



Análise de um Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes através do Método dos Elementos Finitos para Sistemas de Conversão de Energia Eólica

Dalila Mosko Koslinski

Trabalho orientado por:

Prof^ª. Dra. Ângela Paula Ferreira

Prof. Dr. José Fabio Kolzer

Bragança, Portugal

2021/2022



Análise de um Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes através do Método dos Elementos Finitos para Sistemas de Conversão de Energia Eólica

Dalila Mosko Koslinski

Dissertação apresentada à Escola de Tecnologia e Gestão de Bragança para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial no âmbito do acordo de Dupla Diplomação com a UTFPR. Este trabalho foi orientado pela professora Dra. Ângela Paula Ferreira, do IPB, e pelo professor Dr. José Fábio Kolzer, da UTFPR.

Bragança, Portugal

2021/2022

"Somos do tamanho dos nossos sonhos."

- *Fernando Pessoa*

Dedicatória

Dedico esse trabalho a minha mãe Elice,
a mulher mais forte e batalhadora que já conheci.

Agradecimentos

Esse trabalho não teria sido realizado sem o amor e incentivo incondicional da minha família. Mãe e Felype, obrigada por todo o suporte e incentivo, por sempre acreditarem em mim quando eu mesma duvidei, vocês são minha base e jamais conseguiria sem vocês.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e o Instituto Politécnico de Bragança (IPB) pela parceria firmada, a oportunidade de participar do programa de dupla-diplomação foi enriquecedora e jamais será esquecida.

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dra. Ângela Ferreira e Prof. Dr. José Fabio Kolzer, pela atenção, orientação e conhecimento compartilhados nesta etapa.

Um agradecimento as minhas amigas de longa data Bruna e Gabriela, que mesmo no Brasil sempre torceram pelo meu sucesso e me incentivaram a cruzar o oceano para trilhar um novo caminho e seguir meus sonhos.

Madu, Renann, Amanda, Nathan e William, meus colegas de apartamento, obrigada por dividirem esse tempo de intercâmbio comigo e tornarem a nossa casa um lugar de paz, aprendizado diário e de muito apoio.

Às amizades que fiz aqui, Mariah, Isadora, Jaqueline, Lize, Elias, Lucas, Gabriel, Marcelo, Vinícius. Obrigada por todos os momentos vividos durante esse período, certamente meus dias foram mais felizes com a companhia de vocês, carregou vocês no meu coração.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho e que participaram da minha formação acadêmica.

Resumo

O foco desse trabalho é o estudo do gerador síncrono de ímãs permanentes para aplicação eólica. O gerador possui fluxo radial, ímãs de NdFeB fixados a superfície do seu rotor e polos lisos. A máquina de ímãs permanentes possui pequeno tamanho e boa densidade de potência, elevado número de polos e baixa velocidade garantindo um melhor aproveitamento energético, já que não há necessidade de uso de caixa redutora de velocidade.

Os ímãs de terras raras possibilitam aumentar a densidade de potência dos geradores devido ao seu elevado produto energético. A desvantagem do uso de ímãs de NdFeB é que esses ímãs possuem um custo mais elevado quando comparado com os outros materiais magnéticos, e a dependência do mercado Chinês para a compra dos ímãs, já que a China é a maior produtora desse material. Esses fatos refletem na necessidade do seu uso eficiente.

Ao longo do trabalho, buscou-se mostrar alguns aspectos importantes no projeto do gerador, os parâmetros iniciais de projeto e dimensionamento geométrico. Algumas variações geométricas do ímã permanente são realizadas e o desempenho do gerador é analisado a partir dessas variações.

O *software* ANSYS® foi a ferramenta escolhida para realizar as análises do gerador. O *software* utiliza o método dos elementos finitos para resolução de problemas e possui elevada precisão nas simulações.

Palavras chave: Gerador Síncrono; Máquinas Elétricas; Método dos elementos finitos; Ímãs Permanentes.

Abstract

The focus of this research is the study of a permanent magnet synchronous generator for wind application. The generator has radial flux, NeFeB magnets attached to the surface of its rotor and non salient poles. The permanent magnet machine has small size and good power density, high number of poles and low speed ensuring better energy utilization since there is no need to use a speed reducer box.

Rare earth magnets make it possible to increase the power density of generators due to their high energy product. The disadvantage of using NeFeB magnets is that these magnets have a higher cost when compared to other magnetic materials, and the dependence on the Chinese market for the purchase of magnets, since China is the largest producer of this material. These facts reflect the need for their efficient use.

Throughout the work, it was tried to show some important aspects in the design of the generator, the initial design parameters and geometric dimensioning. Some geometric variations of the permanent magnet are performed and the performance of the generator is analyzed from these variations.

The ANSYS® *software* was the tool chosen to perform the generator analysis. The *software* uses the finite element method to solve problems and has high precision in the simulations.

Keywords: Synchronous generator; Electrical machines; Finite element method; Permanent magnets.

Conteúdo

Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Siglas e Símbolos	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo geral	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Estrutura do trabalho	4
2 Caracterização da máquina	7
2.1 Topologia do gerador	8
2.1.1 Fluxo Radial	8
2.1.2 Polos lisos	9
2.1.3 Ímãs de superfície	10
2.1.4 Enrolamento do estator	10
2.2 Dimensionamento	11
2.2.1 Especificações do projeto	11
2.2.2 Parâmetros calculados	11

2.2.3	Modelo do rotor	13
2.2.4	Modelo do estator	14
2.3	Modelagem	18
2.3.1	Força eletromotriz - FEM	19
2.3.2	Reação de Armadura	20
2.3.3	Tensão Terminal	21
2.4	Indutância síncrona	23
2.5	Reatância síncrona	24
2.6	Fluxo de fugas	24
2.7	Potência de saída do gerador	25
2.8	Torque induzido no gerador síncrono	26
2.9	Equações de Maxwell	26
2.9.1	Vetor Potencial	28
3	Materiais	31
3.1	Materiais magnéticos	31
3.1.1	Ímãs de terras raras	33
4	Método dos elementos finitos	37
4.1	Método de Galerkin	38
4.2	Condições de Fronteira	39
4.2.1	Condição de Dirichlet	39
4.2.2	Condição de Neumann	40
4.2.3	Condição Periódica	40
4.3	Divisão do domínio	41
5	Resultados	43
5.1	Máquina Original	44
5.2	Distância dos ímãs	46
5.2.1	Simulações a vazio	46

5.2.2	Simulações com carga resistiva	47
5.2.3	Conclusão variação da distância entre os ímãs	48
5.3	Altura dos ímãs	50
5.3.1	Simulações a vazio	50
5.3.2	Simulações com carga resistiva	51
5.3.3	Conclusão variação da altura dos ímãs	53
6	Conclusão e trabalhos futuros	55
6.1	Resumo do trabalho	55
6.2	Trabalhos futuros	56
A	Dimensões da máquina	62
B	Gráficos das simulações no <i>software</i> ANSYS®	65
B.1	Simulações a vazio	65
B.1.1	Variação na altura dos ímãs	65
B.1.2	Variação na distância entre os ímãs	67
B.2	Simulações com carga resistiva	69
B.2.1	Variação na altura dos ímãs	69
B.2.2	Variação na distância entre os ímãs	71

Lista de Tabelas

2.1	Especificações de projeto do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].	12
2.2	Dados geométricos do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].	12
2.3	Dados elétricos do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].	13
3.1	Propriedades magnéticas dos ímãs de NdFeB do gerador.	33
5.1	Tensões de saída a vazio da máquina original.	44
5.2	Dimensões do ímã da máquina original	46
5.3	Valor da tensão eficaz a vazio quando a distância entre os ímãs é variada	47
5.4	Valor da tensão eficaz com carga resistiva quando a distância entre os ímãs é variada	48
5.5	Valor da tensão eficaz a vazio quando a distância entre os ímãs é variada	51
5.6	Valor da tensão eficaz com carga resistiva quando o tamanho dos ímãs é variado.	51
A.1	Dados elétricos do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].	62
A.2	Dados geométricos do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].	63

Lista de Figuras

1.1	Distribuição mundial da produção de ímã de terras raras no ano de 2021 [1].	2
2.1	Gerador síncrono com a representação de uma fase do enrolamento do estator.	8
2.2	Representação do sentido do fluxo no gerador.	9
2.3	Ímãs montados na superfície do rotor	10
2.4	Enrolamento do circuito de armadura	11
2.5	Representação das dimensões geométricas do gerador	14
2.6	Representação das dimensões geométricas do gerador	15
2.7	Representação das dimensões do estator do gerador	18
2.8	Representação das dimensões do estator do gerador	19
2.9	Representação das dimensões da ranhura do estator	19
2.10	Circuito equivalente do gerador síncrono	22
2.11	Diagrama fasorial do gerador síncrono de polos lisos	22
2.12	Fluxo de fugas entre dois ímãs.	25
3.1	Momentos de spin do material.	32
3.2	Curva de histerese de um material magnético duro.	33
3.3	Característica de desmagnetização dos ímãs de NdFeB [21].	34
3.4	Evolução dos materiais magnéticos ao longo do tempo. Adaptado de: [17].	36
4.1	Domínio de simulação.	40
4.2	Elementos da divisão do domínio [26].	41
4.3	Malha de elementos finitos do gerador.	42

5.1	Representação das dimensões do ímã que serão variadas	43
5.2	Tensão a vazio da máquina original	44
5.3	Circuito externo conectada ao gerador.	45
5.4	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação.	45
5.5	Variação da distância entre os ímãs α_{ran}	46
5.6	Gráfico da tensão eficaz a vazio em relação a distância entre os ímãs.	47
5.7	Gráfico da tensão eficaz do gerador operando com carga resistiva em relação a distância entre os ímãs.	48
5.8	Tensão a vazio quando α_{ran} é variado.	49
5.9	Variação da altura dos ímãs hm	51
5.10	Gráfico da tensão eficaz a vazio em relação a altura dos ímãs.	52
5.11	Gráfico da tensão eficaz do gerador com carga resistiva em relação a altura dos ímãs.	52
B.1	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 3mm$	65
B.2	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 4mm$	66
B.3	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 6mm$	66
B.4	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 7mm$	66
B.5	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 10mm$	67
B.6	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 2,5^\circ$	67
B.7	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 5^\circ$	67
B.8	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 7,5^\circ$	68
B.9	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 12,5^\circ$	68
B.10	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 15^\circ$	68
B.11	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 17,5^\circ$	69
B.12	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 3mm$	69
B.13	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 4mm$	70
B.14	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 6mm$	70
B.15	Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 7mm$	70

- B.16 Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 10mm$. 71
- B.17 Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 2,5^\circ$. 71
- B.18 Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 5^\circ$. 71
- B.19 Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 7,5^\circ$. 72
- B.20 Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 12,5^\circ$. 72
- B.21 Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 15^\circ$. 72
- B.22 Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 17,5^\circ$. 73

Lista de Siglas e Símbolos

A	Vetor potencial magnético, Wb/m
A_g	Comprimento do entreferro, mm
A_r	Área da ranhura, mm^2
B	Indução magnética, T
B_r	Indução magnética de remanência, T
B_s	Indução magnética de saturação, T
D	Vetor deslocamento elétrico, C/m ²
D_{es}	Diâmetro externo do estator, mm
D_{is}	Diâmetro interno do estator, mm
E	Campo elétrico, V/m
E	Tensão induzida, V
E_a	Tensão interna gerada na fase a, V
E_{est}	Tensão da reação de armadura, V
f	Frequência, Hz
FP	Fator de potência
$g(P, t)$	Função forçante
H	Campo magnético, A/m
ha	Largura no topo da ranhura, mm
hb	Largura no fundo da ranhura, mm

H_c	Campo magnético coercitivo, A/m
H_{ci}	Campo magnético coercitivo intrínseco, A/m
h_{ctt}	Altura do complemento do <i>tooth tip</i> , mm
hm	Altura do ímã na direção de magnetização
htt	Altura do <i>tooth tip</i> , mm
h_{ye}	Espessura do estator, mm
h_{yr}	Espessura do rotor, mm
h_{ys}	Espessura da coroa do estator, mm
I_a	Corrente de armadura, A
J	Densidade de corrente elétrica, A/m ²
J_a	Densidade de corrente máxima admissível nos condutores, A/m ²
k_d	Fator de distribuição do enrolamento
k_{enr}	Fator de enrolamento
k_p	Fator de passo do enrolamento
k_{re}	Fator de enchimento da ranhura
L	Operador diferencial
L_a	Autoindutância das bobinas do estator, H
L_{aa}	Autoindutância própria da fase a, H
L_{end}	Indutância de cabeça de bobina por fase, H
L_g	Indutância do entreferro, H
L_s	Indutância síncrona, H
L_p	Comprimento axial da máquina, mm
L_u	Indutância de dispersão da ranhura, H
M	Magnetização, A/m
MEF	Método dos elementos finitos
M_g	Indutância mútua do entreferro, H
M_s	Magnetização de saturação, A/m
N_{bf}	Número de bobinas por fase

N_{bob}	Número de espiras por bobina
N_{CEN}	Número de camadas do enrolamento do estator
N_{CR}	Número de condutores por ranhura
N_{eb}	Número de espiras por bobina
N_{ef}	Número de espiras por fase
N_f	Número de fases
N_{fase}	Número de espiras em série por fase
N_r	Número de ranhuras do estator
P	Polarização elétrica, C/m ²
P	Número de polos do gerador
p	Número de pares de polos do gerador
P_{saida}	Potência ativa de saída do gerador, W
q	Número de ranhuras por polo e por fase
r	Resíduo do MEF
R_a	Resistência de armadura, Ω
R_{es}	Raio externo do estator, mm
R_i	Resíduo ponderado MEF
R_{is}	Raio interno do estator, mm
S_{AC}	Área dos condutores do enrolamento do estator, mm^2
S_d	Profundidade da ranhura, mm
T_{op}	Temperatura de operação em regime permanente, °
$T_{op_{ima}}$	Temperatura de operação dos ímãs, °
V	Potencial escalar elétrico, V
V_a, V_b, V_c	Tensão terminal do gerador a fase a,b,c

V_{eficaz}	Valor da tensão eficaz do gerador, V
v_i	Função de interpolação
V_{linha}	Valor da tensão de linha do gerador, V
w	Abertura da ranhura, mm
w_i	Função de peso do MEF
X	Reação de armadura da máquina, Ω
X_a	Reatância das bobinas do estator, Ω
X_s	Reatância síncrona, Ω
α_a	Passo de bobina de armadura, $^\circ$
α_p	Passo polar, $^\circ$
α_{ran}	Distância angular entre os ímãs, $^\circ$
γ	Passo de ranhura, $^\circ$
δ	Ângulo de carga do gerador, $^\circ$
ϵ	Permitividade absoluta, F/m
ϵ_0	Permitividade do vazio, F/m
λ	Fluxo concatenado, Wb
μ	Permeabilidade absoluta, H/m
μ_0	Permeabilidade do vazio, H/m
ρ	Densidade volumétrica da carga eléctrica, C/m ³
ρ_p	passo polar em graus mecânicos, $^\circ$
σ	Condutividade eléctrica, S/m
τ_D	Volume do domínio
τ_{ind}	Torque induzido, Nm
ϕ	Função que se pretende determinar no MEF
ϕ^*	Função que se pretende determinar no MEF para o qual o resíduo é próximo de zero
ϕ_{polo}	Fluxo por polo, Wb
ω_s	Velocidade angular de rotação, rad/s

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Muito se fala sobre sustentabilidade e sobre diminuição das ações humanas no ambiente. O uso de energia elétrica pela sociedade cresce a cada ano e para suprir a demanda é necessário aumentar a produção de energia e ao mesmo tempo investir em fontes renováveis para geração.

No âmbito das fontes de energia renovável, uma das que se destaca é energia eólica. A energia proveniente do vento é muito presente em todo o mundo e a quantidade de parques eólicos instalados aumenta a cada ano. Para realizar o aproveitamento dessa energia é necessário o uso de geradores síncronos posicionados dentro dos aerogeradores.

Os geradores síncronos são o tipo de máquina ideal para o aproveitamento eólico. Os geradores de ímãs permanentes se destacam devido ao reduzido volume da máquina, dispensam o uso de circuito de excitação externa e não possuem perdas joule no núcleo.

Na década de 1980 surgiram os ímãs de NdFeB. Essa classe de ímãs de terras raras possibilitou a construção de geradores com alta densidade de potência e reduzido tamanho. Desde seu surgimento, geradores com ímãs de NdFeB são amplamente utilizados para geração eólica.

A problemática do uso desse tipo de ímã nos geradores é seu custo mais elevado que os

outros materiais magnéticos e a dependência do mercado Chinês para a compra dos ímãs. De acordo com [1] a China é o maior produtor de ímãs de terras raras, sendo responsável por mais de 60% da produção e venda desse material. A figura 1.1 mostra a distribuição mundial da produção de ímã de terras raras no ano de 2021 [1].

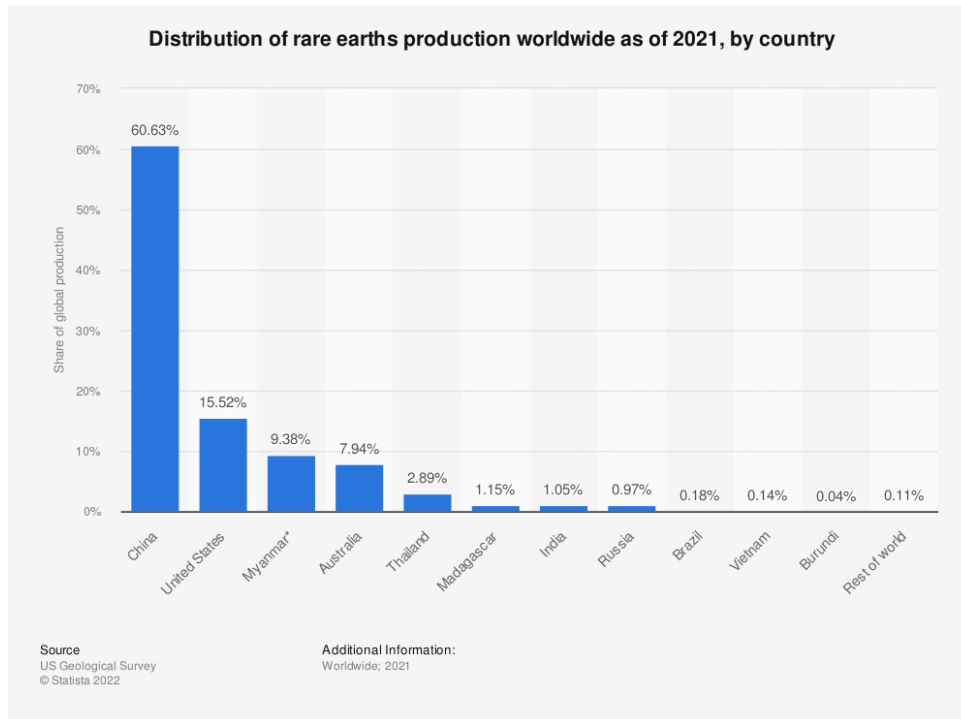


Figura 1.1: Distribuição mundial da produção de ímã de terras raras no ano de 2021 [1].

