



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS ITUMBIARA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDO SOBRE O GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE
APLICADO À ENERGIA EÓLICA

LETICIA LEMES DOS SANTOS

SETEMBRO

2024



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Letícia Lemes dos Santos

Matrícula: 20172040070096

Título do Trabalho: Estudo sobre o Gerador Síncrono de Ímã Permanente aplicado à energia eólica.

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 27 / 11 / 2024.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE GOIÁS**

**ESTUDO SOBRE O GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE
APLICADO À ENERGIA EÓLICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora do trabalho de conclusão de curso Bacharelado de Engenharia Elétrica em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Professor Dr. Victor Régis Bernadeli

**SETEMBRO
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S237 Santos, Leticia Lemes dos
Estudo sobre o gerador síncrono de imã permanente aplicado à
energia eólica. / Letícia Lemes dos Santos. -- Itumbiara, 2024.
76 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) -
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás,
Câmpus Itumbiara, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernadeli.

1. Energia elétrica. 2. Energia eólica. 3. Recursos
energéticos. I. Título. II. Santos, Letícia Lemes dos IV.
Bernadeli, Victor Régis . V. Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.3121

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Marla de Souza Correia CRB-1/3011



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

LETICIA LEMES DOS SANTOS

ESTUDO SOBRE O GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE APLICADO À ENERGIA EÓLICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 26 de Setembro de 2024, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. MSc. Carlos Antunes Queiroz Júnior - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Itumbiara – GO

2024

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcos Antonio Arantes de Freitas, DIRETOR(A) GERAL - CD2 - CP-ITUMBIA**, em 26/09/2024 11:43:51.
- **Carlos Antunes de Queiroz Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 26/09/2024 11:02:01.
- **Victor Regis Bernardeli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 26/09/2024 10:02:45.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 26/09/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 568814

Código de Autenticação: 0d0273cb51



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Avenida Furnas, nº 55, None, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Luiz Mauro dos Santos e Divina D'arc Lemes Almeida, que sob muito sol me fizeram chegar até aqui, por todo apoio e esforço nesta jornada tão importante para nossa família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder saúde, sabedoria e força para conclusão desse trabalho, que representa um capítulo significativo em minha jornada acadêmica, sou extremamente grata a todos, que direta ou indiretamente, contribuíram nessa fase.

Primeiramente, agradeço aos meus pais Luiz Mauro dos Santos e Divina D'arc Lemes Almeida, por todo amor, apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida, em especial no nosso tão sonhado curso superior, vocês são meus maiores exemplos, minha base e força em tudo que conquistei.

Ao meu namorado Heitor Ferreira de Souza, por toda paciência, companheirismo, por sempre acreditar em mim e me dar forças para não desistir. Seu apoio foi fundamental para que eu pudesse concluir essa etapa em minha vida.

Agradeço a toda minha família, por sempre estarem presentes e dispostos a me ajudar, em especial minhas tias Romilda Francisca dos Santos, Recilda Francisca dos Santos e Joana D'arc dos Santos, por fazerem do meu sonho também o delas e o meu tio Marcos Antonio Lemes Almeida, por todo apoio apresentado em um simples “dinheirinho” para o lanche e em diversos momentos em que precisei.

Em especial, agradeço imensamente a minha sogra Carmen Irene Xavier de Souza (*in memorian*), por ter sido um pilar de força e apoio incondicional durante esse período, sua presença, apoio, amizade e ensinamentos foram essenciais.

Gostaria de agradecer todos meus amigos que fizeram parte dessa jornada, com uma palavra, gesto e incentivo, também aproveito para fazer um agradecimento especial a minha amiga e companheira de casa Karem Cristina Guimarães Gomes, pela companhia e por compartilharmos inúmeros momentos juntas, tornando tudo mais leve e alegre.

Por fim, agradeço ao meu orientador Víctor Regis Bernadeli, por toda paciência, ensinamentos, por nortear esse trabalho e todos os conselhos durante a graduação, sua orientação foram essenciais para o meu aprendizado.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise do emprego de Geradores Síncronos de Ímã Permanente (GSIP) em sistemas de geração eólica. Esse tipo de gerador, tem se destacado como uma opção promissora para a conversão mecânica do vento em energia elétrica, devido à sua alta densidade de potência, eficiência e robustez. O estudo busca propor uma análise do GSIP, abordando seu princípio de funcionamento, vantagens e aplicações na geração através da energia eólica. Os objetivos específicos incluem a introdução dos fundamentos de uso de geradores na geração de energia, utilização do ambiente MATLAB/ *Simulink*, para simular o comportamento do sistema em diferentes condições de operação, como variação de velocidade do vento e análise de desempenho. Esses esforços visam aprofundar o entendimento do uso de GSIP e destacar seu grande potencial em aplicações de energia eólica.

Palavras-chave: Energia elétrica, energia eólica, geração, geradores síncronos de ímã permanente.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the use of Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSM) in wind power generation systems. This type of generator has emerged as a promising option for converting mechanical wind energy into electrical energy due to its high power density, efficiency, and robustness. The study aims to propose an analysis of the PMSM, addressing its operating principle, advantages, and applications in wind power generation. Specific objectives include introducing the fundamentals of using generators in power generation, using the MATLAB/Simulink Nenvironment to simulate the system's behavior under different operating conditions, such as wind speed variation, and evaluating the system's performance in terms of efficiency. These efforts aim to deepen the understanding of the use of PMSM and highlight its great potential in wind power applications.

Keywords: Electrical energy, wind energy, generation, permanent magnet synchronous generator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Complexo Eólico Lagoa dos Ventos (AFAPLAN)	26
Figura 2- Complexo Eólico Campo Largo (ENGIE BRASIL)	26
Figura 3- Complexo Eólico Campos Neutrais (iTRACK BRASIL)	27
Figura 4- Evolução das turbinas eólicas (IEA)	28
Figura 5- Classificação dos ventos (MUNDO EDUCAÇÃO)	29
Figura 6- Vista detalhada de um gerador assíncrono de rotor gaiola (FRANCISCO,2010)	38
Figura 7- Gerador assíncrono de rotor bobinado (CHAPMAN, 2013)	39
Figura 8- Rotor de pólos salientes (WEG)	44
Figura 9- Estator de um gerador síncrono (NIEDERLE)	45
Figura 10- Rotor com ímã permanente (CUPERTINO)	46
Figura 11- Esquema geral de simulação <i>MATLAB- Simulink</i>	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais fontes de energia do Brasil (EPE)	20
Tabela 2- Geração de energia eólica por região brasileira	21

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Oferta de energia por fonte no Brasil em 2022 (EPE)	23
Gráfico 2- Comportamento da corrente com carga nominal (AUTOR).....	58
Gráfico 3-Comportamento da tensão com carga nominal (AUTOR)	59
Gráfico 4- Comportamento do torque com carga nominal(AUTOR)	60
Gráfico 5- Comportamento das correntes com 20% de sobrecarga (AUTOR).....	61
Gráfico 6- Comportamento da tensão com 20% de sobrecarga (AUTOR)	62
Gráfico 7- Comportamento do torque com 20% de sobrecarga (AUTOR)	62
Gráfico 8- Comportamento da corrente com 20% de subcarga (AUTOR)	63
Gráfico 9- Comportamento da tensão com 20% de subcarga (AUTOR)	64
Gráfico 10- Comportamento do torque com 20% de subcarga (AUTOR)	64
Gráfico 11- Comportamento da corrente com velocidade 5 m/s (AUTOR)	65
Gráfico 12- Comportamento da corrente com velocidade 10 m/s (AUTOR)	66
Gráfico 13- Comportamento da corrente com velocidade 15 m/s (AUTOR)	66
Gráfico 14- Comportamento da tensão com velocidade 5 m/s(AUTOR)	67
Gráfico 15- Comportamento da tensão com velocidade 10 m/s(AUTOR)	68
Gráfico 16- Comportamento da tensão com velocidade 15 m/s(AUTOR).....	68
Gráfico 17- Comportamento do torque com velocidade 5 m/s.....	69
Gráfico 18- Comportamento do torque com velocidade 10 m/s.	70
Gráfico 19- Comportamento do torque com velocidade 15 m/s.....	70

