução magnética devido à magnetização intrínseca do ímã e da que seria induzida pelo mesmo campo no vazio. O ciclo de histerese intrínseco associado ao ímã pode ser obtido por simples aritmética, recorrendo à equação (3.2), como pode ser observado na Figura 8. O campo coercitivo intrínseco ( $H_{ci}$ ) define o valor do campo magnético necessário para desmagnetizar completamente o material magnético. Quando  $|H_{ci}| > M_s$ , sendo  $M_s = B_r/\mu_0$ , o campo coercitivo intrínseco tem amplitude superior ao campo coercitivo normal e o ciclo de histerese no segundo quadrante, que define as características de desmagnetização do ímã, é linear [3].

A característica apresentada pressupõe que o material é ideal, constituindo uma abordagem teórica. Na prática, a característica de histerese exposta dá lugar a uma curva mais suavizada. A magnetização também é função da temperatura, sendo reduzida à medida que esta aumenta, até o limite da temperatura de *Curie*, que define a transição entre o estado ferromagnético e o estado paramagnético do material.

### 3.1.2 ENERGIA NOS PROCESSOS DE MAGNETIZAÇÃO E DESMAGNETIZAÇÃO

Para que um ímã armazene energia ou produza trabalho nos processos de magnetização e desmagnetização, é necessária uma energia associada a um campo externo. A energia armazenada por unidade de volume de um ímã permanente é dada por:

$$W_m = -\mu_0 MH \quad (3.3)$$

A variação da energia devido a uma variação do campo magnético  $\mathbf{H}$ , é dada por:

$$dW_m = -\mu_0 M dH - \mu_0 H dM \quad (3.4)$$

Na equação (3.4), o termo  $-\mu_0 M dH$  representa o trabalho realizado unicamente pelo campo aplicado, e o termo  $-\mu_0 H dM$  é a energia associada à mudança de direção dos momentos magnéticos, relacionadas aos deslocamentos verticais do mesmo ciclo, e exprime a energia cinética no próprio material. Ao longo de um ciclo de histerese completo  $\oint dW_m = 0$ , ou seja:

$$-\mu_0 \oint M dH - \mu_0 \oint H dM = 0 \quad (3.5)$$

Substituindo (3.2) em (3.5), obtém-se:

$$-\oint (B - \mu_0 H) dH - \oint H d(B - \mu_0 H) = 0 \quad (3.6)$$

Dado que  $\mathbf{H}$  volta ao seu valor original após um ciclo completo,  $\oint (\mu_0 H) dH = 0$ , a equação (3.6) reduz-se a:

$$-\oint BdH - \oint HdB = 0 \quad (3.7)$$

O termo  $-\oint BdH$  representa o trabalho realizado pelo campo magnético aplicado e o termo  $-\oint HdB$  a energia cinética interna. Cada ponto do ciclo de histerese representa a energia total potencial.

Para materiais ideais, como os que aqui foram tratados, o *produto energético máximo* ocorre para  $B = \mu_0 M_s/2$  e  $H = -M_s/2$ , com  $M_s$  sendo a magnetização de saturação. O *produto energético máximo* é uma medida qualitativa do desempenho de um ímã em um ciclo magnético. Ele não quantifica a energia que este é capaz de fornecer. O projeto magnético que estabeleça o ponto de funcionamento no correspondente ao produto energético máximo maximiza a energia liberada pelo ímã [3].

## 3.2 MATERIAIS MAGNÉTICOS DUROS

Materiais magnéticos duros, mais amplamente conhecidos como *ímãs*, são aqueles de magnetização permanente. Eles exigem um forte campo externo para levar sua magnetização à zero. A primeira aplicação conhecida dos materiais magnéticos duros foi uma bússola de marinheiro, instrumento descrito na Europa em 1200, mas aparentemente inventado na China, pelo menos dois milênios antes. O conhecimento crescente da física e da metalurgia associada aos ímãs permanentes trouxe um desenvolvimento rápido para estes materiais após a segunda guerra mundial. Os ímãs na década de 60 constituíram um marco importante na evolução tecnológica, sendo considerados pela primeira vez elementos magnéticos por si só, diminuindo o risco de desmagnetização e competindo diretamente com os eletroímãs nas aplicações industriais.

Dentre os principais materiais magnéticos duros, destacam-se as ferrites, materiais cerâmicos obtidos por mistura de óxido de ferro com bário ou estrôncio. Pelo baixo processamento e baixo custo dos materiais envolvidos, as ferrites constituem uma solução econômica. Em contrapartida, são muito instáveis com a temperatura, e apresentam um coeficiente de temperatura reversível do campo coercitivo positivo, significando que este diminui com a temperatura, característica única entre os materiais

magnéticos duros. Os ferrites também se caracterizam pela elevada resistividade elétrica, na ordem de  $4 \times 10^{-6} \Omega cm$ .

Outro material importante nesse segmento, é a liga de samário e cobalto (SmCo), que apresenta produtos energéticos da ordem de  $128 \text{ kJ/m}^3$ . O uso desse tipo de ímã fica limitado a temperaturas de no máximo  $250^\circ\text{C}$ . A baixa disponibilidade e o conseqüente custo elevado do cobalto são desvantagens que levam a baixa utilização desse tipo de material magnético duro.

Uma liga de material magnético duro de bastante sucesso em aplicações comerciais é a de neodímio, ferro e boro (NdFeB). Elas oferecem características magnéticas equivalentes, e alguns aspectos melhores, às de samário e cobalto. Entretanto, recorrem a matérias-primas mais abundantes, o que resulta em custos menores. Apresentam um produto energético máximo atingindo valores de  $470 \text{ kJ/m}^3$ . A principal desvantagem desse tipo de liga reside no fato de possuírem temperatura de *Curie* baixa, de aproximadamente  $300^\circ\text{C}$ . Possui aplicações limitadas em temperaturas relativamente baixas, inferiores a  $150^\circ\text{C}$ . Tem elevada sensibilidade a corrosão. Em ambientes úmidos, esses materiais reagem com o hidrogênio, levando a uma decomposição da superfície.

Para máquinas de ímãs permanentes, é melhor a utilização de ímãs com geometria simples, privilegiando-se assim a utilização de ímãs sinterizados. Autores defendem a utilização de ímãs de NdFeB em máquinas de alta velocidades ( $f = 1567 \text{ Hz}$ ), por que a resistividade deles é superior as outras ligas sinterizadas [3]. A Tabela 2 mostra as principais características das ligas citadas.

Tabela 2 - Principais características das classes de ímãs sinterizados [3].

| <b>Material</b> | <b><math>B_r</math> (T)</b> | <b><math>H_c</math> (kA/m)</b> | <b><math>(BH)_{max}</math> (kJ/m<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|---|
| Ferrite         | 0,4                         | 223                            | 32  |
| SmCo            | 1,07                        | 1400                           | 214   |
| NdFeB           | 1,35                        | 1200                           | 350   |

Os ímãs de metal sólido são magnetizados sendo inseridos em um campo magnético muito intenso, produzido por um eletroímã alimentado por uma corrente muito forte. Os ímãs de cerâmica são colocados, ainda em estado de pó, em um molde.

Em seguida, são inseridos em um campo magnético intenso e depois compactados com uma cola apropriada.

### 3.3 MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS

Em uma máquina elétrica, os materiais magnéticos macios desempenham um papel preponderante como condutores do fluxo magnético. Ao contrário dos materiais magnéticos duros, os magnéticos macios precisam de uma excitação elétrica ou magnética externa para comportar fluxo magnético. Caracterizam-se por um campo coercitivo muito baixo e um cliço de histerese estreito. Possuem alta permeabilidade e magnetização de saturação, o que contribui para o bom confinamento ou direcionamento de fluxo em peças com esse tipo de material. Apresentam certa resistividade sob excitação variável no tempo, o que resulta em perdas por histerese e correntes de Foucault. O ferro, apesar de boa permeabilidade e magnetização de saturação, é geralmente associado a outros elementos quando usado na composição de circuitos magnéticos. Isto melhora ainda mais seus desempenhos elétricos e magnéticos. Quanto menor forem os domínios em que estão dispostos, mais macio é o material, mais facilmente ele é magnetizado ou desmagnetizado. Essa propriedade pode também ser controlada a partir de procedimentos térmicos, mecânicos ou magnéticos.

As ligas de ferro e níquel (FeNi) são as mais utilizadas em aplicações de alta frequência. Para baixas frequências, as ligas de ferro e silício (FeSi) são as mais utilizadas. O cobalto adicionado ao ferro permite obter magnetização de saturação superior ao ferro puro. As ligas de ferro cobalto (FeCo) são os materiais com as melhores características magnéticas para as aplicações em frequência industrial, tendo sua utilização limitada pelo preço elevado devido a alta concentração de cobalto.

Recentemente, tem-se assistido a uma melhoria das propriedades magnéticas a partir da construção de materiais que consistem em partículas de ferro pulverizado. Estes são revestidas com uma superfície que providencia o isolamento elétrico. Posteriormente, os materiais são comprimidos. Apresentam comportamento *isotrópico*, com propriedades magnéticas e térmicas iguais nas três dimensões. A utilização desse tipo de material em máquinas elétricas ainda está em processo de maturação [3].

## 3.4 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Os conceitos de campos elétricos e magnéticos são muito úteis para a compreensão dos processos de conversão. Entretanto, quando esses processos são utilizados em máquinas complexas, a grande quantidade de informações contidas na abordagem de campo geralmente se torna impossível de ser usado. Em máquinas elétricas, o circuito magnético pode ser formado somente por materiais ferromagnéticos, ou aqueles que acrescentam entreferro e ar. Nas máquinas de ímãs permanentes, o campo magnético é produzido diretamente pelos ímãs. O comportamento completo do campo magnético é descrito pelas equações de Maxwell, que são complementadas por relações constituintes.

