



ipb
INSTITUTO POLITÉCNICO
DE BRAGANÇA



UNIVERSIDADE
DA CORUÑA

Dimensionamento de Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes para Energia Eólica

Pedro Tavares Silva Parreira de Azevedo

Supervisor: Prof. Ângela Paula Barbosa da Silva Ferreira, PhD.

Co-supervisor: Prof. Thiago de Paula Machado Bazzo, PhD.

Co-supervisor: Prof. José Luis Calvo Rolle, PhD.

Bragança

Março 2022

Pedro Tavares Silva Parreira de Azevedo



**UNIVERSIDADE
DA CORUÑA**

Dimensionamento de Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes para Energia Eólica

Dissertação apresentada como critério parcial para obtenção de grau de mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética no Instituto Politécnico de Bragança no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a Universidade da Coruña.

Supervisor: Prof. Ângela Paula Barbosa da Silva Ferreira, PhD.

Co-supervisor: Prof. Thiago de Paula Machado Bazzo, PhD.

Co-supervisor: Prof. José Luis Calvo Rolle, PhD.

Bragança

Março 2022

Pedro Tavares Silva Parreira de Azevedo: *Dimensionamento de Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes para Energia Eólica* , © Março 2022

**Dedico este trabalho à minha maior professora,
prof. Débora Tavares, PhD.**

*Minha mãe que sempre me incentivou a seguir em frente e sempre me
apoiou em minhas decisões.*

ABSTRACT

This work presents the development of a methodology for designing a permanent magnet synchronous generator (PMSG) with magnets mounted on the rotor surface, a machine with several practical applications.

The focus of this dissertation was focused on small wind energy applications, a renewable energy source in exponential growth. The chosen topology presents a great competitive advantage over other electric machines, since it offers the possibility of assembly with a high number of poles, thus eliminating the need for a transmission box in this way reducing the number of mechanical parts in the assembly.

Sought to implement a project methodology where it was possible to obtain all project parameters in a direct and simplified way.

The procedure used analytical equations to the develop a step-by-step design methodology that presented as output all physical dimensions of the machine and all electrical parameters such as voltage, current, power, load angle, armature resistance, synchronous inductance, losses etc.

To obtain the complete model of the machine several models present in different literatures were gathered, and then adapted to fit in the chosen topology and in the same calculation flow.

To verify the project, we used a commercial software that uses the finite element method with a high precision in simulations.

The proposed method produced as a result a 7.5 kVA Synchronous Generator, 300 RPM and 20 poles. The rated voltage and frequency similar to those of the European electricity network. The values were verified and presented the expected accuracy.

Keywords: Synchronous Generator, Project Methodology, Electrical Machines, Permanent Magnets.

RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de uma metodologia para projetar-se um gerador síncrono de ímãs permanentes (PMSG) com ímãs montados sobre a superfície do rotor, máquina com diversas aplicações práticas.

O foco desta dissertação concentrou-se em pequenos aproveitamentos eólicos, fonte renovável de energia em crescimento exponencial. A topologia escolhida apresenta grande vantagem competitiva em relação a outras máquinas elétricas, uma vez que proporciona a possibilidade de montagem com um elevado número de polos, assim eliminando a necessidade de uma caixa de transmissão desta maneira reduzindo o número de partes mecânicas no conjunto.

Buscou-se implementar uma metodologia de projeto onde é possível obter todos os parâmetros de projeto de maneira direta e simplificada.

O procedimento utilizou de equações analíticas para o desenvolvimento de uma metodologia de projeto passo-a-passo que apresentou como saída todas as dimensões físicas da máquina e todos os parâmetros elétricos tais como a tensão, corrente, potência, ângulo de carga, resistência de armadura, indutância síncrona, perdas, etc.

Para obter o modelo completo da máquina diversos modelos presentes em diferentes literaturas foram reunidos, e então adaptados para que se encaixassem na topologia escolhida e em um mesmo fluxo de cálculo.

Para verificar o projeto utilizou um software comercial conceituado que utiliza do método dos elementos finitos e elevada precisão em simulações.

O método proposto produziu como resultado um Gerador Síncrono de 7,5 kVA, 300 RPM e 20 polos. A tensão e a frequência nominais similares aos valores da rede elétrica europeia. Os valores foram verificados e apresentaram resultados similares.

Palavras-chave: Gerador Síncrono, Metodologia de projeto, Máquinas Elétricas, Ímãs Permanentes.

RESUMEN

Este trabajo aborda el desarrollo de una metodología para diseñar un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) con imanes montados sobre la superficie del rotor, máquina con diversas aplicaciones prácticas.

El foco de esta disertación se concentró en pequeños aprovechamientos eólicos, fuente renovable de energía en crecimiento exponencial. La topología elegida presenta una gran ventaja competitiva con respecto a otras máquinas eléctricas, ya que ofrece la posibilidad de montaje con un elevado número de polos, eliminando así la necesidad de una caja de transmisión de esta manera reduciendo el número de partes mecánicas en el conjunto.

Se buscó implementar una metodología de proyecto donde es posible obtener todos los parámetros de proyecto de manera directa y simplificada.

El procedimiento utilizó ecuaciones analíticas para el desarrollo de una metodología de diseño paso a paso que presentó como salida todas las dimensiones físicas de la máquina y todos los parámetros eléctricos tales como la tensión, corriente, potencia, ángulo de carga, resistencia de armadura, inductancia síncrona, pérdidas, etc.

Para obtener el modelo completo de la máquina varios modelos presentes en diferentes literaturas fueron reunidos, y entonces adaptados para que encajaran en la topología elegida y en un mismo flujo de cálculo.

Para verificarse el proyecto se utilizó un conceptuado software comercial que utiliza el método de los elementos finitos y tiene una alta precisión en simulaciones.

El método propuesto ha producido como resultado un Generador Síncrono de 7,5 kVA, 300 RPM y 20 polos. La tensión y la frecuencia nominales similares a las de la red eléctrica europea. Los valores fueron verificados y han presentado la precisión esperada.

Palavras-chave: Generador Síncrono, Metodología de diseño, Máquinas Eléctricas, Imanes Permanentes.

*Nosso mundo está imerso em um enorme oceano de energia,
estamos voando em um espaço infinito com uma velocidade incompreensível.
Tudo gira, tudo se move, tudo é energia.*

— Nikola Tesla

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família que sempre me incentivou a ir além. Minha mãe, Débora, meus avós, Maria Elizabeth e Edgar, por todo apoio e conselhos que tive durante toda a vida.

Agradeço aos meus professores orientadores, prof. Ângela Ferreira, prof. Thiago Bazzo e prof. José Luis Calvo que me auxiliaram neste percurso e tiveram a paciência de me orientar, sempre me corrigir nos meus erros e me mostrar o caminho para desenvolver este projeto.

Agradeço a todos os professores que tive desde o início da graduação até este momento, em especial aos professores Andrea Lúcia, Bruno Yamamura, Celso Fabrício, Diego Issicaba, Fabiano Magrin, José Batista, Luis Frölen, Luiz Erley, Marco José, Orlando Soares e Sérgio Gouvêa que me lecionaram disciplinas que foram fundamentais neste percurso.

Agradeço a todos meus colegas e amigos que fiz neste percurso, em especial a meus amigos Álisson, André, Liliã e Tamara que em diversos momentos me incentivaram a escrever esta dissertação.

Agradeço a toda a equipe da UTFPR, IPB e UdC, por terem me acolhido de braços abertos e de alguma maneira terem contribuído para minha formação e me proporcionarem todas estas oportunidades.

Agradeço a comunidade portuguesa e espanhola por terem sido tão receptivos e terem me proporcionado um lar nestes últimos anos.

Por fim agradeço a todos que de alguma forma fizeram parte desta trajetória, e tenham auxiliado a me formar seja como pessoa ou de maneira profissional.

CONTEÚDO

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	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Tipos de geradores	5
2.2	Projetos de geradores em publicações	6
2.3	Metodologia de Projeto	7
2.4	Evolução do projeto de máquinas	7
3	MODELO ANALÍTICO DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES	9
3.1	Descrição do gerador	9
3.1.1	Topologia	10
3.1.2	Os Materiais Ferromagnéticos	11
3.1.3	Princípio de funcionamento	16
3.2	Descritivo do projeto	19
3.3	Dimensionamento	23
3.3.1	Especificações de Projeto	23
3.3.2	Parâmetros Impostos	25
3.3.3	Modelo do Rotor	30
3.3.4	Modelo do Estator	32
3.3.5	Resistência de Armadura	35
3.3.6	Indutância Síncrona	35
3.3.7	Tensão terminal e Ângulo de carga	37
3.3.8	Perdas	37
3.3.9	Potência entregue e rendimento	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Escolhas de Projeto	40
4.1.1	Escolhas de materiais	44
4.2	Implantação do modelo numérico	47
4.2.1	Enrolamento e Circuito externo	48
4.2.2	Malha de elementos finitos	49
4.2.3	Simulação através do método dos elementos finitos	50
5	CONCLUSÃO	58
5.1	Síntese do trabalho	58
5.2	Trabalhos futuros	59

REFERÊNCIAS	60
Apêndice	
A PLANILHA DE CÁLCULOS DO MODELO ANALÍTICO	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Potência eólica instalada em MW de 1996 até 2020 [4] [5]	2
Figura 2.1	Evolução das máquinas elétricas [25]	8
Figura 3.1	Exemplo de gerador que pode ser projetado em corte	9
Figura 3.2	Caminho percorrido pelos fluxos em um par de polos	10
Figura 3.3	Representação de um polo	11
Figura 3.4	Curva histerética de um material magnético mole e de um material magnético duro [29]	12
Figura 3.5	Curva BH de um ímã permanente grade N42 [30]	13
Figura 3.6	Produto energético de um ímã em relação a variação de seu campo magnético [32]	14
Figura 3.7	Obtenção do coeficiente de permeância a partir da curva característica de um ímã [23]	15
Figura 3.8	Circuito equivalente do gerador síncrono	18
Figura 3.9	Diagrama fasorial de uma máquina de polos lisos	18
Figura 3.10	Fluxograma adaptado de [17]	19
Figura 3.11	Fluxograma para um PMSG	21
Figura 3.12	Esquema sugerido de conexão de gerador a rede elétrica [35]	24
Figura 3.13	Esquema do inversor CC/CA comercial Windy Boy [35]	24
Figura 3.14	Exemplos de modelos de ranhuras a) Ranhura com fundo reto, b) ranhura com abertura reta e c) ranhura com fundo abaulado	26
Figura 4.1	i. Corte de um polo em escala ii. Corte do gerador projetado em escala	43
Figura 4.2	Curva BH do aço M19_24G [43] (adaptado)	45
Figura 4.3	Curva BH do ímã N42SH (vermelho) e linha de carga para um PC=4 (azul)	46
Figura 4.4	Esquema de enrolamento das bobinas de armadura	48
Figura 4.5	Circuito externo implantado	49
Figura 4.6	Malha utilizada na simulação	50
Figura 4.7	Distribuição do fluxo magnético obtido através da simulação MEF	51
Figura 4.8	Indutâncias obtida através da simulação MEF	52

Figura 4.9	Tensão interna gerada obtida através do modelo numérico	52
Figura 4.10	Tensão terminal obtida através da simulação MEF	53
Figura 4.11	Corrente de fase obtida através da simulação MEF	53
Figura 4.12	Torque em carga através da simulação	54
Figura 4.13	Torque a vazio através da simulação	54
Figura 4.14	Distorção Harmônica da tensão terminal	55
Figura 4.15	Perdas no núcleo do gerador obtida através da simulação MEF	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Sufixo normalizado em relação com a temperatura máxima de operação [33]	16
Tabela 3.2	Classes de isolamento de máquinas elétricas segundo IEC 60085	16
Tabela 4.1	Especificações de projeto	40
Tabela 4.2	Parâmetros utilizados no algoritmo do projeto	41
Tabela 4.3	Escolhas de projeto	42
Tabela 4.4	Principais resultados geométricos	43
Tabela 4.5	Principais resultados	44
Tabela 4.6	Secções AWG [44] mais comuns em máquinas elétricas	46
Tabela 4.7	Comparativo entre os modelos analítico e numérico	57

ACRÔNIMOS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A_{Acb}	Comprimento do arco de cabeça de bobina
B_d	Cálculo da densidade de fluxo nos dentes
B_{Ec}	Indução magnética admissível na coroa do estator
B_{Io}	Indução magnética no centro do ímã
B_{Rc}	Indução magnética admissível na coroa do rotor
C_{A1e}	Comprimento médio de uma espira
C_{AX}	Comprimento axial da máquina
CGS	Centímetro-Grama-Segundo
$D_{\alpha Acb}$	Passo da bobina
D_{Ee}	Diâmetro externo do estator
D_{Ei}	Diâmetro interno do estator
D_{Rbi}	Diâmetro do rotor na base dos ímãs
D_{Ri}	Diâmetro interno do rotor
D_{Rt}	Diâmetro na altura do topo da ranhura
d_{fe}	Densidade do aço
D_{Re}	Diâmetro externo do rotor
E_a	Tensão interna gerada
E_{Apb}	Encurtamento de passo da bobina
f	Frequência
FEM	Força eletromotriz
FFT	Transformada Rápida de Fourier
h_{cr}	Altura da coroa do rotor
h_{Ec}	Altura da coroa do estator
h_{PM}	Altura do ímã permanente
h_R	Altura da Ranhura
h_{Rc}	Altura do colarinho da ranhura
h_{Rp}	Altura do pescoço da ranhura
I_A	Corrente de armadura
J_A	Densidade de corrente
K_{Adb}	Fator de distribuição das bobinas de armadura

K_{Aeb}	Fator de redução do fluxo devido ao encurtamento do passo da bobina de armadura
K_e	Fator de perdas por excesso
K_f	Fator de perdas por Foucault
K_h	Fator de perdas por histerése
$K_{\alpha p}$	Fator de encurtamento do passo polar
K_{cr}	Fator entre a altura de coroa do estator e altura da ranhura
K_{dr}	Relação entre a largura do dente e a largura no topo da ranhura
K_{ϕ}	Percentual de fluxo enlaçado
K_{ftd}	Fator de perdas por Foucault na coroa do estator
K_{ftys}	Fator de perdas por Foucault nos dentes
K_{hyd}	Fator de perdas por histerese nos dentes
K_{hyys}	Fator de perdas por histerese na coroa do estator
K_m	Fator de fluxo mútuo entre duas bobinas
K_{os}	Fator de perdas suplementares
K_{re}	Fator de enchimento da ranhura
K_{Stf}	Fator de perdas por ventilação
L_{cb}	Indutância de cabeça de bobina
L_{cbc}	Indutância de cabeça de bobina considerando o fluxo concatenado nos caminhos paralelos
L_{EF}	Comprimento do entreferro
L_{ef}	Componente de entreferro da indutância própria de cada fase
L_{PM}	Comprimento Axial dos Ímãs Permanentes
L_{ran}	Indutância de dispersão da ranhura
L_{Rc}	Largura do colarinho da ranhura
L_{Rf}	Largura da ranhura no fundo
L_{Rt}	Largura da Ranhura no topo
L_p	Indutância própria
L_S	Indutância síncrona
L_{EF}	Comprimento do entreferro
L_{Ra}	Largura da abertura da ranhura
m_{ecfe}	Massa da coroa do estator
m_{edfe}	Massa dos dentes do estator
M_{ef}	Indutância mútua do entreferro
MEF	Método dos Elementos finitos
N_{Abpf}	Número de bobinas por polo e por fase

N_{at}	Número de espiras por fase
N_{CP}	Número de caminhos paralelos
N_f	Numero de fases
N_R	Número de Ranhuras
N_{Rc}	Número de camadas da ranhura
P	Numero de Polos
P_a	Potência ativa
PC	Coefficiente de permeância
P_{ft}	Fator de perdas por Foucault no aço
P_{hy}	Fator de perdas por histerese no aço
PMSG	Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes
R_{Ac}	Resistência de armadura corrigida
R_A	Resistência de uma fase a temperatura ambiente
R_{Akm}	Resistência por quilometro do fio
S_{Ac}	Área dos condutores do enrolamento
S_d	Potência aparente
S_R	Área da Ranhura
S_{Ed}	Potência Aparente de projeto
T_{op}	Temperatura de operação em regime permanente
T_{ref}	Temperatura ambiente de referência
V_{ecfe}	Volume da coroa do estator
V_{edfe}	Volume dos dentes do estator
V_f	Tensão de fase
v_r	Velocidade da superfície do rotor
V_T	Tensão terminal
WECS	Sistemas de Conversão de Energia Eólica
X_S	Reatância síncrona
α_{Ab}	Passo da bobina de armadura
α_{Pef}	Passo Efetivo do polo
α_R	Passo da Ranhura
α_p	Passo polar
δ	Ângulo de carga
η	Rendimento
ϕ	Ângulo entre tensão e corrente
ϕ_{enl}	Fluxo enlaçado
ϕ_{lace}	Fluxo de um laço

ρ_{cu}	Perdas no cobre
ρ_{Ftd}	Perdas Foucault nos dentes
ρ_{Fyys}	Perdas Foucault na coroa do estator
ρ_{Hyd}	Perdas por histerése nos dentes
ρ_{Hyys}	Perdas por histerése na coroa do estator
ρ_t	Perdas totais
ρ_v	Perdas por ventilação
τ_p	Comprimento de arco de passo polar
θ_{Rip}	Ângulo de inclinação da parede da ranhura
θ_{Rt}	Ângulo ocupado pela ranhura no topo

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A crescente demanda energética global e o apelo por fontes de energias renováveis é uma realidade global [1]. A maioria dos países têm projetos ambiciosos em relação à produção de energia elétrica e alguns destes pretendem zerar as emissões de carbono relativas a este tema nas próximas décadas [2].

A energia dos ventos é conhecida e utilizada pelo ser humano há milhares de anos, os primeiros registros datam aproximadamente o ano de 200 a. C. nos moinhos de ventos da Pérsia, na idade média esta energia foi de suma importância para as grandes navegações e assim possibilitaram os descobrimentos [3].

Na era moderna, novas aplicações são estudadas para utilização da energia dos ventos, o bombeamento de água ganhou uma posição de destaque no século passado em propriedades rurais.

Com o avanço da tecnologia e a busca de fontes mais limpas para produção de energia elétrica, possibilitou-se o desenvolvimento de geradores de energia elétrica movidos pela força dos ventos, os chamados aerogeradores [3].

Nas últimas décadas a produção de energia elétrica através dos ventos tem ganhado uma posição de destaque no cenário global, cada vez é mais comum ao viajarmos por rodovias avistar parques eólicos pelo trajeto.

A década de 90 foi considerada um divisor de águas para o segmento, quando houve uma grande evolução na tecnologia empregada e o início do crescimento e surgimento de novos sítios para produção de energia. A figura 1.1 representa a potência global instalada desde 1996 até 2020 [4] [5].

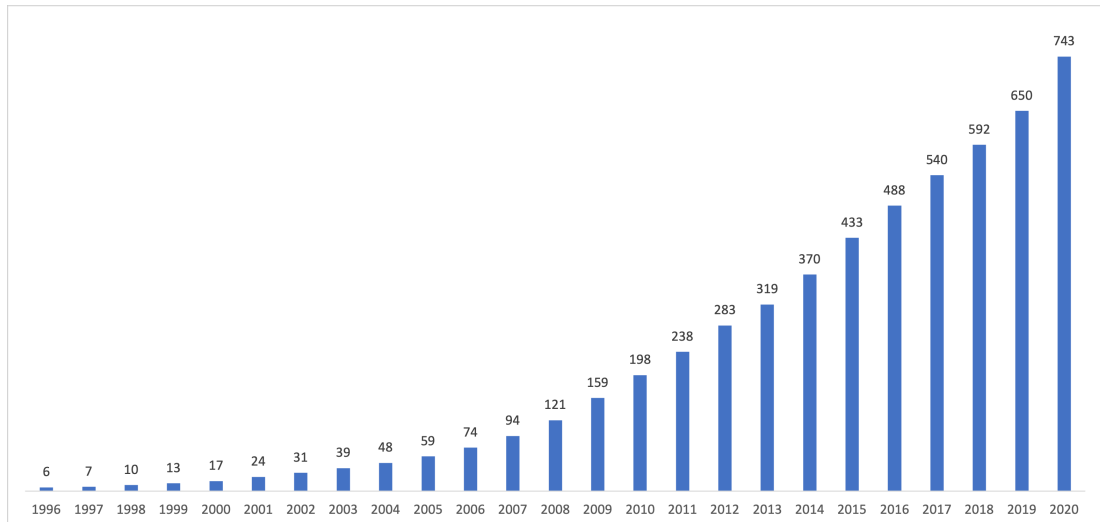


Figura 1.1: Potência eólica instalada em MW de 1996 até 2020 [4] [5]

Para a produção de energia eólica diversas máquinas elétricas são utilizadas, entre estas encontra-se o gerador síncrono que possui como principais vantagens a facilidade de operação e alto rendimento.

Geradores síncronos de ímãs permanentes podem ser construídos com um elevado número de polos, de maneira que a velocidade nominal de rotação do rotor seja reduzida dispensando a necessidade de uma caixa conversora de velocidade. Esta máquina também dispensa a necessidade de retroalimentação uma vez que o fluxo magnético é gerado pelos ímãs permanentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

A criação de um modelo de projeto de geradores permite criar máquinas específicas para cada aplicação, ao invés de utilizar geradores fabricados em série para aplicações genéricas. Máquinas desenvolvidas com aplicações específicas costumam apresentar maior eficiência e menor necessidade de adaptações.

A partir disto justifica-se o desenvolvimento de ferramentas que permitem projetar máquinas com diferentes características adaptadas a finalidade, pois novas fontes de energia necessitam de máquinas adequadas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 *Objetivo Geral*

Esta dissertação visa o desenvolvimento de um projeto de geradores síncronos de ímãs permanentes para aplicações em energias renováveis, com foco em pequenos aproveitamentos eólicos.