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica.
A	Amperes.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
CH ₄	Metano.
CO ₂	Dióxido de Carbono.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
GIDA	Geradores de Indução Duplamente Alimentados.
GSIP	Gerador Síncrono de Imã Permanente.
GSR	Global Status Report.
GW	GigaWatts.
GWEC	Global Wind Energy Council-Conselho Global de Energia Eólica.
IEA	Agência Internacional de Energia.
IRENA	Agência Nacional de Energia Renovável.
<i>i_q, i_d</i>	Correntes.
<i>L_q, L_d</i>	Indutâncias.
MW	megaWatts.
m/s	Metros por segundo.
N ₂ O	Óxido nitroso.
Nm	Newton-metro.
<i>p</i>	Números de pólos.
PMSM	Motor Síncrono de Imã Permanente.
<i>R</i>	Resistência dos enrolamentos do estator.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
TWh	TeraWatt-hora.
<i>T_e</i>	Torque eletromagnético.
V	Volts
<i>v_q, v_d</i>	Tensões.
W	Watts.
WEG	Empresa catarinense de máquinas elétricas.
<i>ω_m</i>	Velocidade angular do rotor.
<i>λ</i>	Amplitude do fluxo induzido pelos ímãs permanentes.
<i>θ</i>	Ângulo elétrico.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO.....	17
1.2 ESTADO DA ARTE.....	17
1.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	17
1.2.2 PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL.....	18
1.2.3 ENERGIA EÓLICA.....	24
1.2.4 APLICAÇÃO DOS GERADORES DE ENERGIA EÓLICA.....	29
1.2.5.DIFICULDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS RENOVÁVEIS	29
1.3 OBJETIVOS.....	30
1.4 METODOLOGIA.....	31
2.GERADORES SÍNCRONOS E ASSÍNCRONOS	33
2.1 GERADORES ASSÍNCRONOS.....	33
2.1.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GERADOR ASSÍNCRONO.....	36
2.1.2. GERADORES DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADOS....	39
2.2. GERADORES SÍNCRONOS	40
2.2.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GERADOR SÍNCRONO.....	43
3 GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE.....	45
3.1 FREQUÊNCIA SÍNCRONA	47
3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	48
3.3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E CONSTRUÇÃO.....	50
3.4 GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES PARA USO EM GERAÇÃO EÓLICA.....	50
4. SIMULAÇÃO	52
4.1. O USO DO PMSM NO MATLAB.....	52
4.2 GERADOR PMSM COM CARGA CONECTADA.....	53
4.3 PMSM COMO GERADOR EÓLICO.....	54

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	58
5. CONCLUSÃO.....	72
REFERÊNCIAS.....	73

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é um elemento vital para o desenvolvimento sustentável e a expansão das atividades humanas, uma vez que a disponibilidade de energia é um dos principais motores do crescimento econômico. A eletricidade é fundamental para a infraestrutura básica, abrangendo iluminação, comunicação, aquecimento, refrigeração, as indústrias desde manufatura até agricultura, processos de produção, operação de máquinas e equipamentos. A eletricidade traz qualidade de vida, permitindo o acesso a serviços essenciais, como cuidados de saúde, educação, lazer e também possibilita o uso de eletrodomésticos, economizando tempo e facilitando as atividades domésticas (PASSINI, 2021).

A crescente demanda energética tem impulsionado a busca por fontes alternativas e sustentáveis. No Brasil, esse movimento é particularmente relevante, dado o vasto potencial do país para a geração de energia a partir de fontes renováveis. Nos últimos anos, a energia solar e eólica têm apresentado um crescimento significativo, contribuindo não só para a diversificação da matriz energética, mas também para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis. Essa transição é essencial para atender às necessidades energéticas crescentes de uma economia em desenvolvimento, ao mesmo tempo em que se busca a sustentabilidade ambiental.

As fontes renováveis, como a solar e a eólica, apresentam emissões de gases de efeito estufa muito inferiores às dos combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural. Além disso, elas ajudam a mitigar a poluição do ar e da água, associada à extração e queima de combustíveis fósseis. Esses temas são frequentemente discutidos em acordos internacionais voltados para a preservação ambiental, como o Acordo de Paris, que estabelece metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Os países signatários comprometem-se a adotar medidas para limitar o aquecimento global e promover o uso de energias limpas (PAGEL, UR).

A diversificação da matriz energética com fontes renováveis provoca a redução do uso de combustíveis fósseis importados, minimizando os riscos relativos a interrupções no fornecimento de energia, diminuindo a volatilidade dos preços da energia e impulsionando a autonomia energética dos países. Outrossim, o grande

potencial da geração de empregos, chama atenção ao uso das fontes renováveis, estudos como os realizados pela Agência Nacional de Energia Renovável (IRENA) e pela Agência Internacional de Energia (IEA), destacam a grande possibilidade de ofertas de trabalho no setor.

As fontes renováveis de energia elétrica, podem ser instaladas em locais remotos, onde a infraestrutura de rede é limitada, proporcionando acesso à eletricidade, destaca-se a importância da universalização do acesso à energia. Com a melhoria de técnicas de produção, a energia eólica tem se tornado cada vez mais atrativa (SILVA, 2018). Segundo dados da IRENA, em 2022 a energia eólica é a terceira fonte de energia mais utilizada do mundo, ficando atrás apenas da energia hídrica e energia solar, onde sua capacidade total instalada é de 900 GW, estima-se que deverá haver um crescimento de 15% para os próximos cinco anos. Esse aumento impulsiona inovações tecnológicas, e nos últimos anos houve avanços significativos, nas pás, turbinas e outros componentes do sistema eólico (GWEC, 2023).

A energia proveniente do vento é presente em todo o mundo e se destaca devido ser uma fonte abundante e amplamente disponível na maioria dos lugares, especialmente em áreas costeiras e planícies abertas, onde o vento tem constância e força. Além disso, não produz gases de efeito estufa durante sua operação, o que contribui para a redução da poluição do ar e dos impactos das mudanças climáticas.

As fontes renováveis utilizam recursos naturais abundantes e renováveis, como o sol, o vento e a água, garantindo assim, a preservação dos recursos naturais para as gerações futuras, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e seus impactos, a diminuição da poluição do ar e da água, contribui para a preservação da biodiversidade. Seu uso reduz a pegada de carbono das atividades humanas minimizando o impacto ambiental e promovendo a sustentabilidade. Ao investir em fontes renováveis, investe-se também na saúde do planeta, na segurança energética, geração de empregos e bem estar das futuras gerações (GOLDEMBERG, 2007).

No contexto atual, com o crescimento da energia elétrica, a busca por fontes renováveis e eficientes tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras. As fontes renováveis, como solar, eólica e hídrica, emergem como alternativas promissoras, possibilitando inúmeros benefícios econômicos e ambientais, tornando-se investimentos fundamentais para o desenvolvimento

sustentável. Elas reduzem a dependência de combustíveis fósseis importados, reduzindo a instabilidade dos preços de energia e alavancando a autonomia energética dos países (LOSEKANN, 2018).

O custo de vida útil das fontes renováveis, são significativamente menores do que das fontes tradicionais, como: petróleo, carvão mineral e gás natural, originando economia a longo prazo para as empresas e os consumidores de energia. A criação de empregos é uma peça chave direta e indiretamente relacionada ao setor de energias renováveis, estimulando o crescimento e diversificação da matriz elétrica. Para isso, cada tipo de energia renovável possui características e aplicações específicas, exigindo geradores adequados para sua conversão em energia elétrica.

Os geradores desempenham um papel fundamental na conversão de diversas fontes de energia em eletricidade. Usinas térmicas, hidrelétricas, eólicas e outras dependem deles para otimizar a conversão, garantindo alta eficiência e reduzindo os custos de produção. Sua versatilidade os torna essenciais, mesmo em condições climáticas adversas, garantindo a confiabilidade e a estabilidade do sistema elétrico, fundamentais na transição para um sistema energético mais sustentável.

Na jornada para garantir um funcionamento estável e confiável, os geradores assumem um papel fundamental, convertendo diversas fontes de energia em eletricidade utilizável. Usinas térmicas, hidrelétricas, eólicas e outras fontes, dependem dos geradores, para realizar o processo de conversão otimizada de energia, oferecendo alta eficiência e reduzindo os custos de produção.

A energia eólica se tornou uma das principais fontes de energia renovável no mundo, promovendo a transição energética para um futuro mais limpo e saudável. Em 2023, segundo o Conselho Mundial de Energia Eólica (GWEC) a capacidade instalada de energia eólica, alcançou a capacidade instalada de 892 GW, Foram criadas turbinas eólicas de grande porte, com pás de alta tecnologia e sistemas inteligentes para otimizar a geração de energia. As pás são fabricadas com materiais leves e resistentes, como fibra de carbono e resina epóxi, otimizando a aerodinâmica e a captura de energia do vento. Os rotores têm maior diâmetro e maior número de pás para aumentar a área varrida e potência gerada. Além disso, as torres estão mais altas e flexíveis para posicionar as turbinas em áreas com maior velocidade do vento. Com esse avanço, tornou-se possível a criação de técnicas inovadoras para a geração de energia, impulsionando o uso da energia dos ventos (QUEIROZ, 2021).

Atualmente, é possível fazer a instalação de turbinas eólicas em alto mar, denominada de energia eólica *offshore*, aproveitando ventos mais fortes e constantes. Com o aumento de geração ocasionado pelas novas tecnologias, tornou-se necessário a criação de uma forma de armazenamento, que é realizado principalmente através da integração de baterias, para garantir um fornecimento de energia estável, mitigando a intermitência da energia eólica.

O presente trabalho propõe realizar um estudo do Gerador Síncrono de Ímã Permanente (GSIP), como tecnologia chave na geração de energia eólica, o trabalho será estruturado em cinco capítulos, conforme descritos abaixo.