### 3.4.1 EQUAÇÕES DO CIRCUITO MAGNÉTICO

Quando o condutor é percorrido por uma corrente elétrica, um campo magnético é produzido em sua volta, como é mostrado na Figura 7. A integral de linha fechada da intensidade de campo magnético é igual às correntes envolvidas que produzem as linhas de campo magnético. Essa relação é denominada *Lei Circuital de Ampère*, e é expressa por:

$$\oint Hdl = N.I = f_{mm} \quad (3.8)$$

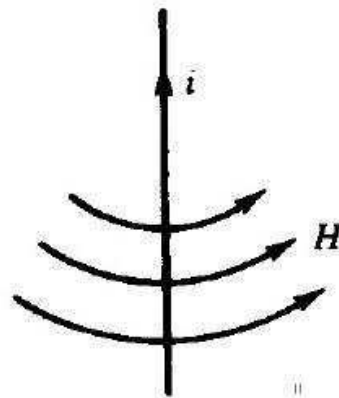


Figura 9 - Condutor percorrido por uma corrente elétrica, gerando um campo magnético circular em sua volta.

Caso o comprimento total de uma linha de fluxo for suposto como sendo  $l$  então a força magnetomotriz associada à linha de fluxo especificada será:

$$f_{mm} = H \cdot l = \frac{B}{\mu} \cdot l \quad (3.9)$$

Nas situações em que  $B$  é constante e penetra uma área fixa e conhecida ( $A$ ) o fluxo magnético pode ser escrito como:

$$\Phi = B \cdot A \quad (3.10)$$

Onde  $\Phi$  é o fluxo magnético correspondente. Substituindo a equação (3.10) na (3.9), teremos:

$$f_{mm} = \Phi \cdot \left( \frac{l}{\mu \cdot A} \right) \quad (3.11)$$

Este fluxo é limitado em módulo pelo que é chamado de *relutância do circuito magnético*. Que é definida como:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A} \quad (3.12)$$

A equação (3.12) é também conhecida como a *Lei de Ohm do circuito magnético*. Essa semelhança permite representar o campo magnético por um circuito magnético equivalente e fazer a sua análise como um circuito elétrico.

Um circuito magnético composto de caminhos magnéticos de diferentes materiais pode ser representado por suas respectivas relutâncias magnéticas.

### 3.5 CIRCUITO MAGNÉTICO PROPOSTO

O circuito magnético equivalente aproximado produz resultados aceitáveis para fins práticos. A partir da análise geométrica da topologia anteriormente escolhida, é possível propor algumas considerações importantes sobre o seu circuito magnético equivalente. Tomando como base um quarto da estrutura pretendida, o cálculo do fluxo por quarto de peça é feito recorrendo-se à representação equivalente do mesmo. O circuito magnético proposto desconsidera a ação magnética dos ímãs inferiores. Desta forma, as relutâncias de dispersão são desconsideradas. Este circuito equivalente é apenas uma proposição, sendo necessária uma análise mais minuciosa da estrutura real para definição de todos os componentes envolvidos. Esta representação se dá por meio de relutâncias e forças magnetomotrizes (Figura 10).



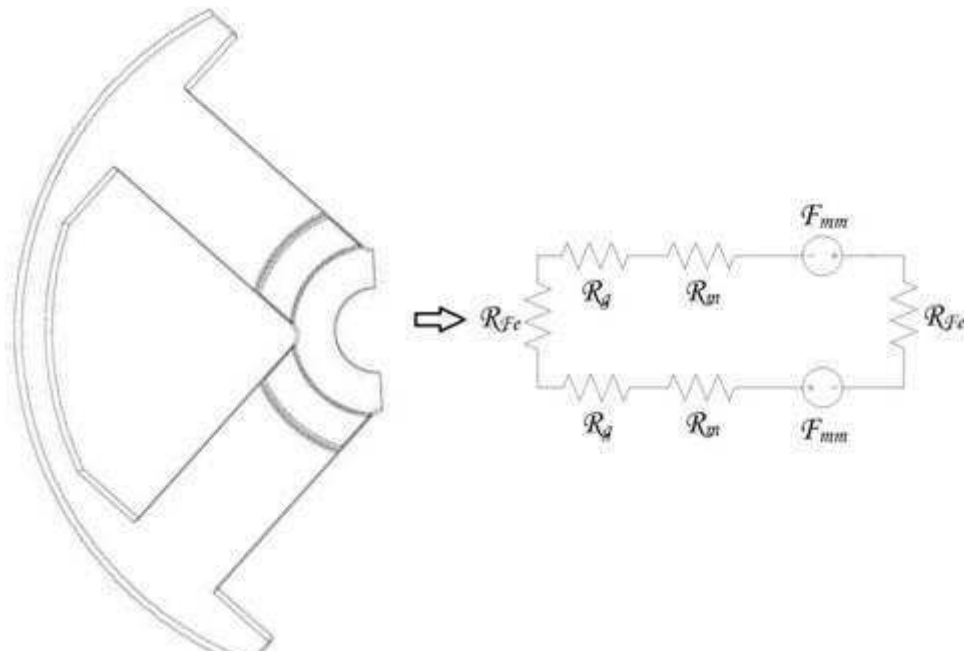


Figura 10 - Circuito magnético para um quarto da estrutura e o correspondente circuito magnético equivalente proposto.

Considerando:

$F_{mm}$ : Força magnetomotriz do ímã;

$R_m$ : Relutância própria do ímã;

$R_g$ : Relutância do entreferro;

$R_{Fe}$ : Relutância do ferro;

$H_c$ : Intensidade do campo coercitivo do ímã;

$g$ : Dimensão do entreferro;

$l_m$ : Comprimento do ímã;

$\mu_0$ : Permeabilidade no vácuo;

$\mu_r$ : Permeabilidade relativa do ímã;

$A_g$ : Área do entreferro;

$A_m$ : Área do ímã;

$\Phi_m$ : Fluxo magnético na peça.

Temos que:

$$F_{mm} = l_m H_c \quad (3.7)$$

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (3.8)$$

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_r A_m} \quad (3.9)$$

Considerando a relutância do ferro desprezível, calcula-se o fluxo máximo na peça como sendo:

$$\Phi_m = \frac{2l_m H_c}{2R_g + 2R_m} \quad (3.10)$$

Para o caso em que uma bobina é enrolada na peça, considerando o número de espiras desta bobina, podemos calcular o fluxo máximo ligado na forma:

$$(\psi_m)_{max} = N\Phi_m \quad (3.11)$$

Onde N é o número de espiras.

### 3.6 MODELAGEM DO SISTEMA MECÂNICO

Vislumbrando os testes para verificação de funcionamento da máquina em estudo, surge a necessidade da construção de uma plataforma de acionamento que vai simular o movimento linear da máquina primária. Para tal, é modelado um sistema de um eixo com dois braços. Tal sistema é preso a uma máquina girante, de modo a converter o movimento rotativo em linear. A Figura 11 mostra a estrutura que se quer modelar, bem como as variáveis de interesse que descrevem o sistema.

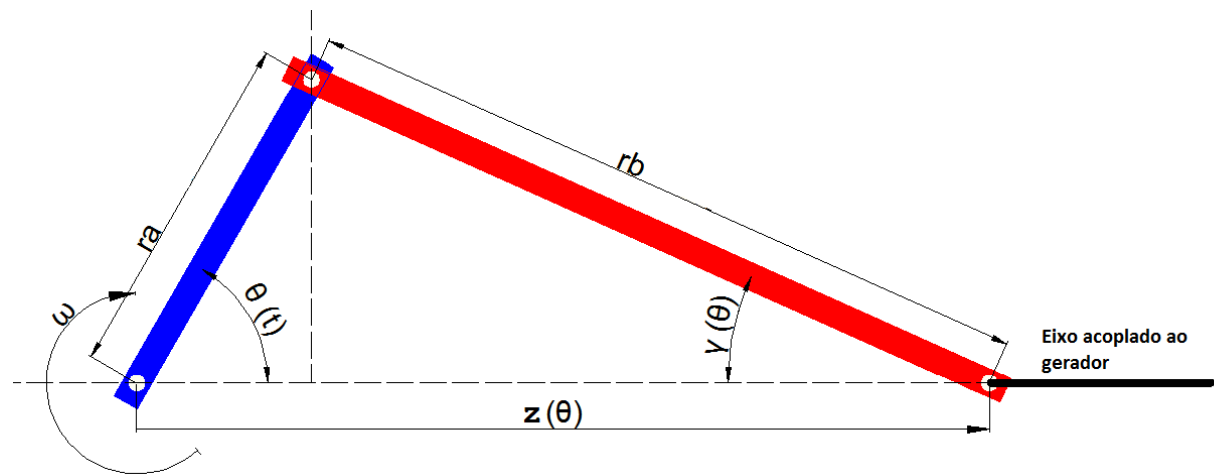


Figura 11 - Sistema mecânico usado na simulação do movimento linear.

O percurso total da parte móvel deve ser igual ao comprimento da máquina em questão. O valor do comprimento  $r_a$  deve ser fixado em metade do comprimento da máquina. Em relação ao comprimento  $r_b$ , para que a evolução do movimento se aproxime do senoidal, este terá valor tão maior quanto seja possível. Desta forma, definiu-se que  $r_b \approx 2r_a$ . Decompondo as componentes polares  $(\theta, \gamma)$  em componentes lineares  $(z, y)$ , o sistema pode ser descrito da seguinte forma:

$$z(t) = r_a \cos(\theta(t)) + r_b \cos(\gamma(\theta)) \quad (3.19)$$

$$r_a \sin(\theta(t)) = r_b \sin(\gamma(\theta)) \quad (3.20)$$

Em seguida, elimina-se qualquer dependência das coordenadas lineares com as componentes polares, exprimindo  $\gamma$  em função de  $\theta$  e resolvendo as equações dependentes do tempo:

$$\theta(t) = \omega t = 2\pi f_{mec} t \quad (3.21)$$

$$\gamma(\theta) = \sin^{-1} \frac{r_a \sin \theta(t)}{r_b} \quad (3.22)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = 2\pi f_{mec} = \omega \quad (3.23)$$

$$\frac{d\gamma(\theta)}{dt} = \frac{\cos(\theta(t)) \frac{r_a}{r_b} \omega}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta(t)) \left(\frac{r_a}{r_b}\right)^2}} \quad (3.24)$$

$$v(t) = \frac{dz}{dt} = -r_a \frac{d\theta(t)}{dt} \sin(\theta(t)) - r_b \frac{d\gamma(\theta)}{dt} \sin(\gamma(\theta)) \quad (3.25)$$

$$v(t) = -r_a \omega \sin(2\pi f_{mec} t) - r_b \frac{d\gamma(\theta)}{dt} \sin(\gamma(\theta)) \quad (3.26)$$

Desta forma é possível calcular a posição da parte móvel ao longo do seu curso ( $z(t)$ ) e da sua velocidade ( $v(t)$ ) [6].