O modelo de projeto divide-se em duas partes, um subprojeto através de equações analíticas e outro subprojeto numérico implementado em um software de elementos finitos.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Estudar a energia eólica e seus geradores;
- Pesquisar ferramentas e metodologias de projetos de geradores;
- Entender como se analisa um gerador;
- Aprender como se definem parâmetros de projeto de um gerador;
- Elaborar um procedimento de projeto de geradores;
- Realizar um projeto utilizando o procedimento desenvolvido;
- Verificar o projeto utilizando o método dos elementos finitos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação foi desenvolvida ao longo de cinco capítulos, sendo estes:

- Capítulo 1: Introdução

O primeiro capítulo contém a motivação, a justificativa e os objetivos do trabalho.

- Capítulo 2: Revisão bibliográfica

O segundo capítulo apresenta um pouco do estado da arte do desenvolvimento de projetos de geradores síncronos, associado a um pouco da história das máquinas elétricas.

- Capítulo 3: Modelo analítico do gerador síncrono de ímãs permanentes

O terceiro capítulo trata do desenvolvimento do trabalho, primeiramente descreve o gerador e explica como pode-se calcular alguns parâmetros de projeto.

Posteriormente apresenta-se o fluxo de projeto, as variáveis de entrada e todas as equações para estabelecer as variáveis de saída.

- Capítulo 4: Resultados e discussões

O quarto capítulo discute o modelo desenvolvido no terceiro capítulo e apresenta um gerador proveniente da metodologia apresentada.

Em seguida implanta-se o modelo numérico no intuito de verificar se os valores obtidos e o modelo analítico estão condscendentes com uma máquina real.

- Capítulo 5: Conclusão

O capítulo final debate sobre as conclusões obtidas a partir dos estudos e sugestões de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o estado atual do desenvolvimento de projetos de máquinas elétricas, especialmente geradores aplicados a fontes renováveis de energia.

Metodologias de projeto de geradores são estudadas há muitos anos, todavia algoritmos ou fluxos de projeto ainda são pouco presentes em publicações científicas.

Algumas teses doutorais ou dissertações de mestrado tem por objetivo apresentar metodologias, porém restritas a algumas aplicações, muitas vezes não sendo possível aproveitar-se da metodologia do projeto para realizar alterações e utilizá-la em outras aplicações.

Os projetos de geradores podem ser divididos de acordo com o tipo de máquina, com sua topologia ou também de acordo com as restrições de projeto.

2.1 TIPOS DE GERADORES

As máquinas rotativas utilizadas na geração de energia elétrica podem ser divididas em 3 principais grupos, sendo estes [6]:

- Máquinas de Corrente Contínua;
- Máquinas Assíncronas;
- Máquinas Síncronas.

Sendo que os geradores de corrente contínua como o próprio nome sugere produzem energia em corrente contínua. O que diferencia os geradores síncronos dos assíncronos é o princípio de funcionamento, uma vez que os dois produzem corrente alternada [6] [7].

Na máquina síncrona a velocidade de rotação acompanha a frequência elétrica, o fluxo pode ser gerado através de ímãs permanentes ou eletroímãs que são alimentados através de um circuito externo ao rotor [6] [7].

Em oposição, na máquina assíncrona (ou de indução) as correntes são induzidas no próprio rotor através da variação no tempo das correntes do estator e o próprio movimento do rotor, existe uma pequena diferença entre a velocidade do rotor e a frequência elétrica (chamada de escorregamento) [6] [7].

Com o foco em sistemas de conversão de energia eólica, os geradores utilizados são [8]:

- Gerador de Indução de Gaiola de Esquilo;
- Gerador de Indução duplamente Alimentado;
- Gerador Síncrono de Rotor Bobinado;
- Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes;
- Gerador de Relutância Comutado.

Sendo os mais comuns nesta aplicação, o gerador de indução duplamente alimentado e o gerador síncrono de ímãs permanentes.

Para demais fontes renováveis de energia, tais como biomassa ou hidroeletricidade, o mais comum são os geradores síncronos de rotor bobinado. Isto se deve ao fato da facilidade de controle de tensão pois se pode controlar o fluxo do campo e a frequência elétrica se dá em função da velocidade de rotação (não há escorregamento como na máquina de indução) [6] [7].

2.2 PROJETOS DE GERADORES EM PUBLICAÇÕES

Por mais que os projetos estejam em constante evolução em busca de otimizações, melhorias de processos ou reduções de custos, porém muitas vezes ficam restritas as empresas desenvolvedoras para fins comerciais gerando vantagens competitivas aos fabricantes.

Alguns livros como [9] ou [8] apresentam metodologias gerais para projetar-se uma máquina elétrica girante, a qual não é direcionada a um tipo específico de máquina.

No entanto livros como [10] apresentam metodologias para projetar-se geradores síncronos com as topologias mais comuns, no caso de [11] apresenta-se uma metodologia completa direcionada a projeto de geradores síncronos de ímãs permanentes.

Outros livros como por exemplo [12] ou [13] apresentam metodologias para projetos de motores que podem ser adaptados para utilizar-se em geradores.

Em casos de artigos pode-se citar alguns que apresentam partes de metodologias como por exemplo [14], [15] ou [16], ou como no caso de [17] que apresenta uma metodologia passo-a-passo para projetar-se um gerador síncrono de polos salientes e [18] apresenta uma metodologia simplificada para um gerador síncrono de ímãs permanentes.

Em relação a pesquisas bibliográficas pode-se exemplificar trabalhos de conclusão de curso que estudam metodologias de projeto

como no caso de [19], dissertações de mestrado como no caso de [20], [21] ou teses doutorais como é o caso de [22] que ensaiou uma metodologia de projeto de uma máquina de fluxo axial ou [23] e [24] que desenvolveram um projeto ótimo de geradores.

2.3 METODOLOGIA DE PROJETO

Independente do nível de refinamento do projeto, topologia ou finalidade da máquina, a maioria dos projetos possuem um denominador comum.

Inicia-se a modelagem através de modelos analíticos e posteriormente implanta-se o modelo em um software de elementos finitos com a finalidade de verificar a fidelidade do projeto.

Existem modelos mais complexos de projeto como [15] que levam em consideração diversos fatores, implantam redes de relutância para maior fidelidade do modelo analítico, outros como [19] adotam hipóteses simplificadoras, como a permeabilidade infinita do ferro, que posteriormente são corrigidas no modelo numérico.

Alguns projetos como [22] partem para protótipos da máquina, outros como [19] ficam restritos a modelagens por softwares, outros podem ser de fabricantes que podem comercializá-los. Cada projeto pode ter um diferente nível de refinamento de acordo com a aplicação ou finalidade do estudo.

2.4 EVOLUÇÃO DO PROJETO DE MÁQUINAS

Graças aos estudos em máquinas elétricas, o refinamento dos projetos e evolução das ciências dos materiais, cada vez mais se torna possível construir máquinas menores e mais eficientes.

As máquinas elétricas foram desenvolvidas graças ao advento da eletricidade e ao avanço das pesquisas nos campos do magnetismo e do eletromagnetismo, os quais foram cruciais tanto para a criação quanto a evolução destes equipamentos [25].

Alguns acontecimentos foram fundamentais para o desenvolvimento das máquinas girantes tais como [25]:

- 1820 - Oersted - Geração do campo magnético pela corrente elétrica;
- 1825 - Sturgeon - Invenção do eletroímã;
- 1866 - Siemens - Primeira máquina elétrica economicamente viável;

- 1887 - Dolivo-Dobrowolsky - Primeira máquina trifásica.

Após anos de evolução das máquinas as maiores modificações são em relação à utilização de materiais isolantes, precisão nos equipamentos, melhora dos materiais magnéticos etc [25].

A figura 2.1 representa a evolução no tamanho físico de máquinas elétricas desde 1891.

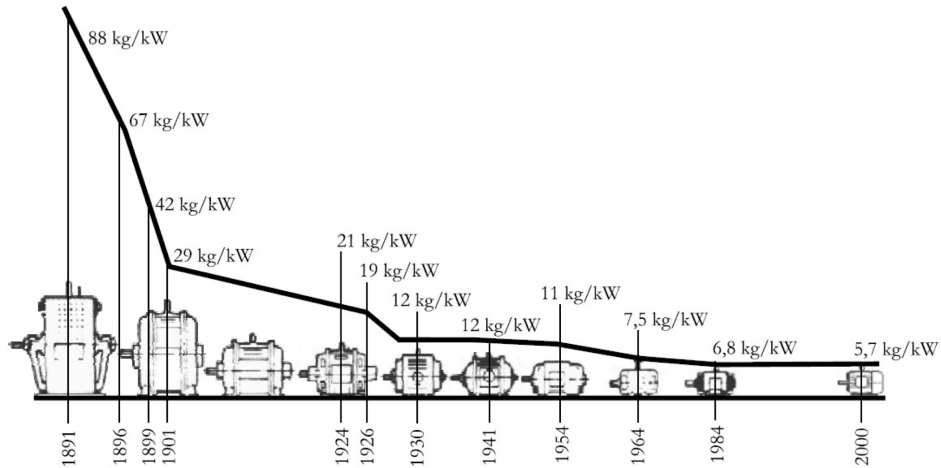


Figura 2.1: Evolução das máquinas elétricas [25]

A melhora na eficiência desde a década de 1970 pode ser atribuída ao desenvolvimento do método dos elementos finitos aplicados a máquinas elétricas [26].

MODELO ANALÍTICO DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida para projetar-se um gerador síncrono de ímãs permanentes, a qual foi criada a partir de adaptações de uma metodologia pré-existente publicada no artigo [17] que por sua vez é baseado em livros como [9] [12] [11] [10].

Em [17] apresenta-se o passo a passo para o desenvolvimento de um gerador síncrono de rotor bobinado e polos salientes, já nesta adaptação apresenta-se a metodologia para o desenvolvimento de um gerador síncrono de ímãs permanentes, com os ímãs montados sob a superfície do rotor e portanto a máquina pode se analisar de maneira similar a uma máquina de polos lisos.

3.1 DESCRIÇÃO DO GERADOR

A figura 3.1 apresenta a secção de um exemplo de gerador que pode ser projetado a partir da metodologia desenvolvida, todavia o número de polos, dimensões e número de ranhuras podem variar de acordo com cada projeto.

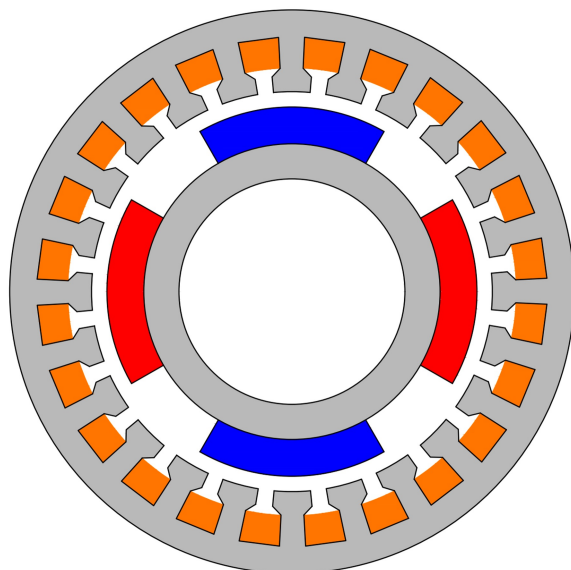


Figura 3.1: Exemplo de gerador que pode ser projetado em corte

O projeto consiste em um gerador síncrono de ímãs permanentes, uma máquina elétrica que pode ter diversas aplicações dependendo de suas especificações. Sendo as aplicações mais usuais centradas em fontes renováveis como a energia eólica.

3.1.1 Topologia

A topologia do gerador consiste em um gerador de fluxo radial, o fluxo magnético flui dos ímãs com superfície externa polarizadas para o norte (em vermelho), cruza o entreferro radialmente, percorre os dentes em direção a coroa do estator então faz o caminho reverso em direção aos ímãs com superfície externa polarizadas para o sul (em azul) e fecha o percurso cruzando a coroa do rotor [9] [27].

O caminho do fluxo magnético se comporta como o apresentado na figura 3.2, sendo que a ilustração representa uma secção equivalente a 2 polos do gerador.

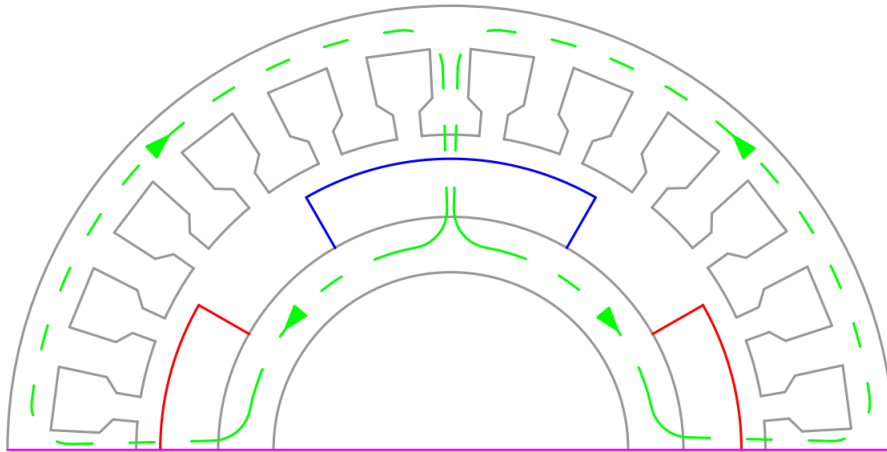


Figura 3.2: Caminho percorrido pelos fluxos em um par de polos

Como apresentado na figura 3.1 a topologia do rotor consiste em uma coroa circular com ímãs montados em sua superfície de forma que os ímãs possuem faces retas em suas laterais e curvas onde estão montados sobre a superfície rotórica e na face externa.

O número de ranhuras pode variar conforme o projeto, sendo esta múltipla do número de fases e do número de polos.

A figura 3.3 representa a seção de um polo, onde observa-se a geometria e algumas dimensões da máquina.

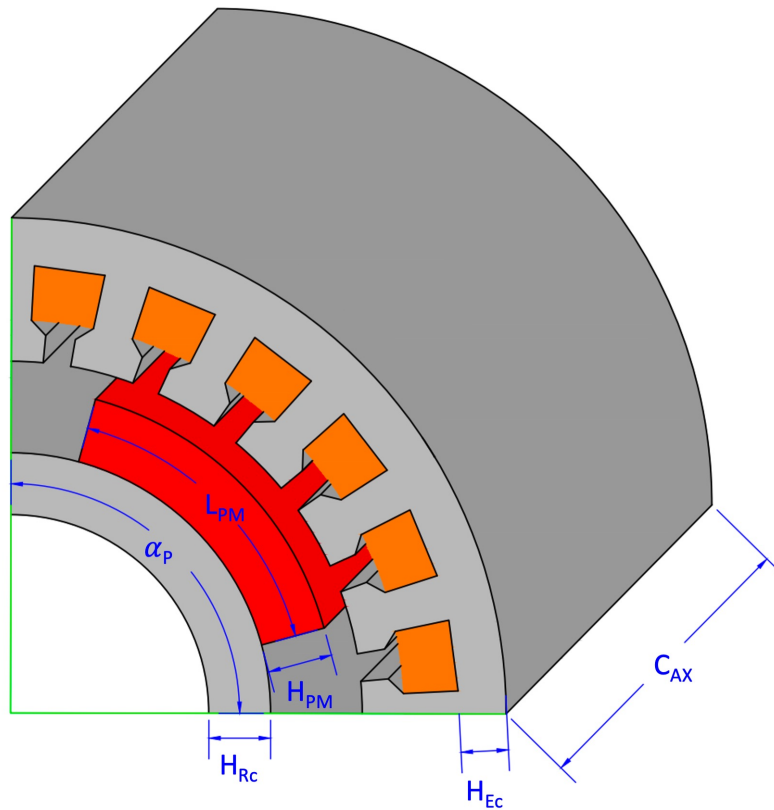


Figura 3.3: Representação de um polo

3.1.2 Os Materiais Ferromagnéticos

3.1.2.1 Materiais magnéticos moles e duros

Os materiais magnéticos podem ser divididos em dois grupos, os materiais moles e duros.

Os materiais moles têm como característica uma alta permeabilidade magnética, porém uma baixa coercitividade, o que faz com que estes materiais sejam utilizados como condutores de fluxo magnético (ferro da máquina) [28] [10].

Os materiais duros têm características opostas aos moles, ou seja, baixa permeabilidade e alta coercitividade, o que faz com que estes sejam mais difíceis de magnetizar e desmagnetizar. Mesmo que estes materiais sejam maus condutores de fluxo magnético, quando magnetizados eles induzem o campo magnético, sendo estes os ímãs permanentes [28] [10].

Esta indução pode ser mensurada e representada através de uma curva e no ponto onde é máxima o campo H é zero, neste ponto é chamada de indução remanente.

As diferenças entre as curvas histeréticas destes dois materiais são ilustradas pela figura 3.4.

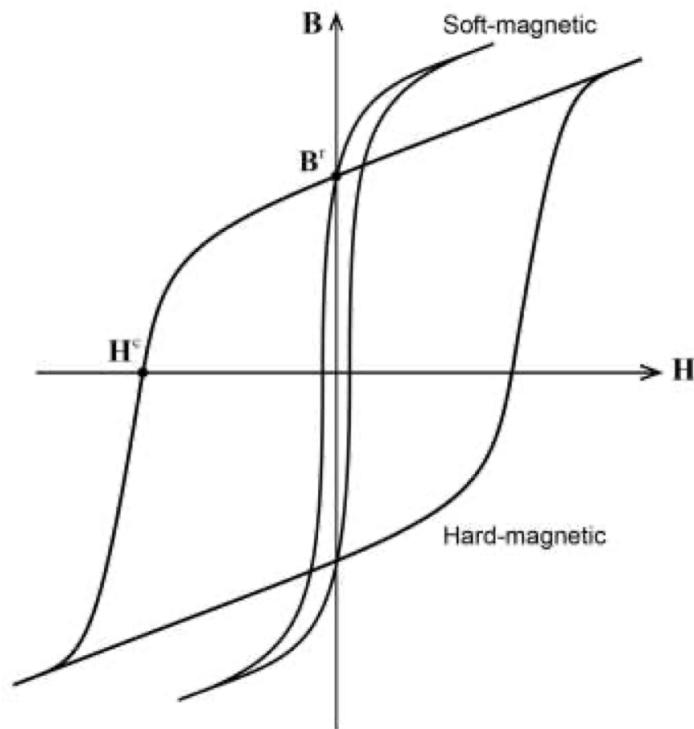


Figura 3.4: Curva histerética de um material magnético mole e de um material magnético duro [29]

3.1.2.2 Indução remanente

A indução remanente é uma característica intrínseca a cada tipo de ímã a qual varia de acordo com a temperatura. Quanto maior a temperatura, menor a indução magnética, causando assim uma redução na capacidade de produção de fluxo magnético.

A figura 3.5 exemplifica as diferentes curvas BH do ímã permanente N42 de acordo com o *datasheet* do fabricante K&J [30].

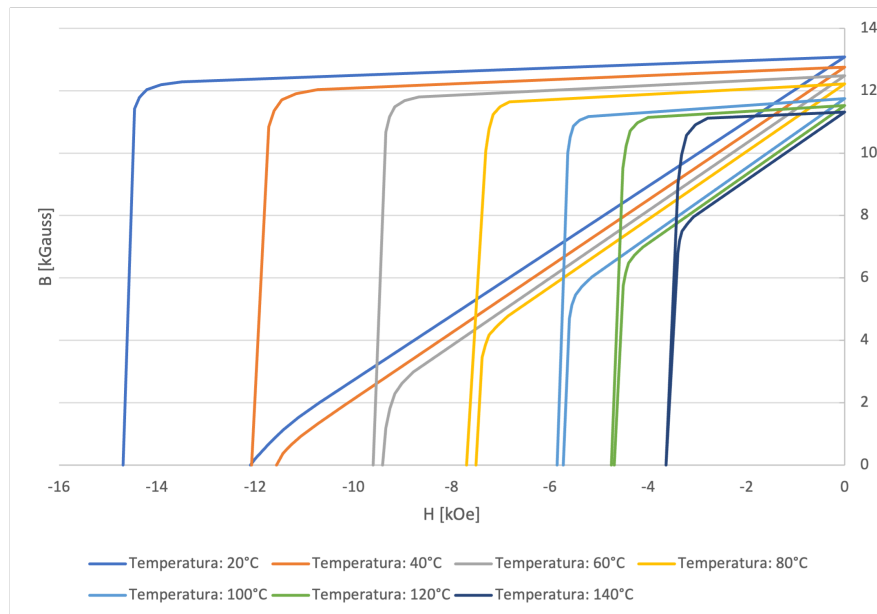


Figura 3.5: Curva BH de um ímã permanente grade N42 [30]

As curvas de maior inclinação em suas respectivas temperaturas de operação, são chamadas de curvas normais, são as utilizadas para obter os pontos de magnetização do ímã. Estas curvas são as resultantes do campo magnético aplicado e o induzido pelo ímã em um circuito magnético [31].

Ao subtrair-se o campo aplicado da curva, ou seja, medir-se apenas o campo induzido, obtém-se as curvas de menor inclinação, chamadas de curvas intrínsecas, em suas respectivas temperaturas de operação [31].

A indução remanente é representada no ponto onde o traçado toca o eixo y do gráfico. À medida que o campo H aproxima-se de zero os domínios continuam com um alinhamento, mantendo uma indução remanente. A partir desta, uma fração de domínios inverte sua orientação, resultando na indução remanente [28].

No gráfico representado na figura 3.5 a 20°C a indução remanente é de 1,309 T, mas a 140°C esta reduz significativamente para 1,132 T [30] mostrando os efeitos negativos do aumento de temperatura na capacidade de indução magnética dos ímãs.

3.1.2.3 Produto energético

Uma característica determinante na escolha do ímã é o produto energético, comercialmente chamado de grade, a qual varia em ímãs de NdFeB para maioria dos fabricantes entre 35 e 52. Este valor representa o produto energético máximo do ímã, ou seja, o maior valor da multiplicação ponto a ponto entre os valores dos eixos B e H do

gráfico da figura 3.5, o ponto máximo da curva resultante é o valor comercial da grade, este valor é expresso em unidades do sistema CGS (MGOe).