Devido a disponibilidade no mercado e alto custo dos ímãs de NdFeB, cabe aos projetistas de máquinas elétricas darem o melhor aproveitamento a esse material. Escolher as dimensões geométricas que maximizem a saída de potência do gerador é uma forma de melhor utilizar o material magnético.

1.2 Justificativa

O estudo dos efeitos da variação geométrica dos ímãs permanentes no desempenho do gerador síncrono permite a realização de projetos otimizados das máquinas elétricas. Os ímãs permanentes de terras raras são materiais magnéticos que possuem um preço

consideravelmente alto quando comparado com os outros materiais utilizados na construção das máquinas elétricas.

Realizar o projeto de uma máquina elétrica onde os ímãs tem um tamanho ideal, que maximiza a tensão de saída do gerador, significa economizar na quantidade de ímãs que são necessários e também significa uma redução no custo de construção do gerador. A partir disso justifica-se o estudo do efeito do tamanho dos ímãs no desempenho do gerador.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

A dissertação tem como objetivo o estudo do efeito da variação das dimensões geométricas do ímã na tensão de saída do gerador síncrono de ímãs permanentes.

O ímã sofre variação no seu comprimento angular, fazendo com que a distância entre os ímãs seja variada, e também sofre variação na sua altura sem alteração do tamanho do entreferro. Os modelos com as respectivas variações serão submetidos a análise em um *software* de elementos finitos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudar o gerador síncrono;
- Estudar os ímãs permanentes e sua aplicação em máquinas elétricas;
- Estudar o efeito da variação geométrica dos ímãs permanentes na tensão do gerador síncrono;
- Estudar o método dos elementos finitos;
- Aprender a utilizar o *software* ANSYS® onde serão realizadas as simulações do trabalho;

- Verificar as variações geométricas dos ímãs utilizando o método dos elementos finitos.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho foi desenvolvido ao longo de seis capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1: Introdução

O capítulo possui a motivação, justificativa, objetivos gerais e específicos do trabalho.

- Capítulo 2: Caracterização da máquina

O segundo capítulo trata da caracterização do gerador síncrono utilizado nesse estudo. Primeiramente algumas características do gerador são descritas e são demonstrados como alguns parâmetros são calculados. Alguns conceitos relacionados aos geradores síncronos são descritos.

- Capítulo 3: Materiais

O terceiro capítulo descreve os materiais magnéticos e suas características. Uma breve história desses materiais também é abordada.

- Capítulo 4: Método dos elementos finitos

O quarto capítulo aborda o método dos elementos finitos, descreve o método de solução utilizado pelo *software* ANSYS® e as condições de fronteira aplicadas no modelo.

- Capítulo 5: Resultados

Esse capítulo apresenta as variações realizadas nas dimensões dos ímãs do gerador. Os modelos criados foram simulados em um *software* de elementos finitos e o desempenho do gerador foi analisado.

- Capítulo 6: Conclusão e trabalhos futuros

O último capítulo do trabalho apresenta as conclusões obtidas a partir do estudo e sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Caracterização da máquina

Nas máquinas elétricas rotativas, o princípio de operação é baseado nos campos magnéticos girantes no entreferro. Com o desenvolvimento de ímãs de alta energia, tornou-se possível desenvolver máquinas com excitação de campo realizada através de ímãs. O uso de máquinas com ímãs se destaca devido à alta densidade de potência que estas máquinas apresentam e à alta eficiência, já que as perdas causadas pela excitação da máquina são nulas [2]–[4].

Este capítulo apresenta a caracterização da máquina síncrona de ímãs permanentes que foi adaptada do projeto realizado por Kolzer em [5]. Em seu trabalho [5], realiza a simulação de um gerador síncrono de ímãs permanentes que alimenta uma carga resistiva CA, Kolzer realiza a otimização desse gerador quando esse está operando em situação de carga.

O gerado descrito em [5] tem seus parâmetros elétricos e geométricos definidos, assim como alguns dos princípios de funcionamento e desempenho do gerador. A figura 2.1 mostra uma vista da máquina utilizada neste trabalho, nessa figura apenas um dos três enrolamentos do estator do gerador está representado.

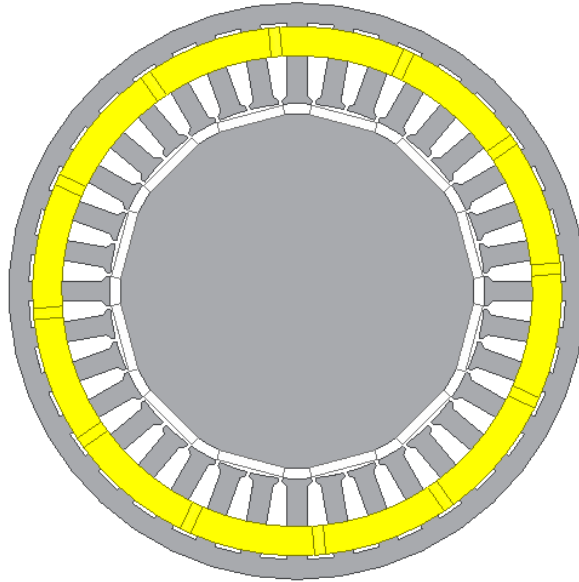


Figura 2.1: Gerador síncrono com a representação de uma fase do enrolamento do estator.

2.1 Topologia do gerador

2.1.1 Fluxo Radial

A grande vantagem das máquinas de ímã permanente é seu pequeno tamanho em comparação com as máquinas com enrolamentos no rotor, já que neste tipo de máquina escovas e anéis deslizantes são dispensáveis. Uma característica importante deste gerador é que ele permite configurações alternativas, tais como fluxo axial ou fluxo radial. Em máquinas de fluxo radial, a direção do fluxo é ao longo do raio da máquina, enquanto que em máquinas de fluxo axial, a direção do fluxo é paralela ao eixo do rotor [2], [6].

As máquinas de fluxo radial são mais fáceis de encontrar e mais comumente utilizadas do que as máquinas de fluxo axial. A grande utilização deste tipo de máquina como gerador pode ser justificada por suas bases de construção e projeto mais fáceis, quando comparadas às máquinas de fluxo axial. Entretanto, as máquinas de fluxo axial se destacam devido a sua maior densidade e capacidade de aceleração quando comparadas às máquinas de fluxo radial, características desejáveis em aplicações de alto

desempenho [2], [7].

O gerador do estudo possui fluxo radial. Na figura 2.2 é possível observar uma representação do sentido do fluxo que se propaga do ímã norte, representado pela cor vermelha, no sentido do ímã sul representado pela cor azul.

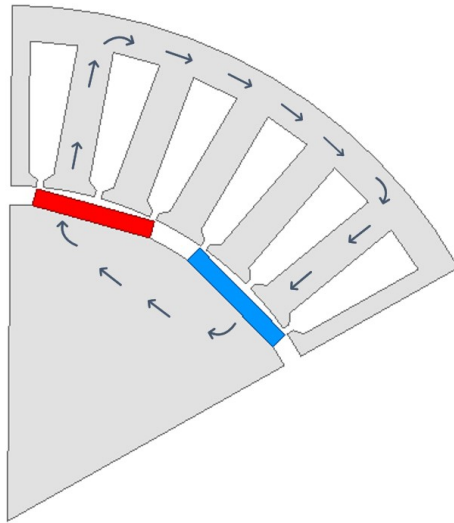


Figura 2.2: Representação do sentido do fluxo no gerador.

2.1.2 Polos lisos

O rotor de polo liso tem enrolamentos ou ímãs embutidos na superfície do rotor de modo que a superfície do rotor seja lisa, sem saliências.

Quando os ímãs do rotor são ímãs de terras raras, a variação da relutância entre o eixo de quadratura e eixo direto é baixa, conseqüentemente a reatância síncrona de eixo direto e de eixo de quadratura tem praticamente o mesmo valor [8]. Então mesmo que os ímãs não estejam enterrados no rotor, mas estejam presos a sua superfície o rotor ainda pode ser considerado como polos lisos [9].

As máquinas com polos lisos têm menor número de polos e diâmetro menor do que as máquinas com polos salientes, maior comprimento axial e maior velocidade de rotação. Este tipo de gerador é ideal para unidades geradoras de energia elétrica onde o gerador precisa ter alta velocidade [4], [6].

2.1.3 Ímãs de superfície

Os ímãs são montados na superfície do rotor e em contato direto com o entreferro da máquina, ajudando no controle da temperatura dos ímãs. A desvantagem desta configuração é que tem menos robustez mecânica, uma vez que os ímãs são fixados no rotor, como se vê na figura 2.3, e é recomendado para máquinas de baixa velocidade, até 3000 rpm [2], [10].

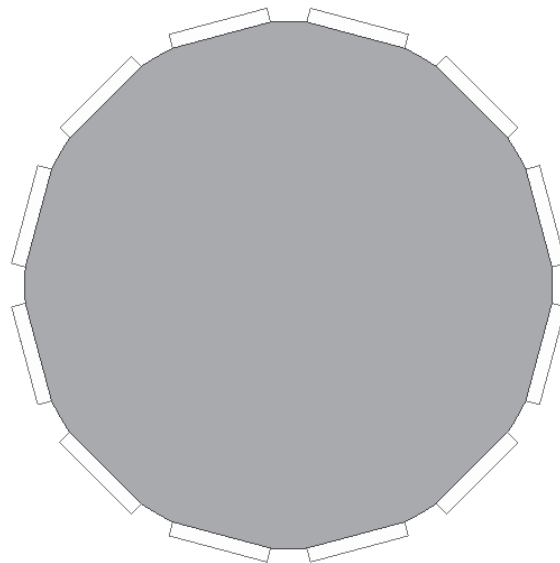


Figura 2.3: Ímãs montados na superfície do rotor

2.1.4 Enrolamento do estator

Os enrolamentos podem ser divididos em mais do que uma ranhura. Quando apenas uma fase é atribuída por ranhura chama-se bobinagem de camada simples, por outro lado quando duas fases são atribuídos na mesma ranhura chama-se bobinagem de camada dupla [2], [11]. O gerador desenvolvido por Kolzer [5] utiliza bobinagem de camada simples para os condutores da armadura, a representação da ligação dos condutores do estator do gerador é mostrada na figura 2.4.

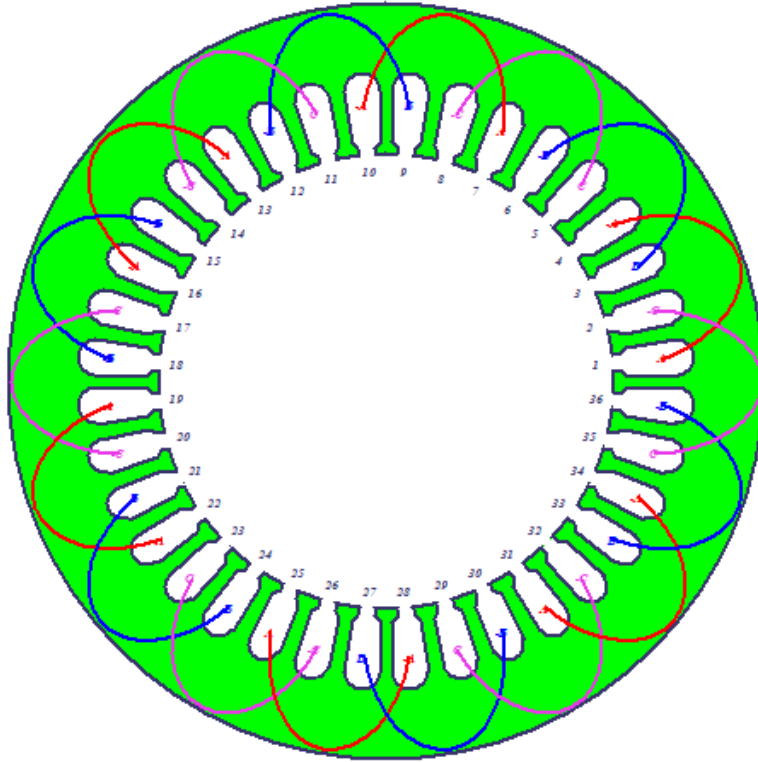


Figura 2.4: Enrolamento do circuito de armadura

2.2 Dimensionamento

2.2.1 Especificações do projeto

Para iniciar o projeto do gerador síncrono o primeiro passo é definir as especificações de projeto, esses parâmetros são necessários para atender as necessidades para as quais a máquina vai ser projetada. Essas variáveis são o ponto de partida para o início do projeto. As especificações do projeto do gerador são mostrados na tabela A.1 e foram determinados pelo projeto realizado por Kolzer [5].

2.2.2 Parâmetros calculados

Após a definição das especificações do gerador, é possível iniciar a etapa de cálculos dos parâmetros elétricos e geométricos. No projeto do gerador, Kolzer [5] realizou o cálculo

Tabela 2.1: Especificações de projeto do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].

Dimensão	Abreviatura	Valor	Unidade
Potência ativa de saída	P_{saida}	3	kW
Tensão linha	V_a	220	V
Velocidade de rotação	ω_s	350	rpm
Fator de Potência	FP	1	-
Frequência elétrica	f	35	Hz

dos parâmetros elétricos e geométricos do gerador, esses valores são mostrados nas tabelas 2.2 e 2.3.

Tabela 2.2: Dados geométricos do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].

Abreviatura	Valor	Unidade
Ncr	47	-
Ag	0,5	mm
Dis	194,9	mm
Des	299,54	mm
hys	10,43	mm
ha	7,25	mm
hb	13,88	mm
Sd	37,89	mm
hm	5,0	mm
hye	52,32	mm
Lp	71,41	mm
w	2,0	mm
htt	2,0	mm
hctt	2,0	mm
P	12	-
q	1	-
N_r	36	-

Para projetar o gerador primeiro é necessário definir os parâmetros iniciais de projeto, esses detalhes foram definidos nas seções anteriores. A próxima etapa no projeto são os cálculos dos parâmetros do rotor e estator do gerador, essa segmentação do projeto foi descrita em [12].

O projeto de rotor e estator fazem parte do projeto sem carga da máquina [12].

Tabela 2.3: Dados elétricos do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].

Descrição	Abreviatura	Valor	Unidade
Fator de enchimento da ranhura	k_{re}	0,6	-
Número de fases	N_f	3	mm
Número de camadas do enrolamento	N_{CEN}	1	mm
Temperatura de operação em regime permanente	T_{op}	120	graus
Indução magnética de remanência	B_r	1,21	T
Resistência de armadura	R_a	0,93	Ω

2.2.3 Modelo do rotor

A primeira etapa do projeto do rotor é a determinação do número de polos do gerador, P . O cálculo do número de polos é dada pela equação (2.1) que relaciona a frequência elétrica e a velocidade de rotação do gerador ω_s , ambos parâmetros são impostos no início do projeto [12].

$$P = \frac{120f}{\omega_s} \quad (2.1)$$

A próxima etapa é calcular o passo polar, α_p , a equação para seu calculo é mostrada em (2.2) [12]. O passo polar é a distância angular entre dois polos de uma máquina. Esta quantidade pode ser calculada a partir da equação (2.2) e é dada em graus mecânicos [2], [13].

$$\alpha_p = \frac{2\pi}{P} \quad (2.2)$$

A próxima etapa no projeto é a determinação da altura dos ímãs, h_m , largura dos ímãs permanentes e raio do rotor, h_{yr} . Esses parâmetros são indicados nas figuras 2.5 e 2.6 e mostrados na tabela 2.2.

Após isso é necessário determinar o fluxo que atravessa um dos ímãs da máquina. O fluxo é determinado pela equação (2.3). O fluxo é dividido por 2 pois se divide em dois caminhos, metade segue sentido para o ímã da direita e a outra metade segue para o ímã da esquerda [12].

$$\phi_{polo} = \frac{BL_p h_m}{2} \quad (2.3)$$

Onde B é a indução magnética do ímã, L_p é o comprimento axial da máquina.

O rotor do gerador é feito de aço e possui os ímãs fixados a sua superfície. Um modelo do rotor do gerador com a representação das suas dimensões é mostrado nas figuras 2.5 e 2.6.

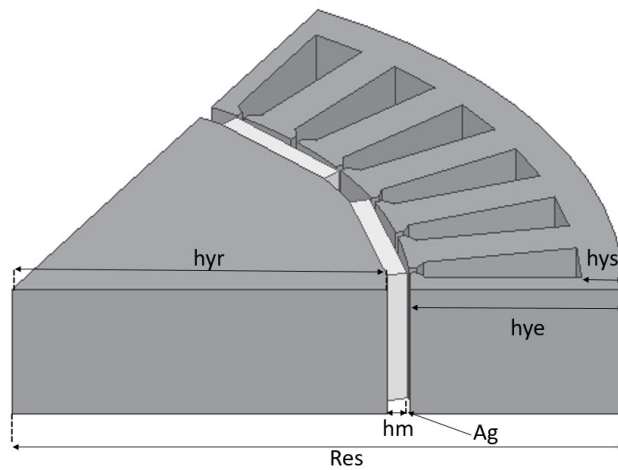


Figura 2.5: Representação das dimensões geométricas do gerador

2.2.4 Modelo do estator

Para projetar o estator, as etapas são semelhantes ao projeto do rotor [12]. A seguir serão descritas as etapas com seus respectivos equacionamentos.