No primeiro capítulo, será realizado uma revisão bibliográfica, onde serão abordados conceitos de energia eólica, retratando os maiores parques eólicos do Brasil, também mostra-se a respeito do perfil de consumo energético no Brasil, tecnologias da geração eólica e aplicações de geradores. Além disso, apresenta-se as dificuldades enfrentadas na implementação de sistemas renováveis. Por fim, os objetivos e metodologia usados no trabalho são apresentados.

O segundo capítulo se dedica aos conceitos de geradores síncronos e assíncronos, seus aspectos construtivos, tipos de geradores, quais se aplicam ao uso em energia eólica, conectando a teoria à prática ao abordar tópicos relacionados à geração eólica.

No terceiro capítulo, concentramo-nos no detalhamento sobre gerador síncrono de ímã permanente, apresentando a importância da frequência síncrona, modelagem matemática, seu princípio de funcionamento e como é realizado seu uso em energia eólica.

Já no quarto capítulo apresenta-se as simulações computacionais realizadas, com base em todo estudo já apresentado, obtendo assim resultados semelhantes aos casos reais.

Finalmente, o quinto capítulo apresenta as conclusões derivadas da análise abrangente, acompanhadas de recomendações para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área. Ao mergulhar nos princípios fundamentais e nas aplicações avançadas dos geradores assíncronos e síncronos, esta pesquisa visa contribuir para o conhecimento científico e tecnológico, impulsionando o avanço contínuo na geração de energia elétrica.

1.1. MOTIVAÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e escassez de recursos naturais impulsiona a busca por fontes de energia limpas e renováveis. A energia eólica, obtida a partir da força do vento, destaca-se como uma alternativa promissora na diversificação da matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Nesse contexto, os GSIP têm se mostrado particularmente eficientes e confiáveis, tornando-se uma tecnologia chave para a expansão da geração eólica.

A geração de energia eólica não emite gases do efeito estufa, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a instalação de parques eólicos apresenta menores impactos ambientais em comparação com outras fontes de energia, como as hidrelétricas. Ao integrar a energia eólica à matriz energética, promove-se a segurança energética, estimula-se o desenvolvimento regional e gera-se empregos.

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar o desempenho dos GSIP em sistemas eólicos, com o intuito de otimizar sua operação e contribuir para o desenvolvimento de uma matriz energética mais sustentável. Através de simulações dinâmicas, será possível avaliar o comportamento do sistema em diferentes condições de operação. A simulação dinâmica permitirá modelar o comportamento do sistema eólico, considerando fatores como a variação da velocidade do vento, as características do gerador e a carga elétrica.

Os resultados obtidos com este estudo poderão contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias e estratégias de controle para os GSIP, tornando-os ainda mais eficientes e confiáveis.

1.2 ESTADO DA ARTE

1.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desenvolvimento humano, está altamente ligado ao uso da energia elétrica, em suas inúmeras formas, para esse avanço, deve-se garantir que fontes de energia estejam disponíveis em níveis significativos, para garantir a demanda energética. Portanto, faz-se cada vez mais fundamental, novas tecnologias para o avanço da preservação de recursos naturais, transformando o desenvolvimento sustentável.

Nos últimos anos, observando a carência em reduzir a necessidade do uso de combustíveis fósseis, vários países, principalmente da Europa e Estados Unidos, desenvolveram o interesse pela diversificação da matriz energética, fazendo uso de fontes de energia limpas, como a energia eólica. Com seu desenvolvimento, técnicas corretas de produção, redução dos custos de instalação e manutenção, a geração de energia eólica vem se destacando cada vez mais.

Para os sistemas de energia eólica, existe uma ampla variedade de tipos de geração. Cada um desses sistemas apresenta características que os tornam qualificados para suas aplicações. Dentro desse leque de sistemas, será abordado sobre o uso do GSIP, através de estudos realizados sobre: energia eólica, parques eólicos, geradores síncronos de ímã permanente e o uso aplicado à geração de energia.

Para o desenvolvimento deste trabalho, a revisão da literatura é essencial para melhor contextualização do tema em estudo, obtendo uma melhor estruturação, para assim ter uma sustentação teórica ao desenvolvimento da pesquisa. Além disso, apresenta-se diversos marcos técnicos, científicos e históricos, referentes às áreas de estudo que contribuíram para que atingisse os objetivos deste trabalho. A seção 1.2.2 trará informações sobre o perfil de consumo energético, focado nas necessidades da matriz energética, dados de usinas, formando o “estado da arte” da tecnologia de energia eólica, dando ênfase nas técnicas modernas para utilização da energia vinda dos ventos. A seção 1.2.3 irá abordar sobre a história da geração eólica, e seu desenvolvimento. Na seção 1.2.4 será detalhado a aplicação dos geradores eólicos. Por fim, a seção 1.2.5 é destinada às dificuldades na implementação de sistemas renováveis e as considerações finais sobre o capítulo.

1.2.2 PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL

O cenário do consumo energético no Brasil experimentou transformações significativas nos últimos anos, refletindo uma transição notável em direção a fontes mais sustentáveis e inovadoras. A matriz energética do país ainda é dominada por fontes renováveis, com aproximadamente 60% provenientes de hidrelétricas. Contudo, observa-se uma mudança progressiva com a ascensão das energias solar e eólica, impulsionada por investimentos e avanços tecnológicos que tornam essas fontes mais competitivas.

A diversificação da matriz energética não é apenas uma resposta às preocupações ambientais, mas também uma estratégia para garantir a segurança e a estabilidade do fornecimento de energia. O Brasil busca equilibrar a dependência histórica das hidrelétricas com uma abordagem mais abrangente, incorporando tecnologias de armazenamento de energia e sistemas inteligentes para otimizar a utilização das fontes renováveis, lidando com desafios como a intermitência.

No contexto residencial, as mudanças no perfil de consumo energético são evidentes com a crescente adoção de soluções sustentáveis. A instalação de painéis solares em residências tem ganhado popularidade, não apenas como uma alternativa econômica, mas também como um meio de empoderar os consumidores a participarem ativamente na produção de energia e na redução das emissões de carbono. A conscientização sobre a importância da eficiência energética tem levado a uma demanda por tecnologias mais inteligentes e práticas cotidianas mais sustentáveis.

Apesar dos avanços, os desafios persistem, especialmente no que diz respeito à infraestrutura e à regulamentação. O país continua a enfrentar questões relacionadas à modernização da rede elétrica e à adaptação das políticas para incentivar a adoção de tecnologias limpas. A busca por soluções inovadoras e a colaboração entre governo, setor privado e sociedade civil são fundamentais para superar esses obstáculos e impulsionar ainda mais a transição para um perfil de consumo energético mais sustentável no Brasil.

O Brasil está em meio a uma transformação energética notável, abraçando fontes mais limpas e eficientes em resposta às demandas ambientais e à necessidade de um setor energético mais resiliente. O compromisso com a diversificação da matriz e a promoção de práticas sustentáveis indicam um caminho promissor para o futuro energético do país.

A tabela 1, apresenta dados do consumo, as principais fontes utilizadas no Brasil, segundo o EPE.

FONTES	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2.022	SOURCES
GÁS NATURAL	17.407	17.981	17.416	17.189	17.230	18.369	16.459	14.619	16.672	17.077	NATURAL GAS
CARVÃO MINERAL	3.630	3.942	3.855	3.258	3.661	3.796	3.439	3.217	3.630	3.578	COAL
LENHA	16.180	16.670	16.666	15.999	17.058	17.778	17.777	17.723	18.288	18.440	FIREWOOD
BAGAÇO DE CANA	29.479	28.612	28.667	29.791	29.126	27.529	28.314	32.116	28.279	28.018	SUGAR CANE BAGASSE
OUTRAS FONTES PRIMÁRIAS	6.825	7.155	7.613	8.078	8.353	8.864	8.490	9.273	9.879	10.769	OTHER PRIMARY SOURCES
BIODIESEL	2.172	2.526	2.985	2.945	3.313	4.174	4.564	4.974	5.239	4.903	BIODIESEL
GÁS DE COQUERIA	1.387	1.387	1.336	1.320	1.404	1.449	1.321	1.236	1.453	1.357	COKE OVEN GAS
COQUE DE CARVÃO MINERAL	7.807	7.733	7.886	7.110	7.745	7.880	7.228	6.859	7.843	7.372	COAL COKE
ELETRICIDADE	44.982	46.291	45.594	45.311	45.951	46.802	47.479	47.102	49.264	50.403	ELECTRICITY
CARVÃO VEGETAL	4.270	4.294	4.195	3.742	3.883	4.211	4.304	4.348	4.564	4.413	CHARCOAL
ÁLCOOL ETÍLICO	12.566	13.602	15.927	14.332	14.348	16.283	18.064	16.080	15.550	15.814	ETHYL ALCOHOL
ALCATRÃO	210	238	229	226	245	253	230	211	249	235	TAR
SUBTOTAL DERIVADOS DE PETRÓLEO	112.252	114.273	107.851	105.485	106.516	100.082	101.373	96.027	102.890	108.938	OIL PRODUCTS
ÓLEO DIESEL	45.902	46.519	44.427	42.867	42.977	42.459	43.297	42.950	46.300	48.188	DIESEL OIL
ÓLEO COMBUSTÍVEL	4.058	3.976	3.494	3.452	3.121	2.464	2.300	2.385	2.470	2.431	FUEL OIL
GASOLINA	24.451	25.740	23.306	24.225	24.856	21.595	21.485	20.166	22.137	24.227	GASOLINE
GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	8.314	8.363	8.258	8.267	8.304	8.189	8.135	8.357	8.298	8.211	LIQUEFIED PETROLEUM GAS
NAFTA	6.565	6.195	6.802	6.277	7.129	6.217	6.759	4.609	5.550	6.959	NAPHTHA
QUEROSENE	3.623	3.661	3.615	3.310	3.301	3.392	3.320	1.899	2.520	3.134	KEROSENE
GÁS CANALIZADO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	GASWORKS GAS
OUTRAS SECUNDÁRIAS DE PETRÓLEO	11.546	11.724	11.219	10.171	10.521	9.429	9.606	8.792	8.995	8.580	OTHER OIL SECONDARIES
GÁS DE REFINARIA	4.091	4.417	4.339	4.000	4.082	3.778	3.357	3.538	3.261	3.382	REFINERY GAS
COQUE PETRÓLEO	5.658	5.640	5.124	4.515	4.326	4.167	4.233	3.949	4.070	3.734	PETROLEUM COKE