A figura 3.6, representa o exemplo de uma curva BH (produto energético) de acordo com a variação do campo magnético de um ímã.

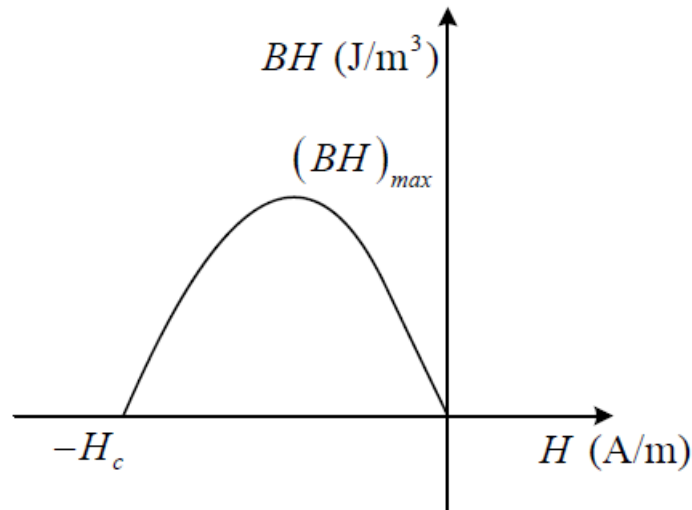


Figura 3.6: Produto energético de um ímã em relação a variação de seu campo magnético [32]

3.1.2.4 Coeficiente de permeância

O coeficiente de permeância, diferentemente das demais características apresentadas, trata-se de um parâmetro devido as dimensões físicas do ímã e do circuito magnético não tratando-se de uma característica intrínseca ao ímã.

Este coeficiente é mensurado através da medida da inclinação da reta de carga obtida de forma simplificada (ignorando a relutância do ferro, que é muito inferior a do ar) através das dimensões do ímã e o comprimento do entreferro. A partir das dimensões é possível traçá-la, e então selecionar um ímã de acordo com a indução magnética pretendida para uma determinada temperatura de operação.

O valor obtido reflete o declive da reta de carga. Adotando-se as hipóteses simplificadoras de que a relutância do entreferro e do ímã são muito maiores que a relutância do ferro mole e de que a permeabilidade magnética do ímã é a a mesma do ar, pode-se definir o coeficiente de permeância como o valor da divisão entre o comprimento radial do ímã e a altura do entreferro, como representado na equação [23] [11]:

$$PC = \frac{L_{PM}}{L_{EF}} \quad (3.1)$$

onde L_{PM} é o comprimento axial do ímã e L_{EF} é altura do entreferro.

A obtenção do coeficiente de permeância através da reta de carga é exemplificada na figura 3.7.

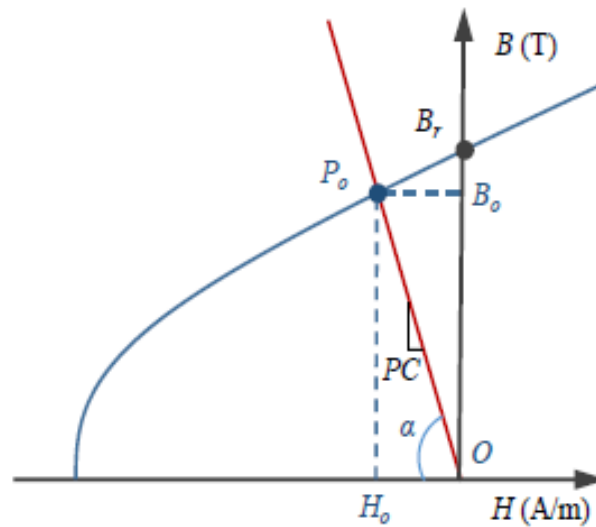


Figura 3.7: Obtenção do coeficiente de permeância a partir da curva característica de um ímã [23]

3.1.2.5 Classe do ímã

A classe do ímã está relacionada com a temperatura máxima de operação do ímã sem que ele perca suas propriedades, ou seja, sem que o ímã seja desmagnetizado.

Os sufixos normalizados em relação à temperatura máxima de operação são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Sufixo normalizado em relação com a temperatura máxima de operação [33]

Sufixo normalizado	Temperatura máx. de operação [°C]
Sem sufixo	80
M	100
H	120
SH	150
UH	180
EH	200

Para melhor escolha do ponto de coercitividade intrínseca, deve-se analisar a temperatura máxima admissível que cada classe de isolamento determina.

A tabela 3.2 representa as classes de isolamento homologadas pela norma IEC 60085 [34].

Tabela 3.2: Classes de isolamento de máquinas elétricas segundo IEC 60085

IEC 60085 (Atual)	IEC 60085 (Antiga)	Temperatura Máx. Admissível [°C]
90	Y	90
105	A	105
120	E	120
130	B	130
155	F	155
180	H	180
200		200
220		220
250		250

3.1.3 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento desta máquina é explicado de maneira simplificada utilizando as leis de Maxwell. No rotor, onde estão alocados os ímãs permanentes, é produzido um fluxo magnético constante em direção ao estator, onde estão localizados os enrolamentos de armadura [11] [9].

De acordo com a lei de Faraday a variação de um fluxo magnético em uma bobina cria uma tensão induzida (força eletromotriz - FEM) de maneira proporcional de acordo com a equação [27]:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

3.1.3.1 Tensão interna gerada

A tensão interna gerada pode ser calculada assumindo que o rotor gira em uma velocidade constante, os enrolamentos de armadura percebem o campo variar de maneira constante.

A tensão interna induzida é diretamente proporcional ao número de espiras por bobina e ao fluxo enlaçado por elas. Desta maneira utilizando a equação 3.2 e assumindo fluxo de forma senoidal obtém-se:

$$E_a = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N_{At} \cdot \phi_{enl} \quad (3.3)$$

onde o N_{At} é o número total de espiras por fase, o ϕ_{enl} é o fluxo enlaçado pelas bobinas, como representado na figura 3.2.

3.1.3.2 Tensão terminal

A tensão terminal quando o gerador está em carga é diferente da tensão interna gerada, pois ocorrem quedas de tensão devido às resistências dos enrolamentos de armadura, a indutância das bobinas e devido à reação de armadura [11] [9].

A reação de armadura ocorre quando a máquina está alimentando uma carga elétrica, e portanto uma corrente percorre os enrolamentos de armadura. Por consequência cria-se um fluxo que interage com o fluxo criado pelo rotor, este fluxo distorce o campo magnético no entreferro [11] [9].

Este princípio pode ser demonstrado pela lei de Ampère a qual afirma que uma bobina produz um campo magnético quando conduz uma corrente [27].

O efeito da reação de armadura na tensão terminal pode ser modelado através da queda de tensão na reatância síncrona. No modelo analítico de máquinas de polos lisos calcula-se um valor de indutância que somada com a indutância própria da bobina são chamadas de indutância síncrona.

Em máquinas de polos lisos esta explicação é conveniente pois o comprimento do entreferro mecânico é constante, mesmo que a topologia do rotor não seja cilíndrica (devido a presença dos ímãs) a relutância que o fluxo magnético produzido pelas bobinas da armadura

tem de cruzar é constante independentemente da posição do rotor (utilizando da hipótese simplificadora de que a permeância magnética dos ímãs são iguais a permeância do ar).

O efeito da reação de armadura pode ser modelado como uma queda de tensão no interior da máquina e assim representado como uma reatância em série com a resistência dos enrolamentos de armadura [11].

Esse comportamento pode ser representado pelo circuito equivalente representado na figura 3.8.

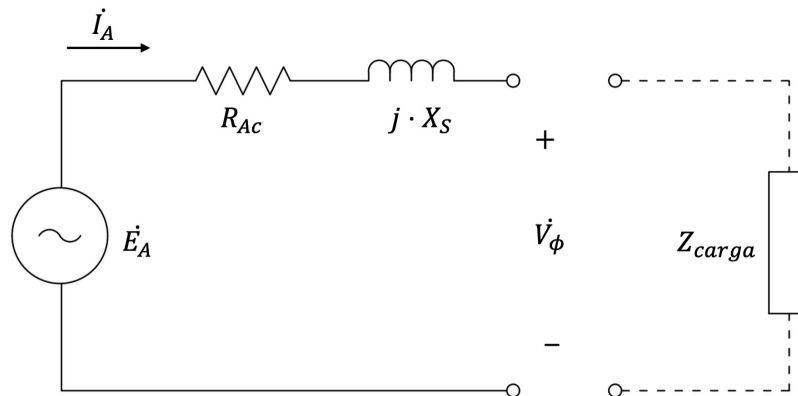


Figura 3.8: Circuito equivalente do gerador síncrono

Por consequência da lei de Kirchoff das tensões [7], a tensão terminal pode ser descrita pela equação:

$$\dot{V}_\phi = \dot{E}_A - R_{Ac} \cdot \dot{I}_A - j \cdot X_S \cdot \dot{I}_A \quad (3.4)$$

A figura 3.9 representa o diagrama fasorial de uma máquina de polos lisos, sendo os vetores em vermelho as quedas de tensão devido à resistência de armadura e à reatância síncrona.

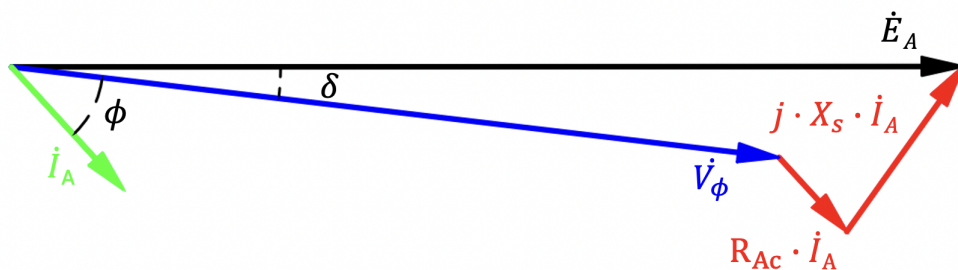


Figura 3.9: Diagrama fasorial de uma máquina de polos lisos

3.2 DESCRITIVO DO PROJETO

O projeto consistiu em adaptar a metodologia de projeto de geradores síncronos de polos salientes apresentada em [17] para que se encaixassem na nova topologia de gerador síncrono de ímãs permanentes, sendo assim a figura 3.10 apresenta o fluxograma de projeto de [17] e em seguida apresenta-se um resumo desta.

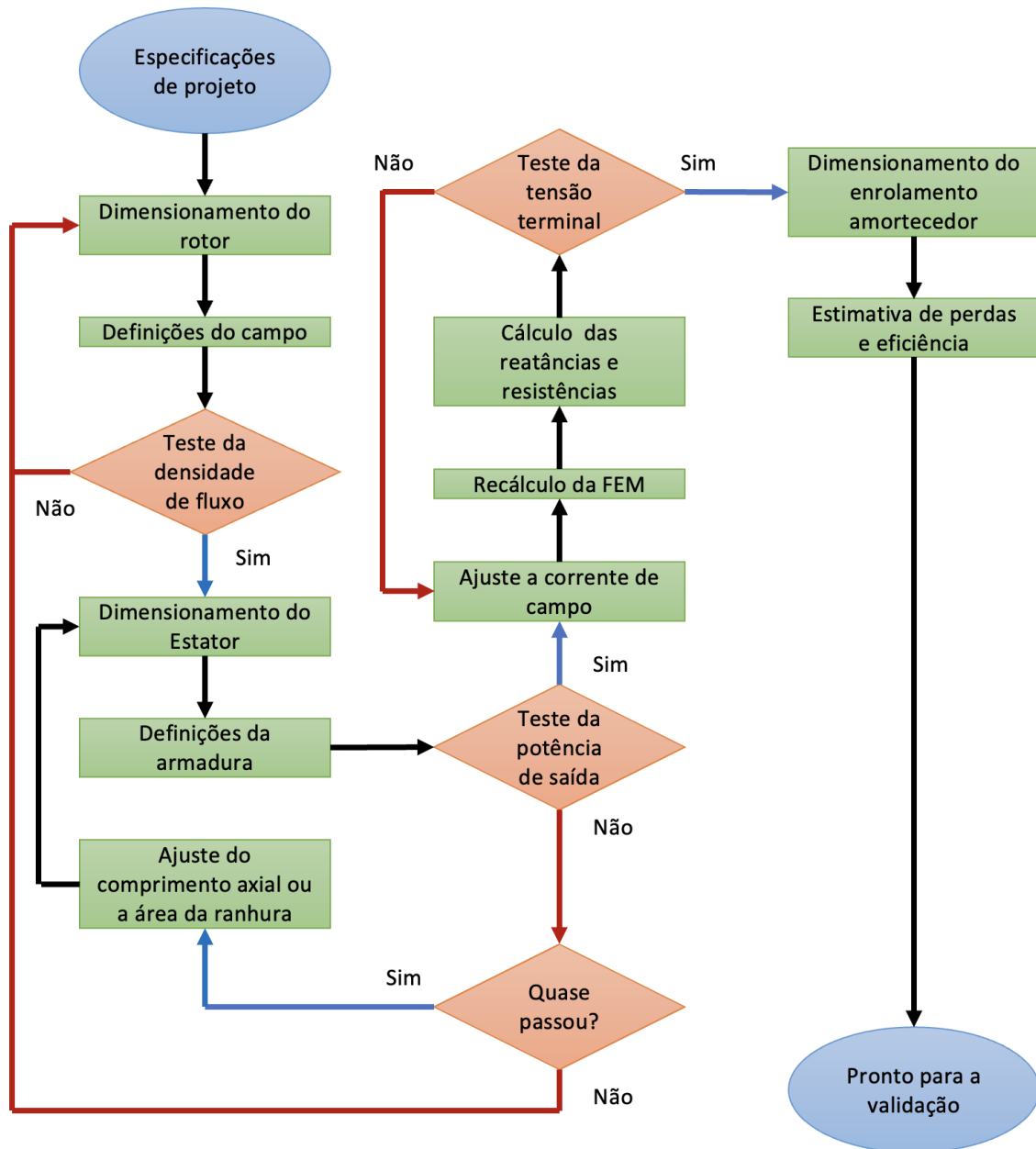


Figura 3.10: Fluxograma adaptado de [17]

O projeto do gerador tem por início um subprojeto a vazio onde não são aplicadas cargas em seus terminais e portanto não há quedas de tensões em seus enrolamentos [17].

As principais etapas do subprojeto a vazio consistem em:

- Dimensionamento do rotor;
- Definição dos enrolamentos de campo;
- Verificação da densidade de fluxo magnético;
- Dimensionamento do estator;
- Definição dos enrolamentos de armadura;

Em continuidade ao projeto faz-se um cálculo preliminar da potência de saída. Se a potência não estiver de acordo com as expectativas cabe ao projetista decidir se é suficiente redefinir o comprimento axial da máquina ou variar a área da ranhura para alocar condutores de outras bitola. Caso os ajustes não sejam suficientes é necessário refazer os cálculos desde o dimensionamento do rotor [17].

Após obter-se todas as dimensões e definições de campo e armadura segue-se para o subprojeto em carga, no qual as principais etapas consistem em:

- Cálculo das reatâncias e resistências de armadura;
- Revisão da força eletromotriz;
- Verificação da tensão terminal, levando em conta as quedas de tensão nos enrolamentos;

Em conclusão ao projeto pode-se adicionar enrolamentos amortecedores, os quais tem como finalidade reduzir os harmônicos, melhorar o desempenho frente a transitórios fornecendo um torque no sentido de auxiliar o gerador a retornar à velocidade síncrona, reduzindo (amortecendo) os transitórios [17].

Então a partir de modelos matemáticos conclui-se o projeto calculando-se as perdas e a eficiência do gerador projetado, e em seguida recomenda-se validar o projeto através de softwares que utilizam o método dos elementos finitos [17].

A figura 3.11 apresenta o passo a passo proposto neste trabalho, para uma máquina de ímãs na superfície. Em seguida apresenta-se um breve descritivo do que foi alterado para obter-se a nova topologia.

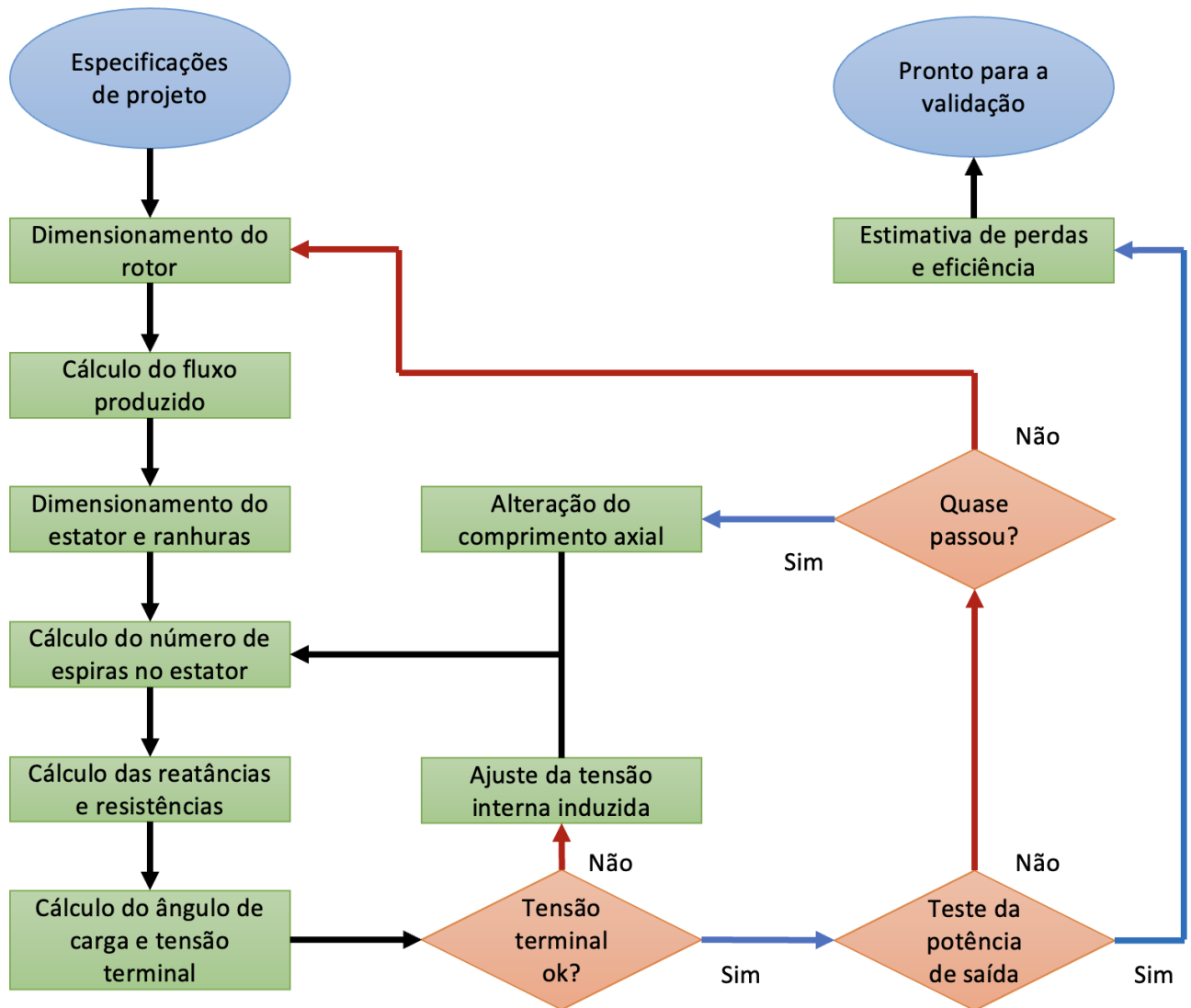


Figura 3.11: Fluxograma para um PMSG

O fluxograma da figura 3.11 tem como principais diferenças uma nova metodologia para dimensionamento do rotor o qual passa a ser de polos lisos e com ímãs permanentes ao invés dos polos salientes e rotor bobinado do projeto [17].

Um rotor de ímãs permanentes possui algumas vantagens em relação aos rotores bobinados, tais como:

- Por não possuir enrolamentos no rotor, não há perdas ohmicas no rotor;
- Baixa inércia e baixo peso quando comparado com outras máquinas; Elevada densidade de potência;
- Não necessita uma excitação inicial para gerar energia.

Porém também existem desvantagens como por exemplo não ser possível ajustar a tensão de saída do gerador, pois não é possível variar o fluxo. No projeto de geradores de ímãs permanentes não tem sentido em separar o projeto em dois (a vazio e em carga) como no caso do gerador de rotor bobinado, pois em consequência de não variar o fluxo a força eletromotriz também não varia.

O fato de não ser possível variar o fluxo para ajustar a força eletromotriz e por consequência a tensão terminal implica em uma maior complexidade no ajuste da tensão terminal, pois no outro caso bastava um ajuste na corrente de campo para obter a tensão terminal desejada (dentro de uma faixa de operação determinada em projeto). Aqui este ajuste implica em alterar algumas características, o que acaba alterando outras variáveis, como a potência, exigindo mais atenção do projetista.

Em analogia ao projeto do artigo [17], a metodologia de projeto proposta neste trabalho também inicia com o cálculo das dimensões do rotor e em seguida calcula-se o fluxo de um laço. Neste método de projeto dimensiona-se os ímãs permanentes e calcula-se o fluxo produzido a partir do ponto de operação do ímã e de algumas de suas dimensões ao invés de calcular-se a relutância diretamente.

De maneira similar dimensiona-se o estator, as ranhuras e o número de espiras de armadura, porém em seguida calculam-se as resistências e reatâncias da máquina. No caso deste projeto pode-se calcular o X_S de forma analítica, em oposição a [17] onde eram calculados X_D e X_Q de forma numérica através do MEF.