Passo da ranhura

A primeira etapa é o cálculo do passo da ranhura, γ . Esse valor vem da divisão dos enrolamentos de uma fase em mais do que uma ranhura. Isto é feito devido à dificuldade e às vezes falta de espaço para colocar todos os condutores de um enrolamento na mesma ranhura. O passo da ranhura do estator é a medida da distância entre duas ranhuras

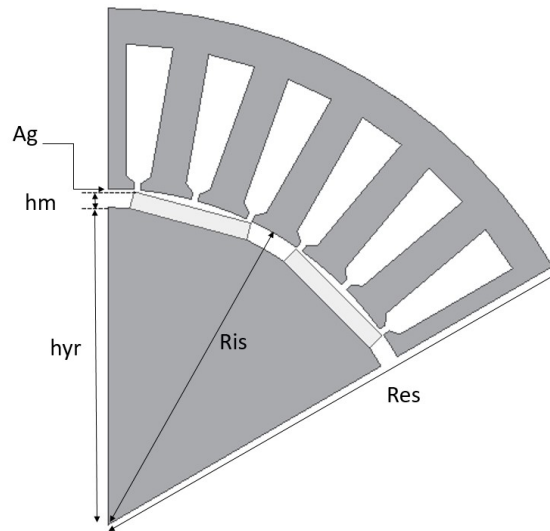


Figura 2.6: Representação das dimensões geométricas do gerador

adjacentes. Esta grandeza pode ser dada em graus eléctricos ou mecânicos [13]. A equação para cálculo do passo da ranhura é mostrada em (2.4), onde N_r é o número de ranhuras do estator.

$$\gamma = \frac{2\pi}{N_r} \quad (2.4)$$

Passo da bobina de armadura

Em máquinas CA, geralmente a distribuição do fluxo magnético no entreferro não é senoidal. A distribuição do fluxo no entreferro será composta por uma componente de fluxo senoidal e alguns harmônicos que causarão harmônicos nas ondas de tensão e corrente do estator.

Os componentes harmônicos são indesejáveis, portanto, existem técnicas para eliminar sua presença. Estas técnicas consistem em alterar a distância angular entre dois polos adjacentes em uma máquina, uma quantidade conhecida como passo de bobina [13].

O passo da bobina de armadura, α_a , é a distância entre dois polos no enrolamento do estator, essa distância é dada em graus mecânicos e a equação para cálculo dessa grandeza é mostrado em (2.5) [12].

$$\alpha_a = \alpha_p * \frac{P}{2} \quad (2.5)$$

Se o passo da bobina do estator e o passo polar tiverem o mesmo valor, ou seja, mesmo ângulo isso significa que essa bobina será chamada de passo pleno. Se a bobina do estator ocupar um ângulo menor do que o passo polar, essa bobina será conhecida como bobina de passo encurtado ou fracionário. Para calcular o passo fracionário, um coeficiente é adicionado a equação (2.5). O gerador deste trabalho possui passo pleno [13].

Fator de Passo

O fator de passo é definido como a distância entre os dois lados de uma bobina e é dado pela expressão (2.6), onde ρ_p é o passo polar em graus mecânicos [2], [13], [14].

$$k_p = \sin\left(\frac{\rho_p}{2}\right) \quad (2.6)$$

Fator de distribuição

Quando as bobinas que compõem uma fase são divididas em ranhuras, surgem algumas vantagens, tais como uma melhor utilização do espaço do estator e uma redução no tamanho das ranhuras. Entretanto, uma desvantagem é que a tensão que produz a fase do enrolamento distribuído será menor do que no caso em que todas as bobinas de uma fase são atribuídas a uma única ranhura [13], [14].

A tensão produzida pelo enrolamento distribuído tem um valor mais baixo do que a tensão produzida pelo enrolamento concentrado. Esta diferença de tensão é compensada pelo fator de distribuição k_d . O fator de distribuição é dado pela expressão mostrada em (2.7) [2], [13], onde q é o número de ranhuras por polo e por fase.

$$k_d = \frac{\text{sen}\left(\frac{q\gamma}{2}\right)}{q \text{sen}\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (2.7)$$

Fator de enrolamento

A tensão da máquina CA, (2.13), é afetada pelo fator de passo e fator de distribuição dos enrolamentos do estator. Por conveniência, é possível agrupar estes parâmetros em um único fator chamado fator de enrolamento, dado pela equação(2.8) [2], [13].

$$k_{enr} = k_d k_p \quad (2.8)$$

Área da Ranhura

É possível calcular a área da ranhura, A_r , a partir de seus parâmetros geométricos previamente apresentados. A equação para cálculo da área da ranhura é mostrada em (2.9) [12].

$$A_r = \left(\frac{ha + hb}{2} \right) Sd \quad (2.9)$$

Área dos condutores do enrolamento

Essa grandeza é obtida através da relação entre a área da ranhura do gerador, A_r , taxa de ocupação da ranhura, k_{re} , número de espiras por bobina, N_{bob} , e o número de camadas do enrolamento N_{CEN} . A equação (2.10) mostra a equação para cálculo da área dos condutores do enrolamento S_{AC} [12].

$$S_{AC} = \frac{A_r k_{re}}{N_{bob} N_{CEN}} \quad (2.10)$$

Corrente máxima dos condutores da armadura

A corrente máxima que circula nos enrolamentos do estator, I_A , é uma relação entre a área dos condutores do enrolamento, S_{AC} , e a densidade de corrente máxima admissível nos condutores, J_A [12]. Essa relação é mostrada na equação (2.11).

$$I_A = S_{AC} \cdot J_A \quad (2.11)$$

O estator do gerador possui 36 ranhuras com formato trapezoidal distribuídas igualmente ao longo da dimensão do estator. Um corte do estator do gerador síncrono com suas respectivas dimensões pode ser visto na figura 2.7. O estator do gerador é feito de aço. Os parâmetros geométricos do estator e das ranhuras, tais como, diâmetro interno do estator, D_{is} , diâmetro externo do estator, D_{es} , largura do topo da ranhura, hb , altura da coroa do estator, hys , altura da ranhura, Sd , largura do fundo da ranhura, ha podem ser vistas nas figuras 2.7 e 2.8.

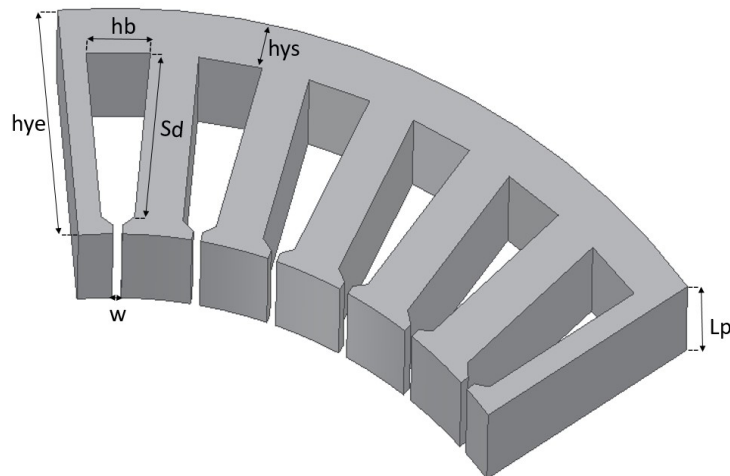


Figura 2.7: Representação das dimensões do estator do gerador

Uma ranhura do estator com suas respectivas dimensões é mostrada na figura 2.9. No interior das ranhuras são alocados os enrolamentos do circuito de armadura do gerador. Nesse enrolamento irá circular a corrente trifásica de armadura da máquina.

2.3 Modelagem

O princípio de fundamento da máquina de ímãs permanentes pode ser explicado de forma simplificada pelas equações de Maxwell. Nas seções seguintes são apresentadas as equações para modelagem da máquina.

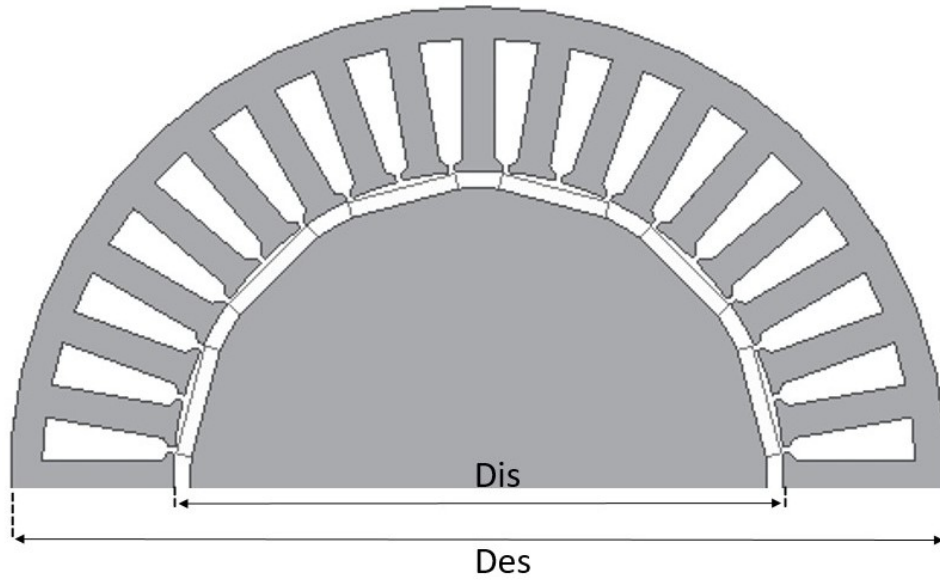


Figura 2.8: Representação das dimensões do estator do gerador

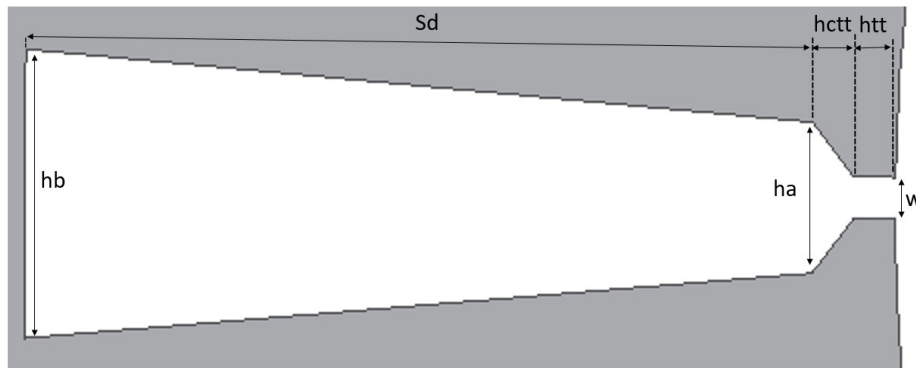


Figura 2.9: Representação das dimensões da ranhura do estator

2.3.1 Força eletromotriz - FEM

As bobinas do estator são expostas à variação de fluxo causada pela mudança de posição dos ímãs à medida que o rotor gira. A variação de fluxo nas bobinas induz uma força eletromotriz nos enrolamentos do estator chamada FEM [2].

A forma de onda da tensão induzida nos enrolamentos do estator depende do fluxo no

entreferro e do número de condutores em cada bobina do estator. Entretanto, o fluxo no entreferro depende da densidade do fluxo magnético do rotor, da configuração do estator, do entreferro e dos parâmetros de construção do rotor [2].

Pela lei de Faraday, a tensão induzida é dada pela expressão (2.12).

$$E = -\frac{d\lambda}{dt} \quad (2.12)$$

O valor rms da tensão induzida é dado pela equação (2.13).

$$E = \sqrt{2}\pi f k_{enr} N_{fase} \phi_{polo} \quad (2.13)$$

2.3.2 Reação de Armadura

O efeito de reação de armadura pode ser definido como a distorção do campo magnético do entreferro causado pela corrente que flui nos enrolamentos do estator [13].

Com o movimento do rotor do gerador síncrono uma tensão E_a é induzida nos enrolamentos de armadura, quando uma carga é conectada ao gerador uma corrente flui nesses enrolamentos. Quando a corrente que flui nos enrolamentos do estator é trifásica um campo magnético é gerado. Esse campo magnético causa perturbações no campo original da máquina gerado pelo rotor, alterando a tensão da fase. Essa é a definição de reação de armadura, segundo [13], a corrente de armadura do estator perturba o campo magnético da máquina e altera a tensão da fase do gerador [13].

Com duas tensões presentes nos enrolamentos do estator, a tensão total em uma fase é dada pela soma da tensão gerada internamente, E_a , mais a tensão da reação de armadura, E_{est} . A tensão total da fase a , V_a , é dada pela expressão mostrada em (2.14) [13].

$$V_a = E_a + E_{est} \quad (2.14)$$

A tensão da reação de armadura é dada pela expressão (2.15) [13].

$$E_{est} = -jXI_a \quad (2.15)$$

É possível representar a tensão da reação de armadura como um indutor em série com a tensão gerada internamente pela máquina. Além da reação de armadura, as bobinas do estator têm uma autoindutância e resistência. A autoindutância do estator é denominada L_a e sua reatância X_a [13]. Com esses parâmetros é possível escrever a equação com a tensão terminal do gerador, essa equação é mostrada em (2.16) [13].

$$V_a = E_a + jXI_a + jX_aI_a + R_aI_a \quad (2.16)$$

Outro conceito importante é o de reatância síncrona do gerador. Essa reatância é dada pela combinação da reatância da autoindutância das bobinas do estator, X_a , e da reação de armadura da máquina X . A reatância síncrona, X_s , é dada pela equação (2.26) [13].

$$X_s = X + X_a \quad (2.17)$$

Reescrevendo a equação (2.16), obtêm-se a equação (2.18) [13].

$$V_a = E_a - jX_sI_a - R_aI_a \quad (2.18)$$

A partir da equação (2.18) é possível construir o circuito equivalente de uma fase do gerador síncrono. A figura 2.10 mostra o circuito equivalente do gerador síncrono [13].

2.3.3 Tensão Terminal

A tensão disponível nos terminais do gerador tem é menor do que a tensão gerada internamente pela máquina graças a queda de tensão nos enrolamentos de armadura, a reação de armadura e as indutância das bobinas [13].

Para estimar a tensão disponível nos terminais do gerador síncrono , V_a , basta utilizar a lei das malhas de Kirchhoff no circuito equivalente do gerador. O circuito equivalente do gerador é mostrado na figura 2.10.

Correndo a lei das malhas, obtêm-se a equação 2.19.

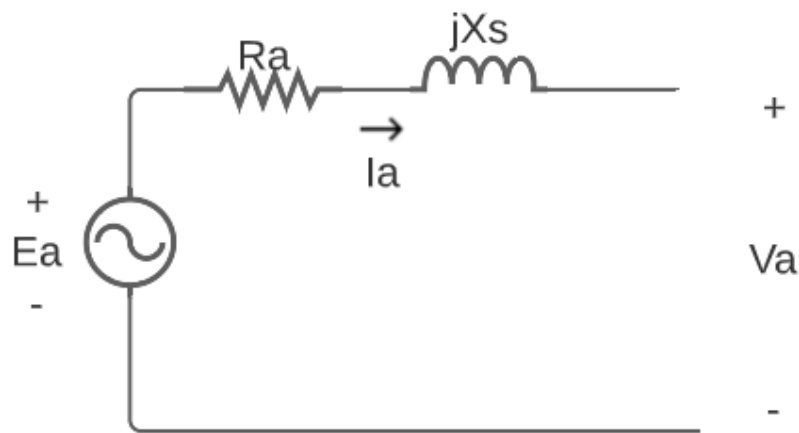


Figura 2.10: Circuito equivalente do gerador síncrono

$$V_a = E_a + (R_a + jX_s)I_a \quad (2.19)$$

Onde X_s é a reatância síncrona, R_a é a resistência do enrolamento de armadura, I_a é a corrente de armadura da fase a e E_a é a tensão interna gerada pela máquina [13].

A figura 2.11 mostra o diagrama fasorial do gerador síncrono, a partir do diagrama também é possível obter a equação 2.19 [8].

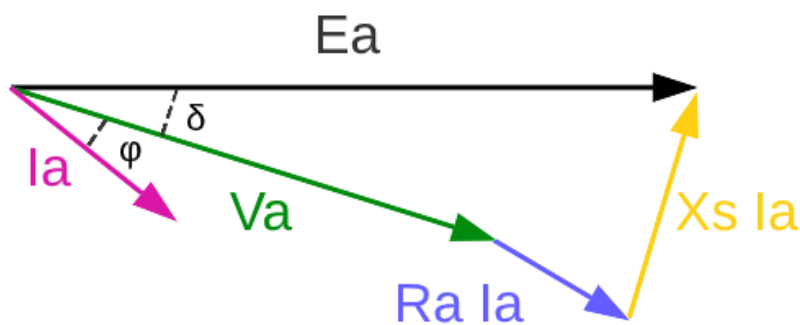


Figura 2.11: Diagrama fasorial do gerador síncrono de polos lisos

Onde δ é o ângulo de carga da máquina e ϕ é o ângulo entre tensão terminal e corrente que representa o modo de operação do gerador com fator de potência, FP, atrasado ou

adiantado [13].

2.4 Indutância síncrona

A indutância síncrona é responsável pela queda de tensão indutiva nas fases da máquina síncrona quando as três fases conduzem correntes senoidais. Em condições de equilíbrio, a indutância síncrona inclui a tensão induzida mútua devido às correntes nas demais fases e a queda de tensão de auto-indutância devido à corrente na própria fase. Esse parâmetro combina as indutâncias mútuas da máquina, eliminando essa parcela dos cálculos de indutância do circuito [15].

A indutância síncrona, L_S do gerador pode ser determinada a partir da indutância própria da fase, L_{aa} , e da indutância mútua do entreferro, M_g [16]. A equação (2.21) mostra a relação entre as equações anteriormente mencionadas.

$$L_S = L_{aa} + M_g \quad (2.20)$$

A indutância própria da fase a é dada pela equação (2.21) [15].

$$L_{aa} = L_g + L_u + L_{end} \quad (2.21)$$

Onde L_g é a indutância do entreferro e é dada pela expressão (2.22).

$$L_g = \frac{\pi\mu_0 N_{ef}^2 L_p R_{is}}{2p^2(A_g + hm)} \quad (2.22)$$

O parâmetro M_g é dado pela equação (2.23) [16].

$$M_g = \frac{L_g}{3} \quad (2.23)$$

A indutância de dispersão da ranhura, L_u , e a indutância de cabeça de bobina, L_{end} , são dadas respectivamente pelas equações (2.24) e (2.25) [16].

$$L_u = \frac{4mf}{N_{ran}} \mu_0 L_p N_{ef}^2 \left[\frac{2S_d}{3(ha + hb)} + \frac{h_{tt}}{w} + \frac{h_{ctt}}{ha - w} \ln \left(\frac{ha}{w} \right) \right] \quad (2.24)$$

e

$$L_{end} = N_{bf}^2 \mu_0 R_e N_{eb}^2 \left[\ln \left(\frac{8R_e}{R} - 2 \right) \right] \quad (2.25)$$

2.5 Reatância síncrona

A reatância síncrona do gerador síncrono de polos lisos pode ser determinada pela equação (2.26) [15].

$$X_S = \omega L_S \quad (2.26)$$

Onde ω é a frequência fundamental em radianos, definida por $\omega = 2\pi f$.

2.6 Fluxo de fugas

Nas máquinas rotativas, o fluxo magnético pode ser dividido em duas parcelas. A parte do fluxo que atravessa o entreferro e participa da conversão de energia chamado de fluxo principal da máquina, e a parcela que não participa desse processo que é chamado de fluxo de fugas [17].