O acoplamento do modelo do sistema mecânico ao modelo do circuito magnético dá-se através do cálculo de tensão induzida nos terminais da bobina enrolada na peça da Figura 10. Admitindo-se que o fluxo ligado tem uma variação senoidal ao longo da posição  $z(t)$ ,  $\psi_m(z(t))$  é dado por:

$$\psi_m(z(t)) = (\psi_m)_{max} \cos\left(2\pi \frac{z(t)}{L}\right) \quad (3.27)$$

Onde  $L$  é o curso total da parte móvel, para o nosso caso  $L=45 \text{ mm}$ .

A tensão induzida,  $E(t)$ , nos terminais da bobina colocada na peça da Figura 10 será:

$$E(t) = -\frac{d\psi_m(z(t))}{dt} = -\frac{d\psi_m(z(t))}{dz} \frac{dz}{dt} = -\frac{d\psi_m(z(t))}{dz} v(t)$$

$$E(t) = -v(t)(\psi_m)_{max} 2\pi \frac{1}{L} \sin\left(2\pi \frac{z(t)}{L}\right) \quad (3.28)$$

Primeiramente, foi definida a topologia a ser tratada. Depois, alguns aspectos físicos que regem a composição dos materiais envolvidos foram abordados. Seguindo o processo de conhecimento gradual, o circuito magnético equivalente foi deduzido, e, a partir disto, obtivemos uma modelagem matemática básica. Chega o momento da modelagem física de todo o processo. Tal modelagem será aplicada por meio de um programa de simulação a elementos finitos.

### 3.7 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

A elaboração do modelo em elementos finitos envolve a decisão entre as seguintes análises possíveis:

- Em duas ou três dimensões;
- Estática, ou no domínio do tempo;
- Cartesiana ou cilíndrica.

O modelo em estudo foi elaborado através de uma representação cilíndrica e em três dimensões, pois se trata de um modelo com efeitos de borda consideráveis, e que não apresenta simetria axial.

Na modelagem por elementos finitos, o domínio onde as equações físicas são aplicadas é discretizado em pequenas regiões chamadas elementos. No caso tridimensional (que é o caso em estudo), as unidades básicas desses elementos constituem-se geralmente por tetraedros. No caso bidimensional, triângulos. Os vértices das unidades básicas são chamados de nós, e estão associados aos graus de liberdade previstos para o elemento. O conjunto de elementos que compõem todo o domínio é chamado de malha.

Cada um dos elementos é distinto. Por isso, a modelagem física por elementos finitos estabelece um sistema de equações que considera todos os elementos infinitesimais discretizados no modelo. Quando se considera que cada elemento possui uma função de forma para cada um dos seus nós, a avaliação das integrais para cada elemento leva a um número de equações igual ao número de nós. Por isso, quanto mais

refinada for a malha, maior o esforço computacional empregado. Em contrapartida, melhor será a representação física do modelo. A modelagem será mais abrangente.

Uma vez que as equações são montadas no sistema de equações, procedimentos iterativos são elaborados para a determinação das características ao longo da solução do mesmo. Dois métodos iterativos são propostos:

- Método das aproximações sucessivas: Neste método, determina-se de forma iterativa o valor do parâmetro que se quer obter em cada elemento que compõe a malha. A partir de valores iniciais, que variam conforme a física do processo, definidos para toda a malha, calcula-se o parâmetro desejado. Este procedimento é repetido até a convergência, que costuma ser lenta.
- Método de Newton-Raphson: Neste método, técnicas de interpolação polinomial, exponencial ou de outros tipos são aplicadas. A convergência deste método é mais rápida que a obtida com o método das aproximações sucessivas, uma vez que a solução é obtida a partir das tangentes ao invés da linearização das características físicas.

Deve haver uma compensação entre a confiabilidade dos resultados obtidos e o esforço computacional demandado. Simulações desse tipo consomem muito tempo e memória. Para cálculos de campo, é aconselhável o refinamento da malha tão quanto seja possível. No caso de modelos dinâmicos, onde a física altera em função do tempo, elementos finitos muito pequenos podem levar a erros de convergência, caso as condições de contorno não estejam bem definidas. Para tal, deve-se haver um conhecimento profundo da física que envolve o processo.

## 4 MÉTODOS

O método que será descrito visa à simulação 3D estática de um gerador que tem parte móvel com ímãs permanentes a ela colados. O centro da parte móvel é constituído de aço de médio carbono recozido, considerado na simulação como ideal (sem perdas). O estator deve ser constituído do mesmo material de alta permeabilidade. O centro está rodeado por dois grupos de quatro blocos. Tais blocos tem curvatura cilíndrica, e representam os ímãs. Os ímãs permanentes são definidos como samário e cobalto (SmCo), que tem valor de fluxo remanente igual a 0.84 [T]. O estator confina o campo e cria caminhos fechados para o fluxo magnético. O fluxo enlaça quatro bobinas dispostas ao longo do estator. Os enrolamentos são enrolados em torno dos polos do estator. O desenho do gerador é obtido através do software de CAD 3D *Inventor*<sup>®</sup>.

### 4.1 DECOMPOSIÇÃO DO PROBLEMA

A física aplicada a este modelo calcula o potencial escalar magnético,  $V_m$ . Convenciona-se que as correntes podem ser ignoradas, o que é válido quando os terminais do gerador estão em aberto. Tal condição aplica-se ao nosso caso, já que se trata de uma simulação estática, e não há correntes induzidas. A equação para  $V_m$  torna-se:

$$-\nabla \cdot (\mu \nabla V_m - \mathbf{B}_r) = 0 \quad (4.1)$$

O centro da parte móvel e o estator são feitos de aço de médio carbono recozido, e é implementado como uma função de interpolação da Curva-BH do material (Figura 12).

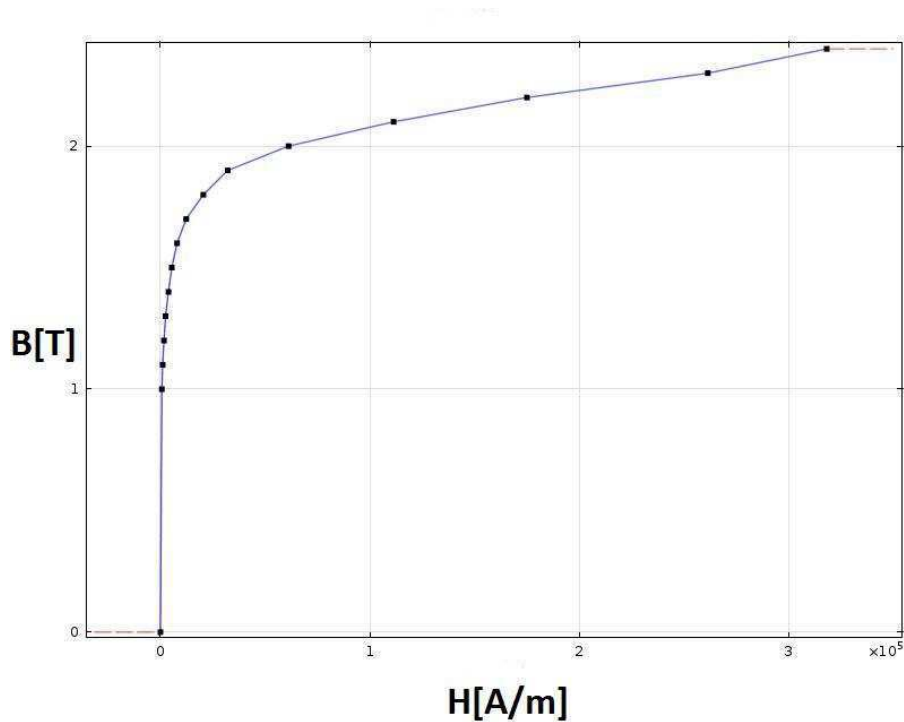


Figura 12 - Função de interpolação da Curva BH para o aço de médio carbono recozido.

É necessário definir uma área de confinamento de ar, onde o gerador será inserido. Isto cria as disposições de ar na peça, de modo a definir o entreferro, as áreas onde os cálculos de fluxo de fuga serão efetuados e regiões de alta relutância. O tamanho desta área deve ser bem maior que o gerador, para que a dispersão de fluxo no ar seja fielmente representada. Deve ter formato cilíndrico, e pode ser observada na Figura 13.

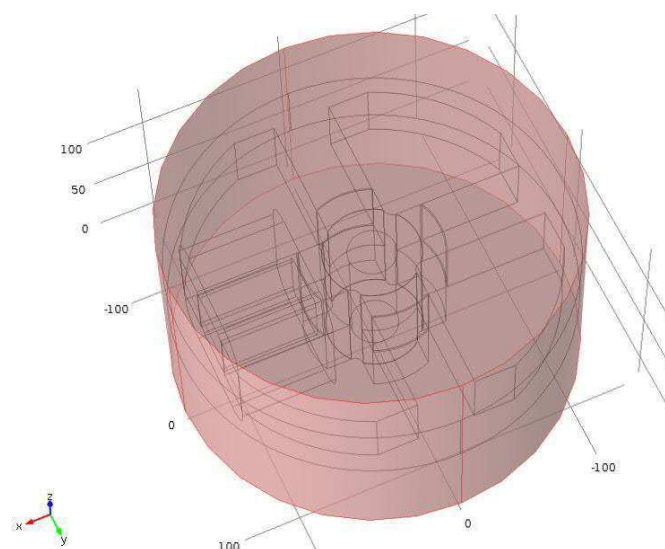


Figura 13 – Área cilíndrica de ar (em vermelho), que define as regiões de entreferro e as áreas de alta relutância.



A modelagem física no processo de simulação considera condições de contorno e as características pontuais para uma modelagem magnetostática. Deve ser adicionado aos domínios equações para solução do potencial magnético neles, definir propriedades do material e a relação constitutiva para a densidade de fluxo magnético. A princípio, está sendo desconsiderado o cálculo de corrente induzida. Os domínios aos quais essa física deve aplicada podem ser vistos na Figura 14, a camada de ar e o domínio que limita a bobina ficam de fora.