A partir dos cálculos de R_A e X_S pode-se estimar a tensão terminal em carga nominal e a potência de saída em plena carga. Uma vez que não é possível ajustar o fluxo magnético, a tensão de terminal e a potência de saída sempre são calculadas a plena carga e em regime permanente.

Nesta parte inicia-se um dos pontos de maior complexidade do projeto, onde deve-se ajustar os parâmetros no intuito de obter-se as especificações desejadas.

Alguns dos parâmetros que devem ser ajustados são o número de espiras, pois este sempre deve ser um número inteiro por ranhura, para isto deve-se ajustar o C_{AX} .

Também pode ser necessário ajustar a FEM para que a tensão terminal seja mais próxima da tensão de projeto, ou alterar o comprimento axial uma vez que a potência não condiz com a demandada pelo projeto.

Realizar ajustes rapidamente tornam-se um processo iterativo, pois ao variar-se algum destes parâmetros deve-se ajustar os demais para que sejam mantidas as especificações de projeto.

Ao obter-se um número inteiro de espiras, uma tensão terminal adequada verifica-se a potência de saída e em caso de não estar de acordo com as especificações de projeto pode-se realizar os mesmos ajustes propostos no fluxograma anterior ou de forma análoga retornar ao dimensionamento do rotor no caso dos ajustes sugeridos não sejam suficientes.

No caso deste gerador não foi considerado adicionar enrolamentos amortecedores, portanto parte-se para o modelo de perdas e cálculo da eficiência da máquina, para por fim validar-se o projeto em um software comercial que utiliza do método dos elementos finitos.

3.3 DIMENSIONAMENTO

3.3.1 Especificações de Projeto

Depois de escolher a topologia do gerador o próximo passo é a definição das especificações do projeto, para a topologia de um gerador síncrono de ímãs permanentes, as seguintes especificações são demandadas:

- Potência Aparente nominal - S_{Ed} :

A potência aparente nominal deve ser escolhida de acordo com disponibilidade de potência mecânica (força motriz) e de acordo com a necessidade.

É importante usar a potência aparente em vez da ativa porque o primeiro fator limitante de uma máquina elétrica é a corrente em seus condutores a qual independe da proporção entre potência ativa e reativa.

- Fator de potência - PF :

O fator de potência deve ser estabelecido de acordo com a natureza da carga, esta escolha define a quantidade de reativos que o gerador é capaz de absorver ou gerar.

- frequência - f :

Trata-se da frequência elétrica do gerador, esta deve ser escolhida de forma que minimize a queda de tensão nos enrolamentos do gerador e mesmo a baixa rotação ainda esteja dentro da faixa de trabalho do inversor acoplado ao gerador.

A frequência do gerador, no caso de um projeto aplicado a energia eólica, normalmente não precisa ser igual a da rede, pois a saída do gerador é retificada e depois há um inversor para conexão com a rede.

No caso de pequenos aproveitamentos eólicos, pode-se utilizar um acoplamento através de um inversor CA/CC-CC/CA. Um exemplo deste tipo de conexão é apresentado na figura 3.12 e a figura 3.13 representa o esquema de um inversor comercial (Windy Boy da fabricante SMA) [35].

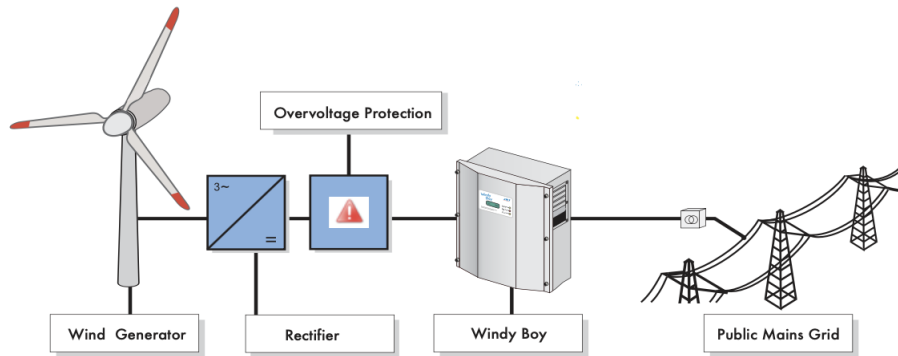


Figura 3.12: Esquema sugerido de conexão de gerador a rede elétrica [35]

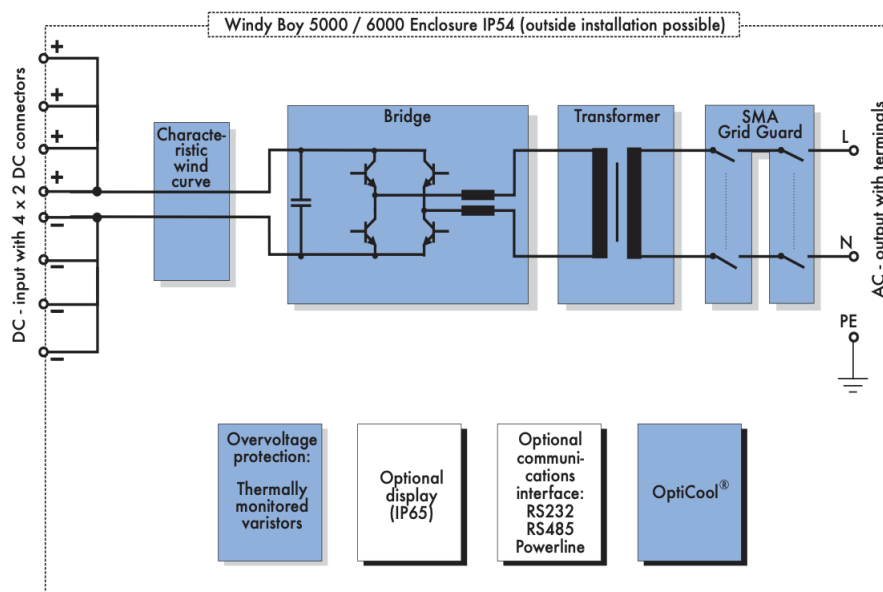


Figura 3.13: Esquema do inversor CC/CA comercial Windy Boy [35]

- Velocidade de rotação - n :

A velocidade de rotação deve ser escolhida de acordo com a aplicação, sendo que esta é inversamente proporcional ao torque (para uma mesma potência), porém para cada aplicação devem ser levados em conta seus respectivos valores típicos.

- Tensão terminal fase-fase - V_{Td} :

A tensão terminal fase-fase deve ser escolhida de acordo com as especificações do inversor de forma que em todas as faixas de rotação forneçam uma tensão dentro desta faixa de trabalho.

3.3.2 Parâmetros Impostos

Para que o projeto de um gerador seja devidamente executado, alguns parâmetros devem ser impostos, sendo que alguns deles são definidos de acordo com cálculos, outros podem ser de acordo com opções do projetista ou limitações de projeto e alguns podem ser medidos e ajustados durante a execução do projeto.

- Tensão interna induzida - E_a :

A tensão interna induzida é um parâmetros que deve ser imposto e posteriormente ajustado para que a tensão terminal seja de acordo com a desejada.

Este valor pode ser observado medindo a tensão terminal da máquina a vazio pois neste caso não há quedas de tensão nos enrolamentos da máquina.

- Diâmetro externo do rotor - D_{Re} :

O diâmetro externo do rotor e o comprimento axial da máquina são dois parâmetros que estão interligados entre si e estes, por sua vez definem o volume do rotor e podem fornecer uma boa estimativa da potência da máquina.

Um destes valores devem ser impostos para que o outro possa ser dimensionado, no entanto, na maioria dos projetos é mais vantajoso dimensionar o diâmetro externo do rotor pois com este o perfil da máquina se mantém inalterado e a capacidade de potência fornecida varia linearmente com o comprimento axial.

- Comprimento axial da máquina - C_{AX} :

O comprimento axial também é importante para ajustar o número de espiras da máquina.

- Fator de encurtamento do passo polar - K_{ap} :

Este fator representa a relação entre o ângulo ocupado de um polo e o comprimento de arco dos ímãs montados sobre a sua superfície, quanto maior o ímã maior o fluxo produzido, porém maior probabilidade de dispersão de fluxo. A redução deste fator também contribui na redução do conteúdo harmônico [11].

- Comprimento do entreferro - L_{EF} :

O comprimento do entreferro é um dos parâmetros que influenciam diretamente no volume da máquina, um entreferro de menor comprimento resulta em uma máquina de menor porém existem diversos fatores limitantes, tais como vibrações, precisão dos equipamentos que são utilizados para construir a máquina.

Tendo em vista que a permeabilidade magnética dos aços que constituem os núcleos do estator e do rotor têm uma permeabilidade relativa na classe dos milhares de vezes maior que a permeabilidade relativa do ar a maior parte da relutância do circuito magnético da máquina esta concentrada no entreferro. É através do entreferro que a energia magnética flui entre o rotor e o estator.

- Largura da abertura da ranhura - L_{Ra} ;
- Altura do pescoço da ranhura - h_{Rp} ;
- Altura do colarinho da ranhura - h_{Rc} ;
- Número de Ranhuras - N_R :

Existem diversas possíveis topologias para ranhuras, alguns exemplos são apresentados na figura 3.14.

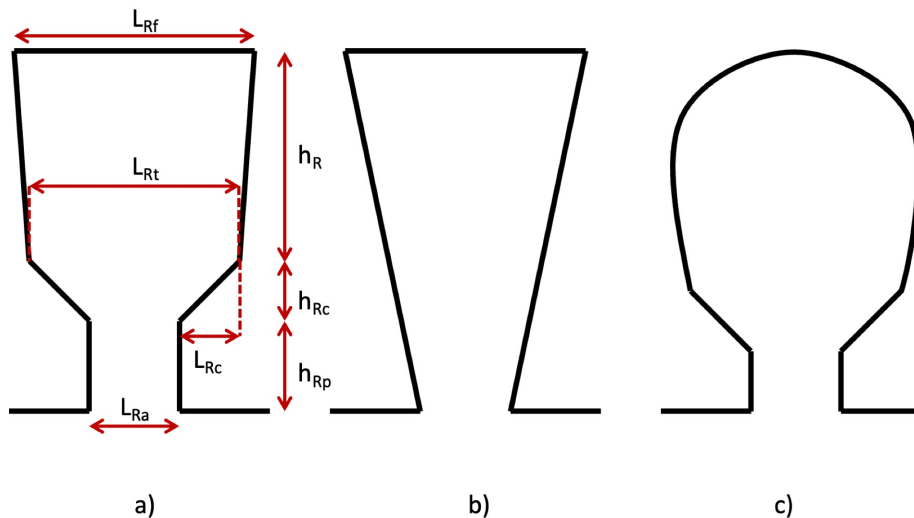


Figura 3.14: Exemplos de modelos de ranhuras a) Ranhura com fundo reto, b) ranhura com abertura reta e c) ranhura com fundo abaulado

O modelo escolhido foi o 3.14.a e a figura representa suas respectivas dimensões, para tanto necessita-se estabelecer alguns parâmetros

tais o como a largura da abertura da ranhura, a altura do pescoço da ranhura e a altura de seu colarinho.

Este modelo permite o fechamento da ranhura através da inserção de uma cunha de material isolante prendendo as bobinas após a inserção nas ranhuras, o que facilita a montagem da máquina no processo de fabrico.

O numero de ranhuras deve ser escolhido de acordo com o tipo de enrolamento e o número de polos e de fases.

- Relação entre a largura do dente e a largura no topo da ranhura - k_{DR} :

Fator que determina em função da largura do dente a largura da ranhura no topo.

- Densidade de corrente - J_A :

O valor da densidade de corrente pode variar de projeto para projeto, porém quanto maior a densidade de corrente, maior a temperatura de operação da máquina e maiores as perdas joules, entretanto máquinas de menor densidade de corrente necessitam de mais cobre e portanto maior área de ranhura e maior quantidade de aço no estator.

- Percentual de fluxo enlaçado - k_ϕ :

Este é um fator que representa a quantidade de fluxo magnético que percorre o caminho de menor relutância, como o proposto na figura 3.2, eliminando o fluxo disperso.

Este parâmetro é ajustado após a realização do projeto. Caso o valor estimado inicialmente esteja divergindo da simulação, é necessário reajusta-lo.

- Número de caminhos paralelos - N_{CP} :

Escolha de projeto para uma dada tensão interna induzida um determinado número de espiras, o numero de espiras por bobina é inversamente proporcional ao número de caminhos em paralelo.

- Número de camadas da ranhura - N_{Rc} :

Os tipos de enrolamentos mais comuns são de camada simples ou dupla.

Para efeitos de potência fornecida o número de camadas não influencia em nada, porém os enrolamentos de camada dupla apresentam uma significativa redução em conteúdo harmônico.

- Fator entre a altura de coroa do estator e altura da ranhura - K_{CR} :

Este fator relaciona a altura das ranhuras com a altura da coroa do estator.

- Fator de enchimento da ranhura - K_{Re} :

O fator de enchimento da bobina deve ser dimensionado de acordo com a área estimada da ranhura [36], pois ao calcular-se a área dos condutores não leva-se em conta a perda na área devido ao isolamento das ranhuras, isolamento dos fios e espaços entre estes.

O enrolamento para máquinas de pequena potência habitualmente é do tipo randômico, ou seja, as bobinas são inseridas de forma aleatória nas ranhuras onde podem ocorrer torções e cruzamentos entre os fios de uma mesma bobina, deste modo a área do cobre em si é somente uma fração da área total da ranhura.

- Encurtamento de passo da bobina - E_{Apb} :

O encurtamento de passo é outra tática para reduzir-se o conteúdo harmônico da máquina. Diversos fatores de encurtamento de passo estão bem fundamentados na literatura, sendo os mais habituais 5/6, 2/3, 7/9, etc.

- Resistência por quilometro do fio - R_{Akm} :

A resistência de um condutor é um fator que deve ser verificado em tabelas ou *datasheets* do fabricante.

- Coeficiente de permeância - PC :

O coeficiente de permeância está relacionado com a inclinação da reta de carga, conforme discutido na seção 3.1.2.

- Numero de fases - N_f :

O número de fases pode variar de gerador para gerador, sendo que o mais comum de se encontrar são 3 fases.

- Indução magnética - B_{I0} :

A indução magnética é a indução de operação dos ímãs. Deve ser medida de acordo com a curva de magnetização dos ímãs permanentes e o coeficiente de permeância escolhido para o projeto, pois está varia de acordo com o tipo, topologia e temperatura dos ímãs.

- Indução magnética admissível na coroa do rotor - B_{Rc} :

- Indução magnética admissível na coroa do estator - B_{Ec} :

As induções magnéticas admissíveis na coroa do rotor e do estator são escolhas nas quais se buscam valores adequados para impedir que a máquina fique demasiadamente saturada e não muito baixos, para evitar máquinas com densidade de torque muito baixas.

Para isto existem tabelas com diferentes topologias de máquinas e valores característicos para diferentes topologias e de acordo com quanto deseja-se saturar o ferro com fluxo magnético.

- Temperatura de operação em regime permanente- T_{op} :

É a temperatura que a máquina deve operar em carga nominal e em regime permanente.

- Temperatura ambiente de referência - T_{ref} :

A temperatura ambiente de referência deve vir do *datasheet* dos condutores, será útil como uma referência para a correção da resistência com a temperatura nominal de operação da máquina.

- Fator de fluxo mútuo entre duas bobinas - K_m :

Este fator é quando tem-se fluxo concatenado entre enrolamentos de uma mesma fase, para tanto calcula-se o percentual do fluxo magnético concatenado para correção da indutância de cabeça de bobina.

- Densidade do aço - d_{fe} :

Fator advindo do *datasheet* do aço selecionado.

- Fator de perdas por histerese na coroa do estator - K_{hyys} ;
- Fator de perdas por histerese nos dentes - K_{hyd} ;
- Fator de perdas por Foucault na coroa do estator - K_{ftd} ;
- Fator de perdas por Foucault nos dentes - K_{ftys} :

Os fatores de perdas por histerese e Foucault na coroa e nos dentes são fatores empíricos inerentes da topologia da máquina, calculados de modo que é possível obter uma boa aproximação das perdas no ferro da máquina.

Estes fatores seguem os valores recomendados por [24]

- Fator de perdas por histerese no aço - P_{hy} :

- Fator de perdas por Foucault no aço - P_{ft} :

São os valores das perdas por kg de material. Fornecido pelos fabricantes de aço através de *datasheets*.

- Fator de perdas por ventilação - K_{Stf} :

O fator de perdas por ventilação, também se trata de uma estimativa, e serve apenas de um cálculo preliminar de para estimar uma pequena perda mecânica, porém em um projeto mais refinado deve se calcular tais perdas em softwares de simulação por método dos elementos finitos.

- Fator de perdas suplementares - K_{ps} :

O fator de perdas suplementares é um valor estimado empiricamente, sendo que pode variar de máquina para máquina e conforme o grau de refinamento do projeto.

3.3.3 Modelo do Rotor

Com todos os parâmetros impostos devidamente explicitados na seção anterior, e as especificações de projeto já definidas, inicia-se o projeto da máquina conforme o fluxograma apresentado na figura 3.11, portanto inicia-se com o dimensionamento do rotor.

A primeira etapa consiste em calcular as dimensões físicas do rotor, posteriormente calcula-se o fluxo produzido e verifica-se se está consistente com os valores desejados.

O primeiro passo se trata de calcular o número de polos da máquina, este pode ser obtido a partir do momento que a frequência e a velocidade de rotação são parâmetros impostos.

- Número de polos

$$P = \frac{120 \cdot f}{n} \quad (3.5)$$

Posteriormente calcula-se o passo polar:

- Passo Polar

$$\alpha_P = \frac{2 \cdot \pi}{P} \quad (3.6)$$

O passo efetivo do polo pode ser dimensionado a partir do passo polar e a partir do fator de encurtamento de passo polar:

- Passo Efetivo do polo

$$\alpha_{pef} = \alpha_P \cdot K_{\alpha p} \quad (3.7)$$

Já com as dimensões do polo, pode-se dimensionar os ímãs, primeiramente calcula-se a altura:

- Altura do ímã permanente

$$H_{PM} = PC \cdot L_{EF} \quad (3.8)$$

Posteriormente calcula-se a largura [17]:

- Largura dos ímãs

$$L_{PM} = \frac{D_{Re} - H_{PM}}{2} \quad (3.9)$$

A largura dos ímãs normalmente é medida no centro dos ímãs, desta forma tem-se a medida do comprimento médio dos ímãs permanentes.

O diâmetro do rotor na base dos ímãs é o ponto onde inicia-se a coroa do rotor, a partir do dimensionamento deste pode-se ter uma ideia das proporções do rotor.

- Diâmetro do rotor na base dos ímãs

$$D_{Rbi} = D_{Re} - 2 \cdot h_{PM} \quad (3.10)$$

Para finalizar o dimensionamento do rotor, calcula-se a altura da coroa do rotor [23]:

- Altura da coroa do rotor

$$h_{cr} = \frac{B_{Io} \cdot L_{PM}}{2 \cdot B_{Rc}} \quad (3.11)$$

Para então subtrair esta do diâmetro na base dos ímãs e por fim calcular o diâmetro interno do rotor:

- Diâmetro interno do rotor

$$D_{Ri} = D_{Rbi} - 2 \cdot h_{cr} \quad (3.12)$$

Em sequência ao exposto no fluxograma da figura 3.11 calcula-se o fluxo magnético de cada laço [11]:

- Fluxo de um laço

$$\phi_{lace} = \frac{B_{Io} \cdot C_{AX} \cdot L_{PM}}{2} \quad (3.13)$$

Este fluxo é a metade do fluxo magnético total que atravessa um ímã, pois este é dividido em dois caminhos nas coroas do estator e do rotor, onde metade do fluxo vai para o ímã a direita e a outra metade para a esquerda.

3.3.4 Modelo do Estator

As próximas etapas do projeto tratam-se do dimensionamento do estator e suas ranhuras e em sequência o cálculo do número de espiras da armadura.

De início, a partir do diâmetro externo do rotor e conhecendo o comprimento do entreferro, calcula-se o diâmetro externo do estator:

- Diâmetro interno do estator

$$D_{Ei} = D_{Re} + 2 \cdot L_{EF} \quad (3.14)$$

Posteriormente calcula-se o passo em graus de cada ranhura:

- Passo da Ranhura

$$\alpha_R = \frac{2 \cdot \pi}{n_R} \quad (3.15)$$

E então calcula-se o diâmetro na altura do topo da ranhura, ou seja no espaço onde a ranhura de fato começa a ser ocupada por condutores.

- Diâmetro na altura do topo da ranhura

$$D_{Rt} = D_{Ei} + 2 \cdot (h_{Rp} + h_{Rc}) \quad (3.16)$$

As principais dimensões da ranhura podem ser observadas na figura 3.14.a. Segue-se calculando as demais dimensões da ranhura

- Ângulo ocupado pela ranhura no topo

$$\theta_{Rt} = \frac{\alpha_R}{1 + K_{DR}} \quad (3.17)$$

- Largura da Ranhura no topo

$$L_{Rt} = D_{Rt} \cdot \tan\left(\frac{\theta_{Rt}}{2}\right) \quad (3.18)$$

- Largura do colarinho da ranhura

$$L_{Rc} = \frac{L_{Rt} - L_{Ra}}{2} \quad (3.19)$$

Para finalizar o dimensionamento da ranhura, deve-se calcular a altura da coroa do estator [23]:

- Altura da coroa do estator

$$h_{Ec} = \frac{B_{Io} \cdot L_{PM} \cdot k_\phi}{2 \cdot B_{Ec}} \quad (3.20)$$

Para por fim calcular a altura da ranhura:

- Altura da Ranhura

$$h_R = h_{Ec} \cdot K_{CR} \quad (3.21)$$

O ângulo de inclinação de sua parede:

- Ângulo de inclinação da parede da ranhura

$$\theta_{Rip} = \frac{\alpha_R}{2} \quad (3.22)$$

E então a ultima dimensão relacionada a esta, a largura de seu fundo:

- Largura da ranhura no fundo

$$L_{Rf} = L_{Rt} + 2 \cdot h_R \cdot \tan(\theta_{Rip}) \quad (3.23)$$

Por fim calcula-se a ultima dimensão física da máquina:

- Diâmetro externo do estator

$$D_{Ee} = D_{Rt} + 2 \cdot h_R + 2 \cdot h_{Ec} \quad (3.24)$$

Para iniciar o cálculo do número de espiras, calcula-se o espaço disponível para alocá-los:

- Área da Ranhura

$$S_R = \left(\frac{L_{Rt} + L_{Rf}}{2} \right) \cdot h_R \quad (3.25)$$

o Passo de cada bobina de armadura:

- Passo da bobina de armadura

$$\alpha_{Ab} = \alpha_P \cdot E_{A_{pb}} \cdot \frac{P}{2} \quad (3.26)$$

O fator de de redução do fluxo devido ao Encurtamento do passo da bobina de armadura, tal fator trata-se de uma redução do fluxo enlaçado pelas bobinas, pois quando existe um encurtamento de passo o fluxo enlaçado também sofre uma redução.