O fluxo principal atravessa o entreferro e conecta eletromagneticamente o rotor e o estator, esse fluxo induz tensão nos enrolamentos de armadura, sendo o fluxo útil da máquina. A parcela de fluxo de fugas não cruza o entreferro, e portanto não induz tensão e não é aproveitado pelo gerador. O fluxo de fugas em geradores que tem excitação através de ímãs permanentes pode acarretar a necessidade de utilizar mais material magnético no interior do rotor para ter a mesma tensão de saída [17].

O termo fluxo de fugas abrange todas as componentes do fluxo que não atravessam o entreferro e as componentes que atravessam o entreferro e não participam da formação do fluxo principal [17]. A figura 2.12 mostra uma representação do fluxo de fugas entre

ímãs em uma máquina de polos lisos.

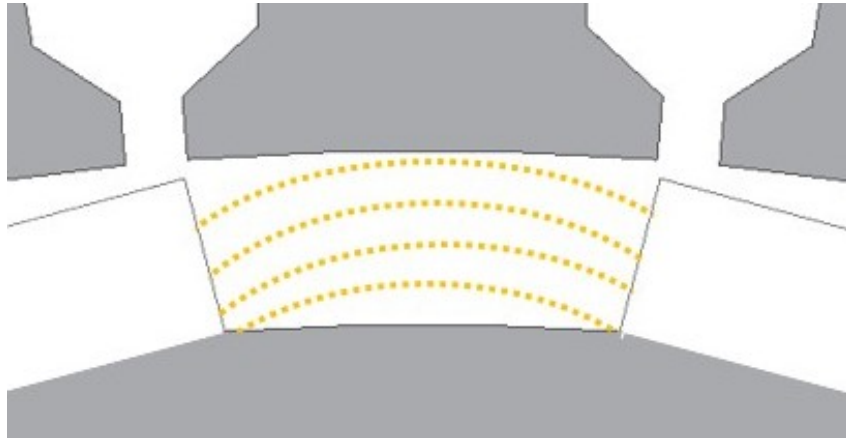


Figura 2.12: Fluxo de fugas entre dois ímãs.

2.7 Potência de saída do gerador

A potência de saída do gerador síncrono é dada pela equação(2.27) [13].

$$P_{saida} = 3V_a I_a \cos(\phi) \quad (2.27)$$

É possível calcular a potência de saída do gerador síncrono utilizando o diagrama fasorial mostrado anteriormente na figura 2.11. Como a reatância de armadura possui um valor maior que a resistência de armadura, esse último parâmetro pode ser desconsiderado. Para escrever a equação de potencia elétrica de saída do gerador síncrono através do diagrama fasorial essa aproximação será utilizada [13].

Analisando o diagrama fasorial da figura 2.11 e considerando que o termo RaI_a será desconsiderado como explicado anteriormente, através de relações trigonométricas é possível escrever a seguinte relação (2.28) [13].

$$I_a \cos(\phi) = \frac{E \text{sen}(\delta)}{X_s} \quad (2.28)$$

Substituindo a equação (2.28) na equação (2.27), e realizando algumas operações

trigonométricas, a equação de potência trifásica do gerador é descrita em (2.29) [13], [14].

$$P = \frac{3V_a E_a}{X_s} \sin\delta \quad (2.29)$$

2.8 Torque induzido no gerador síncrono

O torque induzido no gerador é dado pela equação (2.30) [13].

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_s} \quad (2.30)$$

Substituindo o valor da potência previamente calculada em (2.29), na equação do torque induzido, (2.30), a equação do conjugado obtido é descrita em (2.31) [13], [18].

$$\tau_{ind} = \frac{3V_a E_A}{\omega_s X_s} \sin\delta \quad (2.31)$$

2.9 Equações de Maxwell

A compreensão dos fenômenos electromagnéticos deve-se, em grande parte, às equações de Maxwell. Estas equações podem ser apresentadas de forma diferencial e integral, e quando combinadas com relações constitutivas e condições de contorno permitem formular problemas electromagnéticos[19].

As equações (2.32), (2.33), (2.34) e (2.35) são a forma diferencial das equações de Maxwell [20].

A equação (2.32) é a lei de Àmpere.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\delta \mathbf{D}}{\delta t} \quad (2.32)$$

A equação (2.33) é a lei de conservação do fluxo.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.33)$$

A equação (2.34) é a lei de Faraday.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t} \quad (2.34)$$

E a equação (2.35) é a lei de Gauss [19].

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho. \quad (2.35)$$

Combinando as equações (2.32) e (2.35) é possível obter a equação da continuidade (2.36) que representa o princípio da conservação da carga eléctrica [21].

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0. \quad (2.36)$$

Apenas as equações de Maxwell não fornecem um sistema de solução completo e independente para os campos electromagnéticos, sendo necessária a adição de equações independentes para resolver o problema. Estas equações são chamadas relações constitutivas e são especificadas pelas seguintes equações (2.37), (2.38) e (2.39) [20], [21].

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.37)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.38)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.39)$$

O vetor de magnetização \mathbf{M} representa o momento dipolo magnético por unidade de volume de um material. A polarização vectorial \mathbf{P} representa o momento dipolo eléctrico por unidade de volume [19].

Em material linear, estacionário, isotrópico e homogêneo as relações constitutivas

(2.37) e (2.38) são reduzidas para as equações mostradas em (2.40) e (2.41) [21].

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.40)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} \quad (2.41)$$

2.9.1 Vetor Potencial

As equações de Maxwell (2.32), (2.33), (2.34) e (2.35), podem ser reescritas como equações independentes quando uma função potencial é adicionada. A variável muda quando o potencial vetorial, \mathbf{A} , e o potencial eléctrico V são adicionados às equações de Maxwell, e são utilizados pelo software comercial ANSYS® para modelação de problemas electromagnéticos [22]. Utilização das relações constitutivas (2.40) e (2.41) e adicionando o vetor potencial \mathbf{A} a densidade de fluxo magnético pode ser obtida através da seguinte equação [19]:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.42)$$

Substituindo a equação(2.42) na equação (2.34), e utilizando as identidades diferenciais é possível obter o campo eléctrico:

$$\mathbf{E} = -\frac{\delta\mathbf{A}}{\delta t} - \nabla V \quad (2.43)$$

Substituindo as equações (2.42) e (2.43) nas equações (2.32) e (2.35) e aplicando a condição de normalização de Lorentz, são obtidas as equações (2.44) e (2.45) [19], [20].

$$\nabla^2\mathbf{A} - \mu\epsilon\frac{\delta^2\mathbf{A}}{\delta t^2} = -\mu\mathbf{J} \quad (2.44)$$

e

$$\nabla^2 V - \mu\epsilon\frac{\delta^2 V}{\delta t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.45)$$

As equações (2.44) e (2.45) são equações de segunda ordem para os potenciais vectorial e escalar [20], [21].

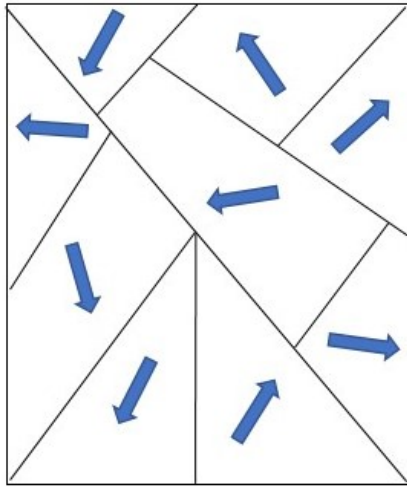
Capítulo 3

Materiais

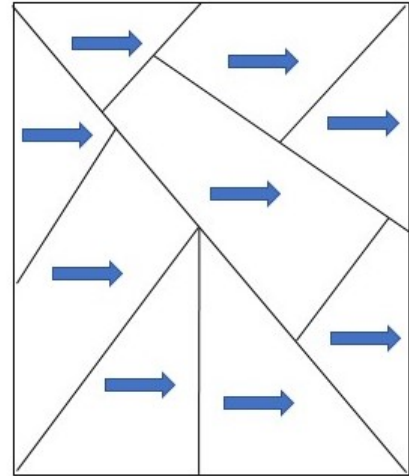
3.1 Materiais magnéticos

Os materiais magnéticos possuem várias classificações, uma delas são os materiais ferromagnéticos, esses materiais possuem a característica de manter sua magnetização mesmo após a fonte externa de campo ser retirada. A magnetização do material é algo que ocorre em seus átomos e está relacionada com o movimento de rotação e translação dos elétrons em torno do núcleo do átomo, evento também conhecido como *spin* do elétron [23].

Os *spins* dos elétrons produzem campo magnético já que são cargas elétricas em movimento. Grande parte dos materiais possuem campo magnético nulo, já que cada elétron se move em uma direção e acabam anulando o campo magnético gerado por outro elétron. Porém, existem materiais magnéticos que possuem campo magnético não nulo, nesses materiais os átomos se alinham formando domínios que possuem uma orientação comum e portanto possuem um campo magnético não nulo. Para que o material tenha os momentos de spin alinhados é necessário que esse material seja exposto a uma fonte de campo magnético externo, dessa forma os momentos individuais dos elétrons serão alinhados no mesmo sentido do campo magnético da fonte externa [24]. A figura 3.1a demonstra os *spins* desalinhados e a figura 3.1b mostra os



(a) Domínios desalinhados



(b) Domínios alinhados

Figura 3.1: Momentos de spin do material.

spins alinhados após a exposição do material ao campo externo [25].

A indução magnética no interior do material é dada pela equação (2.37). As características do material magnético são dadas através da sua curva de histerese. A figura 3.2 mostra uma típica curva de histerese de um material magnético duro.

Alguns pontos da curva de histerese merecem ser destacados. A indução de remanência B_r , é a densidade de fluxo mantida pelo material quando a fonte externa de campo é removida. A indução de saturação B_s , é atingida a medida que o campo externo é aplicado, no início os domínios estão desalinhados, como mostrado na figura 3.1a, quando os domínios se alinham fazendo que todos estejam com a mesma direção, como mostra a figura 3.1b, os domínios individuais formam um único domínio orientado com o campo externo [25]. O campo magnético coercitivo intrínseco H_{ci} , é a medida do campo magnético necessário para desmagnetizar completamente o ímã [21].

Quando o campo coercitivo intrínseco é maior do que a magnetização de saturação do material M_s , o segundo quadrante da curva de histerese pode ser aproximada por uma reta [21]. A figura 3.3 apresenta esse comportamento e a característica de desmagnetização de um ímã de NdFeB de acordo com a temperatura de operação.

O gerador síncrono de ímãs permanentes desse trabalho tem as características

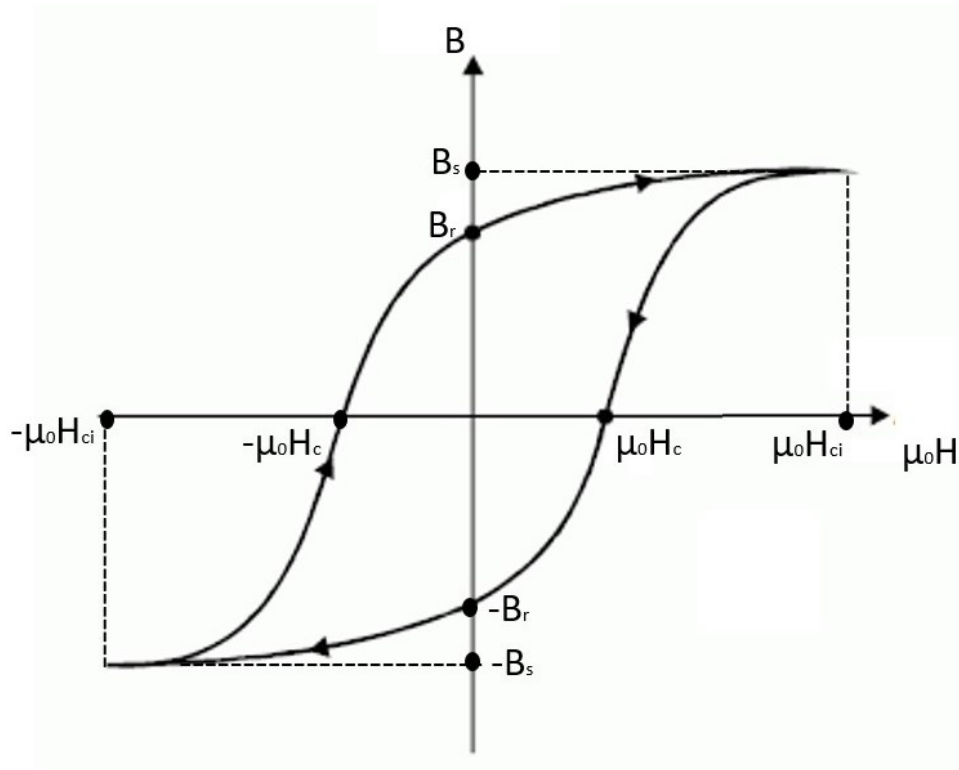


Figura 3.2: Curva de histerese de um material magnético duro.

magnéticas definidas através da curva mostrada na figura 3.3, as propriedades magnéticas do material são descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades magnéticas dos ímãs de NdFeB do gerador.

Abreviatura	Valor	Unidade
B_r	1,21	T
H_c	-1,0	MA/m
T_{opima}	120	°

3.1.1 Ímãs de terras raras

Um dos primeiros registros sobre materiais magnéticos remonta a antiga Grécia onde um material magnético chamado magnetita foi documentado, o mineral recebeu esse nome pois foi encontrado em Magnésia, um distrito na Tessália. Acreditasse que a primeira aplicação do magnetismo pelo homem tenha sido a bússola [8].

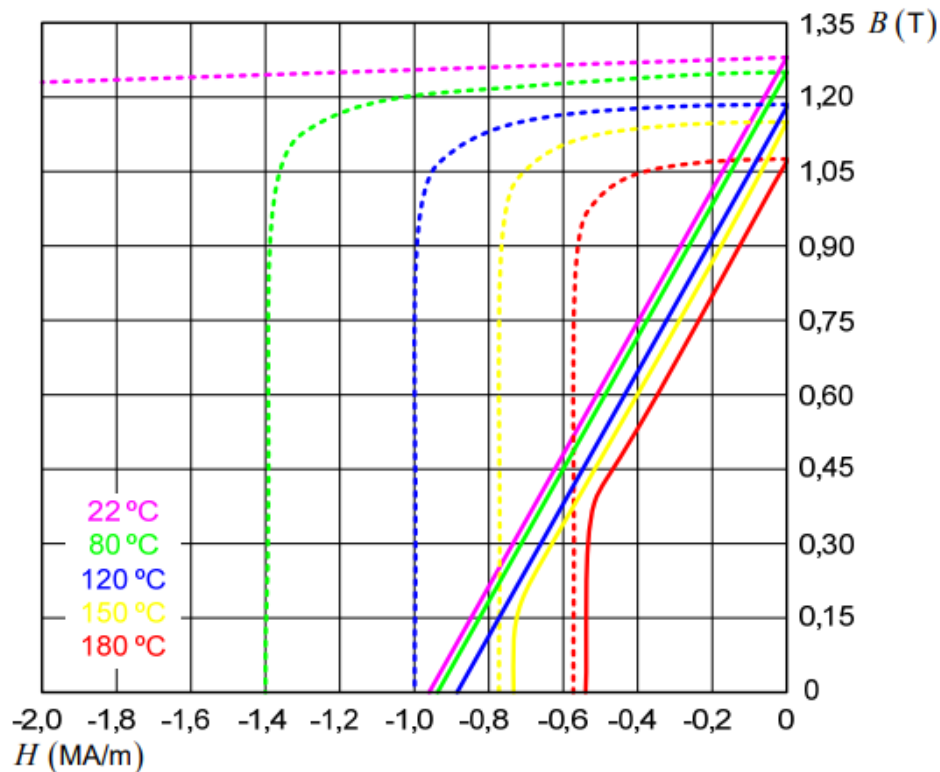


Figura 3.3: Característica de desmagnetização dos ímãs de NdFeB [21].

Há registros que em 1917, ligas de aço cobalto começaram a ser utilizadas [8]. O sucessor desse material foram os ímãs de AlNiCo, que possuíam características magnéticas superiores aos ímãs usados anteriormente, mas ainda apresentavam baixo produto energético [17]. Em 1938 no Japão, desenvolveram ímãs feitos de óxidos em pó, material precursor das ferrites [8].

O ano de 1983 marca o surgimento dos ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro. Este tipo de ímã tem o maior produto energético conhecido atualmente [17].

O desenvolvimento dos ímãs permanentes de terras raras possibilitou o aumento da densidade de energia disponível nos ímãs, o que acarretou um maior uso desse material [8].

Os ímãs são chamados de terras raras devido a grande variedade de minerais em seu composto, não devido a raridade dos minerais que o compõem. Os primeiros ímãs de terras raras, chamados de ímãs de primeira geração, começaram a ser produzidos na década de 1970 e sua liga é composta por samário o cobalto (SmCo). Esses ímãs tem a vantagem

de possuir alta densidade de fluxo remanente, alto produto energético e elevada força coercitiva [8]. Outra vantagem dos ímãs de SmCo é sua elevada temperatura de Curie, aproximadamente 750° , porém o aumento da temperatura diminui o campo coercitivo do ímã, tornando a temperatura máxima de funcionamento em torno de 250° [21]. A temperatura de Curie de um material magnético é o limite de temperatura que o ímã pode suportar sem perder sua característica magnética [17].

A desvantagem dos ímãs de SmCo é seu elevado custo e baixa disponibilidade do cobalto. Devido a essa característica, uma nova geração de ímãs de SmCo foi desenvolvida com variação nas proporções dos materiais na liga. Essa variação proporciona um melhor produto energético, quando comparado a geração anterior dos mesmos ímãs, porém o ímã mantém um custo elevado devido aos tratamentos térmicos necessários para produzir a liga [21]. A temperatura de operação desse ímã passa a ser 350° [8].

Em 1983 no Japão uma nova geração de ímãs permanentes baseada em neodímio (Nd) foi anunciada, essa descoberta foi muito bem recebida graças a abundância desse material em relação ao cobalto e a seu custo reduzido quando comparado com os ímãs da geração anterior [8].

Como desvantagens, os ímãs de NdFeB possuem alta sensibilidade à mudanças de temperatura, com o aumento da temperatura de operação a força coerciva intrínseca do ímã diminui consideravelmente [17]. A temperatura máxima de operação do ímã de NdFeB é de 250° e sua temperatura de Curie é de 350° [8]. Para aumentar a temperatura Curie desses ímãs é possível adicionar metais de terras raras à liga de neodímio, essa adição pode ter como consequência a alteração das propriedades magnéticas do ímã [17].