Tabela 1: Principais fontes de energia do Brasil (EPE).

No cenário energético do Brasil, a distribuição percentual das usinas elétricas oferece percepções cruciais sobre a matriz energética do país. Historicamente, a energia hidrelétrica tem desempenhado um papel dominante, representando aproximadamente 60% do total de produção elétrica. Grandes rios, como o Amazonas e o Paraná, são fontes estratégicas para a construção de barragens que alimentam usinas hidrelétricas, contribuindo significativamente para a capacidade instalada.

Além da hidrelétrica, outras fontes de energia renovável têm ganhado espaço no Brasil. A energia eólica, por exemplo, corresponde a cerca de 10% da matriz energética, com parques eólicos em expansão em diversas regiões do país, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o Brasil possui o 4º maior

potencial do mundo, com capacidade estimada para gerar 200 GW. Regiões como Nordeste Nesse cenário, a fonte de energia eólica vem sendo cada vez mais utilizada.

A diversificação da matriz energética é crucial para garantir a segurança do abastecimento e reduzir a dependência de uma única fonte. Além das fontes renováveis, o Brasil ainda conta com usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis, representando uma parcela significativa da matriz, especialmente em momentos de pico de demanda. Essa diversidade proporciona flexibilidade ao sistema elétrico, adaptando-se às variações sazonais e às condições climáticas.

Em um contexto global de transição para fontes mais limpas, os dados sobre a distribuição percentual das usinas elétricas no Brasil refletem o comprometimento do país em incorporar tecnologias mais sustentáveis e mitigar os impactos ambientais associados à geração de eletricidade. Segundo o boletim anual de 2022, da ABEEólica, em termos de representatividade e abastecimento, a geração obtida através da energia eólica foi de 13,52% de toda a geração injetada no Sistema Interligado Nacional (SIN). Na tabela 2, pode-se verificar a geração em TWh, das regiões do Brasil, exceto a região Centro Oeste, que possui um potencial para a geração eólica, porém ainda não é muito explorado.

REGIÃO	GERAÇÃO (TWh)	REPRESENTATIVIDADE
NORDESTE	70,48	90,30%
SUL	5,95	7,60%
NORTE	1,59	2,00%
SUDESTE	0,06	0,10%

Tabela 2: Geração de energia eólica por região brasileira (Autor adaptado do boletim anual ABEEólica).

No Brasil, a utilização de energia eólica tem aumentado significativamente nos últimos anos, refletindo um compromisso crescente com fontes renováveis e sustentáveis de energia. Originária da transformação da energia cinética do vento em eletricidade através de turbinas eólicas, essa tecnologia surgiu de avanços contínuos na engenharia e na ciência de materiais.

A história da geração eólica remonta a séculos atrás, quando as velas eram utilizadas para impulsionar embarcações, em civilizações do Egito, Mesopotâmia e

Creta, nos milenares antes de Cristo. Logo após, expandiram o uso em moinhos de vento que eram empregados para moer grãos, na produção de óleo, serragem de madeira e bombeamento de água em diferentes partes do mundo.

A busca por eficiência e aproveitamento máximo da energia eólica, engendrou no século XVII o desenvolvimento dos moinhos holandeses, com velas móveis que se ajustam conforme a direção do vento. Logo após, no século XVIII, no período da Revolução Industrial, houve a necessidade de um aumento significativo de energia, fazendo com que o carvão mineral e o vapor se tornassem as principais fontes, pois as primeiras turbinas eólicas da época, não tinham a eficiência necessária para atender as demandas. No século XX, aconteceu o chamado Renascimento da Energia Eólica, marcado por inovações, desafios e crescimento (DINIZ NETO, 2014).

Contudo, a verdadeira revolução na geração eólica moderna teve início nas últimas décadas do século XX. Na década de 1970, países como Dinamarca e Estados Unidos começaram a desenvolver turbinas eólicas mais eficientes, capazes de gerar eletricidade em larga escala.

A década de 1980 marcou o início da comercialização da energia eólica, com o estabelecimento dos primeiros parques eólicos conectados à rede elétrica. Apesar de enfrentar desafios tecnológicos e financeiros nessa fase inicial, o aumento do interesse global na busca por fontes renováveis impulsionou pesquisas e investimentos no setor. Ao longo das décadas de 1990 e 2000, a geração eólica ganhou escala global, com a Europa liderando a expansão, seguida pela Ásia, América do Norte e América Latina.

O avanço tecnológico desempenhou um papel crucial na evolução da geração eólica. As turbinas eólicas tornaram-se mais eficientes, maiores e capazes de operar em locais variados, incluindo parques terrestres e offshore. A crescente conscientização sobre as mudanças climáticas e a busca por fontes limpas de energia impulsionam políticas governamentais favoráveis, incentivos fiscais e acordos internacionais, consolidando ainda mais a posição da geração eólica no mix energético global.

Na última década, a geração eólica atingiu marcos impressionantes em termos de capacidade instalada e competitividade econômica, ela vive um momento de expansão significativa, tornando-se uma fonte de energia indispensável para o futuro sustentável do planeta. Segundo o Relatório sobre a Situação Global das Energias

Renováveis (GSR), a capacidade instalada de energia eólica ultrapassou 743 GW em 2023, com um crescimento anual médio de 12,4 % nos últimos dez anos. Tecnologias inovadoras, como turbinas eólicas flutuantes e sistemas de armazenamento de energia, emergem como soluções promissoras para lidar com os desafios associados à intermitência da energia eólica. À medida que a transição para uma matriz energética mais sustentável se intensifica, a geração eólica continua a desempenhar um papel crucial, consolidando-se como uma peça fundamental na transição global para fontes de energia mais limpas e renováveis.

A fonte de energia eólica tem sido amplamente adotada para atender à crescente demanda de energia e encontra-se em um momento de expansão, impulsionada por seu potencial, benefícios e compromisso com a sustentabilidade. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a oferta de energia eólica no Brasil é de 11,8% da matriz energética total, como evidenciado pelos dados apresentados no gráfico 1. O crescimento constante dessa fonte destaca seu papel vital na matriz energética contemporânea.

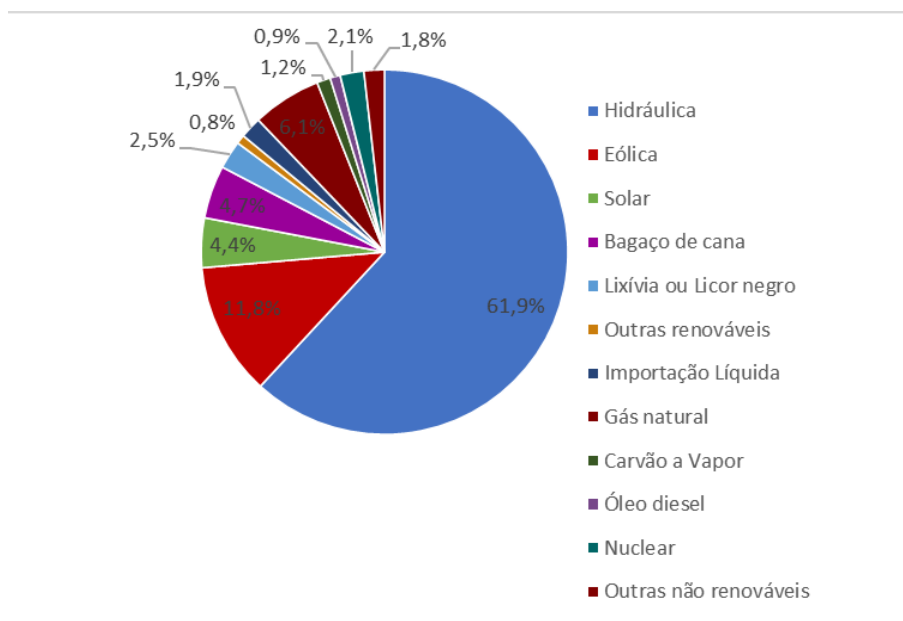


Gráfico 1- Oferta de energia por fonte no Brasil em 2022 (EPE).