- Fator de redução do fluxo devido ao Encurtamento do passo da bobina de armadura

$$K_{Aeb} = \text{sen} \left(\frac{\alpha_{Ab}}{2} \right) \quad (3.27)$$

O número de bobinas por polo e por fase faz uma divisão homogênea das bobinas entre os polos e as fases da máquina.

- Número de bobinas por polo e por fase

$$N_{Abpf} = \frac{N_R \cdot N_{Rc}}{2 \cdot N_f \cdot P} \quad (3.28)$$

O fator de distribuição das bobinas de armadura é uma correção do fluxo enlaçado caso o enrolamento seja distribuído [9].

- Fator de distribuição das bobinas de armadura

$$k_{Adb} = \frac{\text{sen} \left(\frac{N_{Abpf} \cdot \alpha_R}{2} \right)}{N_{Abpf} \cdot \text{sen} \left(\frac{\alpha_R}{2} \right)} \quad (3.29)$$

Após os cálculos do número de bobinas e seu fator de distribuição, pode-se calcular o número total de espiras por fase [10].

- Número total de espiras por fase

$$N_{At} = \frac{E_A}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot K_\phi \cdot K_{Aeb} \cdot K_{Adb} \cdot 2 \cdot \phi_{lace}} \quad (3.30)$$

Então calcula-se o número de caminhos em série.

- Número de caminhos em série

$$N_{CS} = \frac{P}{N_{CP}} \quad (3.31)$$

Para posteriormente calcular-se o número de espiras por bobina.

- Número de espiras por bobina

$$N_{Ab} = \frac{N_{At}}{N_{Abpf} \cdot N_{CS}} \quad (3.32)$$

A partir do dimensionamento das ranhuras e tendo o número de espiras que devem estar inseridas em cada ranhura, calcula-se a área máxima admissível para os fios de cobre.

- Área dos condutores do enrolamento

$$S_{Ac} = \frac{S_R \cdot K_{Re}}{N_{Ab} \cdot N_{Rc}} \quad (3.33)$$

Levando em conta a área dos condutores e a máxima densidade de corrente admissível, calcula-se a corrente nominal da armadura.

- Corrente admissível nos condutores

$$I_A = S_{Ac} \cdot J_A \quad (3.34)$$

3.3.5 Resistência de Armadura

Em continuidade ao fluxograma da figura 3.11 o cálculo da resistência da armadura é apresentado entre as equações 3.35 - 3.39.

O primeiro passo consiste em calcular o passo de cada bobina.

- Passo da bobina

$$D_{\alpha Acb} = (D_{Rt} + h_R) \cdot \frac{\alpha_{Ab}}{P} \quad (3.35)$$

Em adição estima-se o comprimento médio do arco da cabeça de bobina, o comprimento trata-se de uma estimativa do comprimento médio, tendo em vista que os enrolamentos são randômicos e cada arco tem um comprimento levemente diferente [23].

- Comprimento do arco de cabeça de bobina

$$A_{Acb} = \pi \cdot \frac{D_{\alpha Acb}}{2} \quad (3.36)$$

Posteriormente calcula-se o comprimento de cada bobina, neste procedimento leva-se em conta uma bobina de seção circular [17].

- Comprimento médio de uma espira

$$C_{A1e} = 2 \cdot C_{AX} + 2 \cdot A_{Acb} \quad (3.37)$$

Então calcula-se a resistência de fase em temperatura ambiente.

- Resistência de uma fase a temperatura ambiente

$$R_A = C_{A1e} \cdot N_{At} \cdot R_{Akm} \quad (3.38)$$

Para por fim corrigi-la de acordo com a temperatura de operação da máquina [10].

- Correção da resistência de acordo com a temperatura de operação

$$R_{At} = R_A \cdot \frac{243,5 + T_{op}}{243,5 + T_{ref}} \quad (3.39)$$

3.3.6 Indutância Síncrona

A indutância síncrona pode ser calculada através dividindo-na em componentes, esta metodologia foi explicitada por [11]. Em máquinas de polos lisos esta aproximação se mostrou bastante razoável em oposição as máquinas de polos salientes que não há tanta precisão.

- Componente de entreferro da indutância própria de cada fase

$$L_{ef} = \pi \cdot \frac{\mu_0 \cdot N_{At}^2 \cdot C_{AX} \cdot D_{Ei}}{P^2 \cdot (L_{EF} \cdot + H_{PM})} \quad (3.40)$$

- Indutância mútua do entreferro

$$M_{ef} = \frac{-L_{ef}}{3} \quad (3.41)$$

- Indutância de dispersão da ranhura

$$L_{ran} = \left(4 \cdot \frac{N_f}{N_R}\right) \cdot \mu_0 \cdot C_{AX} \cdot N_{At}^2 \cdot \left(\frac{h_R}{3 \cdot L_{Rt}} + \frac{h_{Rp}}{L_{Ra}} + \frac{h_{Rc}}{L_{Rt} - L_{Ra}} \cdot \ln\left(\frac{L_{Rt}}{L_{Ra}}\right)\right) \quad (3.42)$$

- Cálculo do R

$$R = 0,447 \cdot \sqrt{S_R} \quad (3.43)$$

O fator R é a distância média geométrica da bobina a ela mesma, o prefixo da equação pode variar conforme sua geometria, neste caso assumiu-se uma cabeça de bobina circular.

- Cálculo da indutância de cabeça de bobina

$$L_{cb} = \mu_0 \cdot D_{\alpha Acb} \cdot N_{Ab}^2 \cdot \left(\ln\left(8 \cdot \frac{D_{\alpha Acb}}{R}\right) - 2\right) \quad (3.44)$$

- Correção da indutância de cabeça de bobina considerando o fluxo concatenado nos caminhos paralelos

$$L_{cbc} = N_{CS} \cdot (1 + (N_{CP} - 1) \cdot K_m) \cdot L_{cb} \quad (3.45)$$

Após o cálculo de todas as componentes da indutância síncrona estas podem ser somadas de modo a obter-se a indutância síncrona.

- Indutância própria

$$L_p = L_{ef} + L_{ran} + L_{cbc} \quad (3.46)$$

- Indutância síncrona

$$L_s = L_p - M_{ef} \quad (3.47)$$

E por fim, obter-se a reatância síncrona.

- Reatância síncrona

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s \quad (3.48)$$

3.3.7 Tensão terminal e Ângulo de carga

Após obter-se as resistências e reatâncias da máquina, calculou-se o ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente e o ângulo de carga (ângulo de defasamento entre tensão induzida e tensão terminal), para por fim calcular-se a tensão terminal.

- Ângulo entre tensão e corrente

$$\phi = \text{acos}(PF) \quad (3.49)$$

- Ângulo de carga [17][13] (Adaptado)

$$\delta = \text{asin} \left(\frac{X_s \cdot I_A \cdot \cos(\phi) - R_{At} \cdot I_A \cdot \text{sen}(\phi)}{E_A} \right) \quad (3.50)$$

- Tensão fase-neutro

$$V_f = E_A - jX_s \cdot (I_A \angle -(\phi + \delta)) - R_{At} \cdot (I_A \angle -(\phi + \delta)) \quad (3.51)$$

- Tensão terminal (fase-fase)

$$V_T = \sqrt{3} \cdot V_f \quad (3.52)$$

3.3.8 Perdas

O modelo de perdas no cobre é baseado em um cálculo direto de perdas por efeito Joule, já o modelo de perdas no ferro é baseado no modelo desenvolvido por Grauers [24].

Em alguns destes cálculos foram estimados fatores empíricos para densidades de fluxo de 1,5 T e frequências de 50 Hz, porém é possível corrigi-las de forma proporcional, como apresentado nas equações 3.58, 3.59, 3.61, 3.62.

- Perdas no cobre

$$\rho_{cu} = 3 \cdot R_{At} \cdot I_A^2 \quad (3.53)$$

- Volume da coroa do estator

$$V_{ecfe} = \pi \cdot \left(\left(\frac{D_{Ee}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{Ei} + 2 \cdot (h_R + h_{Rc} + h_{Rp})}{2} \right)^2 \right) \cdot C_{AX} \quad (3.54)$$

- Volume dos dentes do estator

$$V_{edfe} = \left(\pi \cdot \left(\left(\frac{D_{Ei} + 2 \cdot (h_R + h_{Rc} + h_{Rp})}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{Ei}}{2} \right)^2 \right) - N_R \cdot S_R \right) \cdot C_{AX} \quad (3.55)$$

- Massa da coroa do estator

$$m_{ecfe} = V_{ecfe} \cdot d_{fe} \quad (3.56)$$

- Massa dos dentes do estator

$$m_{edfe} = V_{edfe} \cdot d_{fe} \quad (3.57)$$

- Perdas por histerése na coroa do estator

$$\rho_{Hyys} = K_{hyys} \cdot m_{ecfe} \cdot p_{hy} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B_{Ec}}{1,5}\right)^2 \quad (3.58)$$

- Perdas Foucault na coroa do estator

$$\rho_{Fyys} = K_{ftys} \cdot m_{ecfe} \cdot p_{ft} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B_{Ec}}{1,5}\right)^2 \quad (3.59)$$

- Cálculo da densidade de fluxo nos dentes

$$B_d = \frac{B_{Io} \cdot L_{PM} \cdot P \cdot K_{\phi}}{K_{\alpha p} \cdot N_R \cdot L_{Rt} \cdot K_{DR}} \quad (3.60)$$

- Perdas por histerése nos dentes

$$\rho_{Hyd} = K_{Hyd} \cdot m_{edfe} \cdot p_{hy} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B_{Ec}}{1,5}\right)^2 \quad (3.61)$$

- Perdas Foucault nos dentes

$$\rho_{Ftd} = K_{ftd} \cdot m_{edfe} \cdot p_{ft} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B_{Ec}}{1,5}\right)^2 \quad (3.62)$$

- Comprimento de arco de passo polar

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_{Re}}{P} \quad (3.63)$$

- Velocidade da superfície do rotor

$$v_r = \frac{n \cdot D_{Re}}{2} \quad (3.64)$$

- Perdas por ventilação

$$\rho_v = K_{stf} \cdot D_{Re} \cdot (C_{AX} + 0,6 \cdot \tau_p) \cdot v_r^2 \quad (3.65)$$

- Perdas totais

$$\rho_t = K_{ps} \cdot (\rho_{Hyys} + \rho_{Fyys} + \rho_{Hyd} + \rho_{Ftd} + \rho_v + \rho_{cu}) \quad (3.66)$$

3.3.9 Potência entregue e rendimento

Por fim pode-se obter o rendimento e a potência aparente entregue pela máquina.

- Potência aparente

$$S_d = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_A \quad (3.67)$$

- Potência ativa

$$P = 3 \cdot R_{carga} \cdot I_A^2 \quad (3.68)$$

- Rendimento

$$\eta = \frac{P}{P + \rho_t} \quad (3.69)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo aborda os resultados obtidos a partir de um gerador projetado seguindo a metodologia descrita no capítulo 3 o passo a passo do cálculos está apresentado no apêndice A.

4.1 ESCOLHAS DE PROJETO

Na primeira etapa para criar um projeto tratou-se definir as especificações de projeto as quais são apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Especificações de projeto

Símbolo	Valor	Unidade
S_{Ed}	7,5	kVA
n	300	rpm
f	50	Hz
PF	0,8	
V_{Td}	400	V

A seleção do valor nominal de potência é relativo a máquina ter a capacidade de fornecer 6 kW de potência ativa a um fator de potência de 0,8 à rede elétrica em condições nominais que é um valor típico de geradores para pequenas turbinas eólicas comerciais [37] [38].

A velocidade de rotação foi escolhida de acordo com valores típicos de geradores eólicos, a aplicação mais comum para geradores de ímãs permanentes nesta faixa de potência como por exemplo [39] e [40].

Geradores eólicos de pequeno aproveitamento costumam utilizar-se de geradores síncronos de ímãs permanentes aproveitando-se da facilidade de operação, uma vez que este tipo de máquina não necessita de nenhuma excitação pois não possui enrolamentos de campo.

Outra vantagem que as máquinas síncronas têm sobre as demais é a facilidade de inserção de um grande número de polos, o que na energia eólica permite que projete-se máquinas com uma baixa velocidade de rotação sem a necessidade de inserção de uma caixa de engrenagens, o que representa uma maior eficiência, maior durabilidade e menor taxa de manutenção.

A tensão terminal e a frequência foram escolhidas de acordo com os valores típicos da tensão fase-fase e da frequência da rede elétrica na Europa.

Para a realização do projeto os parâmetros escolhidos são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados no algoritmo do projeto

Variável	Valor	Unidade
E_a	291,25	V
D_{Re}	250	mm
C_{AX}	163,8	mm
$K_{\alpha p}$	4/5	
L_{EF}	4	mm
L_{Ra}	2,5	mm
h_{Rp}	2,5	mm
h_{Rc}	1,2	mm
N_R	60	ranhuras
K_{Dr}	1	
J_A	5	A/mm ²
k_ϕ	0,8	
N_{CP}	1	caminhos paralelos
N_{Rc}	2	camadas
k_{Cr}	3,4	
k_{Re}	0,5	
E_{Apb}	2/3	
PC	4	
k_{IL}	1	
B_{io}	0,94	T
T_{op}	120	°C
k_m	1	

Alguns parâmetros foram escolhidos baseados na literatura, tais como J_A [9], outros fatores como por exemplo E_a foram obtidos de maneira iterativa no projeto ajustando-o de modo que a FEM subtraída das quedas de tensão na armadura fornecesse a tensão terminal desejada.

Fatores como o k_ϕ foram obtidos de maneira empírica, medindo a partir de simulações utilizando o método dos elementos finitos (apre-

sentado na seção 4.2.3) a dispersão de fluxo e ajustando-a ao projeto analítico.

O k_ϕ é obtido medindo-se o total de fluxo magnético que cruza o ímã e a quantidade de fluxo que cruza as ranhuras no respectivo polo, sendo este fator a razão entre os valores medidos.

Alguns outros como por exemplo PC , D_{Re} , C_{Ax} , L_{EF} etc. foram escolhas de projeto, que se aproximam proporcionalmente a máquinas reais, mantendo a características de geradores frequentemente utilizados em pequenas turbinas eólicas.

O enchimento da ranhura (K_{Re}) deve ser elegido de acordo com a área da ranhura. Existe uma recomendação por parte da fabricante WEG de que em ranhuras de área inferior a 30 mm^2 este fator não seja superior a 28%, e em ranhuras de área de 150 mm^2 seja de até 43% [36]. Como a ranhura dimensionada tem uma área superior a do manual escolheu-se um fator de preenchimento ligeiramente superior.

Já parâmetros como R_{Akm} ou B_{io} são advindos de *datasheets* dos fabricantes de materiais como por exemplo [30], e outros como por exemplo T_{op} foram supostos pois o modelo térmico não é abordado neste projeto.

Os valores adotados como escolhas (seja de tabelas, padrões ou constantes) estão apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Escolhas de projeto

Varíavel	Valor	Unidade
R_{Akm}	7,9	Ω/km
N_f	3	fases
B_{Ra}	1,3	T
B_{Ea}	1,5	T
T_{ref}	20	$^\circ\text{C}$
d_{fe}	7,65	g/cm^3
k_{hyys}	2	
k_{hyd}	1,2	
k_{ftd}	2,5	
k_{ftys}	1,8	
P_{hy}	1,66	W/kg
P_{ft}	0,7	W/kg
k_{stf}	10	$\text{W}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$
k_{ps}	0,002	

Estes valores foram obtidos a partir da literatura como por exemplo todos os fatores de perdas ($k_{f_{tys}}$, $k_{f_{td}}$, $k_{h_{yd}}$, $k_{h_{yys}}$), a densidade do ferro (d_{fe}) e os respectivos fatores de perdas (P_{ft} , P_{hy}) [24], k_{ps} e k_{stf} [17].

Alguns são valores habituais como o N_f ou entre os valores admitidos como o B_{Rc} e o B_{Ec} expostos em [9].

A partir destes parâmetros, obteve-se um gerador com os principais parâmetros geométricos apresentadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Principais resultados geométricos

Variável	Valor	Unidade
D_{Ee}	325,5	mm
D_{Ri}	198,2	mm
θ_{Rc}	28,3	Deg
L_{Rt}	6,95	mm
L_{Rf}	9,4	mm
h_r	23,2	mm
P	20	polos
h_{PM}	16	mm
L_{PM}	29,4	mm

Com as dimensões obtidas pode-se desenhar a representação de um polo na figura 4.1.i e em 4.1.ii observa-se um corte da máquina em escala.

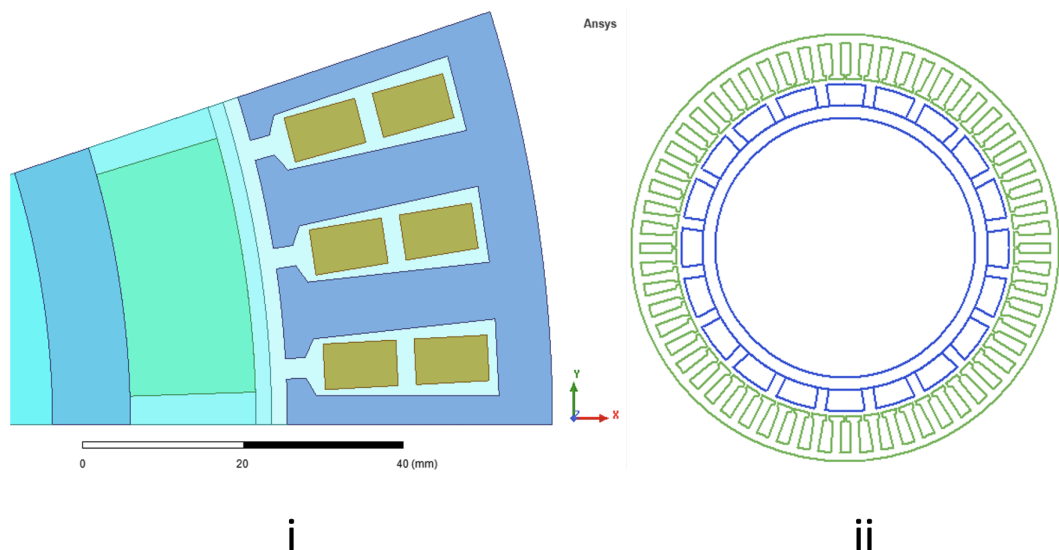


Figura 4.1: i. Corte de um polo em escala ii. Corte do gerador projetado em escala

E as características obtidas estão apresentadas na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Principais resultados

Variável	Valor	Unidade
S_d	7,5	kV·A
η	87,8	%
ρ_{cu}	737,6	W
ρ_t	832,3	W
V_T	382,1	V
δ	10,2	
X_s	7,2	Ω
R_{At}	1,9	Ω
I_A	11,3	A
N_{Ab}	21	espiras
ϕ_{lace}	2,3	Wb · 10 ⁻³

A partir dos resultados obtidos no projeto analítico, implementou-se o modelo numérico em um software baseado no método dos elementos finitos.

4.1.1 Escolhas de materiais

O aço escolhido para construção e na simulação dos dentes do estator e as coroas do rotor e do estator foi o aço M19_24G (nome comercial para o aço M350-65A5 segundo a IEC 60404 [41]), aço frequentemente utilizado para construção de máquinas elétricas [42] [43].

A figura 4.2 representa a curva BH do aço M19_24G.

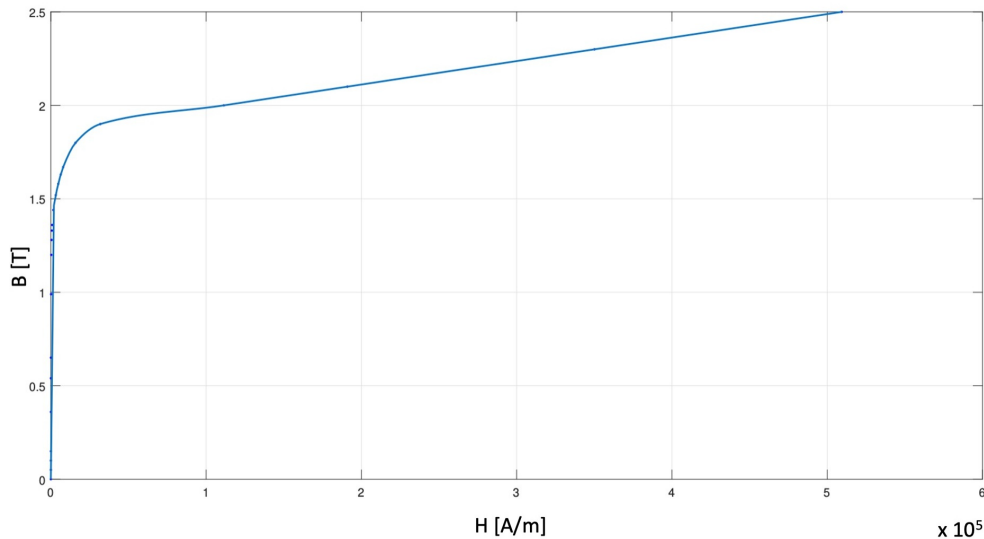


Figura 4.2: Curva BH do aço M19_24G [43] (adaptado)

Segundo as especificações do fabricante, o aço M19_24G possui a espessura de 0,23 mm, a condutividade de 1,96 GS/m e a densidade de 7,65 ton/m³.