Nos ímãs de NdFeB, as correntes de curto-circuito da máquina podem causar aquecimento do rotor e conseqüentemente desmagnetização dos ímãs, ou a desmagnetização pode ocorrer se a temperatura ou a reação de armadura for muito alta, ou ainda sobretemperaturas nos ímãs causadas por sobrecarga da máquina, ou perda de resfriamento, ou ainda, curto-circuito na rede onde a máquina está conectada. [17].

Outra desvantagem dos ímãs de NdFeB são sua disposição para corrosão, esse problema pode ser solucionado através de revestimentos metálicos ou de resina aplicados sobre a

superfície dos ímãs para melhorar a resistência à corrosão [8].

A figura 3.4 resume a evolução dos materiais magnéticos ao longo dos anos. A figura relaciona o ano de descoberta do material magnético com seu produto energético.

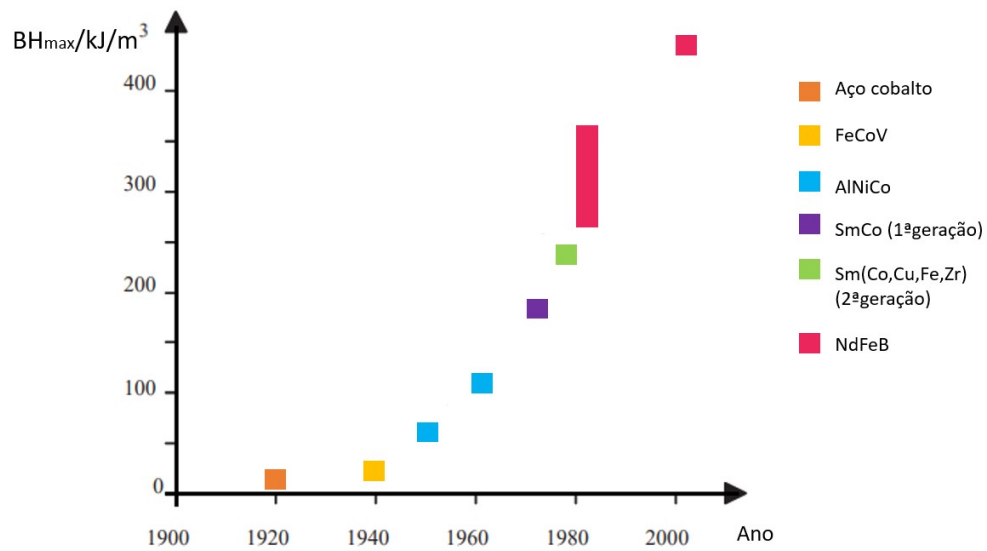


Figura 3.4: Evolução dos materiais magnéticos ao longo do tempo. Adaptado de: [17].

Capítulo 4

Método dos elementos finitos

De acordo com [26], o método dos elementos finitos surgiu na década de 40, para aplicações em engenharia de design aeronáutico e estrutural, porém devido a necessidade de precisão no projeto de máquinas elétricas esse método ganhou notoriedade nesse campo.

O método consegue determinar a distribuição do campo elétrico e magnético na estrutura estudada através da solução das equações de Maxwell. Uma solução numérica é difícil de ser obtida devido a geometria complexa da máquina, campos magnéticos variáveis no tempo e as características não-lineares dos materiais [26].

O método consiste em dividir o domínio de estudo em pequenos subdomínios, os elementos finitos, onde as equações de Maxwell serão aplicadas em cada nó do subdomínio. As equações obtidas nesse processo formarão um sistema de equações integrais e diferenciais que podem ser resolvidas através do processo de interpolação polinomial, também conhecido como método de Galerkin, ou através do método variacional, também conhecido como método de Rayleigh-Ritz's [21], [26].

A ferramenta de elementos finitos utilizada nesse trabalho é o *software* ANSYS® *Electromagnetics Suite* 2021 R2, módulo electronics e a formulação utilizada pelo software é a de Galerkin [27].

O *software* ANSYS® é uma ferramenta de simulação que abrange vários módulos aplicáveis a diferentes ramos de estudo. A ferramenta utiliza os elementos finitos para solução de problemas. O módulo de Maxwell é destinado para simulações de máquinas

elétricas, atuadores e dispositivos elétricos. O módulo realiza simulações de campo elétrico e magnético no domínio da frequência ou no domínio do tempo e também realiza simulações de transitório em máquinas elétricas [22].

4.1 Método de Galerkin

O método de Galerkin resolve o problema do campo através da resolução da equação (4.1) até a redução do seu resíduo diferencial [26]. A equação (4.1) define um problema eletromagnético em um certo domínio [21].

$$L\phi(P, t) = g(P, t) \quad (4.1)$$

Para encontrar a solução do problema uma equação para o resíduo é construída r , a equação para o resíduo é mostrada em (4.2). A função ϕ^* é a formulação para o qual o resíduo é próximo de zero, ou seja, a melhor aproximação à solução exata do problema [21], [26].

$$r = L\phi^* - g \quad (4.2)$$

Para encontrar a solução de ϕ^* o método de Galerkin faz cumprir a condição mostrada em (4.3) [26].

$$R_i = \int_{\tau_D} w_i(L\phi^* - gcx)d\tau = 0 \quad (4.3)$$

Sendo o resíduo ponderado R_i formulado pela função peso w_i , o volume do domínio τ_D e as funções de interpolação v_i . A melhor e mais usada maneira de resolver o problema é através do método de Galerkin. As funções peso são escolhidas iguais às funções de interpolação como mostra a equação (4.4) [26].

$$w_i = v_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4.4)$$

As funções de peso são escolhidas iguais às funções de interpolação v_i soluções mais precisas [21].

4.2 Condições de Fronteira

O método dos elementos finitos é vantajoso pois possibilita a obtenção de simulações numéricas para modelos com geometrias complexas e com os mais variados tipos de materiais, sendo eles lineares ou não. Também dispensa a construção de inúmeros protótipos.

Porém, o método pode exigir esforço e tempo computacional, pois quanto menores os subdomínios, mais equações serão geradas e mais tempo será necessário para chegar a solução do sistema de equações. Como o algoritmo tem natureza numérica, a solução é sempre aproximada.

Para reduzir o tempo computacional, é possível utilizar condições de fronteira para simetria e reduzir o tamanho do domínio a ser simulado assim como reduzir a quantidade de elementos. [26]. As condições de fronteira são descritas a seguir.

No *software* ANSYS® as condições de fronteira utilizadas foram do tipo Neumann e Periódicas. A figura 4.1 mostra a utilização das condições de fronteira do tipo Periódica e a simplificação que essa condição possibilitou no domínio da simulação.

4.2.1 Condição de Dirichlet

As condições de fronteira de Dirichlet supõem que o vetor potencial magnético assume um valor determinado. As condições de Dirichlet forçam as linhas de fluxo a serem paralelas ao limite da fronteira e impedem que as linhas a cruzem [8].

Essa condição é equivalente a considerar o material externo, que está fora do domínio, como isolante magnético possuindo permeabilidade magnética nula [26].

A condição de Dirichlet pode ser considerada uma simplificação, já que o fluxo que cruza a fronteira da máquina é negligenciado. Essa simplificação é aceitável já que o

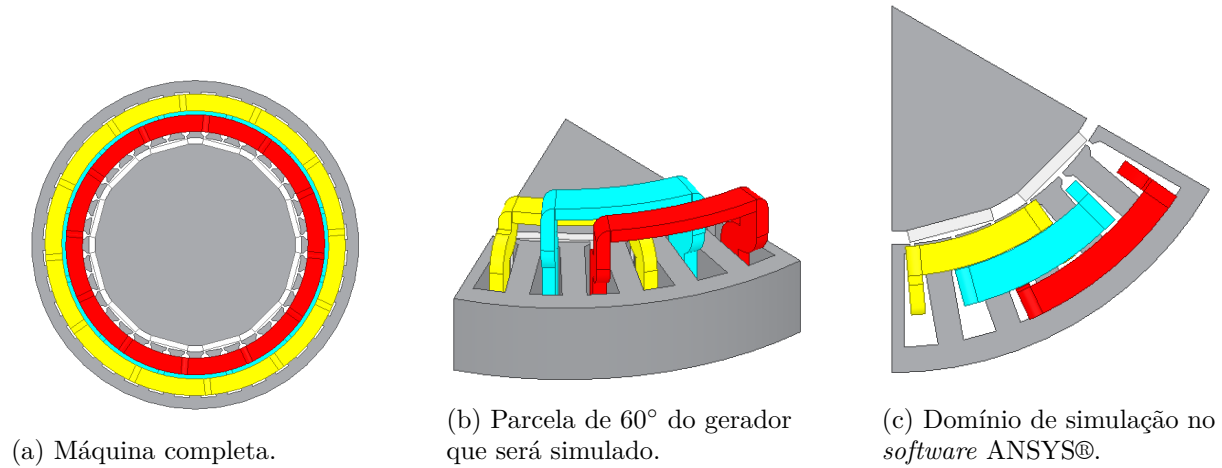


Figura 4.1: Domínio de simulação.

material da máquina tem alta permeabilidade relativa o que garante que a maior parte do fluxo magnético permanece no interior da máquina [8].

No *software* ANSYS® essa condições de fronteira é conhecida como *Magnetic vector potential* nas simulações em 2D e *Insulating* nas simulações em 3D [27], [28].

4.2.2 Condição de Neumann

A condição de fronteira de Neumann faz com que a derivada do potencial vetor magnético seja zero, as linhas de fluxo atravessam a fronteira de forma perpendicular [8].

A condição de Neumann é equivalente a ter um material externo com permeabilidade magnética infinita [8].

No *software* ANSYS® essa condições de fronteira é uma condições pré-estabelecidas conhecida como *Natural* ou *Neumann* [22].

4.2.3 Condição Periódica

A condição periódica faz correspondência entre os vetores potenciais magnéticos de duas ou mais linhas presentes nos limites da estrutura da máquina [26].

Para definir uma condição periódica uma ou mais linhas do limite da máquina são escolhidas. Uma dessas linhas é definida como principal e a outra como secundária. O

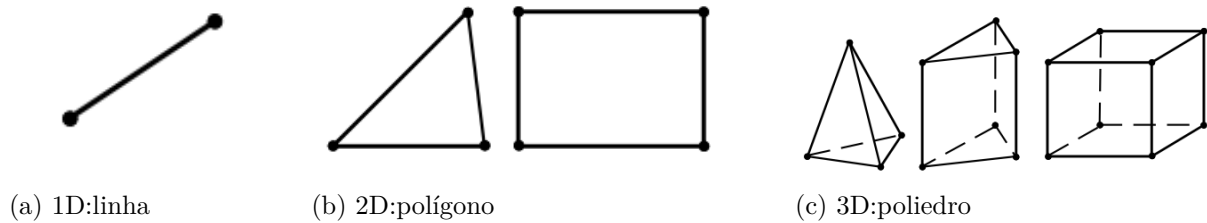


Figura 4.2: Elementos da divisão do domínio [26].

vetor potencial magnético da linha secundária é expresso como função do vetor potencial magnético da linha principal [26].

No *software* ANSYS® essa condições de fronteira é conhecida como *Matching* (*Independent* e *Dependent*) nas simulações em 2D e em 3D [22].

4.3 Divisão do domínio

Para resolver um problema pelo método dos elementos finitos, o primeiro passo é dividir o domínio em vários elementos. Quanto mais elementos existirem no domínio mais refinada será a simulação e mais tempo e esforço computacional serão necessários para encontrar a solução [26].

Quando o problema possui uma dimensão, o domínio é uma curva e a divisão do domínio, subdomínio, é uma linha como mostrado na figura 4.2a. Quando o problema possui duas dimensões, o domínio é uma superfície e o subdomínio é um polígono, como mostrado na figura 4.2b. Já nos casos onde o problema é tridimensional, o domínio é um poliedro e o subdomínio pode ser um prima, paralelepípedo ou tetraedro como mostra a figura 4.2c [26].

O *software* ANSYS® utiliza uma ferramenta para criação automática de malhas nos sólidos antes de iniciar o processo de solução, essa malha de elementos finitos inicial é utilizada para calcular o campo em todo o domínio. Outra ferramenta existente no *software* é o processo de malha adaptativa que refina a malha inicial e melhorar o cálculo do campo no domínio, principalmente em áreas que necessitem de maior densidade de

elementos como no entreferro das máquinas rotativas [29].

A figura 4.3 mostra o refinamento da malha de elementos finitos no entreferro do gerador e no pescoço das ranhuras do estator.

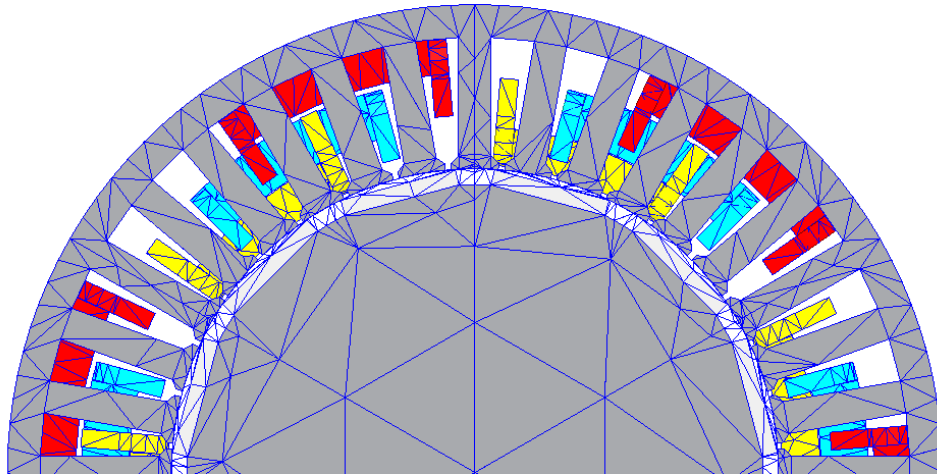


Figura 4.3: Malha de elementos finitos do gerador.

Capítulo 5

Resultados

Esse capítulo descreve os resultados obtidos através das variações geométricas dos ímãs permanentes. As variações geométricas realizadas foram, a variação da distância angular entre os ímãs, α_{ran} , e variação da altura dos ímãs, hm . As dimensões que sofreram variação são mostradas na figura 5.1. Essas variações serão expostas nas seções seguintes com mais detalhes.

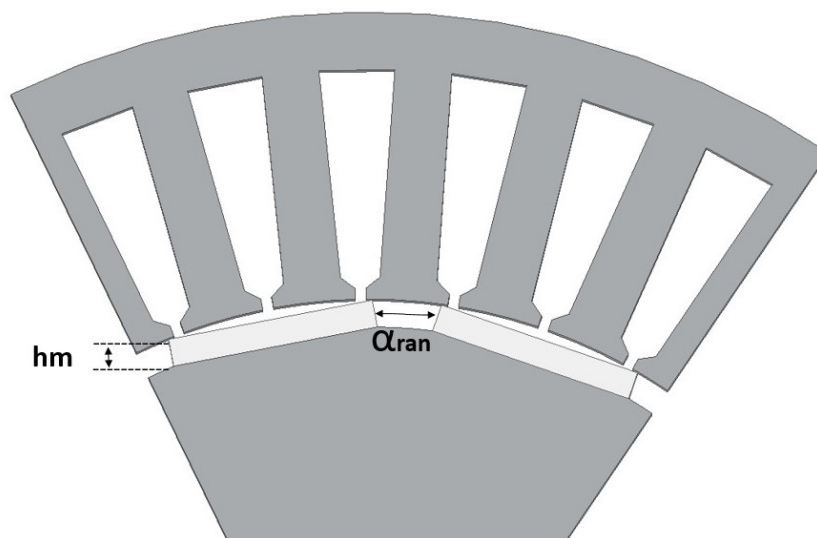


Figura 5.1: Representação das dimensões do ímã que serão variadas

5.1 Máquina Original

Para fins de comparação, a máquina estudada por Kolzer [5], foi ensaiada no *software* ANSYS® no módulo de Maxwell através do método dos elementos finitos. A tensão a vazio obtida através da simulação é mostrada na figura 5.2.

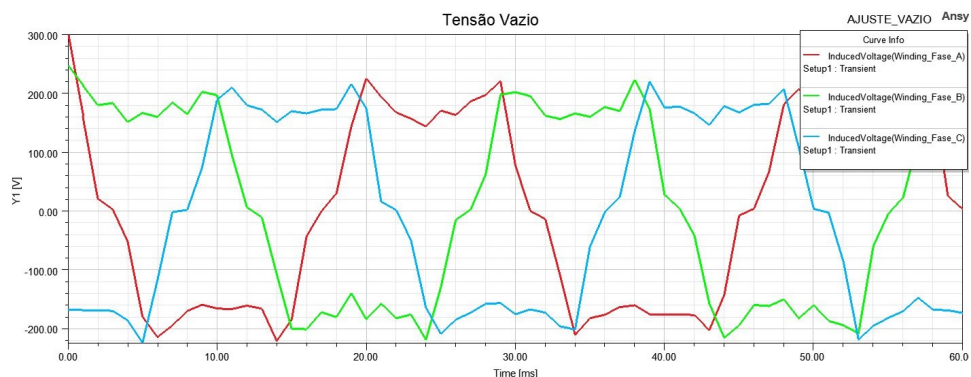


Figura 5.2: Tensão a vazio da máquina original

A tabela 5.1 mostra o valor da tensão a vazio e tensão eficaz obtidas por Kolzer em seu trabalho [5], e o valor desses mesmos parâmetros obtidos através da simulação no *software* ANSYS® e o respectivo erro percentual entre esses valores.

Tabela 5.1: Tensões de saída a vazio da máquina original.

	Kolzer [5]	ANSYS®	Erro
V_{linha}	220 V	225,23 V	2,09%
V_{eficaz}	156 V	159,37 V	2,38 %

Para ensaiar a situação de carga da máquina original, foi realizado o mesmo ensaio feito por Kolzer em [5]. Uma carga resistiva de $8,3 \Omega$ por fase, conectada em Y com neutro isolado foi ligada aos terminais do gerador.

Para conectar a carga ao gerador foi utilizado o modo de excitação por circuito externo disponível no ANSYS®. O esquema de circuito externo, com a resistência de armadura R_a , e os respectivos multímetros para aferir a tensão terminal, (V_a, V_b, V_c) são mostradas na figura 5.3.