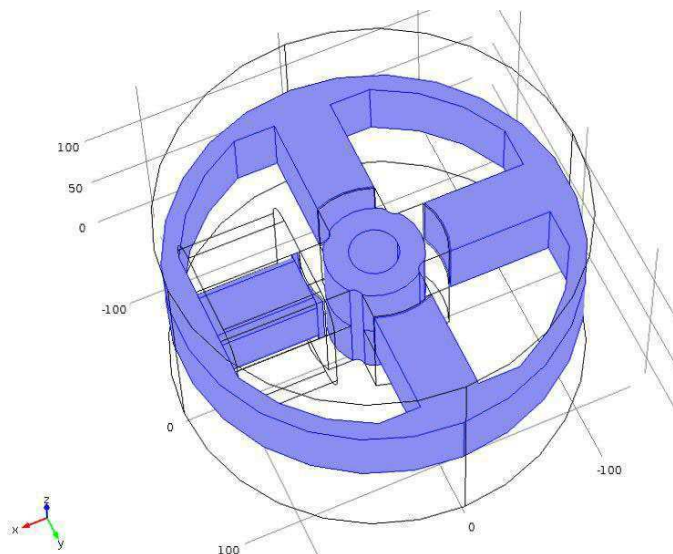


Figura 14 – Domínios correspondentes ao aço de médio carbono recozido onde serão calculado valores do potencial magnético.

O sistema de coordenadas adotado é o sistema cilíndrico. Consiste em um sistema de referenciamento que permite a localização de um ponto qualquer em um espaço de formato cilíndrico. Isto é possível através de um conjunto de três valores, chamados coordenadas cilíndricas. O sistema de coordenadas cilíndricas está apresentado na Figura 15.

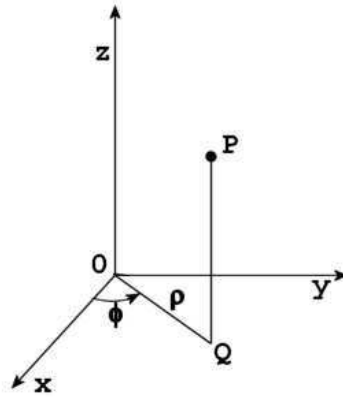


Figura 15 - Sistema de coordenadas cilíndricas.

Por convenção, as coordenadas retangulares podem ser obtidas a partir das cilíndricas como:

$$x = r \cos \phi \quad (4.2)$$

$$y = r \sin \phi \quad (4.3)$$

$$z = z \quad (4.4)$$

Podemos definir relações inversas de modo a obter coordenadas cilíndricas a partir das retangulares:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (4.5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (4.6)$$

$$z = z \quad (4.7)$$

Alguns parâmetros fundamentais devem ser definidos. São valores de permeabilidade, fluxo remanente e cálculo de raio na geometria. Tais parâmetros e a forma como eles foram definidos no programa estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Definição de parâmetros

| Nome    | Valor    | Descrição                        |
|---------|----------|----------------------------------|
| $B_r$   | 0,84 [T] | Fluxo remanente nos ímãs         |
| $\mu_r$ | 1,05     | Permeabilidade relativa dos ímãs |

A física aplicada os domínios dos ímãs (Figura 25) é definida, seguindo as equações:

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m \quad (4.8)$$

$$\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \mathbf{H}) = 0 \quad (4.9)$$

E a relação constitutiva para a densidade de fluxo magnético:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (4.10)$$

Sendo o vetor  $\mathbf{B}_r$  definido como positivo para dois ímãs em eixos diferentes, caracterizando o polo positivo. Um novo vetor contendo valores iguais em módulo, mas contrários no sinal, para os outros dois ímãs que restarem. Desta forma, os ímãs no mesmo eixo terão magnetização contrária. Considera-se a condutividade elétrica dos ímãs como sendo 0, e a permeabilidade relativa como 1,05. Os domínios definidos como ímãs permanentes são mostrados na Figura 16.

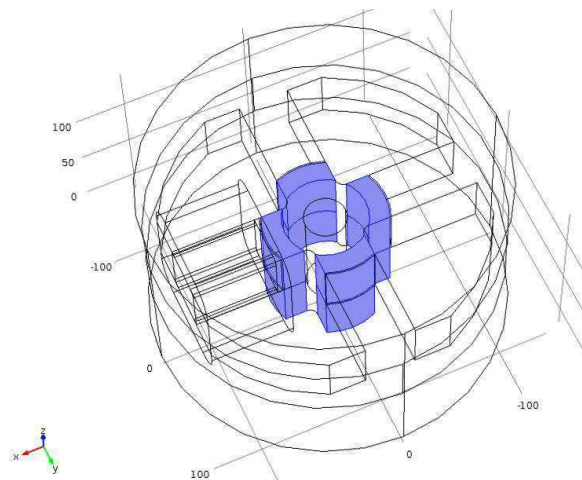


Figura 16 - Domínios definidos como ímãs permanentes onde será aplicada a relação constitutiva da densidade de fluxo magnético.

Outro aspecto importante diz respeito ao refinamento da malha computacional. Define-se o tipo e tamanho dos elementos infinitesimais que vão compor a geometria, de modo a contemplar todas as partes da estrutura, da menor à maior. Para a simulação em questão, o recomendado é uma geometria de elemento infinitesimal como sendo do tipo tetraedral. O tamanho pode variar entre fino e muito fino, a depender da capacidade

computacional disponível. A Figura 17 mostra a geometria depois do refinamento da malha e a divisão em pedaços infinitesimais.

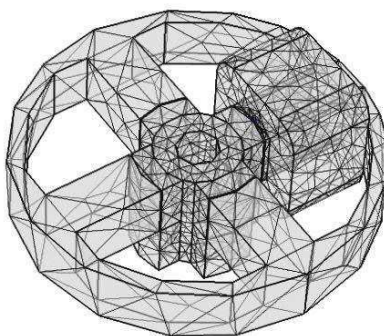


Figura 17 – Geometria após o refinamento da malha e a divisão em pedaços infinitesimais.

O cálculo para estudo da distribuição estática de fluxo na máquina tem uma modelagem definida. A problemática surge quando se tem que aliar essa distribuição a um movimento linear. À medida que a posição da parte móvel se altera, a distribuição de fluxo também muda. É necessária, então, a definição de algumas condições de fronteira de continuidade, que permitam o cálculo de distribuição de fluxo para as várias posições da parte móvel da máquina.

## 5 RESULTADOS

Após a implementação da física de todo o processo, e a definição dos domínios correspondentes, foi possível realizar uma simulação computacional. A Figura 18 nos mostra uma visão geral da densidade de fluxo magnético normalizado na peça. Esta simulação foi feita utilizando elementos infinitesimais do tipo tetraedral. O tempo de resolução usando um processador Intel i7 é de 17 s. A malha consiste de 15056 elementos. A simulação contou com 20497 graus de liberdade.

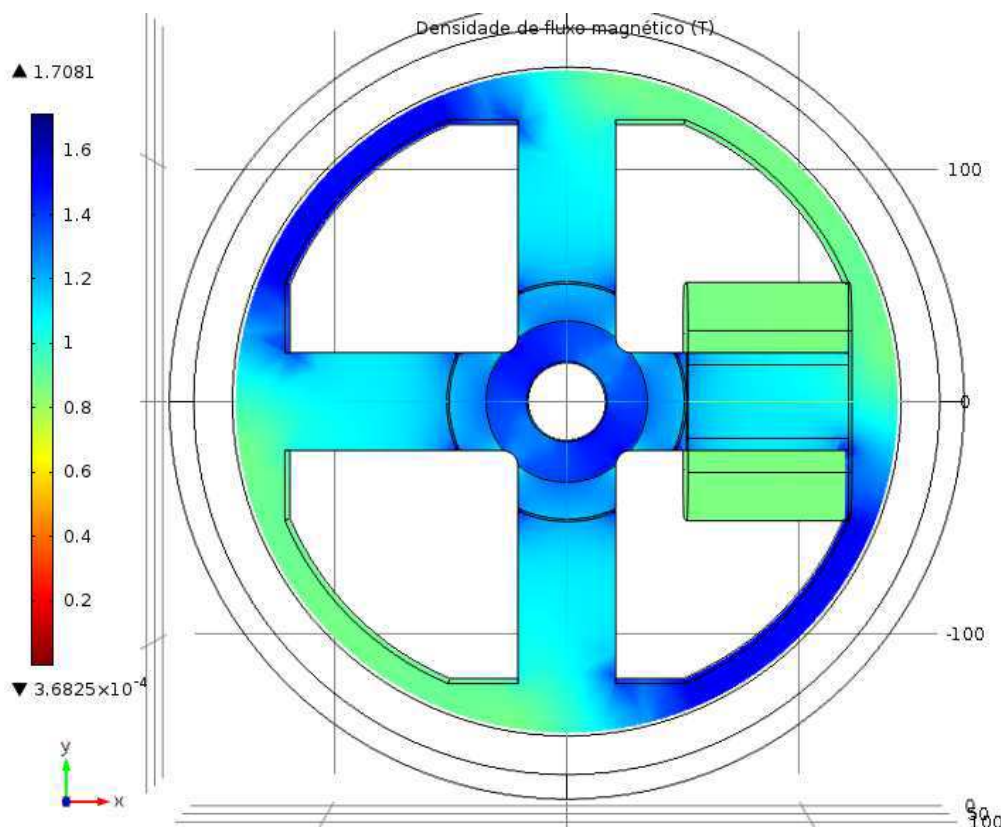


Figura 18 – Visão geral da distribuição da densidade de fluxo normalizado no estator do gerador.

Essa distribuição de fluxo tem sentido físico. Os ímãs no mesmo eixo possuem magnetização contrária. A geometria simétrica da peça cria caminhos fechados para as linhas de fluxo ao longo da estrutura. A densidade de fluxo próximo a 1 T nas regiões onde as bobinas serão colocadas.

Considerando a densidade de fluxo magnético uma grandeza vetorial, faz-se necessária uma representação vetorial da sua distribuição ao longo da peça. É possível observar as linhas de fluxo no estator da máquina na Figura 19, que corresponde a uma vista do plano xy.