Visando aproveitar, o potencial brasileiro, que ocupa o segundo lugar no cenário mundial, com uma capacidade instalada de 51,3 GW, responde por cerca de 61,9% da matriz energética nacional, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Várias usinas hidrelétricas são implementadas e construídas,

porém, tais construções, acarretam em grandes impactos ambientais e sociais, devido ao grande alagamento das áreas ali existentes, sendo preciso remover populações indígenas e ribeirinhas que vivem às margens dos rios, além disso, podem causar danos ao ecossistema e ciclo hidrológico do local. Sendo assim, novas fontes de energia renovável são alternativas buscadas para a melhora desse aspecto.

Diante deste cenário, surge a importância que a energia eólica pode desempenhar na matriz energética brasileira, transformando-se em uma das fontes renováveis que mais cresce na atualidade. Compete a uma fonte com menos impactos, recursos inesgotáveis, graças ao seu alto desempenho, a manutenção é mínima e barata, suas pás e turbinas podem funcionar por longos anos sem necessitar de nenhum ajuste, além de não emitir gases de efeito estufa.

No Brasil, principalmente no Nordeste, há uma grande capacidade para o crescimento da energia eólica, devido às condições climáticas, além disso o sistema pode ser instalado em áreas onde o terreno não seria tão utilizado para outros fins, ocasionando assim em uma melhora econômica nessas zonas menos favorecidas.

1.2.3 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica, uma forma de energia renovável, é gerada pela conversão da energia cinética do vento em energia elétrica, através da rotação dos aerogeradores e conversores estáticos presentes no sistema, como rotor, estator, pás entre outros componentes do sistema. A principal tecnologia responsável por essa conversão é a turbina eólica, composta por pás que capturam a força do vento e a transformam em movimento rotativo. Essas turbinas são estrategicamente instaladas em locais onde os ventos são consistentes e fortes, como colinas, áreas costeiras e regiões elevadas.

Os parques eólicos, compostos por múltiplas turbinas, são a forma mais comum de implementação da energia eólica em larga escala. O Brasil tem investido significativamente nessa tecnologia, com parques eólicos distribuídos por diversas regiões do país, especialmente no Nordeste, onde concentra a maior parte dos parques eólicos do país. Cada turbina eólica converte a energia do vento em eletricidade, gerando uma corrente contínua que é então convertida em corrente alternada por meio de um gerador elétrico. De acordo com a ABEEólica, em 2023, o Brasil registrou uma capacidade instalada de 20,9 GW, distribuída em 678 parques eólicos. Os principais parques do Brasil estão listados abaixo.

O Complexo Eólico Lagoa dos Ventos, considerado o maior parque eólico em atividade na América do Sul, está localizado no Piauí, nos municípios de Lagoa do Barro, com uma capacidade instalada de 716 MW. A figura 1, mostra as instalações do parque.



Figura 1: Complexo Eólico Lagoa dos Ventos (AFAPLAN).

O Complexo Eólico Campo Largo, fica localizado no norte da Bahia, no município de Sento Sé, com uma capacidade instalada de 600 MW. A figura 2, mostra as instalações do parque.



Figura 2: Complexo Eólico Campo Largo (ENGIE Brasil).

O Complexo Eólico Campos Neutrais, fica localizado no Rio Grande do Sul instalado nos municípios de Santa Vitória do Palmar e Chuí, possui capacidade instalada de 580 MW. A figura 3, mostra as instalações do parque.



Figura 3: Complexo Eólico Campos Neutrais (iTRACK BRASIL).

É importante destacar que além dos parques listados, o Brasil possui diversos outros parques eólicos, que contribuem para a geração de energia limpa e renovável.

Uma das vantagens notáveis da energia eólica é a sua sustentabilidade ambiental. Ao contrário das fontes de energia não renováveis, como o carvão e o petróleo, a geração de eletricidade a partir do vento não emite gases de efeito estufa ou poluentes atmosféricos. Além disso, a pegada de carbono associada à produção e instalação de turbinas eólicas é relativamente baixa quando comparada aos impactos ambientais de fontes tradicionais de energia.

As usinas de energia solar, embora ofereçam diversos benefícios no fornecimento de energia limpa e renovável, também geram impactos que carecem ser considerados e mitigados. A sua construção exige a remoção de vegetação nativa, impactando na biodiversidade do local, é de extrema importância minimizar a área desmatada e realizar o reflorestamento, para compensar. Diante disso, a fragmentação de habitats pode afetar a fauna local, exigindo medidas para garantir a integridade das áreas naturais.

Aves e morcegos, podem colidir nas pás das turbinas, especialmente nos momentos de migração, deve-se fazer a sinalização e adequação na velocidade de rotação para minimizar esse impacto. Portanto, as usinas devem ser construídas de

forma responsável, considerando os impactos gerados antes de sua execução (PORCIÚNCULA, 2019).

A expansão da energia eólica também tem proporcionado benefícios socioeconômicos, como a geração de empregos, qualificação profissional, desenvolvimento regional, redução de custos com energia e estabilidade no fornecimento de energia. A construção e operação de parques eólicos geram empregos locais, impulsionam o desenvolvimento das comunidades e contribuem para a diversificação da matriz energética. No entanto, desafios persistem, como a intermitência da geração e a necessidade de sistemas de armazenamento eficientes para lidar com períodos de baixa produção devido à falta de vento (PAULO,S).

Os avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de turbinas eólicas mais eficientes e de menor impacto ambiental. Nos primórdios, eram utilizados moinhos de vento, no Oriente Médio e na Ásia Central, com o intuito da moagem dos grãos, bombeamento de água e outras atividades, devido à sua confiabilidade, no final do século XIX, surgiram os primeiros aerogeradores modernos, criados pelos pesquisadores Friedrich W. Schulze e Thomas Edison, deles surgiram as bases para o desenvolvimento de turbinas eólicas eficientes e potentes.

No século XX, houve um avanço significativo na tecnologia das turbinas eólicas, onde o estudo das propriedades do vento e o *design* das pás foram otimizados para aumentar a eficiência da geração de energia elétrica. Da mesma forma, o uso de materiais mais leves e resistentes, permitiu a construção de turbinas maiores e de boa durabilidade, avanços na eletrônica possibilitaram o controle e otimização das turbinas. A figura 4 mostra a evolução das turbinas eólicas, comparando seus tamanhos e capacidade de potência.

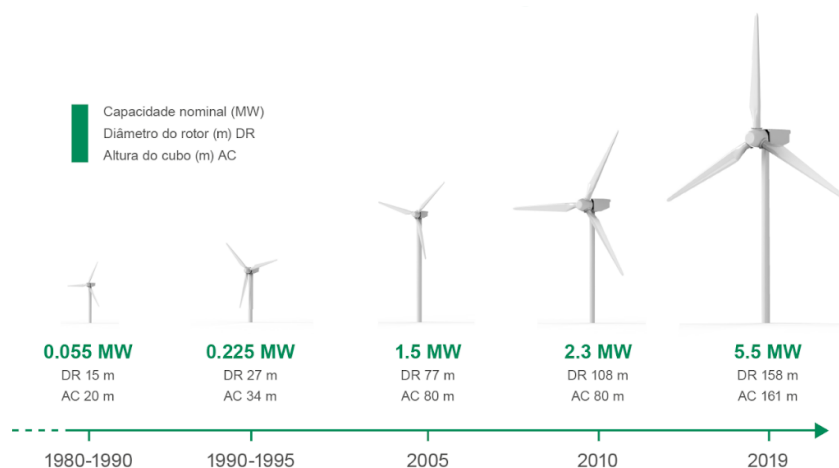


Figura 4- Evolução das turbinas eólicas. (IEA).

Além disso, a integração da energia eólica com outras fontes renováveis e a implementação de sistemas de armazenamento de energia são áreas de pesquisa em crescimento. A energia eólica, assim, desempenha um papel crucial na transição global para um futuro mais sustentável, fornecendo uma fonte de energia limpa, abundante e economicamente viável, obtida através dos ventos.

Os ventos são os "combustíveis" essenciais na geração eólica, motivando um profundo interesse na compreensão de seu comportamento. Conceitualmente, o vento é definido como o ar atmosférico em movimento natural, resultante do aquecimento não homogêneo da atmosfera terrestre e do fluxo de gases em grande escala.