Os fios de cobre foram escolhidos a partir da tabela de condutores AWG (American Wire Gauge) [44], medida referência em máquinas elétricas.

O fio selecionado para o projeto, conforme área máxima admissível calculada foi uma combinação de 4 fios AWG 21 e um fio AWG 20 por espira para obter assim a área calculada do condutor no projeto analítico.

As principais características, tais como diâmetro, secção e resistividade estão descritos na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Secções AWG [44] mais comuns em máquinas elétricas

Número AWG	Diâmetro [mm]	Secção [mm ²]	Resistência [Ω /Km]
11	2,305	4,17	4,07
12	2,053	3,31	5,13
13	1,828	2,63	6,49
14	1,628	2,08	8,17
15	1,45	1,65	10,3
16	1,291	1,31	12,9
17	1,15	1,04	16,34
18	1,024	0,82	20,73
19	0,9116	0,65	26,15
20	0,8118	0,52	32,69
21	0,7230	0,41	41,46

O ímã permanente selecionado foi o ímã de NdFeB de grade N42SH, e a temperatura de operação foi suposta em 120°C, o coeficiente de permeância escolhido para o projeto foi igual a 4.

O que resultou na curva BH e linha de carga representados na figura 4.3.

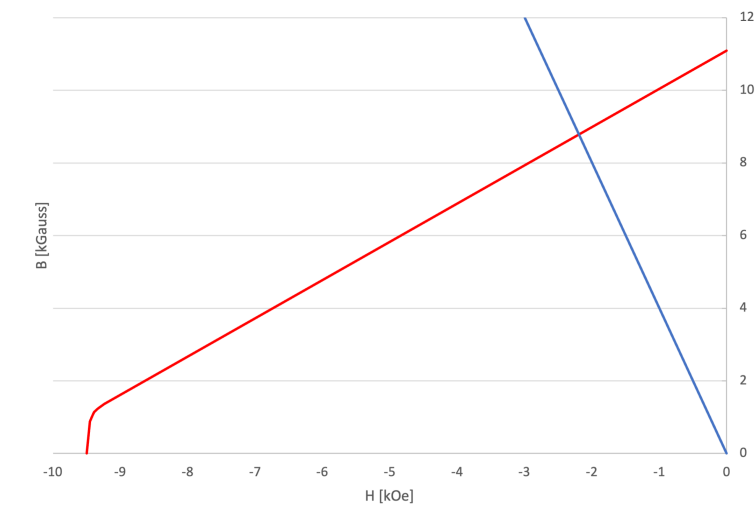


Figura 4.3: Curva BH do ímã N42SH (vermelho) e linha de carga para um PC=4 (azul)

4.2 IMPLANTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi implantado no intuito de verificar-se o modelo analítico e melhorar sua precisão, uma vez que utiliza-se de artifícios para aproximar-se de uma máquina real.

O software escolhido para as simulações foi o ANSYS MaxwellTM no qual utilizou-se do módulo RMxpert para modelar-se a máquina a partir das características físicas, número de bobinas e tipos de materiais escolhidos no projeto analítico [45] [46].

O módulo Maxwell 2D foi a escolha para as simulações, o qual utiliza do desenho de uma seção da máquina para aplicar o método dos elementos finitos. Este método permite realizar simulações com alto grau de fidelidade, a partir da discretização dos domínios [47].

O princípio deste método consiste em substituir problemas complexos, que necessitariam de equações diferenciais parciais (EDP) para serem resolvidos, em subproblemas de soluções mais simples que solucionam-se através de equações lineares. A discretização do domínio é feita de modo que se dividem os objetos em análise em pequenos triângulos ou retângulos em análises bidimensionais ou em tetraedros em tridimensionais [47].

O método do elementos finitos (MEF) é mais preciso e acurado em relação ao modelo analítico pois reflete o comportamento de materiais fundamentando-se em 3 etapas [47] [48]:

- A primeira etapa consiste no pré-processamento onde estabelece-se a geometria do objeto analisado, as condições de contorno e formula-se o problema através de EDP.

- A segunda etapa é quando ocorre a discretização do domínio, cada novo subdomínio está conectado por nós em outros subdomínios, criando assim a malha de elementos.

- A terceira etapa, o pós-processamento, consiste na junção das soluções obtidas onde pode-se analisar o objeto de estudo (neste caso o gerador) como um todo.

Além do alto grau de fidelidade da simulação através do MEF, o modelo analítico apresenta algumas imprecisões pois hipóteses simplificadoras são adotadas para otimizar as rotinas de cálculos, e após simular-se o modelo preliminar fatores de ajustes são implementados. Por este motivo existem pequenas divergências entre os modelos e faz-se necessário está análise a fim de obter o projeto completo do gerador.

Algumas hipóteses simplificadoras utilizadas no modelo analítico podem ser apontadas, tais como permeância infinita do aço do rotor e estator, permeância dos ímãs igual a do ar, não se leva em consideração a dispersão de fluxo magnético etc.

4.2.1 Enrolamento e Circuito externo

O modelo de enrolamento escolhido foi um enrolamento distribuído de uma bobina por polo e por fase com encurtamento de passo de $2/3$, duas camadas por ranhura, uma vez que esta configuração permite um número reduzido de ranhuras.

Por escolha de projeto, os enrolamentos de cada fase estão montados em série, ou seja, somente um caminho (sem caminhos em paralelo).

O esquema de montagem do enrolamento é apresentado na figura 4.4.

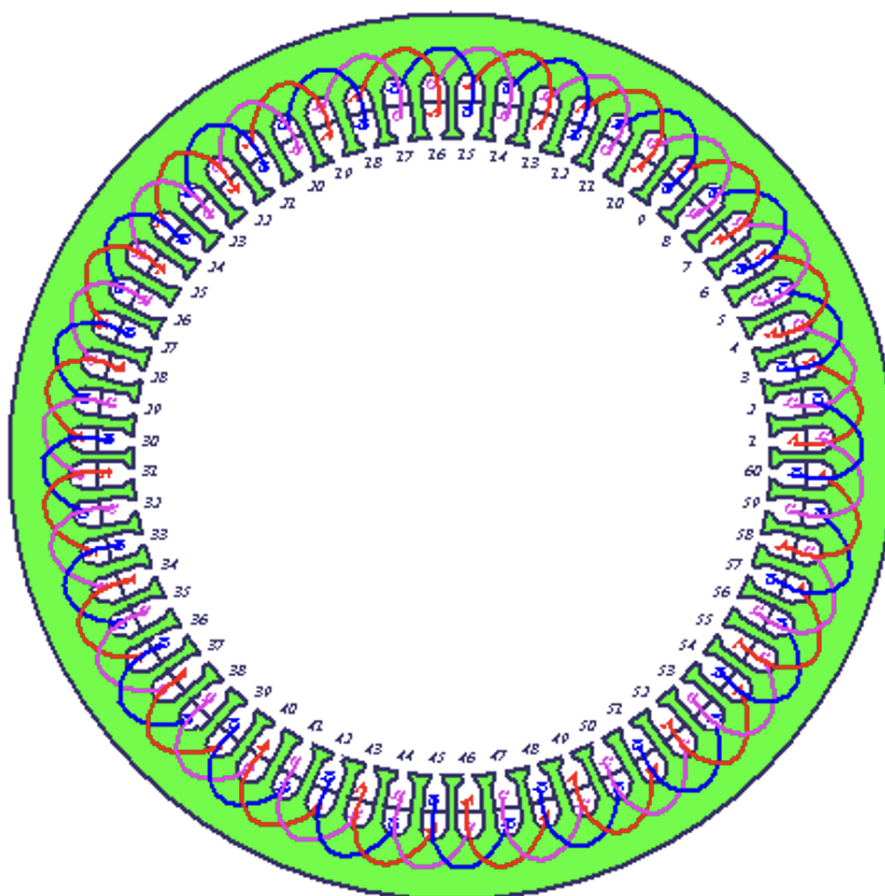


Figura 4.4: Esquema de enrolamento das bobinas de armadura

O software é capaz de calcular a indutância síncrona, porém não a resistência de armadura. Portanto deve-se calculá-la de maneira analítica e colocá-la em um circuito externo, junto com uma carga teórica nominal [49].

Na prática em um gerador conectado a rede elétrica a transferência de potência se dá através de um controlador eletrônico de carga que

regula a transferência de potência. Deste modo após o gerador entrar em sincronismo com a rede o controlador regula a corrente e o fator de potência de modo que sempre opere na mesma tensão e frequência da rede.

O esquema de circuito externo, com as respectivas pontas de prova de tensão onde seriam a tensão terminal, a resistência de armadura e a carga em valores nominais estão expostas na figura 4.5.

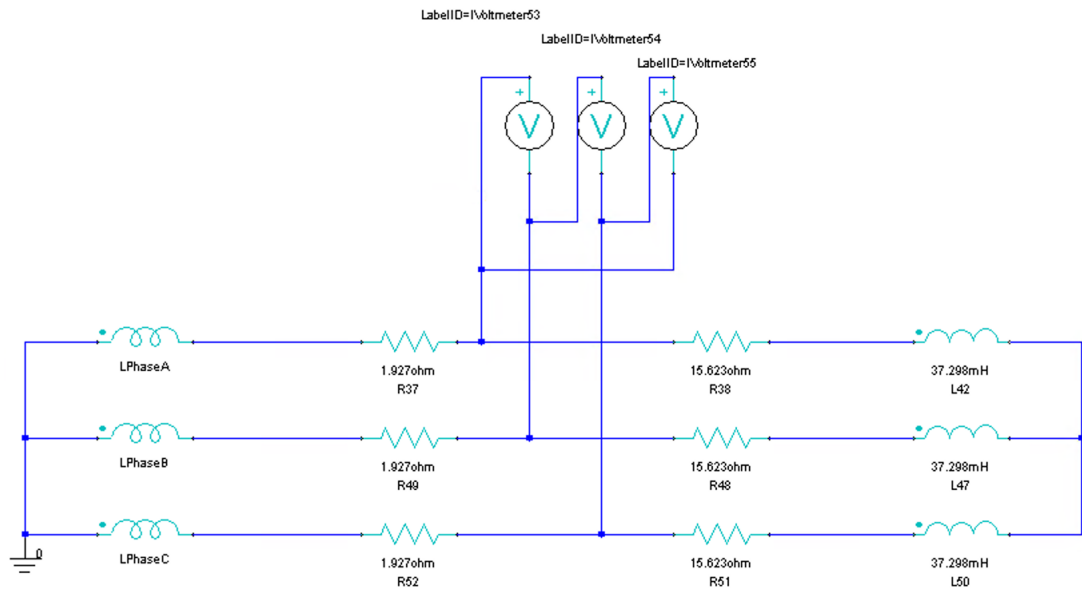


Figura 4.5: Circuito externo implantado

As resistências R37, R49 e R52 representam as resistências de armadura, as R38, R48 e R51 representam as resistências de carga e os indutores L42, L47 e L50 representam as indutâncias de carga. As cargas foram calculadas de maneira que representem a carga nominal da máquina.

4.2.2 Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos foi implantada de acordo com a sugestão do software na configuração de otimização do refinamento. O algoritmo utilizado para malhagem foi o TAU o qual utiliza maior refinamento nas partes com maior concentração de densidade de fluxo magnético, como no entreferro, dentes e coroa do estator [50].

A figura 4.6 exibe a malha utilizada nas simulações.

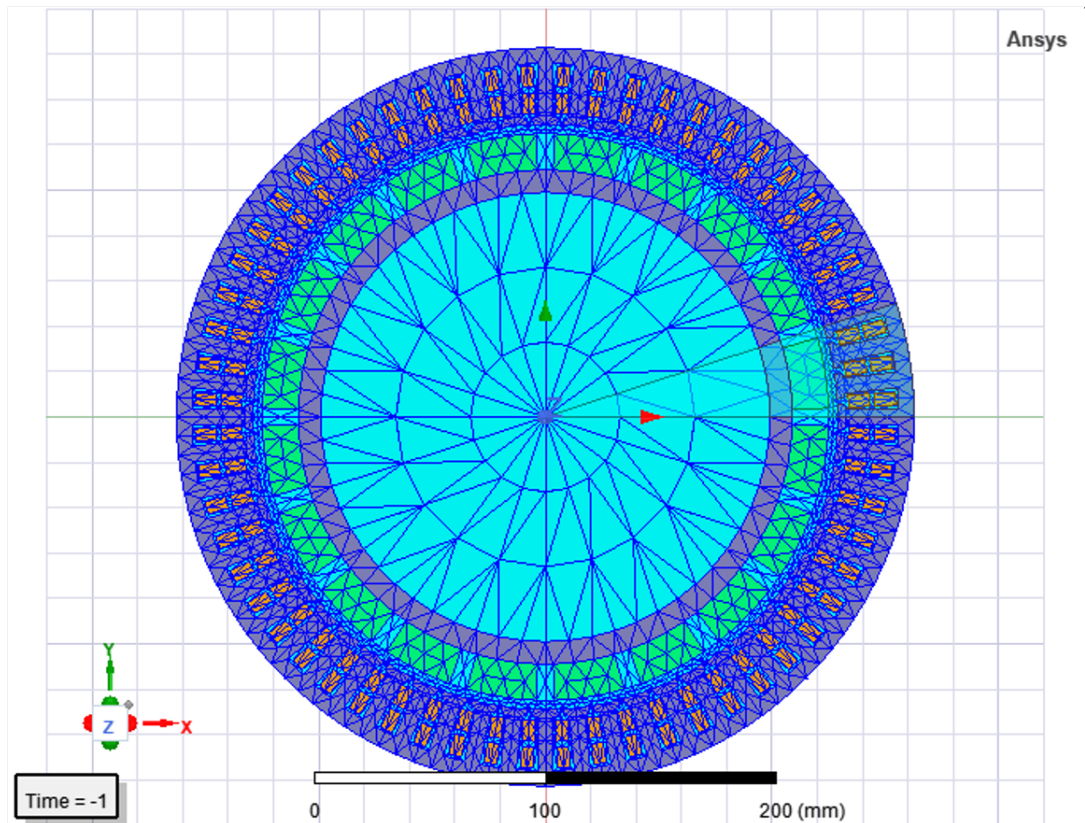


Figura 4.6: Malha utilizada na simulação

4.2.3 Simulação através do método dos elementos finitos

Nesta seção apresentaram-se e discutiram-se os resultados da simulação através do método dos elementos finitos.

A primeira característica da máquina analisada foi a distribuição do fluxo magnético no intuito de verificar possíveis pontos de saturação do ferro ou buscar ou possíveis erros de cálculo no modelo analítico.

A figura 4.7 mostra a distribuição do fluxo obtido na simulação MEF.

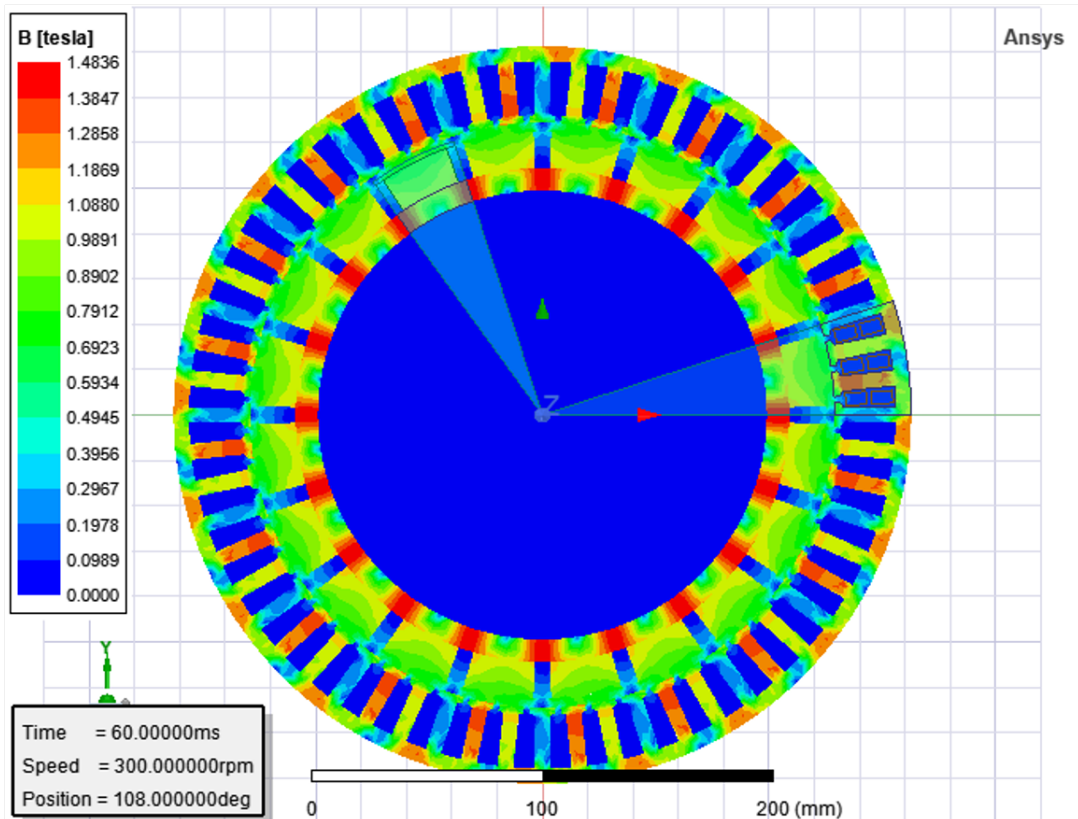


Figura 4.7: Distribuição do fluxo magnético obtido através da simulação MEF

Havia se estipulado uma densidade máxima a vazio de 1,3 T para a coroa do rotor e 1,5 T para a coroa do estator, valores que estão dentro dos limites propostos por [9].

Pode-se observar que os valores simulados em carga foram próximos, obtendo um valor máximo de 1,48 T no rotor e no estator o ponto de maior densidade foi de cerca de 1,38 T nos dentes.

As diferenças estão conforme o esperado, uma vez que em carga a reação de armadura provoca um aumento da densidade de fluxo no estator e uma redução na densidade de fluxo do rotor [9].

Nas análises gráficas das indutâncias, Tensão interna gerada, Tensão terminal, corrente, Torque e Perdas no ferro (figuras 4.8 a 4.15) deve-se desprezar os primeiros 10 ms por se tratarem de transitórios numéricos.

Em seguida verificou-se as indutâncias de eixo direto e de quadratura que devem ser similares por se tratar de uma máquina de polos lisos e comparou-se com o valor obtido no modelo analítico (onde é chamado simplesmente de indutância síncrona).

A imagem 4.8 apresenta o valor gráfico das indutâncias obtidas através da simulação MEF.

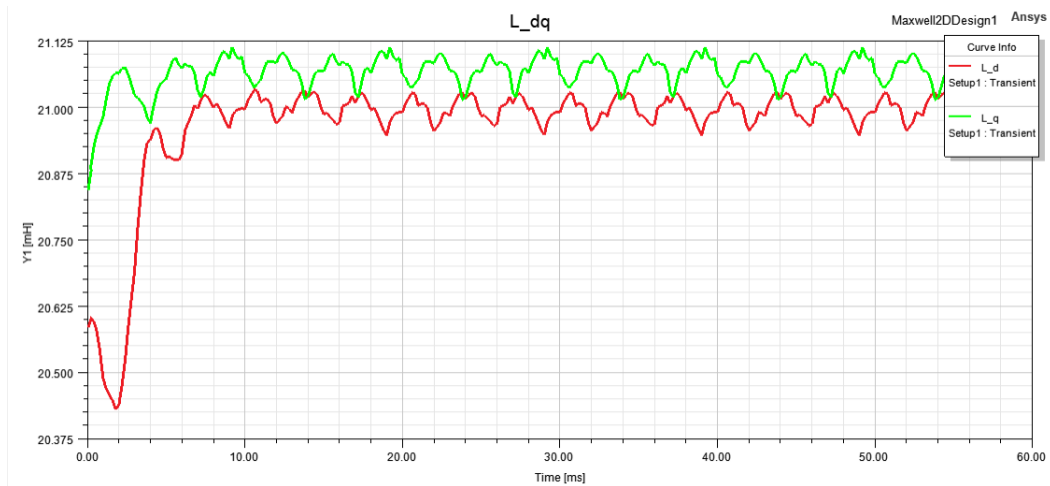


Figura 4.8: Indutâncias obtida através da simulação MEF

As indutâncias analisadas apresentaram valores muito próximos aos calculados, onde no modelo analítico o valor da reatância síncrona era de 22,8 mH e o valor obtido nas simulações foi de cerca de 21 mH.

Após analisar-se o fluxo magnético e a indutância síncrona pode-se verificar a conformidade da tensão interna gerada entre os dois projetos. A figura 4.9 representa a E_a obtida no modelo numérico.