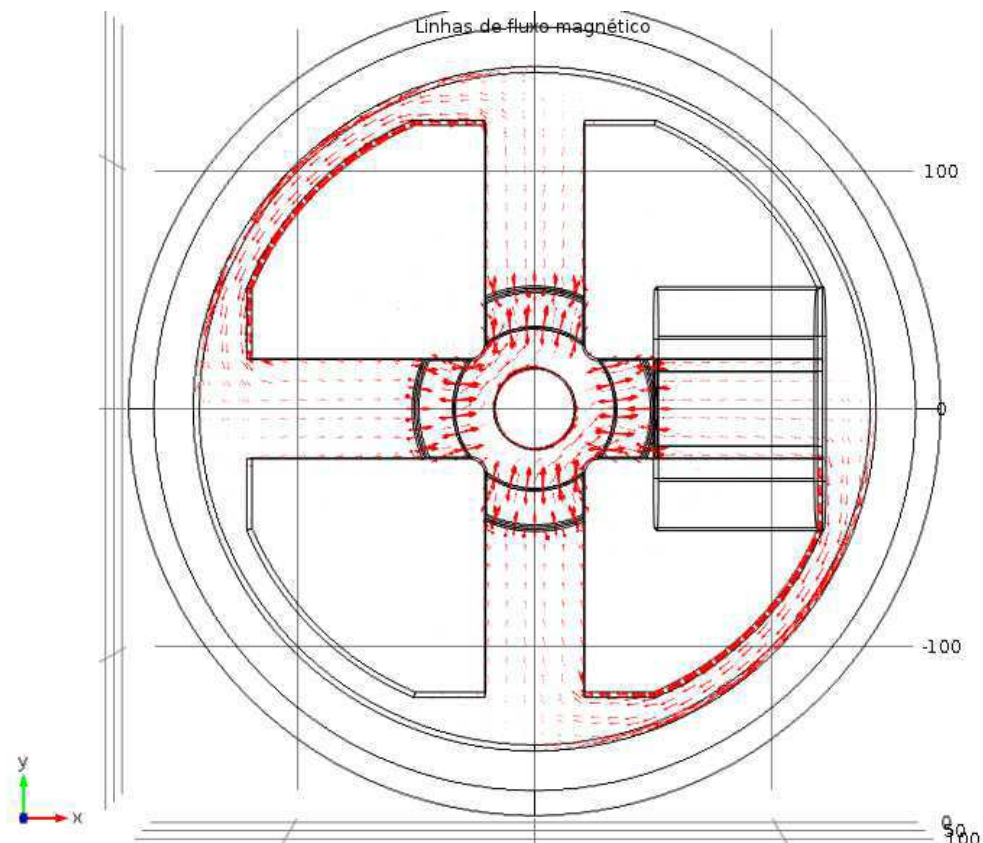


Figura 19 - Linhas de fluxo no estator. Vista do plano xy.

Há pontos da peça em que a densidade de fluxo é maior (pontos da Figura 21), com valores próximos a 1,7 T. Isto pode ser explicado levando também em consideração a influência dos ímãs inferiores na quantidade de fluxo na peça. Este fenômeno é mostrado na Figura 20, que corresponde a uma vista ampliada do plano zy. Essa influência deve ser considerada no momento de definir o circuito magnético equivalente, e fazer considerações de saturação.

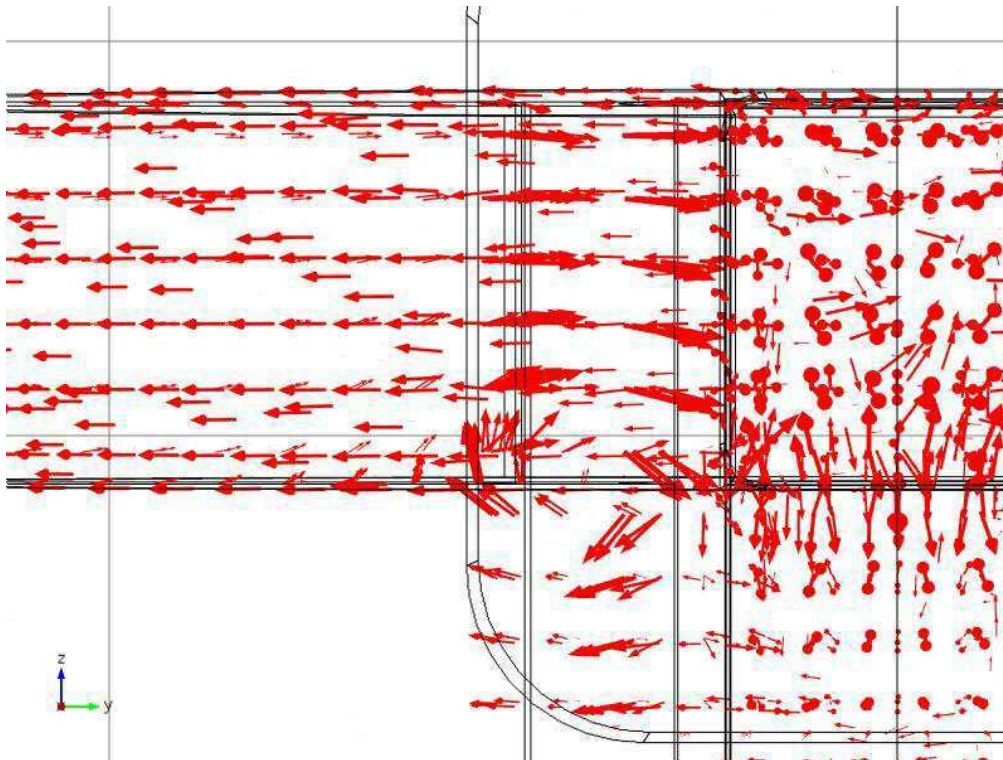


Figura 20 - Influência dos ímãs inferiores na distribuição de fluxo, que contribui para o aumento da densidade de fluxo em certos pontos da geometria.

A Figura 21 é obtida a partir da Figura 18, com o acréscimo de três pontos em três regiões de alto valor de densidade de fluxo (1,7 T). Esses níveis são atingidos devido às linhas de campo provenientes dos ímãs inferiores, ao estreitamento do estator em alguns segmentos da peça, e a proximidade com o entreferro.

O ponto 1, correspondente à parte móvel da máquina apresenta alta concentração de fluxo devido à influência dos quatro pólos do ímã. O caminho de todas as linhas de fluxo passa por essa região. O ponto 2, na extremidade de um dos braços estatóricos apresenta alta concentração de fluxo devido à proximidade com o entreferro e com o ímã. Além disso, há uma contribuição de fluxo vindo dos ímãs inferiores, que se manifestam prioritariamente nesta região. A alta concentração de fluxo no ponto 3, parte mais estreita do estator deve-se justamente ao estreitamento da peça. As linhas de fluxo são concatenadas por motivo da diminuição da área de ferro, isto leva a uma maior densidade de fluxo magnético naquela região.



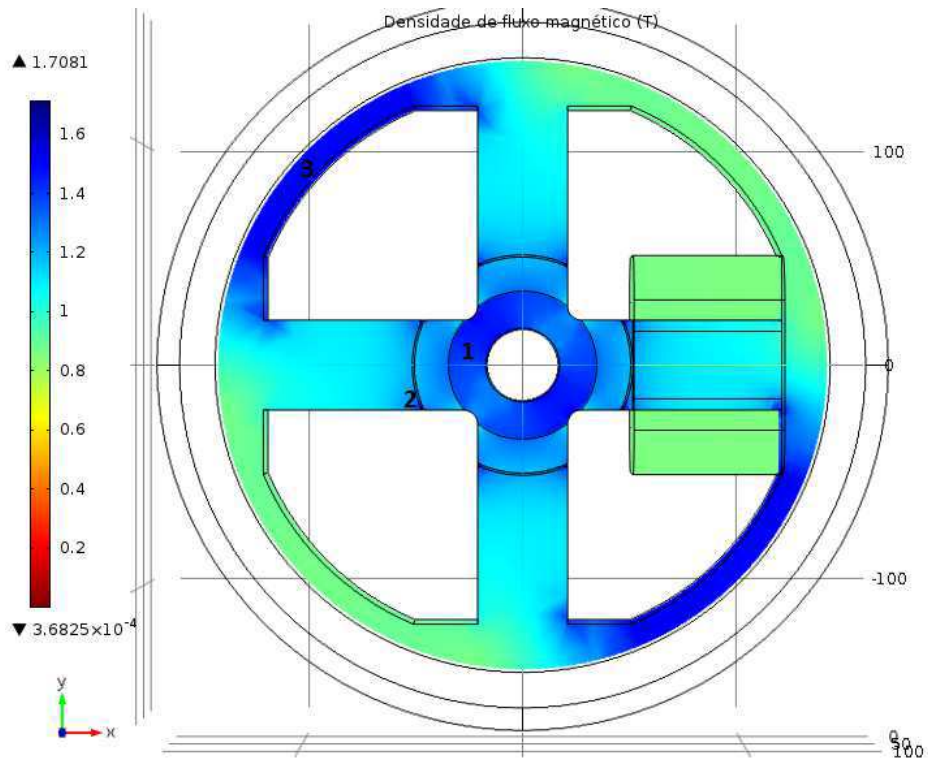


Figura 21 – Pontos onde o valor da densidade de fluxo chega a 1,7 T, pois sofrem influência dos ímãs inferiores, do estreitamento da peça ou da proximidade com o entreferro.



## 5.1 DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO AO LONGO DA POSIÇÃO DO ÍMÃ

Um resultado importante é a observação da distribuição de fluxo na peça em função da posição espacial dos ímãs. As Figuras 22, 23 e 24 indicam o caminho do fluxo magnético para três posições: 0, 22,5 e 45 mm. São obtidas a partir de uma vista do plano zy. Esta simulação foi feita utilizando elementos infinitesimais do tipo tetraedral. O tempo de resolução usando um processador Intel i7 é de 20 s. A malha consiste de 15056 elementos. A simulação contou com 18786 graus de liberdade.