O processo inicia-se com massas de ar mais quentes ascendendo na atmosfera, criando zonas de baixa pressão junto à superfície terrestre. Como resposta, massas de ar frio deslocam-se para essas áreas de baixa pressão, dando origem ao vento por meio de convecção. A rotação da Terra provoca o deslocamento do ar pela força de Coriolis, uma pseudo-força inercial.

A partir desses fenômenos físicos, os ventos são classificados com base em sua localização na superfície terrestre, seguindo o conceito de células de Hadley, conforme ilustrado na Figura 5. Essa classificação resulta em três conjuntos principais de ventos constantes:

- Ventos alísios e contra alísios, ocorrendo entre -30° e 30° de latitude;
- Ventos do oeste, presentes entre 30° e 60° ou -30° e -60° de latitude;
- Ventos polares de leste, localizados acima de 60° ou -60° de latitude.

No contexto da geração eólica, dois fatores cruciais em relação ao vento são a sua velocidade e qualidade. A qualidade do vento está associada ao menor nível de turbulência, sendo esta influenciada pela rugosidade do terreno na superfície. Essa compreensão detalhada do comportamento dos ventos é essencial para otimizar a eficiência e a sustentabilidade da geração de energia eólica.

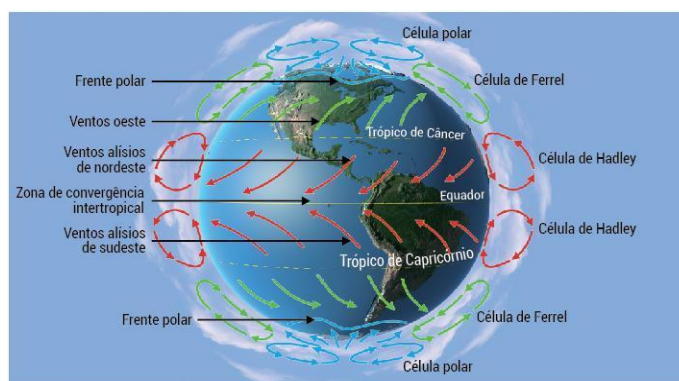


Figura 5: Classificação dos ventos (MUNDO EDUCAÇÃO).

1.2.4 APLICAÇÃO DE GERADORES DE ENERGIA EÓLICA

Os geradores de energia eólica encontram aplicação em diversos contextos, desempenhando um papel fundamental na diversificação da matriz energética. Uma das formas mais proeminentes de aplicação é nos parques eólicos, que consistem em agrupamentos estratégicos de turbinas eólicas. Esses parques são geralmente instalados em áreas com ventos consistentes e fortes, seja em regiões costeiras ou em áreas elevadas, maximizando a eficiência na captura da energia do vento.

Além dos parques eólicos em larga escala, os geradores de energia eólica também são implementados em sistemas descentralizados. Turbinas eólicas de menor porte, adequadas para instalação em áreas urbanas e rurais, têm sido adotadas em residências, empresas e comunidades isoladas. Esses sistemas, muitas vezes denominados microgeração e minigeração distribuída, proporcionam uma fonte de energia local, reduzindo a dependência da rede elétrica convencional.

Outra aplicação inovadora dos geradores de energia eólica é a instalação de turbinas offshore, ou seja, em alto-mar. Esses parques eólicos marinhos aproveitam os ventos mais intensos e consistentes encontrados em ambientes oceânicos, permitindo uma geração mais eficiente de eletricidade. A instalação offshore também aborda preocupações relacionadas à ocupação de terras e minimizar possíveis impactos ambientais em comparação com parques terrestres.

Os geradores de energia eólica têm aplicações versáteis que vão desde parques terrestres até instalações *offshore*, atendendo às demandas de diferentes contextos geográficos e energéticos. Essa diversidade de aplicações contribui para a adoção crescente da energia eólica como uma peça-chave na transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

1.2.5 DIFICULDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS RENOVÁVEIS

A implementação de sistemas renováveis, embora crucial para enfrentar os desafios ambientais, enfrenta diversas dificuldades que podem impactar seu desenvolvimento efetivo. Em primeiro lugar, o custo inicial elevado associado à instalação de infraestruturas renováveis é um desafio significativo, embora os custos tenham diminuído significativamente ao longo dos anos, o investimento inicial ainda

pode ser um obstáculo para muitos governos, empresas e consumidores. Além disso, a intermitência das fontes renováveis, como a solar e a eólica, exige o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento eficientes para garantir um fornecimento estável e contínuo. Outro desafio, é a necessidade de adaptar a infraestrutura elétrica existente para integrar as fontes renováveis de forma eficiente. Ademais, a falta de políticas claras e consistentes, a resistência de algumas indústrias estabelecidas e a falta de conscientização pública também dificultam a transição para um modelo mais energético e sustentável.

Superar essas dificuldades exigirá um esforço conjunto entre governos, setor privado e sociedade civil. Investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento são cruciais para aprimorar as tecnologias de armazenamento, aumentar a eficiência dos sistemas renováveis e reduzir custos. A criação de redes inteligentes permitirá uma melhor gestão da energia, integrando as fontes renováveis de forma mais eficiente. Políticas públicas que incentivem a geração distribuída, a eficiência energética e o uso de fontes renováveis também são fundamentais para acelerar a transição.

Em suma, a transição para um sistema energético mais sustentável é um processo complexo e desafiador, mas os benefícios a longo prazo são inegáveis. Ao superar os obstáculos existentes e investir em soluções inovadoras, podemos construir um futuro energético mais limpo, seguro e resiliente. A energia renovável representa uma oportunidade única para promover o desenvolvimento sustentável e combater as mudanças climáticas.

1.3 OBJETIVOS

Investigar e analisar os aspectos construtivos, princípios de funcionamento, modelagem matemática, controle, aplicações e desafios tecnológicos dos geradores assíncronos e síncronos, com ênfase nos geradores síncronos de ímãs permanentes, visando contribuir para o entendimento aprofundado dessas tecnologias na geração de energia elétrica. Os objetivos específicos consistem em:

1. Estudo de fontes renováveis de energia, com foco em energia eólica, sua história, aplicações e tecnologias.

2. Analisar os geradores síncronos e assíncronos abordando a estrutura construtiva, aplicações, funcionamento e, além de explorar tipos específicos como os geradores síncronos de ímã permanente.
3. Investigar o gerador síncrono de ímãs permanentes para uso em geração eólica, compreendendo as características da energia eólica e a aplicação.
4. Examinar os desafios associados aos geradores síncronos permanentes, em diferentes cenários.
5. Elaborar conclusões abrangentes, destacando as principais percepções obtidas por meio da pesquisa e análise dos geradores assíncronos e síncronos, identificando tendências futuras e áreas para desenvolvimentos adicionais.
6. Propor para as futuras pesquisas e avanços tecnológicos na área de geração de energia elétrica, considerando as lacunas identificadas durante o estudo.

Ao alcançar esses objetivos, o trabalho busca contribuir para a compreensão aprofundada das tecnologias de geração elétrica por meio dos geradores assíncronos e síncronos, promovendo conhecimento científico e tecnológico na busca por fontes eficientes e sustentáveis de energia.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia empregada no estudo da energia eólica abrangeu diversas etapas interligadas, desde a coleta e análise de dados até a modelagem e simulação de cenários. O ponto de partida consistiu em uma revisão bibliográfica sobre os geradores síncronos de ímã permanente, seus principais componentes, suas vantagens e desvantagens em comparação a outros tipos de geradores, os princípios para sua operação, características, aplicações de conversão de energia elétrica, turbinas eólicas e seus desafios e oportunidades que o uso dessa tecnologia proporciona.

Foram compilados diversos dados eólicos, que são de extrema relevância para o estudo, como características do vento, evolução das turbinas eólicas, provenientes de diferentes fontes confiáveis, como a ANEEL, IRENA e diversos sites especializados em energia eólica. A qualidade e a representatividade espacial e temporal dos dados foram criteriosamente avaliadas para garantir a confiabilidade dos resultados.

A etapa central do estudo, consiste na utilização de um modelo computacional no Matlab, que é um software que oferece a possibilidade de modelar e simular sistemas dinâmicos, como o Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM), que foi utilizado para simular o comportamento do GSIP, aplicado às turbinas eólicas, em diferentes condições de vento. Essa etapa possibilitou a estimativa da geração de energia eólica.

A integração dos resultados obtidos nas diferentes etapas da pesquisa permitiu a elaboração de um estudo abrangente sobre a energia eólica, com ênfase na eficiência e desempenho. Os resultados discutidos na análise, destacam as principais conclusões sobre o estudo, possibilitando direcionar pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

2. GERADORES SÍNCRONOS E ASSÍNCRONOS

Geradores síncronos e assíncronos são equipamentos fundamentais na conversão de energia mecânica em energia elétrica, possibilitando o funcionamento de diversos sistemas, sendo de pequenas instalações até grandes sistemas de potência. A principal distinção entre esses dois tipos de geradores se dá no sincronismo entre a rotação do rotor e a frequência da tensão gerada.