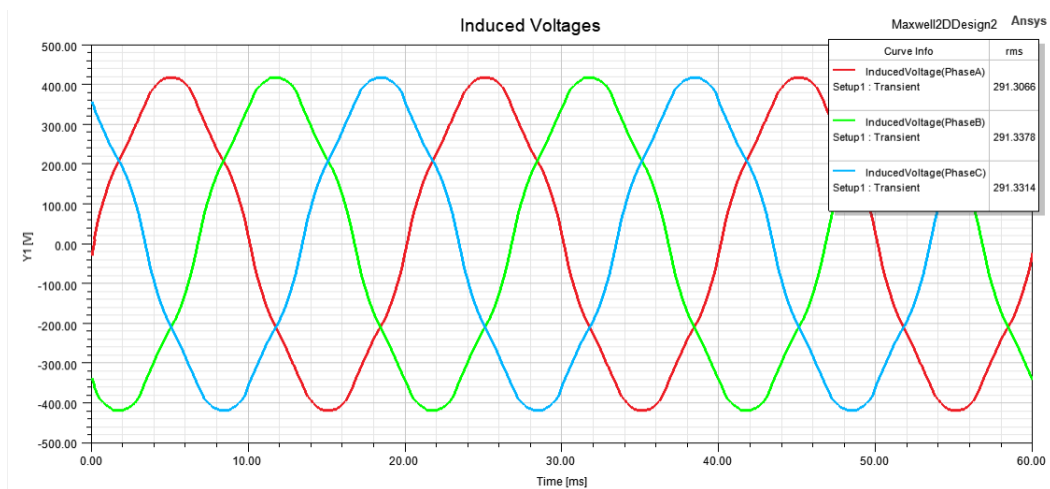


Figura 4.9: Tensão interna gerada obtida através do modelo numérico

Após comparar-se a tensão interna gerada nos dois modelos, colocou-se a carga nominal nos terminais da máquinas e analisou-se a tensão terminal (fase-fase) e corrente de fase para verificar se está conforme o projeto analítico.

A figura 4.10 representa a tensão terminal e a figura 4.11 a corrente de fase obtidas na simulação MEF.

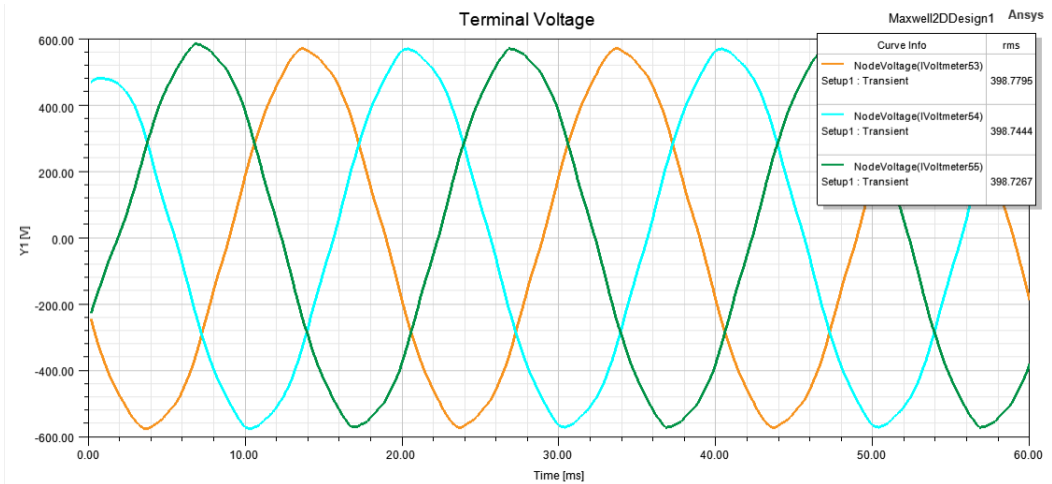


Figura 4.10: Tensão terminal obtida através da simulação MEF

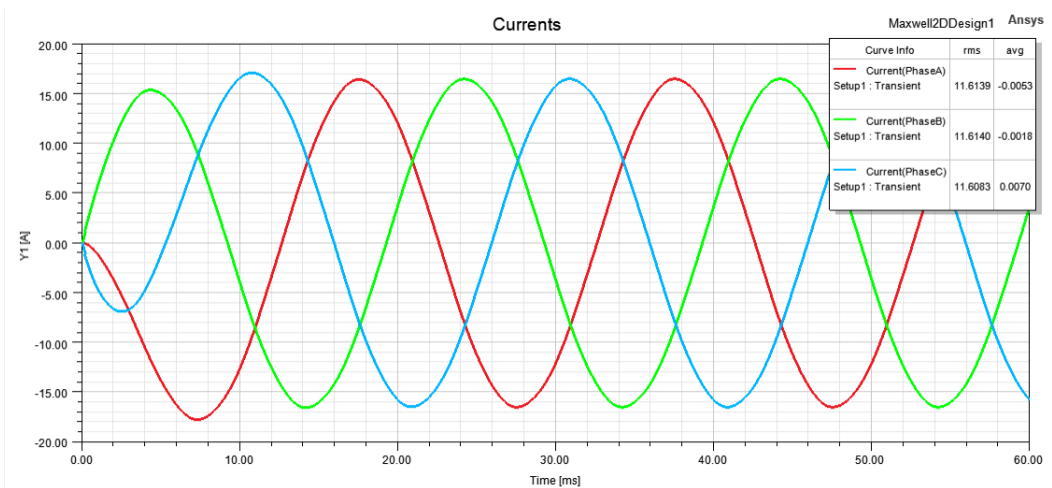


Figura 4.11: Corrente de fase obtida através da simulação MEF

A maior diferença entre o valor obtido através do modelo analítico e o modelo numérico foi em relação à tensão terminal. No modelo analítico o valor obtido foi de 382,1 V e no modelo numérico o valor calculado pelo software foi de cerca de 398,7 V.

A corrente de fase ficou próxima em ambos modelos, enquanto no analítico obteve-se um valor de 11,3 A no numérico pode-se aferir cerca de 11,6 A.

Analisou-se o torque a vazio e em carga de modo que pudesse contrasta-los para avaliar quanto da ondulação do torque era devido ao cogging torque e quanto devido ao conteúdo harmônico.

O cogging torque é a componente do torque ondulatório devido a força que o rotor exerce para alinhar-se ao estator na direção de maior permeância magnética [11].

Observou-se que a ondulação do torque em carga é cerca de 20 N·m (figura 4.12) e a vazio (cogging torque) cerca de 10 N·m (figura 4.13), e em caso de aplicar-se técnicas para reduzir o conteúdo harmônico (por exemplo alterar o encurtamento de passo das bobinas) ou utilizar técnicas para reduzir o cogging torque (por exemplo inclinar os ímãs permanentes) pode-se reduzir a ondulação do torque consideravelmente [9] [17].

Uma técnica sugerida para esta finalidade é a inclinação das ranhuras do estator [19]

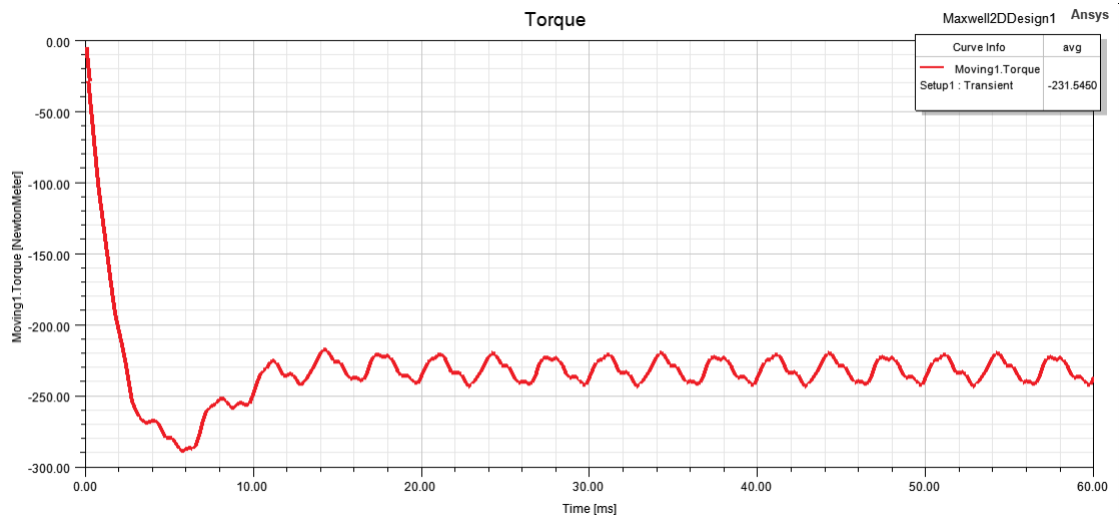


Figura 4.12: Torque em carga através da simulação

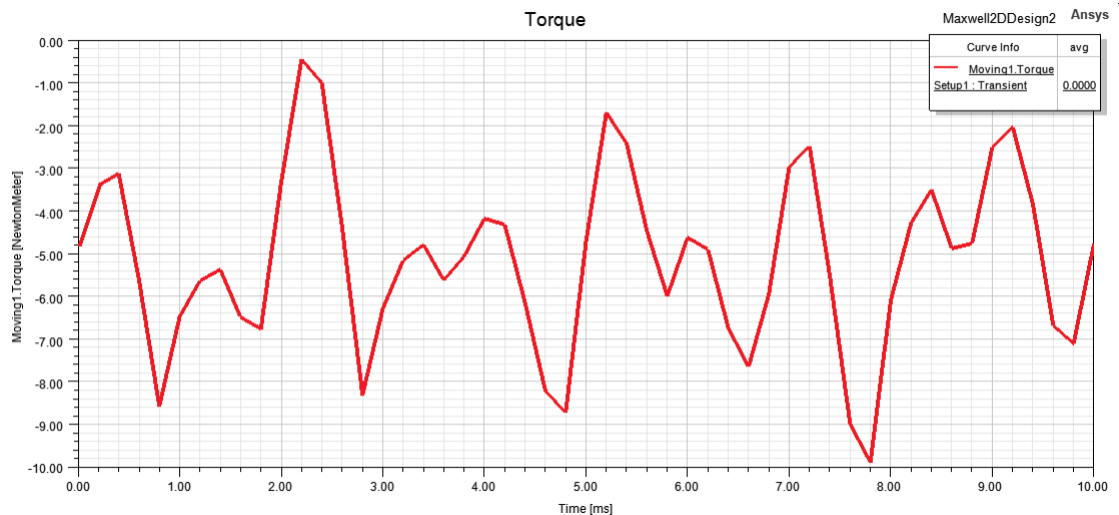


Figura 4.13: Torque a vazio através da simulação

Na figura 4.13 devido ao fato de mesmo não possuindo correntes na armadura, existem as correntes de Foucault e outras perdas no ferro

que fazem com que o torque não possua média zero. Essas correntes criam pequenos fluxos que cruamente podem ser consideradas como este torque de resistência.

Em seguida amostrou-se a tensão terminal (tensão de linha) e aplicou-se a transformada rápida de Fourier (FFT) para obter-se o gráfico da tensão no domínio da frequência, desta maneira permite-se analisar a distorção harmônica [51].

Recorda-se que de acordo com o teorema de Nyquist, para reconstituir-se um sinal deve-se amostrá-lo com no mínimo o dobro da frequência, no caso da distorção harmônica, o dobro da maior harmônica a ser analisada [51].

Como observou-se na figura 4.14 a máquina apresentou pouquíssima distorção harmônica, tendo um valor minimamente relevante na 7ª harmônica, todavia inferior a 1,5%.

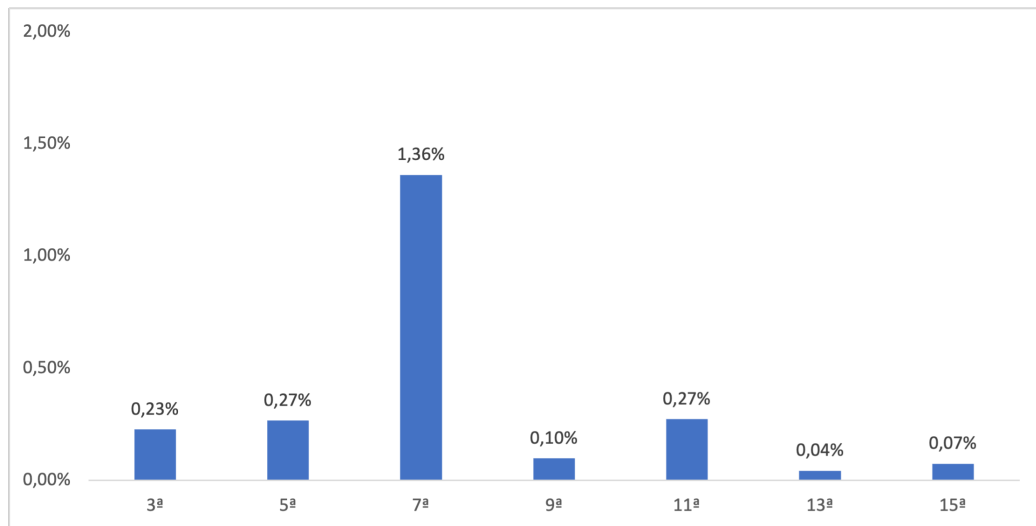


Figura 4.14: Distorção Harmônica da tensão terminal

O módulo da potência aparente pode ser calculada de maneira direta a partir da equação:

$$S_A = \sqrt{3} \cdot |V_t| \cdot |I_A| \quad (4.1)$$

Principalmente devido a diferença de tensão, a potência aparente obtida foi de 8 kVA que ficou um ligeiramente superior à obtida no modelo analítico (7,5 kVA).

O fator de potência foi verificado através da medição da defasagem entre a tensão terminal de fase e a corrente de armadura onde obteve-se uma defasagem de 1,8 ms ou seja $32,4^\circ$ (0,84)

De maneira análoga mediu-se a defasagem entre a tensão interna induzida e a tensão terminal, obteve-se a defasagem de 0,6 ms ($10,8^\circ$).

Por fim, após verificar-se as saídas do gerador verificou-se as perdas no núcleo do gerador, ou seja, a soma das perdas por histerese e correntes de Foucault, o gráfico da soma destas perdas está representado na figura 4.15.

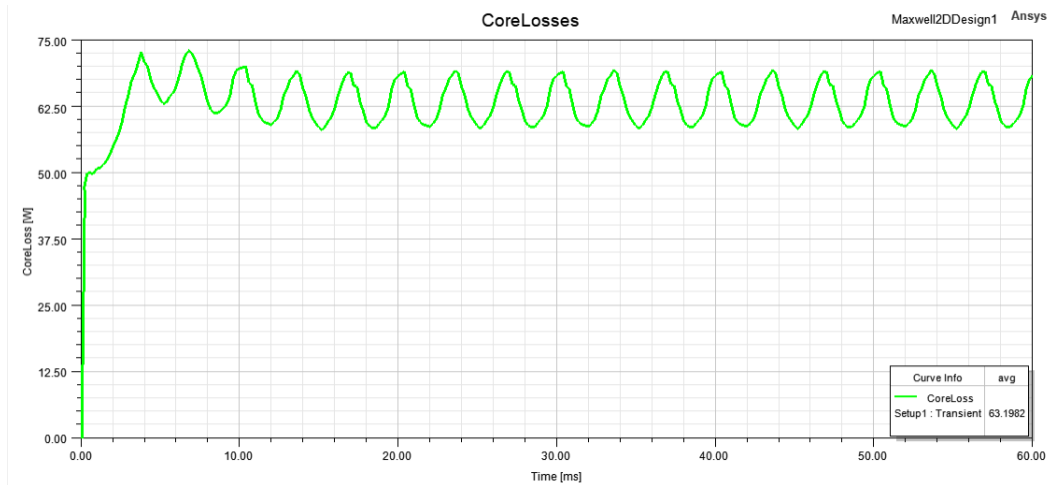


Figura 4.15: Perdas no núcleo do gerador obtida através da simulação MEF

O cálculo das perdas no modelo analítico é feita através de uma aproximação, já no modelo numérico a aproximação é feita de outra maneira levando em consideração fatores de perdas e a multiplicação ponto a ponto da densidade de fluxo magnético e fatores relativos ao tipo de perda e a frequência [50]:

$$\rho_{Fe} = K_h \cdot f \cdot (B_M)^2 + K_c \cdot (f \cdot B_M)^2 + K_e \cdot (f \cdot B_M)^{1,5} \quad (4.2)$$

onde K_h , K_c , K_e são os fatores de perdas por Foucault, Histerese e excesso respectivamente.

Por este motivo as perdas não convergiram como o esperado, onde no modelo analítico obteve-se as perdas no ferro no valor de 85,8 W e no modelo numérico obteve-se o valor 63,3W.

A tabela 4.7 compara os resultados obtidos nos modelos implementados.

Tabela 4.7: Comparativo entre os modelos analítico e numérico

Variável	Mod. Analítico	Mod. Numérico	Unidade	Diferença [%]
V_T	382,1	399,7	V	-4,2
I_A	11,3	11,6	A	-2,6
S_D	7,5	8	kV·A	-6,2
L_S	22,8	21	mH	8,6
δ	10,2	10,8	deg	-5,8
PF	0,8	0,84	-	-4,8
ρ_{Fe}	85,8	63,3	W	35,5

CONCLUSÃO

5.1 SÍNTESE DO TRABALHO

Esta dissertação realizou o desenvolvimento de uma metodologia de projeto de um gerador síncrono de ímãs permanentes (PMSG) com ímãs de NdFeB montados sobre a superfície do Rotor. A metodologia de projeto pode ser utilizada em diferentes aplicações, todavia o foco é a aplicação em pequenos aproveitamentos de energia eólica.

Por primeiro o trabalho consistiu em pesquisar os diferentes tipos de geradores e as aplicações, a busca de metodologias tanto clássicas quanto recentes e um pouco da história das máquinas elétricas utilizadas como geradores. Por fim optou-se por adaptar uma metodologia recém publicada relativa ao projeto de geradores síncronos de rotor bobinado e adaptá-la para o modelo de ímãs permanentes.

Diversas etapas tiveram de ser adaptadas, pois toda a geometria do rotor é diferente, por consequência como é calculado o fluxo magnético entre outros parâmetros de projeto que dependiam da geometria do rotor.

Como grande vantagem da geometria escolhida pode-se calcular a indutância síncrona através de equações analíticas com alto grau de fidelidade, diferentemente de algumas metodologias (como a de uma máquina de polos salientes) que sugeria o cálculo através de simulações, devido a complexidade da obtenção através de cálculos analíticos.

Através da metodologia criada, criou-se um gerador de 7,5 kVA e 20 polos, um modelo de máquina que tem como perfil de uso pertinente a pequenos aproveitamentos eólicos, a tensão e a frequência nominal escolhidas são as mesmas da rede elétrica europeia.

De resultados obteve-se um modelo analítico com o qual pode-se obter toda a geometria da máquina, a resistência de armadura, a reatância síncrona, o ângulo de carga, as perdas, a tensão terminal e a potência de saída.

Como proposto verificou-se o modelo utilizando o software comercial AnsysTM nos módulos RMXprt para a criação do desenho da máquina e o módulo Maxwell 2D para simulação através do Método dos elementos finitos.

Os resultados obtidos nas duas modelagens (analítica e numérica) foram conforme o esperado, com poucos desvios.

Pequenos desvios são justificáveis, uma vez que o software de elementos finitos possui uma alta fidelidade com máquinas reais, utilizando de artifícios como a discretização do domínio e convergência de soluções para obter os resultados. E o modelo analítico utiliza de algumas simplificações de modo que as equações sejam simplificadas e ajustes finos sejam realizados a partir das simulações.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Alguns pontos de melhorias podem ser pontuados como contribuição para aprimorar a metodologia de projeto. Tais como:

- A implantação de um modelo térmico pode ser muito útil para identificação do correto ponto de operação do ímã;
- Inclusão de redes de relutâncias que auxiliariam na estimativa da dispersão de fluxo magnético;
- Otimização do cálculo de perdas que beneficiariam no cálculo da eficiência da máquina;
- Desenvolver um modelo de otimização que poderiam reduzir as dimensões, quantidade de material ativo, custo de fabricação ou aumentar a eficiência da máquina através de cálculos computacionais.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Castro. «Perspectivas de la demanda energética global». Em: *Petrotecnia* 1 (2011), pp. 54–70.
- [2] International Energy Agency. «Photovoltaic Power Systems Programme: Annual Report 2020». Em: (2020).
- [3] E. Fadigas. *Energia Eólica*. first. Vol. único. Rio de Janeiro: Mansole, 2012.
- [4] Global Wind Energy Council. «GWEC | GLOBAL WIND REPORT 2010». Em: (2010).
- [5] Global Wind Energy Council. «GWEC | GLOBAL WIND REPORT 2021». Em: (2021).
- [6] S. Chapman. *Electric machinery fundamentals*. McGraw-hill, 2004.
- [7] S. Umans e B. James A. E. Fitzgerald C. Kingsley. *Electric machinery*. Vol. 5. McGraw-Hill New York, 2003.
- [8] P. Sen. *Principles of electric machines and power electronics*. John Wiley & Sons, 2007.
- [9] T. Jokinen e V. Hrabovcova J. Pyrhonen. *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons, 2013.
- [10] I. Boldea. *Synchronous generators*. CRC press, 2005.
- [11] J. Hendershot e T. Miller. *Design of brushless permanent-magnet machines*. Motor Design Books Venice, Florida, USA, 2010.
- [12] D. Hanselman. *Brushless permanent magnet motor design*. The Writers' Collective, 2003.
- [13] J. Gieras. *Permanent magnet motor technology: design and applications*. CRC press, 2002.
- [14] S. Morimoto e M. Sanada H. Haraguchi. «Suitable design of a PMSG for a large-scale wind power generator». Em: *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. IEEE. 2009, pp. 2447–2452.
- [15] T. Bazzo e J. F. Kolzer e R. Carlson e F. Wurtz e L. Gerbaud. «Optimum design of a high-efficiency direct-drive PMSG». Em: *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE. 2015, pp. 1856–1863.