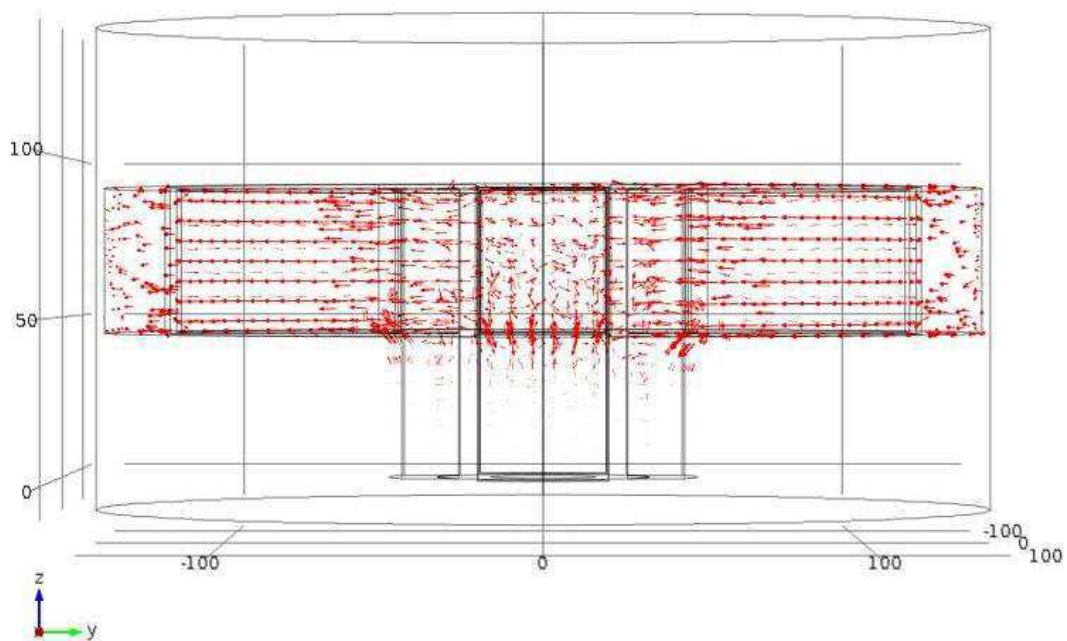


Figura 22 - Distribuição de fluxo para a posição 0 mm.

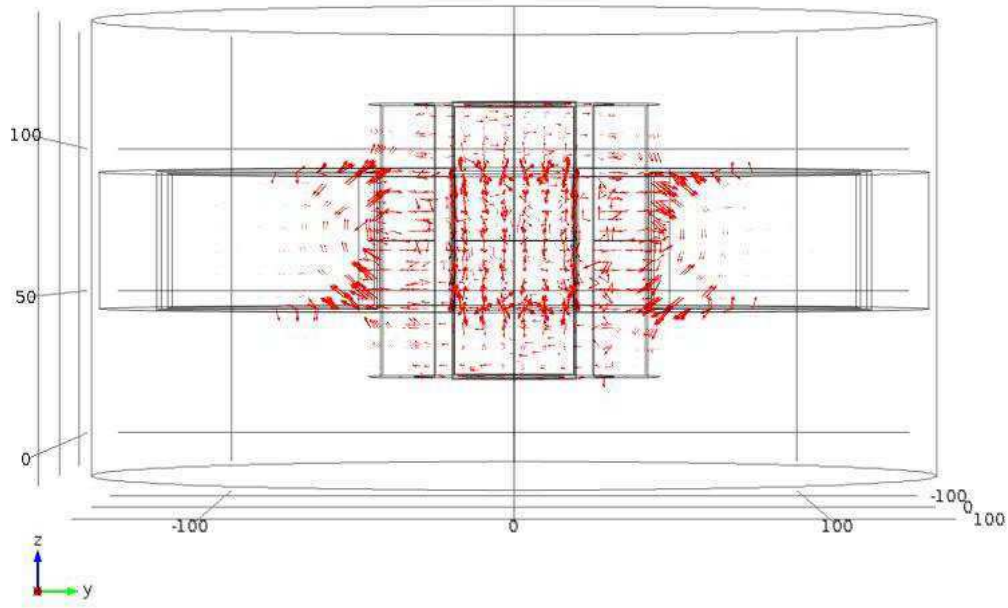


Figura 23 - Distribuição de fluxo para a posição 22,5 mm.

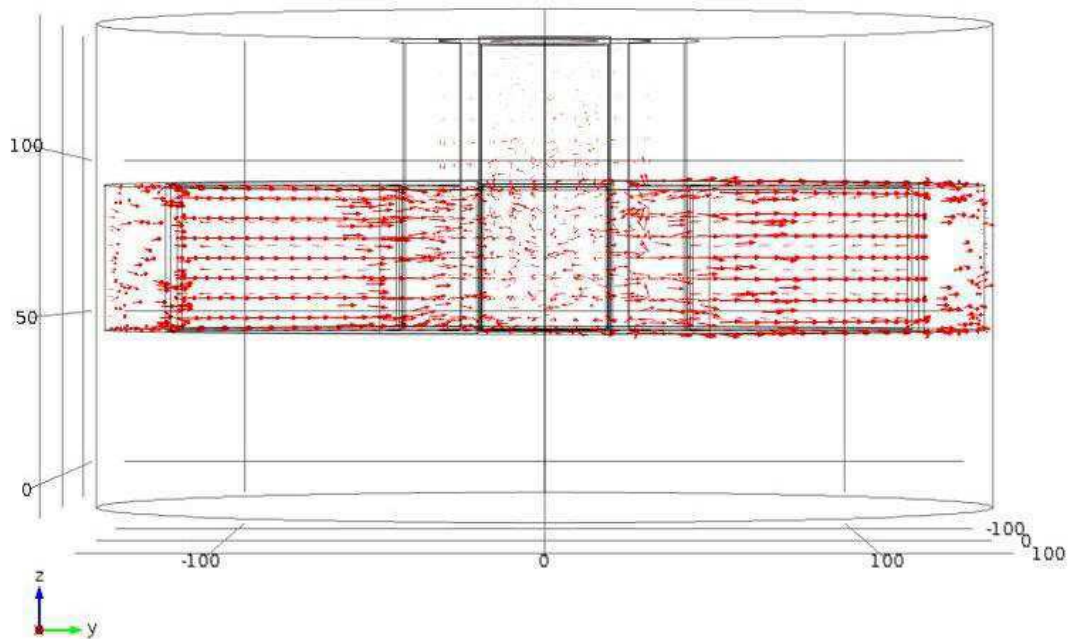


Figura 24 - Distribuição de fluxo para a posição 45 mm.

Analisando as figuras, percebe-se, na posição 0 mm, a influência dos ímãs inferiores na quantidade de fluxo da peça. Na posição 22,5 mm, que é a posição média de deslocamento, o fluxo total na peça se anula. Isto é coerente, pois há influência dos

ímãs superiores e inferiores na peça, com vetores de fluxo contrários, o que leva a anulação do fluxo. No outro extremo, na posição 45 mm, nota-se a distribuição máxima de fluxo na peça. Percebe-se que a influência dos ímãs inferiores, que não estão em contato magnético com o estator, já não é tão grande como na posição 0 mm. A partir dessa variação de fluxo em função da posição da parte móvel, é possível levantar uma curva que relaciona o fluxo máximo em um ponto da peça com a posição da parte móvel.

## 5.2 VARIAÇÃO DE PARÂMETROS AO LONGO DA EXTENSÃO DO ÍMÃ

A partir da inserção de uma linha de corte através de um dos pólos de um dos ímãs, é possível observar o comportamento do campo magnético e da densidade de fluxo ao longo da extensão deste. A Figura 25 mostra como é posicionada esta linha de corte.

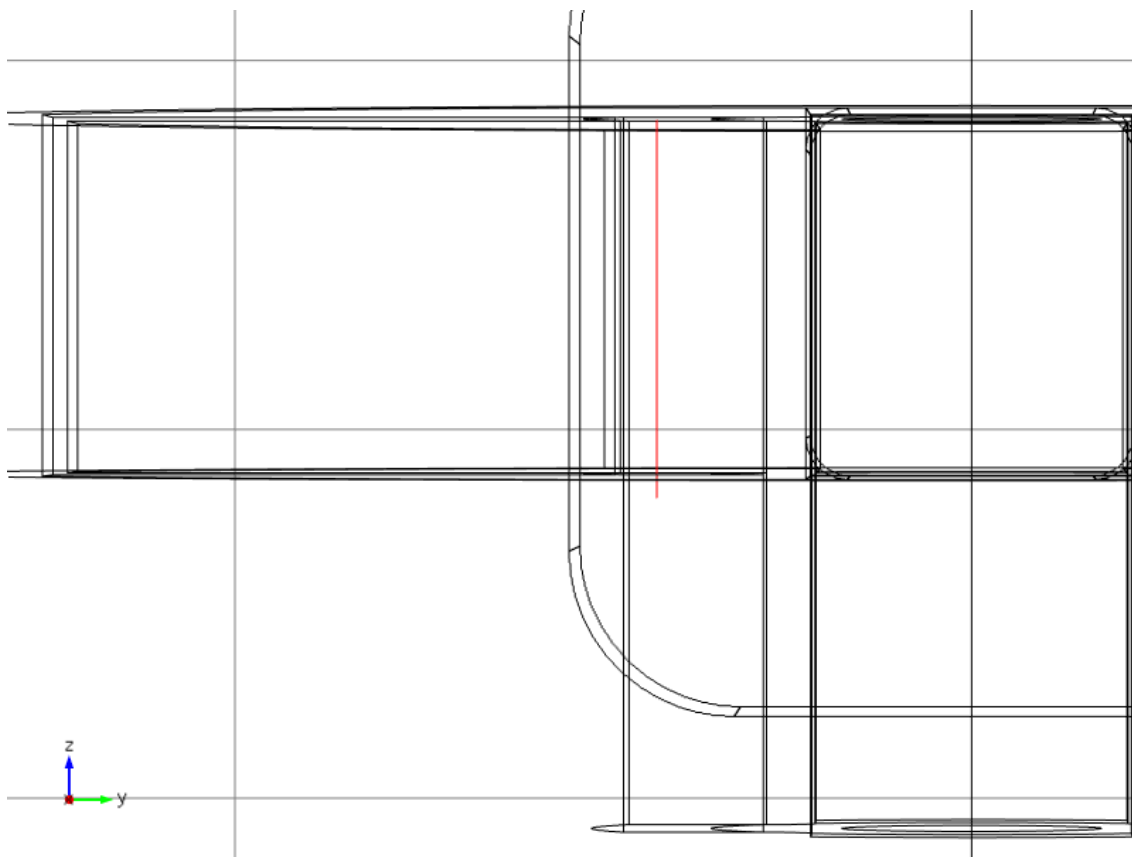


Figura 25. Linha de corte na cor vermelha posicionada ao longo de um dos pólos do ímã para cálculo da distribuição de campo e de densidade de fluxo.