Geradores síncronos operam com rotação perfeitamente sincronizada com a frequência da rede elétrica, o que os torna ideais para aplicações que demandam alta qualidade de energia e precisão na frequência, como em grandes usinas geradoras e sistemas de transmissão. Essa característica os torna equipamentos robustos e confiáveis, capazes de manter a estabilidade da rede elétrica.

Por outro lado, os assíncronos apresentam uma pequena diferença entre a velocidade de rotação do rotor e a velocidade síncrona do campo magnético. Essa característica, conhecida como escorregamento, confere aos geradores assíncronos uma construção mais simples e robusta, tornando-os adequados para diversas aplicações, incluindo sistemas de menor porte e em ambientes com variação de carga.

A escolha entre um gerador síncrono ou assíncrono depende de diversos fatores, como: a aplicação específica, as características da carga, a qualidade da energia requerida e as condições de operação. Nos próximos tópicos, aprofundaremos a análise dos geradores assíncronos, explorando seu princípio de funcionamento, construção, características e aplicações. Veremos como o escorregamento influencia o desempenho desses geradores e como eles podem ser utilizados em diferentes sistemas elétricos.

2.1 GERADORES ASSÍNCRONOS

Geradores assíncronos, também conhecidos como geradores de indução, são dispositivos utilizados na geração de eletricidade que opera com base nos princípios de indução eletromagnética, se destaca como um dos principais conversores de energia mecânica em energia elétrica. Diferentemente dos geradores síncronos, que

operam com uma rotação sincronizada com a frequência da rede, os geradores assíncronos apresentam um escorregamento, ou seja, uma pequena diferença entre a velocidade do rotor e a velocidade do campo magnético girante. Essa característica confere aos geradores assíncronos uma construção mais simples e robusta, tornando-os adequados para diversas aplicações.(CHAPMAN, 2013). A seguir, exploraremos como o campo magnético girante gerado no estator induz correntes no rotor, gerando um torque eletromagnético que faz o rotor girar. Essa rotação, combinada com o escorregamento, resulta na geração de energia elétrica.

O funcionamento básico de um gerador assíncrono envolve um rotor que gira dentro de um estator. Ao conectar o gerador à rede elétrica, um campo magnético girante surge no estator, induzindo uma corrente elétrica no rotor e a diferença entre as velocidades de rotação do campo magnético do estator e rotor que é conhecida como escorregamento, determina a magnitude da corrente induzida no rotor e consequentemente a potência gerada. Esse tipo de gerador é frequentemente utilizado em locais remotos ou em aplicações industriais, onde a precisão da sincronização não é uma exigência crucial, como: geração de energia em usinas hidrelétricas, biomassa, eólicas, sistemas de geração distribuída e em locomotivas elétricas (SIMÕES; FARRET, 2014). Desde as pioneiras invenções, esses geradores evoluíram e se tornaram uma peça fundamental no sistema energético.

A história dos geradores assíncronos teve início com a genialidade de Nikola Tesla em 1880. Suas pioneiras pesquisas em desenvolvimento e aplicação de motores, geradores de indução, revolucionaram a indústria elétrica e os tornaram uma figura indispensável no ramo de geração e distribuição de energia. A invenção de Tesla abriu caminho para uma infinidade de aplicações. Hoje, os geradores assíncronos são encontrados em diversas indústrias, como a automotiva, a siderúrgica e a petroquímica. Sua versatilidade e eficiência os tornam equipamentos indispensáveis para um mundo cada vez mais eletrificado.

Os geradores assíncronos destacam-se por sua robustez e simplicidade construtiva. Com um número mínimo de peças móveis, são menos propensos a falhas, o que resulta em menores custos de manutenção ao longo de sua vida útil. Além disso, esses geradores demonstram alta eficiência e estabilidade operacional, mesmo em condições de carga variável. Sua capacidade de limitar correntes de curto-circuito os torna seguros e confiáveis, garantindo a continuidade do fornecimento de energia em diversas aplicações (MAGALHAES, et al, 2017).

No setor de geração de energia, os geradores assíncronos são amplamente utilizados em usinas hidrelétricas, eólicas e de biomassa. Sua robustez e simplicidade os tornam ideais para locais remotos e sistemas isolados. A capacidade de se adaptar a fontes de energia renováveis, que geralmente apresentam variações na geração, é um dos principais motivos para sua popularidade nesse setor.

Além da geração de energia, os geradores assíncronos também desempenham um papel fundamental no acionamento de motores em diversas indústrias e aplicações comerciais. Por exemplo, em sistemas de ventilação, os geradores assíncronos garantem a circulação de ar fresco em ambientes fechados, proporcionando conforto térmico. Sua confiabilidade os torna essenciais em locais como hospitais e data centers, onde a interrupção do fornecimento de energia pode ter consequências graves.

Em resumo, os geradores assíncronos são equipamentos versáteis e confiáveis, com um amplo espectro de aplicações. Suas vantagens em termos de custo, eficiência e robustez os tornam uma escolha popular em diversos setores. No entanto, é importante ressaltar que, apesar dessas vantagens, os geradores assíncronos apresentam algumas limitações que podem influenciar sua escolha em determinadas aplicações.

Embora os geradores assíncronos apresentem diversas vantagens, como robustez e eficiência, também possuem algumas limitações. Uma delas é o baixo fator de potência, o que exige a compensação de energia reativa, aumentando os custos operacionais. Além disso, em algumas aplicações específicas, sua eficiência pode ser inferior à de geradores síncronos, especialmente em regimes de carga variável.

Com sua construção robusta, operação confiável e versatilidade, o gerador assíncrono desempenha um papel fundamental na conversão de energia e recebe contínuos aprimoramentos, está percorrendo um caminho para desempenhar um papel fundamental na transição para um futuro energético ainda mais sustentável, promovendo mais flexibilidade de rede, eletromobilidade e aumento da eficiência.

2.1.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GERADOR ASSÍNCRONO

Segundo Chapman (2013), um gerador assíncrono é basicamente dividido em duas partes principais, o estator e o rotor. O estator que é a parte fixa do gerador com enrolamentos simetricamente enrolados que, quando alimentados por uma tensão alternada, geram um campo magnético girante. Esse campo magnético induz correntes elétricas no rotor, que pode ser de dois tipos, bobinado ou em gaiola de esquilo. O rotor, por sua vez, imerso no campo magnético girante do estator gira e gera força eletromotriz induzida, convertendo energia mecânica em energia elétrica.

Os geradores assíncronos possuem na base do estator, uma estrutura robusta em aço que protege e oferece sustentação aos componentes internos do estator, garantindo resistência mecânica e durabilidade. O seu núcleo é laminado de Ferro Silício, formado por finas chapas isoladas entre si, minimizando perdas por correntes parasitas, otimizando a eficiência magnética do gerador. Suas bobinas são compostas por fios de cobre enroladas com precisão sobre o núcleo, tem como função gerar o campo magnético girante quando energizadas, induzindo assim a corrente elétrica no rotor, além desse componentes, o estator também possui um material isolante de alta qualidade, que envolve as bobinas, protegendo-as contra curto-circuitos garantindo segurança em sua operação. A segunda parte do gerador é composta pelo rotor, que pode ser bobinado ou gaiola, cada um com suas características e vantagens, que influenciam diretamente no seu desempenho e aplicações.

O rotor gaiola é composto por barras de alumínio ou cobre, interligadas por anéis nas extremidades, formando uma estrutura similar a uma gaiola. Seu funcionamento se dá pelo campo magnético rotativo do estator, que induz correntes elétricas nas barras. Essas correntes, por sua vez, geram um campo magnético no próprio rotor, que busca se alinhar com o campo magnético do estator e o escorregamento determina a magnitude da corrente induzida no rotor e consequentemente a potência gerada. Na figura 6, evidencia-se a estrutura de uma máquina assíncrona de rotor gaiola, com suas respectivas partes.

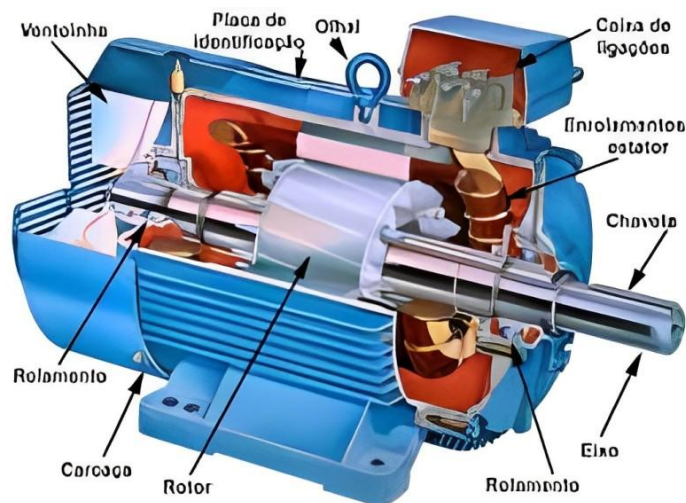


Figura 6 – Vista detalhada de um gerador assíncrono de rotor gaiola (FRANCISCO, 2010).