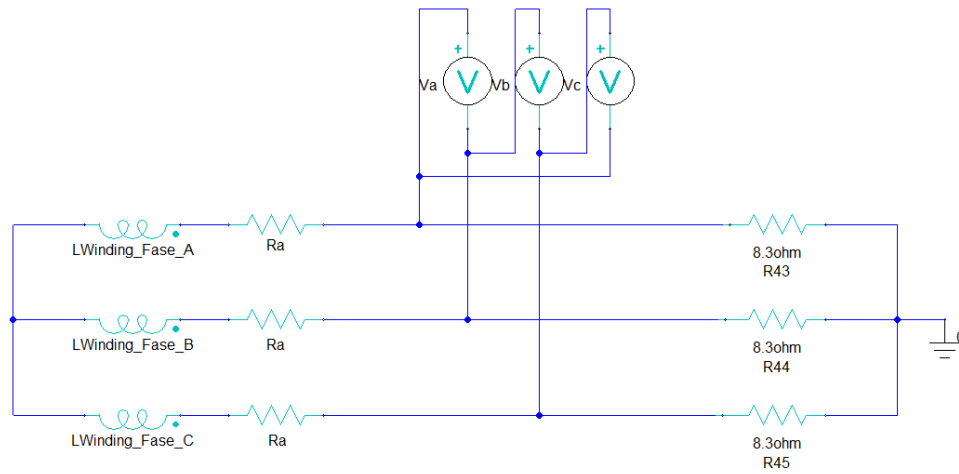


Figura 5.3: Circuito externo conectada ao gerador.

A tensão terminal (V_a, V_b, V_c) obtida através da simulação é mostrada na figura 5.4. A tensão eficaz na saída do gerador é de aproximadamente 100 V para a fase a, valor próximo ao obtido por Kolzer [5]. Os valores de tensão nos primeiros 10ms de simulação devem ser desconsiderados devido aos transitórios que a máquina sofre até entrar em regime permanente.

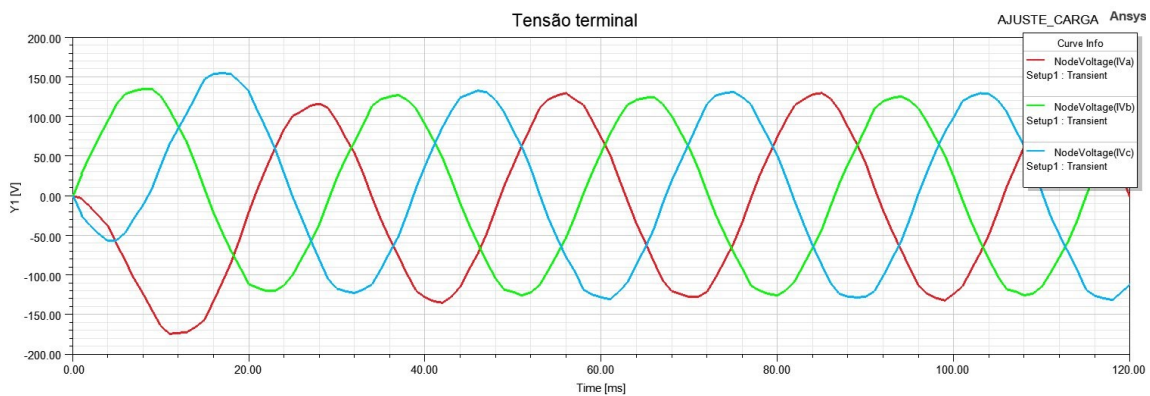


Figura 5.4: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação.

A tabela 5.2 mostra as dimensões de α_{ran} e hm da máquina original. Os resultados obtidos nas simulações da máquina original serão os parâmetros de comparação para as variações que as dimensões do ímã irão sofrer.

Tabela 5.2: Dimensões do ímã da máquina original

Dimensão	Valor
α_{ran}	10°
hm	5 mm

5.2 Distância dos ímãs

Um dos parâmetros que sofreu variação foi a distância entre os ímãs, α_{ran} . Os ímãs tiveram sua distância aumentada e diminuída de forma que o número de ímãs não é alterado. Quando α_{ran} aumenta, o comprimento do ímã diminui e quando α_{ran} diminui o comprimento do ímã aumenta. A figura 5.5 exemplifica a variação da distância entre os ímãs com os respectivos valores de α_{ran} que foram estudado nesse trabalho.

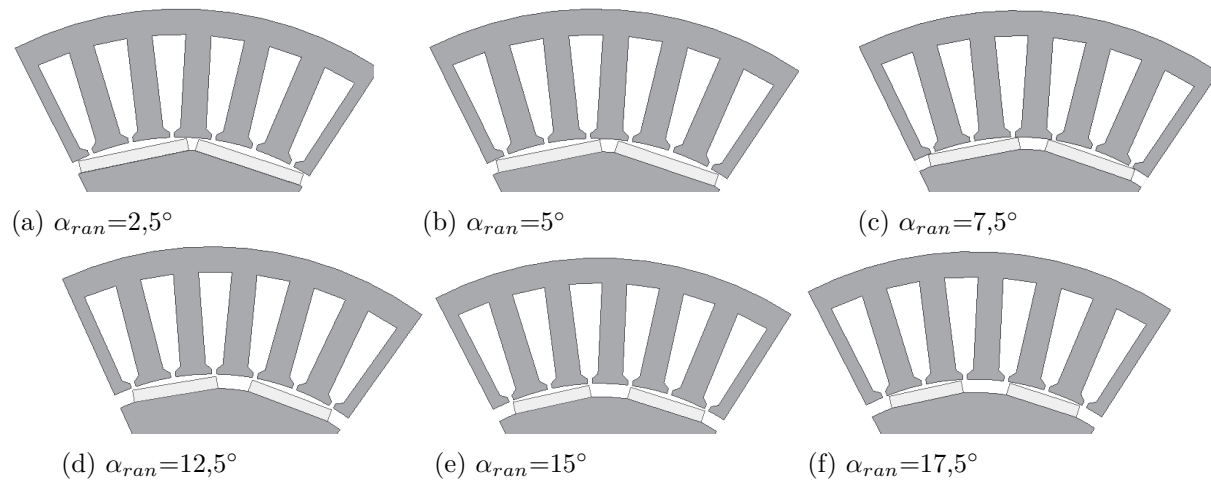


Figura 5.5: Variação da distância entre os ímãs α_{ran}

5.2.1 Simulações a vazio

A tabela 5.3 mostra os valores que foram atribuídos a α_{ran} e os respectivos valores da tensão de linha e tensão eficaz obtidas nas simulações a vazio do gerador. Os gráficos das simulações estão no anexo B.

O gráfico mostrado na figura 5.6 mostra a relação entre a tensão eficaz a vazio e a

Tabela 5.3: Valor da tensão eficaz a vazio quando a distância entre os ímãs é variada

α_{ran}	V_{linha} (V)	V_{eficaz} (V)
2,5°	221,86	156,88
5°	227,75	161,04
7,5°	218,07	154,20
12,5°	204,19	144,38
15°	204,57	144,65
17,5°	201,58	142,54

distância entre os ímãs.

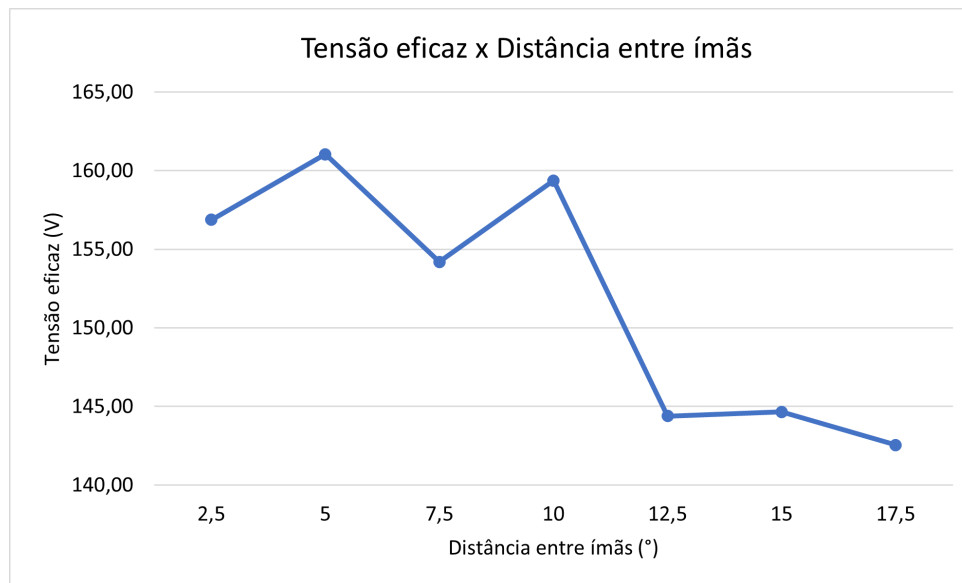


Figura 5.6: Gráfico da tensão eficaz a vazio em relação a distância entre os ímãs.

5.2.2 Simulações com carga resistiva

A tabela 5.4 mostra os valores que foram atribuídos a α_{ran} e os respectivos valores da tensão de linha e tensão eficaz obtidas nas simulações com carga resistiva do gerador. Os gráficos das simulações estão no anexo B.

O gráfico mostrado na figura 5.6 mostra a relação entre a tensão terminal do gerador em carga e a distância entre os ímãs.

Tabela 5.4: Valor da tensão eficaz com carga resistiva quando a distância entre os ímãs é variada

α_{ran}	V_{linha} (V)	V_{eficaz} (V)
2,5°	114,03	80,63
5°	148,17	104,77
7,5°	124,96	88,36
12,5°	137,29	97,08
15°	144,33	102,05
17,5°	118,80	84,01

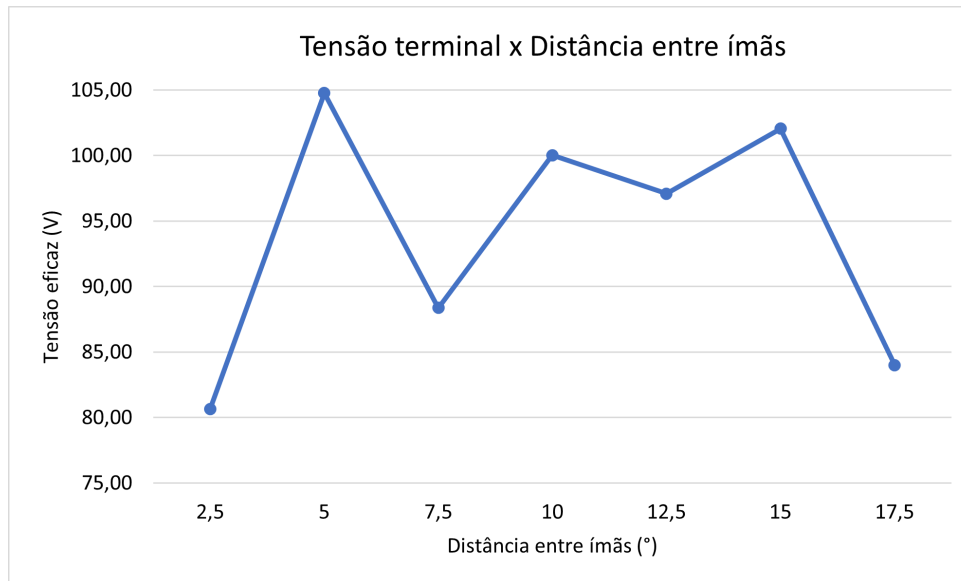


Figura 5.7: Gráfico da tensão eficaz do gerador operando com carga resistiva em relação a distância entre os ímãs.

5.2.3 Conclusão variação da distância entre os ímãs

Quando α_{ran} é variada, a forma de onda da tensão induzida continua sendo trapezoidal. É possível observar que quando valores superiores a 12,5° são atribuídos a α_{ran} a onda de tensão induzida a vazio começa a ter tendência a oscilar durante alguns milissegundos em torno de zero. Quando α_{ran} tem valor de 15° esse efeito fica mais presente e a tensão induzida tem valor igual a zero durante aproximadamente 3 milissegundos em cada fase durante um período de operação do gerador. Quando α_{ran} tem valor de 17,5° a tensão permanece com valor nulo durante 4 milissegundos durante um período de operação do

gerador em cada fase. Esse fato não é desejável no projeto de máquinas elétricas pois a tensão induzida nula em uma fase diminui a tensão eficaz na saída do gerador. Os gráficos das ondas de tensão a vazio para as distâncias de $12,5^\circ$, 15° e $17,5^\circ$ são mostradas na figura 5.8. Todos os gráficos de tensão eficaz a vazio do gerador estão no anexo B.

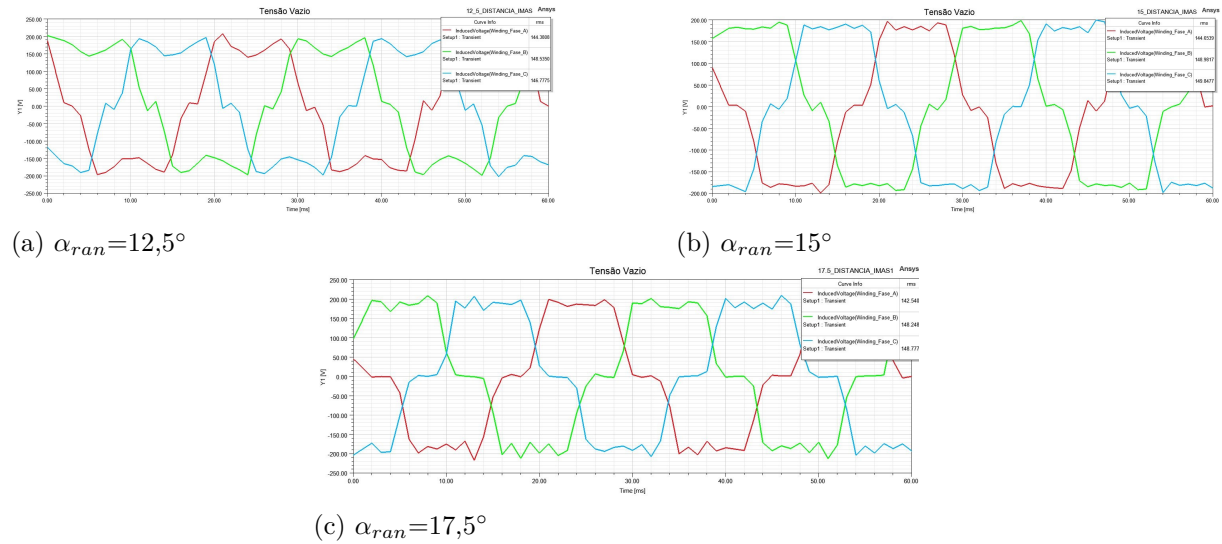


Figura 5.8: Tensão a vazio quando α_{ran} é variado.

Com o aumento da distância entre os ímãs o comprimento angular do ímã é diminuído, ou seja, menos material magnético estará presente na superfície do rotor e menos fluxo será induzido, o que pode justificar a tensão nula por alguns milissegundo. Quando os ímãs estão demasiadamente afastados, o fluxo gerado por um ímã deve atravessar o entreferro em direção ao próximo ímã após circular pelo estator do gerador, quando os ímãs estão muito afastados parte do fluxo se perde no ferro do estator.

Quando a distância entre os ímãs é inferior ao valor da máquina original, ou seja, $2,5^\circ$, 5° , $7,5^\circ$, mais material magnético está presente no gerador pois o comprimento do ímã é aumentado até que o valor de α_{ran} seja satisfeito. Com o aumento da superfície do rotor ocupada pelos ímãs, não existem momentos em que a tensão permanece nula em nenhuma fase, esse efeito é visível nos gráficos de tensão a vazio do gerador. Com o aumento da área do rotor ocupada por ímãs, o fluxo por polo aumenta, então mesmo que parte do fluxo do ímã se perca devido ao fluxo disperso, parte desse fluxo cruza o

entreferro e induz tensão nos enrolamentos de armadura.

A desvantagem de colocar os ímãs muito próximos um dos outros é que mais material magnético é necessário e conseqüentemente o custo do gerador é mais elevado. Outra desvantagem é que se os ímãs estiverem muito próximos o efeito de fluxo disperso pode ser enfatizado. Esse efeito faz com que nem todo o fluxo gerado pelo ímã atravesse o entreferro e induza tensão nas bobinas de armadura, uma parte desse fluxo circula entre os ímãs adjacentes e não induz tensão, portanto é um fluxo inutilizado, o fluxo por polo diminui devido ao aumento do fluxo disperso nos ímãs.

O efeito de fluxo disperso diminui a tensão induzida no gerador, esse efeito é visível quando a máquina está em situação de carga. O gráfico 5.7 mostra a relação entre a tensão terminal do gerador e a distância entre seus ímãs.

5.3 Altura dos ímãs

Outro parâmetro que sofreu variação foi a altura dos ímãs, hm . Os ímãs tiveram sua altura aumentada e diminuída, Quando o parâmetro hm muda, o número de ímãs não é alterado. Quando hm é aumentado, o comprimento do entreferro não é alterado, para compensar o aumento do ímã o tamanho do rotor é diminuído, e quando o tamanho do ímã diminui o raio do rotor aumenta. A figura 5.9 mostra um corte da máquina com a altura dos ímãs que foram estudadas nesse trabalho.

5.3.1 Simulações a vazio

A tabela 5.6 mostra os valores que foram atribuídos a hm e os respectivos valores da tensão de linha e tensão eficaz obtidas nas simulações a vazio. Os gráficos das simulações estão no anexo B.

O gráfico mostrado na figura 5.10 mostra a relação entre a tensão eficaz a vazio e a altura dos ímãs.