- [16] C. Brad e I. Vadan e I. Berinde. «Design and analysis of an axial magnetic flux wind generator». Em: *2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. IEEE. 2017, pp. 1–7.
- [17] T. Bazzo e V. Moura e R. Carlson. «A Step-by-Step Procedure to Perform Preliminary Designs of Salient-Pole Synchronous Generators». Em: *Energies* 14.16 (2021), p. 4989.
- [18] W. Ghoneim e H. Ashour A. Hebala. «Detailed design procedures for PMSG direct-driven by wind turbines». Em: *Journal of Electrical Engineering & Technology* 14.1 (2019), pp. 251–263.
- [19] F. Dembinski. «Modelo de dimensionamento de geradores síncronos com ímãs permanentes de superfície utilizando ímãs de ferrite». B.S. thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- [20] G. Concer. «Projeto de motor de ímã permanente utilizando ferrite na configuração de ímãs enterrados». Em: (2008).
- [21] T. A. Maia. «Projeto e construção de um gerador a ímãs permanentes de fluxo axial para turbina eólica de pequena potência». Em: *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte* (2011).
- [22] Â. Ferreira. «Projecto de uma máquina de ímanes permanentes de fluxo axial orientado para os sistemas de conversão de energia eólica». Em: (2011).
- [23] T. Bazzo. «Projeto ótimo multidisciplinar de geradores síncronos de ímãs permanentes para aerogeradores considerando a curva de ocorrência do vento». Em: (2017).
- [24] A. Grauers. «Design of Direct Driven Permanent Magnet Generators for Wind Turbines». Em: (1996).
- [25] Museu WEG de Ciência e Tecnologia. «A incrível transformação dos motores no seu dia a dia». Em: (2017). URL: <https://museuweg.net/blog/a-incrivel-transformacao-dos-motores-no-seu-dia-a-dia/>.
- [26] Z. Csendes e P. Silvester. «Numerical solution of dielectric loaded waveguides: I-finite-element analysis». Em: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 18.12 (1970), pp. 1124–1131.
- [27] J. P. Bastos. *Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática*. Serie Didatica Universidade Federal de Santa Catarina. Ed. da UFSC, 2004. ISBN: 9788532803061.
- [28] E. Furlani. *Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications*. Academic press, 2001.

- [29] Pradeep e X. Zhao R. Zhao e Y. Kim e S. Chester e P. Sharma. «Mechanics of hard-magnetic soft materials». Em: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 124 (2019), pp. 244–263.
- [30] K&J Magnets Inc. 2021. URL: <https://www.kjmagnetics.com/bhcurves.asp>.
- [31] Arnold Magnetic Technologies. «The Vocabulary of Magnetism». Em: *TechNotes* (2016).
- [32] Â. Ferreira e A. Costa. «Projeto e seleção de materiais magnéticos permanentes». Em: *e-LP-Engineering and Technology Journal* (2011), pp. 1–21.
- [33] S. Constantinides. «Magnet selection». Em: *Arnold Magnetic Technologies Corp.* [Online]. Available: http://www.arnoldmagnetics.com/Technical_Papers_and_Presentations.aspx (2003).
- [34] I. Culbert e H. Dhirani G. Stone E. Boulter. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Vol. 21. John Wiley & Sons, 2004.
- [35] SMA Inc. *Windy Boy 5000 Windy Boy 6000 Inverter for Wind Energy Power Plants Operating Instructions*. 2015.
- [36] WEG. *Manual de bobinagem*. 2005.
- [37] K. Boorsma A. Gonzalez X. Munduate O. Pires N. Sørensen C. Ferreira G. Sieros J. Madsen e S. Voutsinas J. Ceyhan O. Schepers. «Latest results from the EU project AVATAR: Aerodynamic modelling of 10 MW wind turbines». Em: *Journal of Physics: Conference Series* 753.2 (2016).
- [38] I. Uribe. «Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero». Em: *Ingeniería* 22.3 (2018), pp. 30–46.
- [39] M. Mueller. «Design and performance of a 20 kW, 100 rpm, switched reluctance generator for a direct drive wind energy converter». Em: *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005*. IEEE. 2005, pp. 56–63.
- [40] T. Crawford e G. Hill W. Wu V. Ramsden. «A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines». Em: *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy*. Vol. 1. IEEE. 2000, pp. 147–154.
- [41] Tata Steel Europe. «Steel Datasheet». Em: *Cogent Power Inc.* (2015).

- [42] S. Kaur e D. Kaur. «Analysis of effect of core material on the performance of single phase transformer using FEM». Em: *IOP conference series: materials science and engineering*. Vol. 561. 1. IOP Publishing. 2019.
- [43] P. A. González e G. D. Avila. «Comparación de diversos métodos para el cálculo de los parámetros de operación de un motor síncrono de imanes permanentes». Em: (2020).
- [44] Standard. «American Wire Gauge». Em: (1979).
- [45] Ansys Inc. «Maxwell 2D User's Guide». Em: (2020).
- [46] Ansys Inc. «RMXprt User's Guide». Em: (2012).
- [47] J. M. Jin. *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons, 2015.
- [48] N. Bianchi. *Electrical machine analysis using finite elements*. CRC press, 2005.
- [49] Ansys Inc. «ANSYS Maxwell Training Manual: Maxwell Transient Solvers». Em: (2012).
- [50] Ansys Inc. «Maxwell 2D User's Guide». Em: (2018).
- [51] B. Lathi e A. Green. *Linear systems and signals*. Oxford University Press New York, 2005.

APÊNDICE

A

PLANILHA DE CÁLCULOS DO MODELO
ANALÍTICO

Especificações do Projeto

$$S_{Ed} := 7.5 \text{ KV} \cdot \text{A}$$

$$PF := 0.8$$

$$f := 50 \text{ Hz}$$

$$n := 300 \text{ rpm}$$

$$V_{Td} := 400 \text{ V}$$

Parâmetros Impostos

$$E_A := 291.254 \text{ V}$$

Tensão interna induzida

$$D_{Re} := 250 \text{ mm}$$

Diâmetro externo do rotor

$$k_{\alpha p} := \frac{4}{5}$$

Fator de encurtamento do passo polar

$$L_{EF} := 4 \text{ mm}$$

Comprimento do entreferro

$$C_{AX} := 163.788 \text{ mm}$$

Comprimento axial da máquina

$$L_{Ra} := 2.5 \text{ mm}$$

Largura da abertura da ranhura

$$h_{Rp} := 2.5 \text{ mm}$$

Altura do pescoço da ranhura

$$h_{Rc} := 1.2 \text{ mm}$$

Altura do colarinho da ranhura

$$N_R := 60 \text{ ranhuras}$$

Número de ranhuras

$$k_{DR} := 1$$

Relação entre a largura do dente e a largura de topo da ranhura

$$J_A := 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Densidade de corrente da armadura

$$k_{\phi} := 0.7962$$

Fator de % do fluxo do campo enlaçado pelos enrolamentos de armadura

$$N_{CP} := 1 \text{ caminhos em paralelos}$$

Número de caminhos em paralelo

$$N_{Rc} := 2 \text{ camadas}$$

Número de camadas da ranhura

$$k_{CR} := 3.4$$

Fator entre altura da coroa do estator e altura da ranhura

$$k_{Re} := 0.5$$

Fator de enchimento da ranhura

$$E_{Apb} := \frac{4}{6}$$

Encurtamento de passo da bobina de armadura

$$R_{Akm_fio} := 7.87 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Resistência por quilometro do fio

$$PC := 4$$

Coefficiente de permeância

$$N_f := 3$$

Numero de fases

$B_{Io} := 0.94 \text{ T}$	Indução magnética
$B_{Ra} := 1.3 \text{ T}$	Densidade de fluxo no rotor
$B_{Ea} := 1.5 \text{ T}$	Densidade de fluxo no Estator
$T_{op} := 120 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura de operação da máquina
$K_t := 243.5 \text{ }^\circ\text{C}$	Fator de correção de temperatura do cobre
$T_{ref} := 20 \text{ }^\circ\text{C}$	Peso específico do aço utilizado
$K_m := 1$	Fator de correção de fluxo concatenado
$d_{fe} := 7.7 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$	Peso específico do aço utilizado
$k_{hys} := 2$	Fator empírico de perdas por histerese na coroa do estator
$k_{hyd} := 1.2$	Fator empírico de perdas por histerese nos dentes do estator
$k_{ftd} := 2.5$	Fator empírico de perdas por Foucault na coroa do estator
$k_{ftys} := 1.8$	Fator empírico de perdas por Foucault nos dentes do estator
$p_{hy} := 1.656 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$	Fator de perdas por histerese do aço utilizado
$p_{ft} := 0.698 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$	Fator de perdas por Foucault do aço utilizado
$K_{Stf} := 10 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$	
$\rho_s := 0.002$	Fator de perdas suplementares

1 - Projeto do Rotor

1.1 - Número de Polos

$$P := \frac{120 \cdot f}{n} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} = 20$$

1.2 - Passo polar

$$\alpha_P := \frac{2 \cdot \pi}{P} = 18^\circ$$

1.3 - Passo efetivo do polo

$$\alpha_{P_{ef}} := \alpha_P \cdot k_{\alpha p} = 14.4^\circ$$

1.4 - Altura do Imã Permanente

$$H_{PM} := PC \cdot L_{EF} = 16 \text{ mm}$$

1.5 - Diâmetro do Rotor na base dos ímãs

$$D_{Rbi} := D_{Re} - 2 \cdot H_{PM} = 218 \text{ mm}$$

1.6 - Largura do ímã

$$L_{PM} := \frac{D_{Re} - H_{PM}}{2} \cdot \alpha_{P_{ef}} = 29.405 \text{ mm}$$

1.7 - Altura da coroa do Rotor

$$h_{cr} := \frac{B_{Io} \cdot D_{Rbi} \cdot \alpha_{P_{ef}}}{4 \cdot B_{Ra}} = 9.904 \text{ mm}$$

1.8 - Diâmetro interno do Rotor

$$D_{Ri} := D_{Rbi} - 2 \cdot h_{cr} = 198.192 \text{ mm}$$

1.9 - Fluxo de um laço

$$\phi_{Laço} := \frac{B_{Io} \cdot C_{AX} \cdot L_{PM}}{2} = 0.0022636 \text{ Wb}$$

2 - Projeto do Estator

2.1 - Diâmetro interno do estator

$$D_{Ei} := D_{Re} + 2 \cdot L_{EF} = 258 \text{ mm}$$

2.2 - Passo de ranhura

$$\alpha_R := \frac{2 \cdot \pi}{N_R} = 6^\circ$$

2.3 - Diâmetro na altura do topo da ranhura

$$D_{Rt} := D_{Ei} + 2 \cdot (h_{Rp} + h_{Rc}) = 265.4 \text{ mm}$$

2.4 - Ângulo ocupado pela ranhura no topo

$$\theta_{Rt} := \frac{\alpha_R}{1 + k_{DR}} = 3^\circ$$

2.5 - Largura da ranhura no topo

$$L_{Rt} := D_{Rt} \cdot \tan\left(\frac{\theta_{Rt}}{2}\right) = 6.95 \text{ mm}$$

2.6 - Largura do colarinho da ranhura

$$L_{Rc} := \frac{L_{Rt} - L_{Ra}}{2} = 2.225 \text{ mm}$$

2.7 - Altura da coroa do estator

$$h_{Ec} := \frac{B_{Io} \cdot D_{Rbi} \cdot \alpha_{P_{ef}} \cdot k_\phi}{4 \cdot B_{Ea}} = 6.834 \text{ mm}$$

2.8 - Altura da ranhura

$$h_R := h_{Ec} \cdot k_{CR} = 23.237 \text{ mm}$$

2.9 - Ângulo de inclinação da parede da ranhura

$$\theta_{Rip} := \frac{\alpha_R}{2} = 3^\circ$$

2.10 - Largura da ranhura no fundo

$$L_{Rf} := L_{Rt} + 2 \cdot h_R \cdot \tan(\theta_{Rip}) = 9.385 \text{ mm}$$

2.11 - Diâmetro externo do estator

$$D_{Ee} := D_{Rt} + 2 \cdot h_R + 2 \cdot h_{Ec} = 325.542 \text{ mm}$$

2.12 - Área da ranhura

$$S_R := \left(\frac{L_{Rt} + L_{Rf}}{2} \right) \cdot h_R = 189.786 \text{ mm}^2$$

2.13 - Passo da bobina de armadura

$$\alpha_{Ab} := \alpha_P \cdot E_{Apb} \cdot \frac{P}{2} = 120^\circ$$

2.14 - Fator de encurtamento do passo da bobina de armadura

$$k_{Aeb} := \sin \left(\frac{\alpha_{Ab}}{2} \right) = 0.866$$

2.15 - Número de bobinas por polo e por fase da armadura

$$N_{Abpf} := \frac{N_R \cdot N_{Rc}}{6 \cdot P} = 1 \text{ bobinas}$$

2.16 - Fator de distribuição da bobina de armadura

$$k_{Adb} := \frac{\sin \left(\frac{N_{Abpf} \cdot \alpha_R}{2} \right)}{N_{Abpf} \cdot \sin \left(\frac{\alpha_R}{2} \right)} = 1$$

2.17 - Número total de espiras da armadura por fase

$$N_{At} := \frac{E_A}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot k_\phi \cdot k_{Aeb} \cdot k_{Adb} \cdot 2 \cdot \phi_{Laço}} = 420 \text{ espiras}$$

2.18 - Número de caminhos em série

$$N_{CS} := \frac{P}{N_{CP}} = 20 \text{ caminhos}$$

2.19 - Número de espiras da armadura por bobina

$$N_{Ab} := \frac{N_{At}}{N_{Abpf} \cdot N_{CS}} = 21 \text{ espiras}$$

2.20 - Área dos condutores do enrolamento de armadura

$$S_{Ac} := \frac{S_R \cdot k_{Re}}{N_{Ab} \cdot N_{Rc}} = 2.259 \text{ mm}^2$$

2.21 - Corrente admissível nos condutores de armadura

$$I_A := S_{Ac} \cdot J_A = 11.297 \text{ A}$$

3 - Cálculo da resistência de armadura

3.1 - Passo da bobina de armadura em milímetro

$$D\alpha_{Acb} := (D_{Rt} + h_R) \cdot \frac{\alpha_{Ab}}{P} = 30.226 \text{ mm}$$

3.2 - Comprimento do arco da cabeça de bobina de armadura

$$A_{Acb} := \pi \cdot \frac{D\alpha_{Acb}}{2} = 47.479 \text{ mm}$$

3.3 - Comprimento de uma espira da Armadura (médio)

$$C_{A1e} := 2 \cdot C_{AX} + 2 \cdot A_{Acb} = 422.534 \text{ mm}$$

3.4 - Resistência de uma fase do enrolamento de armadura

$$R_A := C_{A1e} \cdot N_{At} \cdot R_{Akm_fio} = 1.397 \text{ } \Omega$$

3.5 - Resistência corrigida de acordo com a temperatura de operação da máquina

$$R_{At} := R_A \cdot \frac{K_t + T_{op} - 2 \cdot 0 \text{ } ^\circ\text{C}}{K_t + T_{ref} - 2 \cdot 0 \text{ } ^\circ\text{C}} = 1.927 \text{ } \Omega$$

4 - Cálculo da Indutância Síncrona

4.1 - Componente de entreferro da indutância própria de cada fase

$$L_{ef} := \pi \cdot \frac{\mu_0 \cdot N_{At}^2 \cdot C_{AX} \cdot D_{Ei}}{P^2 \cdot (L_{EF} + H_{PM})} = 3.678 \text{ mH}$$

4.2 - Indutância mútua de entreferro

$$M_{ef} := \frac{-L_{ef}}{3} = -1.226 \text{ mH}$$

4.3 - Indutância de dispersão de ranhura

$$L_{ran} := \left(4 \cdot \frac{N_f}{N_R}\right) \cdot \mu_0 \cdot C_{AX} \cdot N_{At}^2 \cdot \left(\frac{h_R}{3 \cdot L_{Rt}} + \frac{h_{Rp}}{L_{Ra}} + \frac{h_{Rc}}{L_{Rt} - L_{Ra}} \cdot \ln\left(\frac{L_{Rt}}{L_{Ra}}\right)\right) = 17.356 \text{ mH}$$

4.4 - Cálculo do R para a bobina de seção circular

$$R := 0.447 \cdot \sqrt{S_R} = 6.158 \text{ mm}$$

4.5 - Cálculo da indutância de cabeça de bobina

$$L_{cb} := \mu_0 \cdot D\alpha_{AcB} \cdot (N_{Ab})^2 \cdot \left(\ln\left(8 \cdot \frac{D\alpha_{AcB}}{R}\right) - 2\right) = 27.98 \text{ } \mu\text{H}$$

4.6 - Correção da indutância de cabeça de bobina considerando o fluxo concatenado nos caminhos paralelos

$$L_{cbc} := N_{CS} \cdot (1 + (N_{CP} - 1) \cdot K_m) \cdot L_{cb} = 559.597 \text{ } \mu\text{H}$$

4.7 - Indutância Própria

$$L_{aa} := L_{ef} + L_{ran} + 1 \cdot L_{cbc} = 21.594 \text{ mH}$$

4.8 - Indutância Síncrona

$$L_{sinc} := L_{aa} - M_{ef} = 22.821 \text{ mH}$$

4.9 - Reatância Síncrona

$$X_{sinc} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{sinc} = 7.169 \text{ } \Omega$$

5 - Cálculo da Tensão Terminal em Carga

5.1 - Ângulo entre a tensão e a corrente

$$\phi := \arccos(PF) = 36.87^\circ$$

5.2 - Ângulo de carga

$$\delta := \arcsin\left(\frac{X_{sinc} \cdot I_A \cdot \cos(\phi) - R_{At} \cdot I_A \cdot \sin(\phi)}{E_A}\right) = 10.231^\circ$$

5.3 - Componente da Tensão terminal fase-neutro no eixo em quadratura

$$V_\phi := E_A - 1j \cdot X_{sinc} \cdot (I_A \angle -(\phi + \delta)) - R_{At} \cdot (I_A \angle -(\phi + \delta)) = (220.616 \angle -10.231^\circ) \text{ V}$$

5.4 - Tensão terminal fase-fase orientada com o eixo direto

$$V_T := V_\phi \cdot \sqrt{3} = (382.119 \angle -10.231^\circ) \text{ V}$$

6 - Estimativa de perdas

6.1 - Perdas no cobre

$$\rho_{cu} := 3 \cdot R_{At} \cdot I_A^2 = 737.635 \text{ W}$$

6.2 - Volume da coroa do estator

$$V_{ecfe} := \left(\pi \cdot \left(\left(\frac{D_{Ee}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{Ei} + 2 \cdot (h_R + h_{Rc} + h_{Rp})}{2} \right)^2 \right) \right) \cdot C_{AX} = 0.001 \text{ m}^3$$

6.3 - Volume dos dentes do estator

$$V_{edfe} := \left(\pi \cdot \left(\left(\frac{D_{Ei} + 2 \cdot (h_R + h_{Rc} + h_{Rp})}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{Ee}}{2} \right)^2 \right) - N_R \cdot S_R \right) \cdot C_{AX} = 0.002 \text{ m}^3$$

6.4 - Massa da coroa do estator

$$m_{ecfe} := V_{ecfe} \cdot d_{fe} = 8.63 \text{ kg}$$

6.5 - Massa dos dentes do estator

$$m_{edfe} := V_{edfe} \cdot d_{fe} = 16.049 \text{ kg}$$

6.6 - Perdas por histerése na coroa do estator

$$\rho_{Hyys} := k_{hyys} \cdot m_{ecfe} \cdot p_{hy} \cdot \left(\frac{f}{50 \frac{1}{s}} \right) \cdot \left(\frac{B_{Ea}}{1.5 \text{ T}} \right)^2 = 28.583 \text{ W}$$

6.7 - Perdas por Foucault na coroa do estator

$$\rho_{Fyys} := k_{fyyys} \cdot m_{ecfe} \cdot p_{ft} \cdot \left(\frac{f}{50 \frac{1}{s}} \right) \cdot \left(\frac{B_{Ea}}{1.5 \text{ T}} \right)^2 = 10.843 \text{ W}$$

6.8 - Cálculo da densidade de fluxo nos dentes

$$B_d := \frac{B_{Io} \cdot L_{PM} \cdot P \cdot k_\phi}{k_{\alpha p} \cdot N_R \cdot L_{Rt} \cdot k_{DR}} = 1.319 \text{ T}$$

6.10 - Perdas por histerese nos dentes do estator

$$\rho_{Hyd} := k_{hyd} \cdot m_{edfe} \cdot p_{hy} \cdot \left(\frac{f}{50 \frac{1}{s}} \right) \cdot \left(\frac{B_d}{1.5 \text{ T}} \right)^2 = 24.677 \text{ W}$$

6.11 - Perdas por Foucault nos dentes do estator

$$\rho_{Ftd} := k_{ftd} \cdot m_{edfe} \cdot p_{ft} \cdot \left(\frac{f}{50 \frac{1}{s}} \right) \cdot \left(\frac{B_d}{1.5 \text{ T}} \right)^2 = 21.669 \text{ W}$$

6.12 - Comprimento de arco do passo polar

$$\tau_p := \frac{\pi \cdot D_{Re}}{P} = 39.27 \text{ mm}$$

6.13 - Velocidade da superfície do rotor

$$v_r := \frac{n \cdot D_{Re}}{2} = (3.927 \cdot 10^3) \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot \text{mm}$$

6.14 - Perdas por ventilação

$$\rho_v := K_{Stf} \cdot D_{Re} \cdot (C_{AX} + 0.6 \cdot \tau_p) \cdot v_r^2 = 7.223 \text{ W}$$

6.15 - Perdas totais

$$\rho_t := (1 + \rho_s) \cdot (\rho_{Hyys} + \rho_{Fyys} + \rho_{Hyd} + \rho_{Ftd} + \rho_v + \rho_{cu}) = 832.291 \text{ W}$$

7 - Cálculo da Potência entregue e rendimento

7.1 - Potência aparente

$$S_d := \sqrt{3} \cdot V_T \cdot (I_A \angle (\phi + \delta)) = (7.477 \angle 36.87^\circ) \text{ kV} \cdot \text{A}$$

7.2 - Rendimento

$$\eta := \frac{\text{Re}(S_d)}{\text{Re}(S_d) + \rho_t} = 87.785\%$$

7.3 - Cálculo da impedância de carga nominal

$$Z_{carga} := \frac{V_\phi}{I_A \angle -(\phi + \delta)} = (15.623 + 11.717j) \ \Omega$$

7.4 - Indutância de carga nominal

$$L_{load} := \frac{\text{Im}(Z_{carga})}{2 \cdot \pi \cdot f} = 37.298 \text{ mH}$$