A Figura 26 mostra o comportamento do campo magnético ao longo da extensão do ímã. Em uma perspectiva ideal, a curva seria de valores constantes. Mas o resultado da simulação depende diretamente do refinamento da malha de simulação. Tal refinamento gera erros de medida, que dependem diretamente do tamanho do elemento infinitesimal para cálculo de campo. Tais erros podem ser amenizados a partir da diminuição da malha de elementos infinitesimais. O comportamento simétrico da curva denota uma consistência física no resultado.

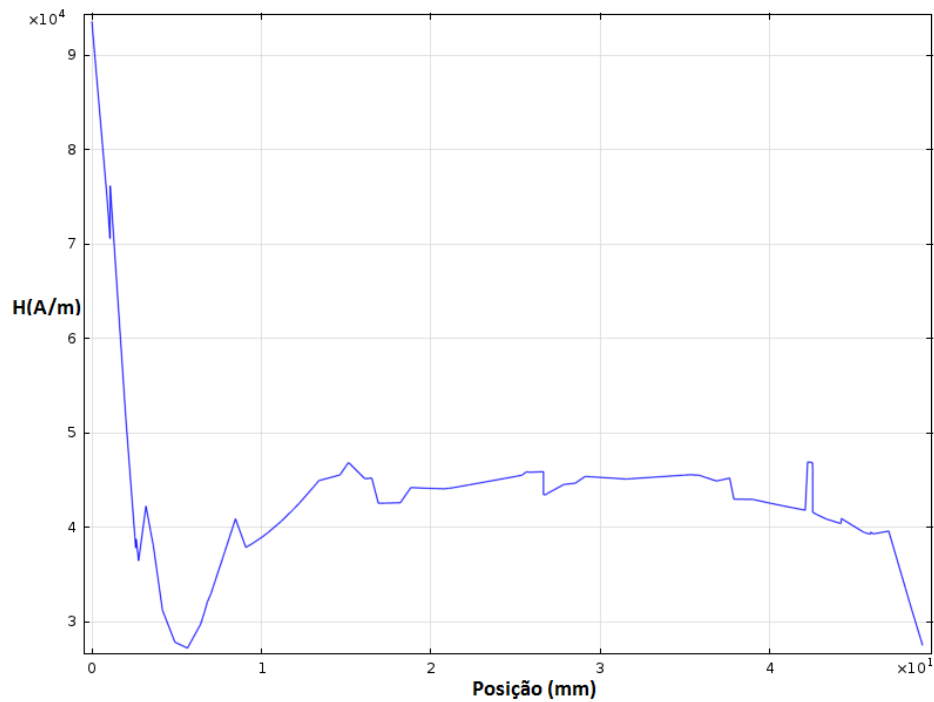


Figura 26. Comportamento do campo magnético ao longo da extensão de um dos pólos do ímã.

A estimação do comportamento do fluxo magnético ao longo da mesma extensão de um dos pólos do ímã superior dá-se a partir dos mesmos pontos usados no campo magnético. Tal comportamento pode ser visto na Figura 27. Assim como no gráfico do campo magnético, o gráfico da densidade de fluxo apresenta pontos dissonantes, quando teoricamente o resultado deveria ser constante. A explicação é a mesma, o refinamento da malha leva à melhora do resultado. O comportamento simétrico denota uma consistência física.

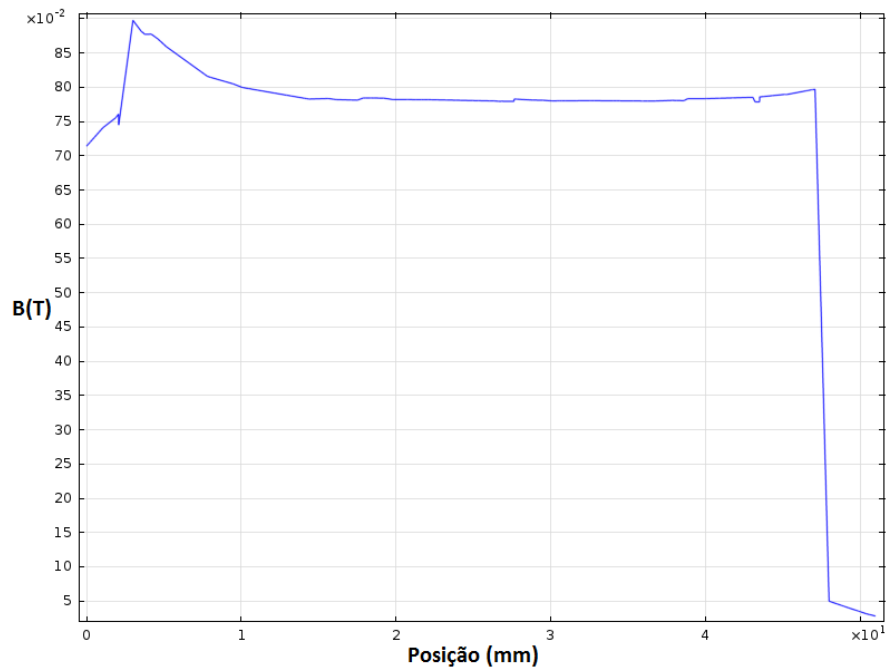


Figura 27. Comportamento do fluxo magnético ao longo da extensão de um dos pólos do ímã.

Considerando um deslocamento da parte móvel para a posição 22.5 mm, e traçando novamente uma linha de corte na posição indicada na Figura 28, é possível analisar o comportamento do campo magnético na extensão do ímã, bem como a densidade de fluxo.

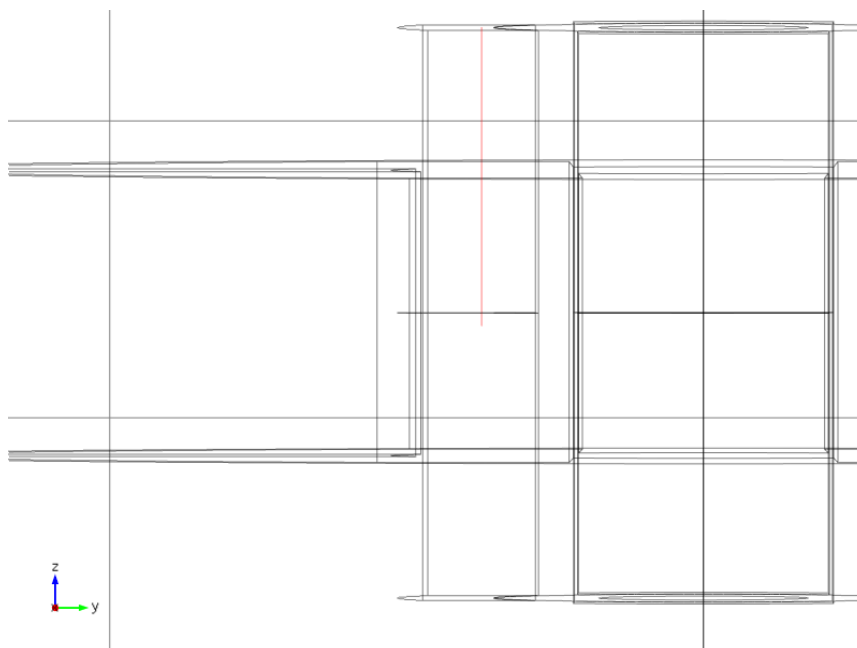


Figura 28. Linha de corte na cor vermelha posicionada ao longo de um dos pólos do ímã para cálculo da distribuição de campo e de densidade de fluxo na posição 22.5mm.

A Figura 29 mostra o comportamento do campo magnético ao longo da extensão do ímã para a posição de eixo em 22.5 mm. O resultado apresenta uma variação grande do no começo da extensão do ímã. Esse fato pode ser explicado devido à influência de uma parte dos ímãs inferiores que também estão em contato magnético com o estator. O valor de campo diminui muito nas posições extremas, fato explicado pela perda do contato magnético nessa região.

O gráfico é plotado a partir de uma função de interpolação que pega valores de densidade de fluxo ou de campo magnético para pontos segregados ao longo da linha de corte. A qualidade da representação vai depender do espaçamento entre os pontos da linha de corte. Tal espaçamento depende diretamente do refinamento da malha computacional. Com elementos infinitesimais cada vez menores, é possível uma representação mais clara, e com menos picos. O gráfico apresentado mostra duas curvas. No momento da compilação, o programa faz dois processos de cálculo, e armazena os valores. As duas curvas são mostradas de modo comparativo, evidenciando alguns pontos de convergência diferentes. Tal fato se dá devido à maneira como a malha foi refinada. O uso de elementos infinitesimais menores diminui o erro entre as duas curvas.