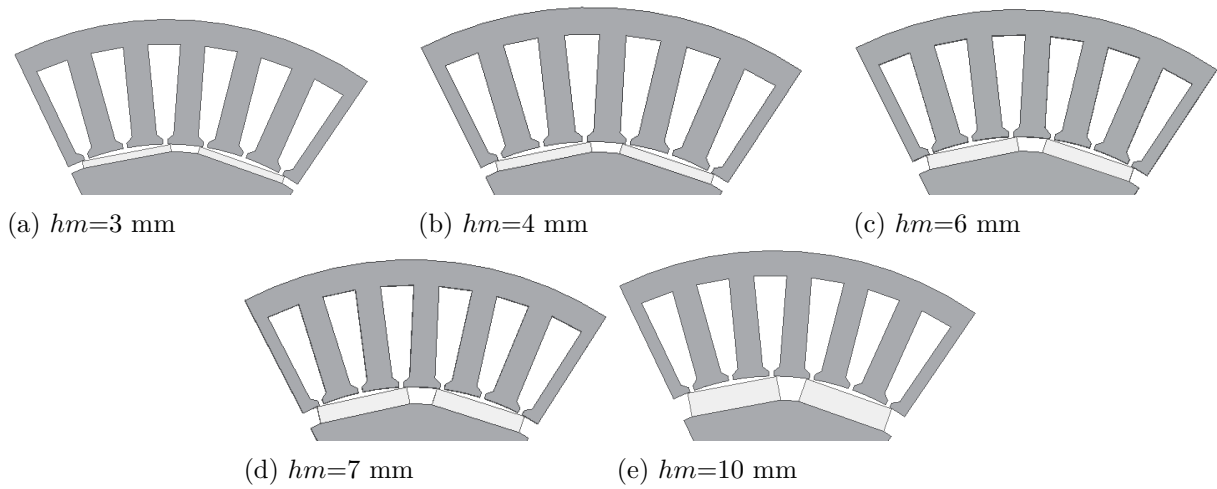


Figura 5.9: Variação da altura dos ímãs hm

Tabela 5.5: Valor da tensão eficaz a vazio quando a distância entre os ímãs é variada

hm (mm)	V_{linha} (V)	V_{eficaz} (V)
3	187,24	132,40
4	215,28	152,23
6	244,96	173,22
7	230,85	163,24
10	258,46	182,76

5.3.2 Simulações com carga resistiva

A tabela 5.6 mostra os valores que foram atribuídos a hm e os respectivos valores da tensão de linha e tensão eficaz obtidas nas simulações com carga resistiva. Os gráficos das simulações estão no anexo B.

Tabela 5.6: Valor da tensão eficaz com carga resistiva quando o tamanho dos ímãs é variado.

hm (mm)	V_{linha} (V)	V_{eficaz} (V)
3	112,57	79,60
4	126,18	89,22
6	151,16	106,89
7	143,25	101,30
10	168,19	118,93

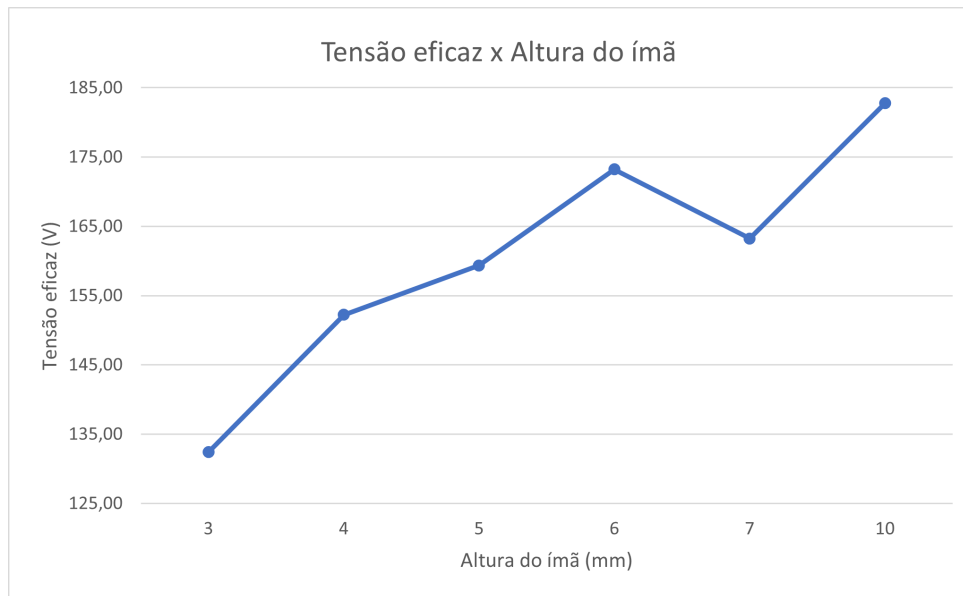


Figura 5.10: Gráfico da tensão eficaz a vazio em relação a altura dos ímãs.

O gráfico mostrado na figura 5.10 mostra a relação entre a tensão terminal do gerador e a altura dos ímãs.

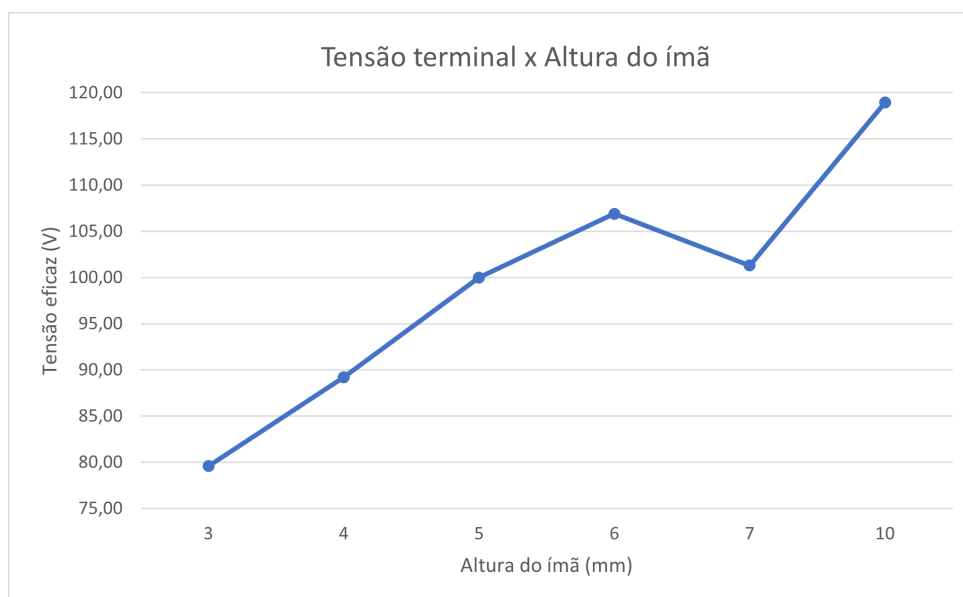


Figura 5.11: Gráfico da tensão eficaz do gerador com carga resistiva em relação a altura dos ímãs.

5.3.3 Conclusão variação da altura dos ímãs

Analisando as curvas dos gráficos 5.10 e 5.11 é possível perceber que a variação de hm afeta diretamente a tensão de saída do gerador. Quando hm assume valores baixos, a tensão induzida eficaz nos enrolamentos da armadura é mais baixo. Quando a altura dos ímãs tem um valor superior ao valor de hm da máquina original, a tensão eficaz induzida, em geral, é mais alta.

Quando a dimensão de altura do ímã é definida é importante levar em consideração a otimização do ímã. Fazer uma relação do fluxo necessário pra gerar a tensão de saída exigida pelo projeto da máquina e o fluxo gerado pelo ímã.

A equação (2.13) faz a relação entre a tensão induzida no gerador síncrono e o fluxo gerado pelos ímãs do rotor. O fluxo gerado pelos ímãs permanentes é função de suas características magnéticas descritas no capítulo 3.

Os gráficos 5.10 e 5.11 possuem um comportamento semelhante, com o aumento da altura do ímã a tensão aumenta.

A variação na dimensão do ímã mostra a necessidade de sempre se trabalhar com o projeto otimizado ou o mais eficiente possível das máquinas elétricas. A máquina com $hm = 10mm$ utiliza o dobro de material magnético que a máquina original, que possui $hm = 5mm$, e não produz o dobro da tensão de saída. Essa comparação demonstra que a relação entre tensão induzida e altura do ímã não é uma relação linear. Para que a tensão de saída do gerador tenha um valor mais elevado, existem soluções melhores e mais eficientes do que aumentar o tamanho do material magnético.

Quando se fala em aumentar a altura do ímã, conseqüentemente é necessário aumentar a quantidade de material magnético na máquina. Esse aumento reflete diretamente no custo de construção do gerador. O preço do quilo do ímã de NdFeB é alto, então escolher a altura do ímã que otimize a tensão de saída também significa otimizar o custo do gerador.

No caso do gerador em estudo, o tamanho do rotor foi alterado para possibilitar o aumento do ímã e manter o diâmetro externo da máquina e seu entreferro com o mesmo valor.

Para elevar a tensão de saída do gerador de forma mais eficiente, uma possibilidade é a alteração do material magnético da máquina. Um ímã de NdFeB com indução de remanência B_r , mais elevada pode ser uma solução ou mesmo outro tipo de ímã permanente que possua indução de remanência superior ao ímã da máquina em estudo.

Outra possibilidade para aumento da tensão de saída do gerador seria alterar sua frequência de operação através da diminuição do número de polos ou aumento na velocidade de operação nominal da máquina. Além dessas possibilidades, é possível realizar um estudo sobre o fator de enrolamento das bobinas do estator que também influencia na tensão de saída do gerador. Essas possibilidades citadas não foram abordadas nesse trabalho, mas podem ser objetivo de trabalhos futuros.

Capítulo 6

Conclusão e trabalhos futuros

6.1 Resumo do trabalho

Esse trabalho realizou um estudo sobre o efeito da geometria dos ímãs permanentes de NdFeB nas tensões induzida e terminal do gerador em vazio e operando com carga resistiva. O foco do trabalho foram os ímãs de terras raras de NdFeB, mas os conceitos abordados podem ser aplicados para outros materiais magnéticos.

A primeira etapa do trabalho consistiu na pesquisa sobre as etapas de projeto do gerador síncrono e sobre os materiais magnéticos que podem ser utilizados como fonte de excitação do gerador e um pouco da história das máquinas síncronas e dos materiais magnéticos. A máquina desse estudo foi baseada no gerador construído e ensaiado por Kolzer [5], os parâmetros geométricos e elétricos foram os calculados por Kolzer, com alguns ajustes.

A máquina original foi ensaiada a fim de validar o modelo construído, os ensaios realizados foram os mesmos realizados por Kolzer [5] e os valores obtidos foram comparados. Após essa etapa estabeleceu-se as variações geométricas que seriam impostas aos ímãs do gerador, sendo elas a variação da altura e variação da distância entre os ímãs.

Com as variações geométricas dos ímãs definidas, foram realizadas as simulações a

vazio e com carga resistiva, mesmas simulações realizadas na máquina original. Os valores de tensão induzida a vazio e tensão terminal aferida no circuito externo do gerador foram comparados.

Com as simulações realizadas, constatou-se que as alterações geométricas nos ímãs do rotor do gerador tem efeito direto na tensão de saída da máquina. Quando os ímãs são posicionados muito próximos uns dos outros, ou quando a altura dos ímãs é aumentada mais material magnético é necessário e portanto o custo do gerador é mais alto. Tentou-se fazer uma relação entre o valor ótimo da distância entre os ímãs e da altura dos ímãs com o valor das tensões do gerador e foi possível verificar que o valor otimizado para essas grandezas é o valor utilizado na máquina original. Quando o valor da altura do ímã é dobrado a tensão de saída é um pouco mais elevada, mas essa pequena diferença na tensão de saída não justifica o uso do dobro da quantidade de material magnético na máquina.

As simulações foram realizadas no *software* comercial ANSYS® no módulo Maxwell 3D e 2D para simulação através do método dos elemento finitos.

Os resultados do modelo da máquina original e do modelo ensaiado no *software* tem pequenas diferenças, que são esperadas. Esses erros são baixos e não impedem a validação do modelo. Pequenos erros entre valores calculados e valores simulados são justificáveis uma vez que o ANSYS® realiza uma alta discretização do domínio de simulação e nos cálculos analíticos algumas simplificações são realizadas.

6.2 Trabalhos futuros

Alguns aspectos podem ser explorados em trabalhos futuros, tais como:

- Implantação de um modelo térmico para verificar a temperatura em que os ímãs operam em cada variação geométrica;
- Implementação da rede de relutância do gerador para quantificar o fluxo disperso em cada variação geométrica do ímã;
- Variação do material magnético dos ímãs e análise da saída do gerador;

- Variação do tipo de alocação do ímã permanente.

Bibliografia

- [1] D. Knuth. “Rare earths: production share by country 2021 | Statista.” (), URL: <https://www.statista.com/statistics/270277/mining-of-rare-earths-by-country/>. (consult. 2022-10-27).
- [2] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. 2017, ISBN: 9780824753849. DOI: 10.1201/9781420014235.
- [3] I. Boldea, *Synchronous generators*. 2005, pp. 1–432, ISBN: 9781420037258. DOI: 10.4324/9781315725741-22.
- [4] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter e H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, Second Edi. IEEE Press 445, 2014.
- [5] J. F. Kolzer, T. Bazzo, J. Ivanqui, R. Carlson e P. L. de Miranda, “Modelagem de Gerador Síncrono a Ímãs Permanentes Conectado a um Retificador a Diodos,” 2014.
- [6] M. Rosu, P. Zhou, D. Lin et al., *Multiphysics simulation by design for electrical machines, power electronics and drives*. John Wiley & Sons, 2017.
- [7] Y. Chen, P. Pillay e A. Khan, “PM wind generator topologies,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, n.º 6, pp. 1619–1626, 2005.
- [8] J. F. Gieras, *Permanent magnet motor technology: design and applications*. CRC press, 2009.

- [9] C. He e T. Wu, “Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator,” *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 3, n.º 1, pp. 94–100, 2019, ISSN: 2096-3564. DOI: 10.30941/cestems.2019.00013.
- [10] S. Eriksson, *Permanent magnet synchronous machines*. 2019, vol. 12, ISBN: 9783039213504. DOI: 10.3390/en12142830.
- [11] D. C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*. 1994, ISBN: 0070260257.
- [12] T. d. P. M. Bazzo, V. d. O. Moura e R. Carlson, “A Step-by-Step Procedure to Perform Preliminary Designs of Salient-Pole Synchronous Generators,” *Energies*, vol. 14, n.º 16, p. 4989, 2021.
- [13] S. J. Chapman, *Fundamentos de Máquinas Eléctricas*, 5ª ed. 2013, vol. 53, p. 684, ISBN: 9788578110796. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- [14] V. Del toro, *Fundamentos de máquinas eléctricas*, 1990.
- [15] J. R. Hendershot e T. J. E. Miller, *Design of brushless permanent-magnet machines*. Motor Design Books Venice, FL, USA, 2010.
- [16] J. F. Kölzer et al., “Projeto ótimo multidisciplinar de geradores síncronos com ímãs permanentes de ferrite para microgeração eólica,” 2017.
- [17] J. Pyrhönen, T. Jokinen e V. Hrabovcová, *Desig of Rotating Electrical Machines*, Second edi. 2008, pp. 367–441, ISBN: 9781118581575. DOI: 10.1007/978-981-32-9938-2_6.
- [18] L. Jicheng, *Design and Application of Modern Synchronous Generator Excitation Systems*, ISBN: 9788490225370.
- [19] E. P. Furlani, *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*, 1st. San Diego, California, United States: Academic Press, 2001, ISBN: 0-12-269951-3.
- [20] W. H. Hayt Jr e J. A. Buck, *Eletromagnetismo*. Bookman Editora, 2013.

- [21] Â. Paula Barbosa da Silva Ferreira, “Projeto de uma Máquina de ímanes permanentes de fluxo axial orientado para os sistemas de conversão de energia eólica,” tese de doutoramento, 2011.
- [22] A. Inc., *ANSYS Maxwell Help*. ANSYS, Inc., 2021.
- [23] J. V. G. Kasper, “Projeto ótimo de geradores síncronos de ímãs permanentes usando elementos finitos,”
- [24] J. M. Coey, *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge university press, 2010.
- [25] W. Callister, *Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução* . Grupo Gen-LTC, 2000.
- [26] N. Bianchi, *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, 1st. Boca Raton, Florida, United States: Taylor Francis Group, 2005, ISBN: 0-8493-3399-7.
- [27] A. Inc., *Maxwell 3D User’s Guide*. Ansoft, 2012.
- [28] A. Inc., *Maxwell 2D User’s Guide*. Ansoft, 2011.
- [29] A. Inc., *ANSYS Maxwell Training Manual: Meshing and Mesh Operations*. Ansoft, 2013.

Apêndice A

Dimensões da máquina

Nesse apêndice estão resumidos os parâmetros do gerador.

Tabela A.1: Dados elétricos do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].

Abreviatura	Valor	Unidade
P_{saida}	3	kW
V_a	220	V
FP	1	-
f	35	Hz
B_r	1,21	T
H_c	-1,0	MA/m
T_{opima}	120	°

Tabela A.2: Dados geométricos do gerador síncrono de ímãs permanentes [5].

Abreviatura	Valor	Unidade
Ncr	47	-
Ag	0,5	mm
Dis	194,9	mm
Des	299,54	mm
hys	10,43	mm
ha	7,25	mm
hb	13,88	mm
Sd	37,89	mm
hm	5,0	mm
hye	52,32	mm
Lp	71,41	mm
w	2,0	mm
htt	2,0	mm
hett	2,0	mm
P	12	-
q	1	-
N_r	36	-
k_{re}	0,6	-
N_f	3	mm
N_{CEN}	1	mm
T_{op}	120	graus
Ra	0,93	Ω
ω_s	350	rpm
α_{ran}	10	$^\circ$

Apêndice B

Gráficos das simulações no *software* ANSYS®

Abaixo estão os gráficos obtidos como resultado nas simulações realizadas no *software* ANSYS®.

B.1 Simulações a vazio

B.1.1 Variação na altura dos ímãs

- $hm = 3mm$

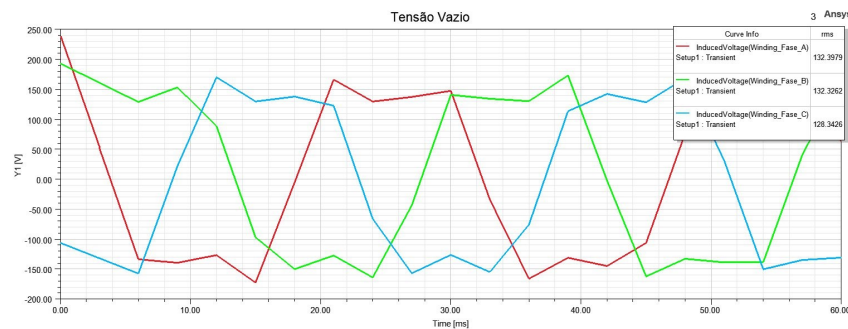


Figura B.1: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 3mm$.

- $hm = 4mm$

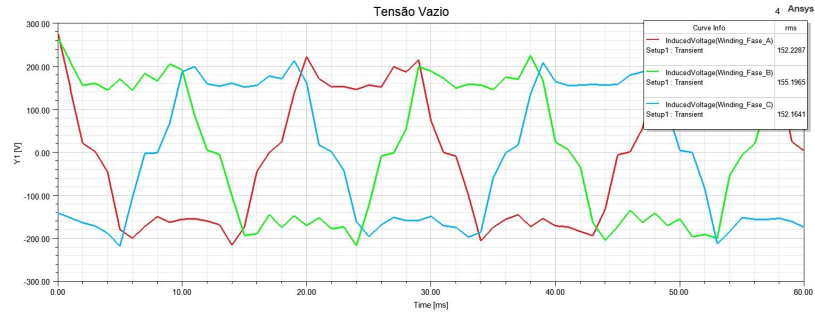


Figura B.2: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 4mm$.

- $hm = 6mm$

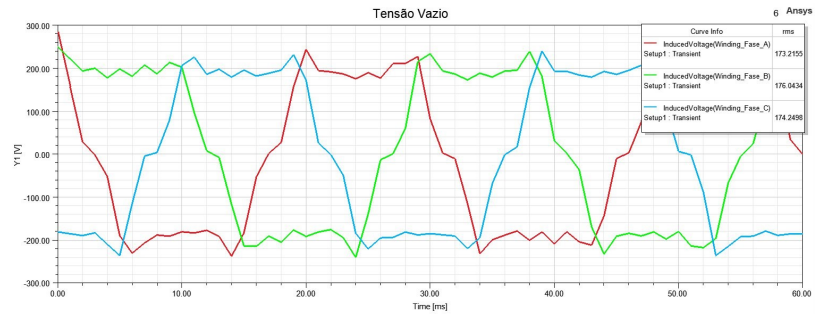


Figura B.3: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 6mm$.

- $hm = 7mm$

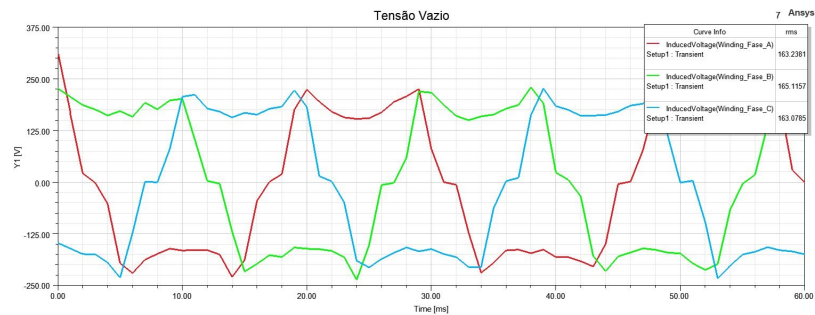


Figura B.4: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 7mm$.

- $hm = 10mm$

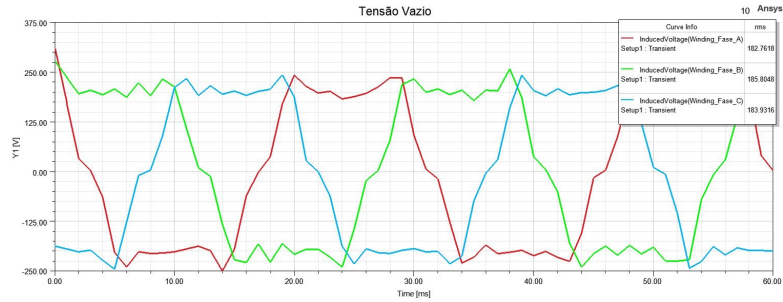


Figura B.5: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 10mm$.

B.1.2 Variação na distância entre os ímãs

- $\alpha_{ran} = 2,5^\circ$

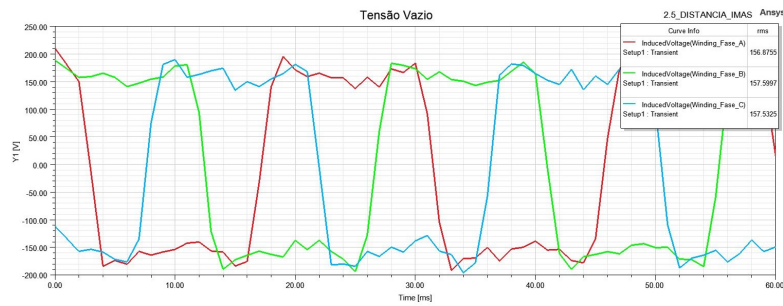


Figura B.6: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 2,5^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 5^\circ$

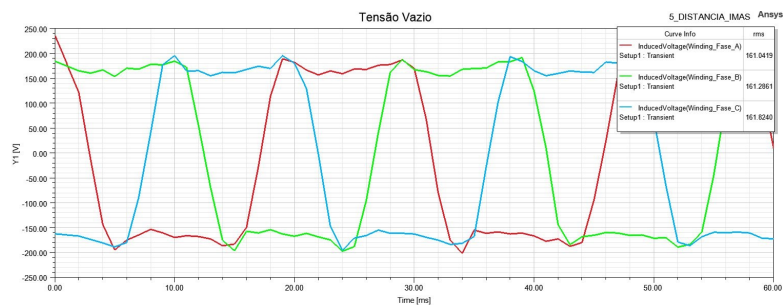


Figura B.7: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 5^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 7,5^\circ$

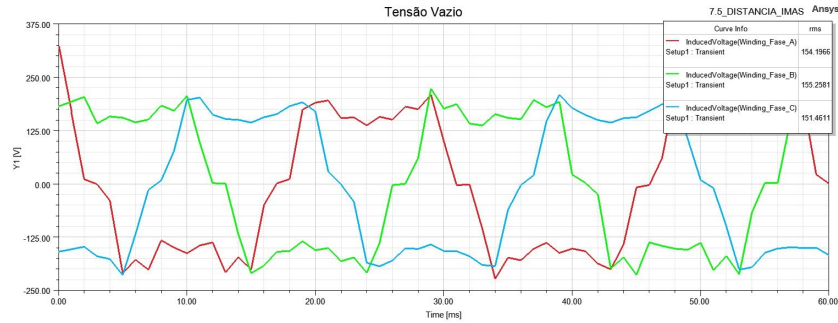


Figura B.8: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 7,5^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 12,5^\circ$

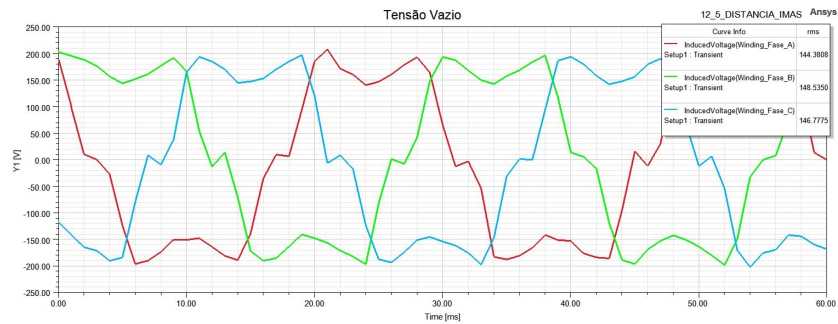


Figura B.9: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 12,5^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 15^\circ$

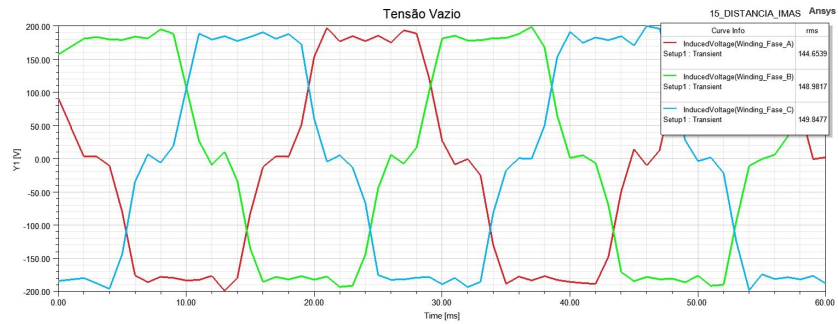


Figura B.10: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 15^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 17,5^\circ$

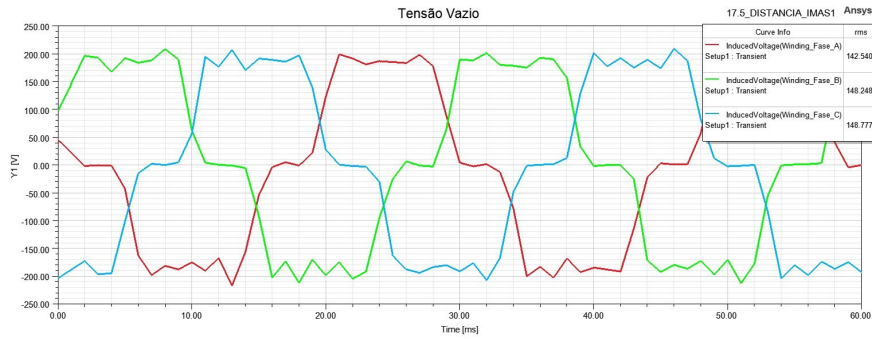


Figura B.11: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 17,5^\circ$.

B.2 Simulações com carga resistiva

B.2.1 Variação na altura dos ímãs

- $hm = 3mm$

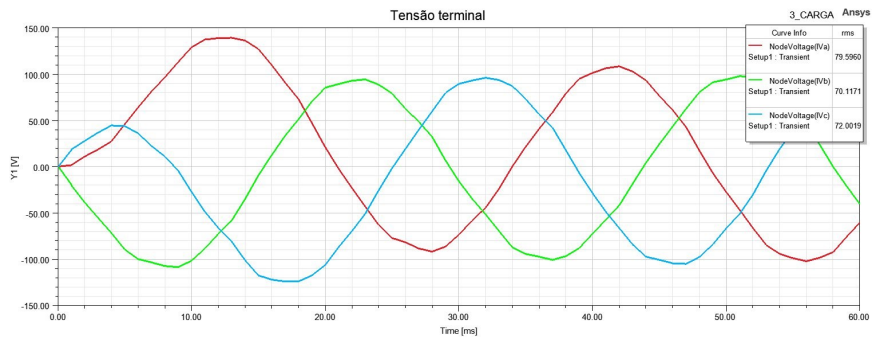


Figura B.12: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 3mm$.

- $hm = 4mm$

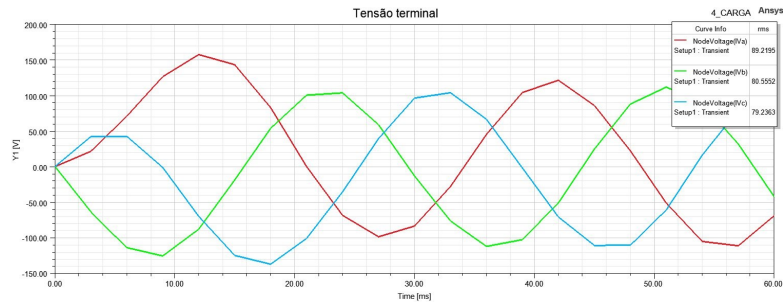


Figura B.13: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 4mm$.

- $hm = 6mm$

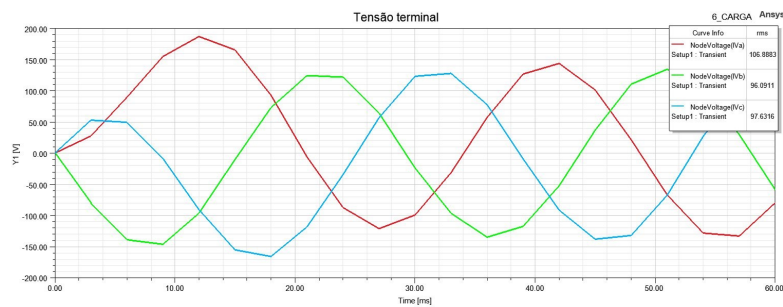


Figura B.14: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 6mm$.

- $hm = 7mm$

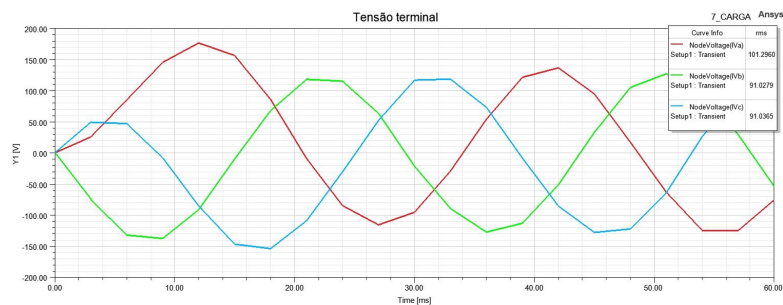


Figura B.15: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 7mm$.

- $hm = 10mm$

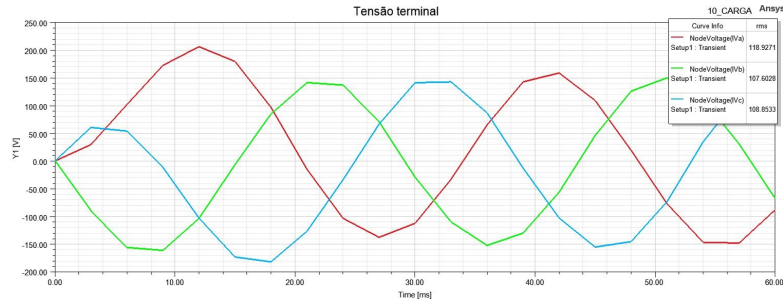


Figura B.16: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $hm = 10mm$.

B.2.2 Variação na distância entre os ímãs

- $\alpha_{ran} = 2,5^\circ$

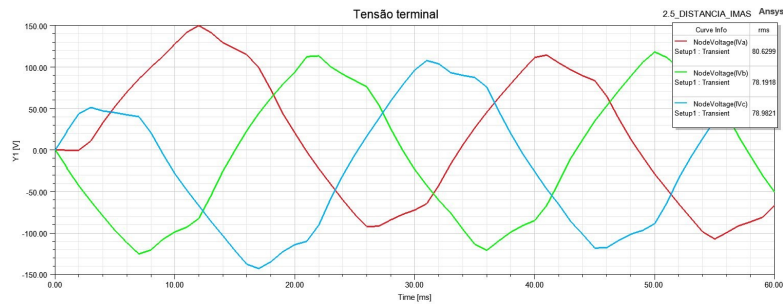


Figura B.17: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 2,5^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 5^\circ$

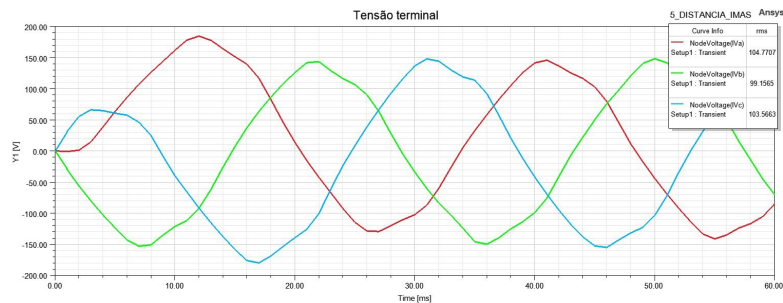


Figura B.18: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 5^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 7,5^\circ$

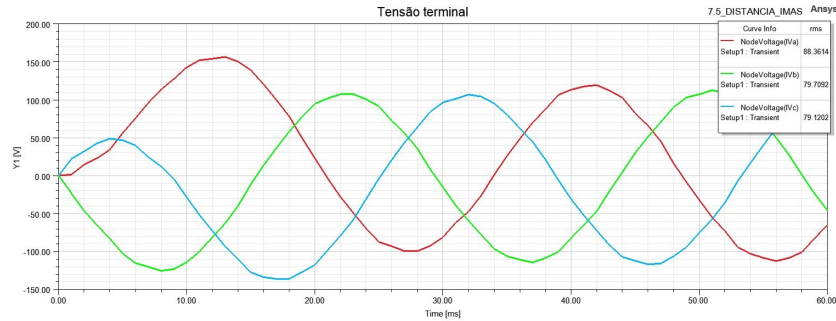


Figura B.19: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 7,5^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 12,5^\circ$

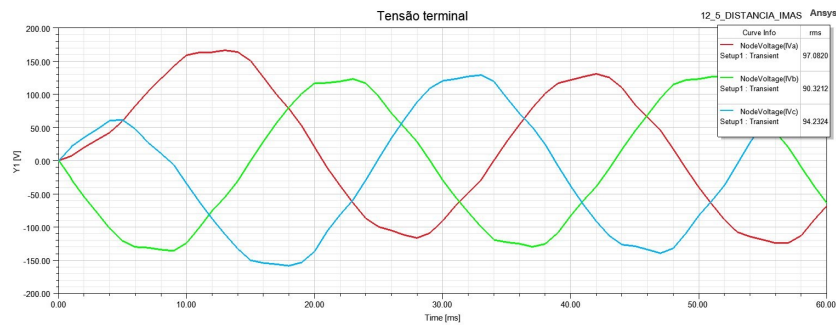


Figura B.20: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 12,5^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 15^\circ$

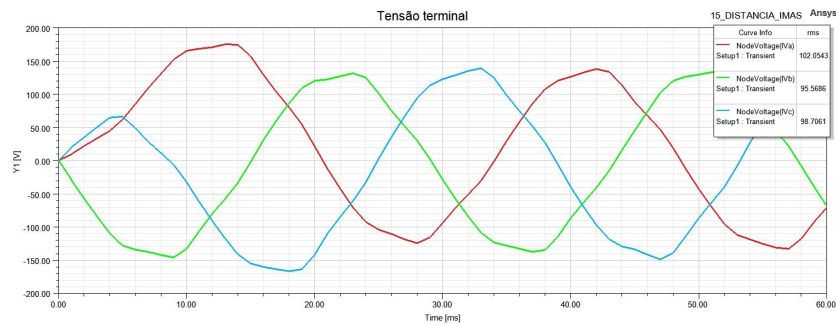


Figura B.21: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 15^\circ$.

- $\alpha_{ran} = 17,5^\circ$

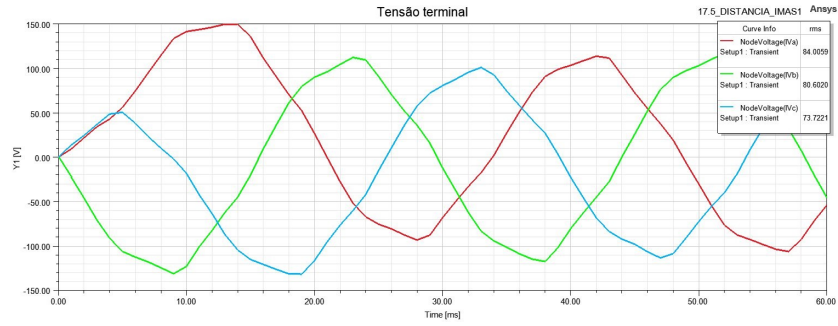


Figura B.22: Tensão terminal do gerador obtida através da simulação quando $\alpha_{ran} = 17,5^\circ$.