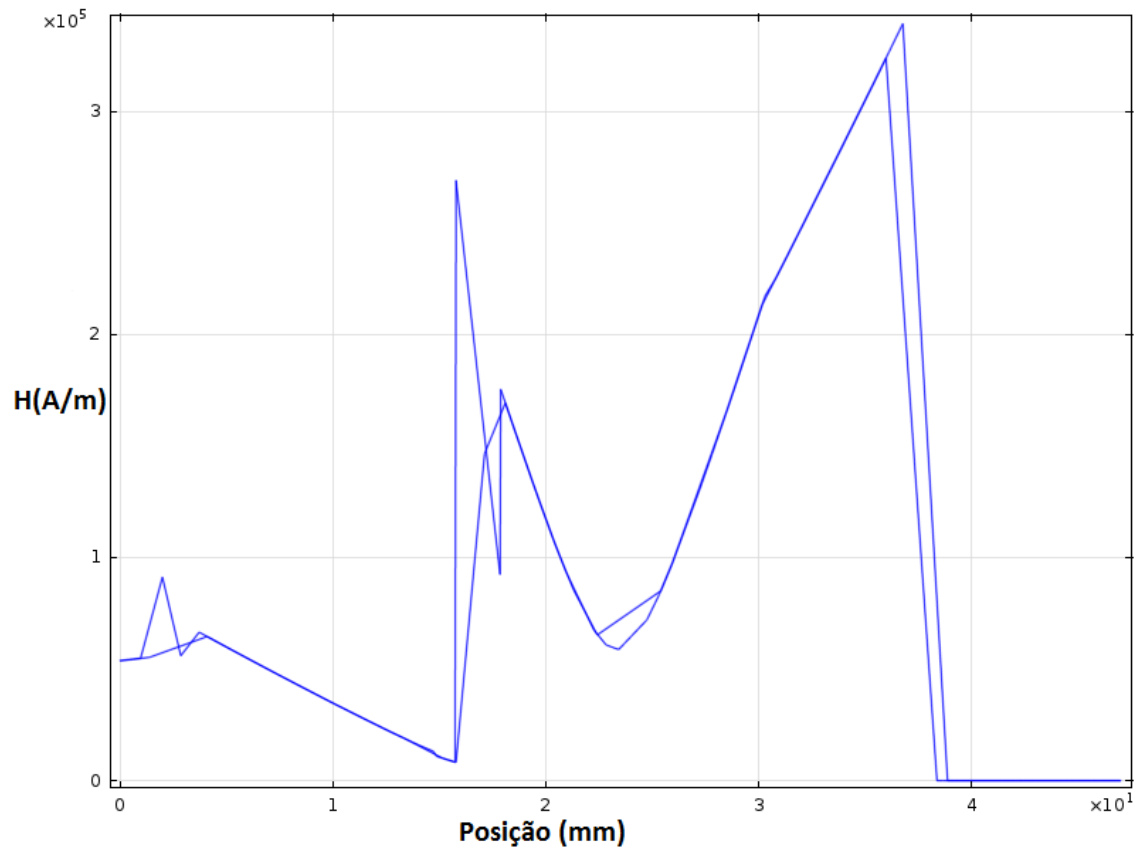


Figura 29. Comportamento do campo magnético ao longo da extensão de um dos pólos dos ímãs para a posição de eixo 22.5mm.

A distribuição da densidade de fluxo ao longo da extensão de um dos pólos do ímã pode ser observada na Figura 30. A linha de corte é a mesma utilizada no caso do campo magnético.



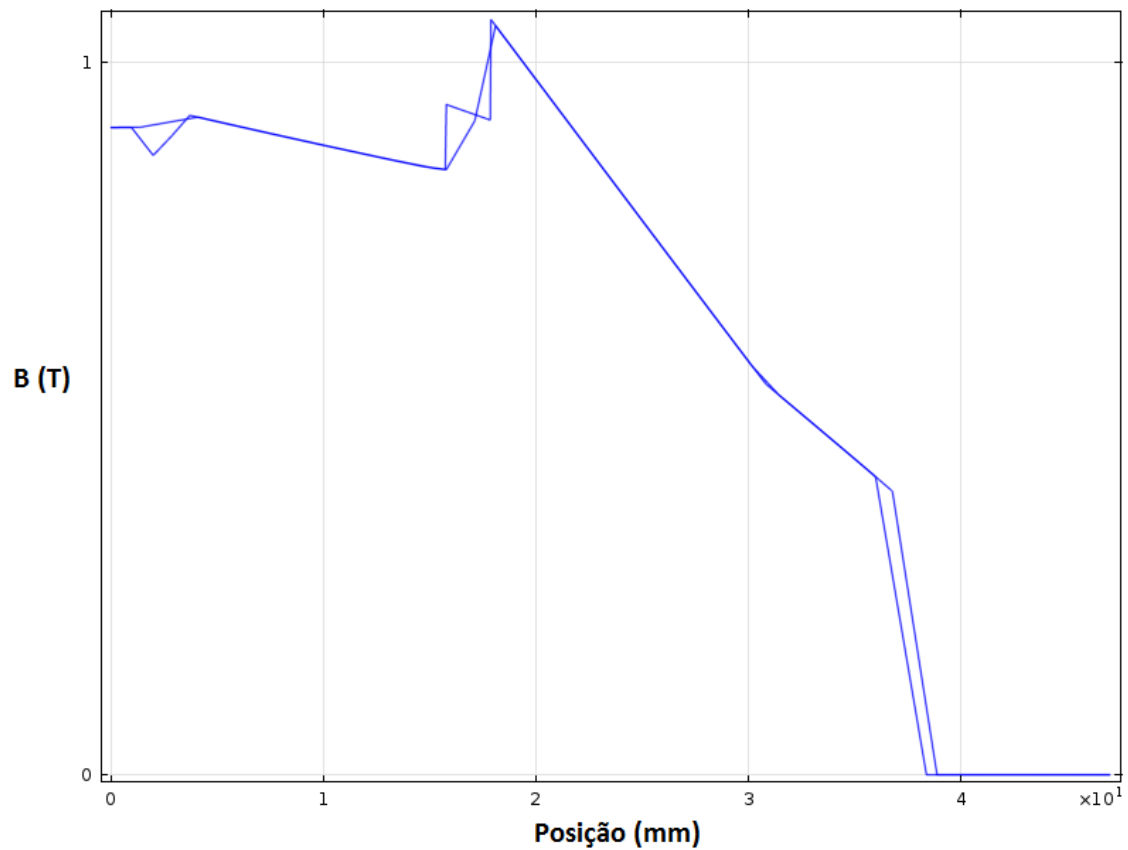


Figura 30. Comportamento da densidade de fluxo ao longo da extensão de um dos pólos dos ímãs para a posição de eixo 22.5mm.

Assim como no caso da demonstração de campo magnético ao longo da extensão do ímã, a distribuição da densidade de fluxo também varia muito. Tem valores altos nos primeiros centímetros do ímã, devido à interação dos ímãs inferiores. Em contrapartida, se estabiliza em um valor baixo na parte do ímã que está fora do contato magnético com o estator.

## 6 CONCLUSÃO

O levantamento do estado da técnica sobre as topologias de máquinas lineares a ímãs permanentes possibilitou a identificação dos parâmetros principais de cada máquina. O resultado dessa análise foi a escolha do gerador de curso curto para ser tratado ao longo do trabalho. Logo se verificou que a geometria particular desse tipo de estrutura impõe grandes modificações nos processos clássicos de projeto e construção de máquinas elétricas.

O processo de funcionamento da máquina primária foi estudado, e um sistema para simulá-la a partir de um movimento rotativo foi proposto. O resultado da análise do circuito magnético foi a proposição de um circuito magnético equivalente. Isto possibilitou a identificação das variáveis de acoplamento entre o sistema mecânico e o magnético.

A necessidade prioritária era uma simulação computacional da máquina, para uma análise mais minuciosa dos fatores que a descrevem. Houve uma ponderação sobre qual estilo de simulação adotar, optando pelo modelo 3D, que considera comportamentos magnéticos característicos da geometria, e que são suprimidas em simulações 2D.

De posse da simulação computacional, confirmou-se uma simetria na distribuição de fluxo ao longo da máquina em regime estático. Fato que a teoria já havia descrito. Percebeu-se, ainda, a influência dos ímãs inferiores na distribuição de campo e densidade de fluxo, que é um dado importante e precisará ser considerado nas etapas de refinamento do modelo e construção para testes, pretendidas em trabalhos futuros. Observou-se, ainda, que há pontos ao longo do estator em que a densidade de fluxo é maior. Esse fato se dá, principalmente, devido a influência dos ímãs inferiores, a proximidade com o entreferro, e ao fato que todas as linhas de fluxo passam pela parte móvel da máquina. Outra etapa da simulação foi analisar a distribuição de campo e fluxo para três posições da parte móvel da máquina. Com isso foi possível ter uma noção de que como se dá o comportamento dinâmico da máquina. Outros resultados mostram a variação do campo magnético e da densidade de fluxo ao longo dos ímãs da máquina. O resultado mostra uma curva simétrica com consistência física, porém muito

oscilante. Constatou-se, então, que é preciso um maior refinamento da malha para obtenção de resultados mais realísticos.

O trabalho pretendia, ainda, uma etapa de simulações dinâmicas, onde o movimento da parte móvel da máquina seria descrito por uma função seno. Entretanto, houve problemas de convergência, e este passo não foi completado. A simulação dinâmica nos possibilitaria os cálculos de correntes e tensões induzidas. Além disso, não foi possível fazer o refinamento do modelo, de modo a definir alguns parâmetros que melhorem o modelo. As etapas de construção de um protótipo e testes experimentais também não foram concluídas.

Os trabalhos futuros pretendem completar a etapa de simulação. Depois, objetiva-se a construção de um modelo e uma plataforma experimental, para testes de conceito. O último passo é a implementação de sistemas de eletrônica de potência e de controle para utilização do gerador em sistemas de geração distribuída.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] FITZGERALD, A. E.; JUNIOR, C. K.; UMANS, S. D. *Máquinas elétricas*. 6ª edição. Editora Bookman. 607 p.
- [2] BOLDEA, I.; NASAR, S. A. – *Linear Electric Actuators and Generators*. Cambridge University Press, New York, 1997.
- [3] FERREIRA, A. P. S. – *Projecto de uma máquina de ímanes permanentes de fluxo axial orientado para os sistemas de conversão de energia eólica*. Dissertação (Doutorado), Setembro 2011.
- [4] CONCKER, G., E. – *Projeto de motor de ímã permanente utilizando ferrite na configuração de ímãs enterrados*. Dissertação (Mestrado), Julho de 2008.
- [5] SCHUTTER, J. - *Optimisation of a transverse flux linear PM generator using 3D Finite Element Analysis*. Dissertação (Mestrado), Dezembro 2011.
- [6] BEIRÃO, G. F. - *Protótipo de um Gerador Linear para Aproveitamento de Energia das Ondas num Sistema AWS*. Dissertação (Mestrado), Maio 2010.