Os geradores assíncronos de rotor bobinado, são um tipo de gerador de indução que apresenta um rotor com enrolamentos de fio ao invés do rotor de gaiola de esquila típico dos geradores assíncronos tradicionais. Esses enrolamentos do rotor podem ser conectados a resistores externos, permitindo o controle de velocidade e torque do gerador (MAGALHÃES, 2019).

O rotor bobinado possui bobinas de fio de cobre enroladas em ranhuras ao longo do núcleo laminado, elas são conectadas aos terminais externos através de anéis coletores. Seu funcionamento é similar ao rotor gaiola, onde o campo magnético girante do estator induz correntes elétricas nas bobinas do rotor. Essas correntes, geram um campo magnético próprio no rotor. No entanto, nesse tipo de rotor, as bobinas podem ser conectadas em diferentes configurações, através de anéis coletores, permitindo um controle mais preciso da corrente e do campo magnético do rotor. A invenção do rotor bobinado, representou um salto significativo na tecnologia dos geradores elétricos.

O primeiro gerador assíncrono de rotor bobinado, foi elaborado no século XIX, no cenário do surgimento da eletricidade industrial. Essa invenção, com sua capacidade de controlar de forma precisa a energia elétrica, foi um divisor de águas para a indústria. A partir desse momento, a eletrificação de processos industriais ganhou um novo impulso, abrindo caminho para a automatização e a mecanização em larga escala.

A figura 7 mostrada abaixo, apresenta um gerador assíncrono de rotor bobinado.

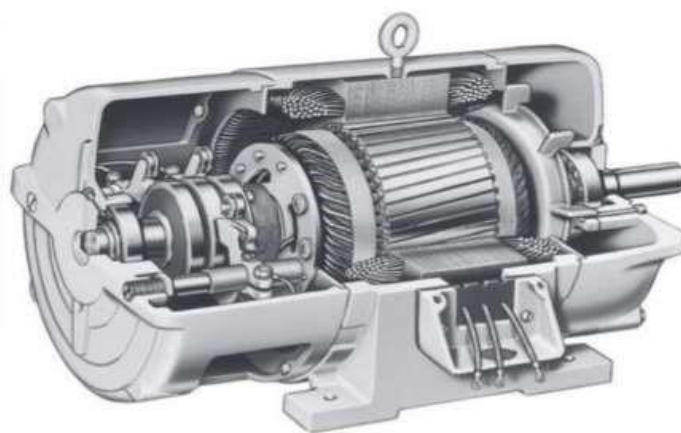


Figura 7 – Gerador assíncrono de rotor bobinado (CHAPMAN, 2013).

Os geradores de rotor bobinado permitem um controle de velocidade preciso porque a resistência dos enrolamentos do rotor pode ser ajustada. Ao alterar a resistência, você pode alterar a velocidade do gerador. A utilização de resistores no rotor possibilita a partida suave do gerador. Ao reduzir progressivamente a resistência durante a inicialização, os picos de corrente podem ser limitados e os picos de corrente evitados. O controle de resistência do rotor também controla o torque produzido pelo gerador. Isso é útil para aplicações de torque variável, como guindastes ou máquinas-ferramenta (JORDÃO, 2013).

Entre as diversas tecnologias disponíveis, os geradores de rotor bobinado se destacam por sua versatilidade e capacidade de adaptação. Através do controle preciso da resistência dos enrolamentos do rotor, esses geradores oferecem uma série de vantagens em relação aos geradores de rotor em gaiola de esquilo, tornando-os indispensáveis em diversas aplicações.

A possibilidade de ajustar a resistência do rotor confere ao gerador de rotor bobinado um controle preciso da velocidade e do torque. Essa característica o torna ideal para aplicações que exigem variações de carga, como guindastes, elevadores e máquinas-ferramenta. Além disso, a partida suave possibilitada pela redução gradual da resistência durante a inicialização protege o equipamento e prolonga sua vida útil (JORDÃO, 2013).

Embora ofereçam um controle mais preciso, os geradores de rotor bobinado apresentam algumas particularidades. A presença de resistências no rotor, embora essencial para o controle, acarreta perdas adicionais, impactando levemente a eficiência do sistema quando comparados aos geradores de rotor em gaiola de esquilo. No entanto, a flexibilidade e o controle oferecido pelos geradores de rotor

bobinado compensam essa desvantagem, tornando-os a escolha ideal para aplicações que exigem um alto nível de customização.

Os geradores de rotor bobinado encontram ampla aplicação em diversos setores industriais. Em sistemas de energia renovável, como parques eólicos e sistemas solares fotovoltaicos, eles são utilizados em conjunto com conversores de frequência, otimizando a geração de energia e a integração à rede. Em sistemas de energia renovável, como parques eólicos e sistemas solares fotovoltaicos, eles são usados em conjunto com conversores de frequência, ajustando assim a velocidade de rotação das turbinas eólicas e painéis solares, otimizando a eficiência do sistema e permitindo melhor assimilação à rede.

2.1.2 GERADORES DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADOS

Os geradores de indução duplamente alimentados (GIDA), também conhecidos como geradores de dupla alimentação ou geradores de indução de dupla alimentação, são uma variante dos geradores assíncronos comuns. Eles possuem dois enrolamentos no estator, um conectado à rede elétrica principal e outro alimentado geralmente por um conversor eletrônico de frequência (CHAPALLAZ, 1992).

Os geradores de dupla alimentação permitem um controle mais preciso da velocidade e da potência, em comparação com os geradores de indução convencionais (CHAPALLAZ., 1992). Essa característica faz com que eles sejam essenciais em aplicações como energia eólica e sistemas de tração elétrica.

Essa flexibilidade é obtida através do uso de um conversor de frequência conectado ao segundo enrolamento do estator, que permite ajustar a velocidade de rotação do gerador e otimizar seu desempenho em diferentes condições de operação. Além disso, a utilização de um conversor de frequência reduz o tamanho e a complexidade do sistema, tornando-os mais compactos e econômicos. Essa característica, aliada à sua capacidade de resposta rápida, os torna ideais para aplicações que exigem um controle dinâmico.

Em comparação com os geradores de indução convencionais, os GIDAs oferecem uma série de vantagens, como maior eficiência em cargas parciais, melhor resposta transitória e maior flexibilidade de controle. O controle preciso da velocidade e da potência, proporcionado pelos GIDAs, permite otimizar a captura de energia garantindo maior eficiência e produtividade, sendo utilizados em aplicações

que exigem um controle avançado de velocidade, torque e eficiência energética, como sistemas de geração distribuída (CHAPMAN, 2013).

Os GIDAs se destacam em aplicações que exigem controle preciso de velocidade e torque, como é o caso das turbinas eólicas. A capacidade de ajustar sua velocidade de rotação em resposta às variações do vento permite otimizar a captura de energia eólica, garantindo uma geração mais eficiente e estável. Essa flexibilidade é crucial para maximizar a produção de energia em parques eólicos, onde as condições climáticas são variáveis (UMANS, 2014). A seguir, exploraremos em detalhes como são empregados em parques eólicos e quais os benefícios que proporcionam para esse setor.

Os GIDAs demonstram sua versatilidade em diversas aplicações. Em parques eólicos, por exemplo, sua capacidade de ajustar a velocidade de rotação das pás em resposta às variações do vento otimiza a captura de energia, garantindo maior eficiência. Essa mesma flexibilidade os torna ideais para sistemas de geração distribuída, onde a integração de múltiplas fontes de energia exige um controle preciso e rápido. Além disso, em regiões remotas ou ilhas, eles proporcionam uma solução confiável e eficiente para a geração de energia renovável, graças à sua capacidade de operar de forma isolada. Em ambientes marítimos, demonstram robustez, adaptando-se às condições adversas e garantindo a estabilidade da geração eólica offshore. Por fim, em sistemas híbridos, a capacidade dos GIDAs de se integrar com outras fontes de energia, como solar e armazenamento de energia, permite uma gestão otimizada da energia, maximizando a eficiência do sistema (CHAPMAN, 2013).

2.2. GERADORES SÍNCRONOS

De acordo com Chapman (2013) geradores síncronos são máquinas síncronas colocadas para converter energia mecânica em energia elétrica, de forma síncrona com a frequência da rede elétrica em que estão conectados, o que é de extrema importância para a estabilidade de qualidade e fornecimento, o que os tornam diferenciais, em meio a outros geradores, com um papel fundamental na geração de energia elétrica.

Essa sincronização é possível graças à sua construção específica. Os geradores síncronos são compostos por um rotor giratório e um estator estacionário,

onde estão localizados os enrolamentos de campo e armadura. No momento em que o rotor é acionado por uma fonte de energia mecânica, é gerado um campo magnético girante dentro do gerador. O campo magnético produzido induz uma corrente elétrica nos enrolamentos do estator, fazendo assim a geração de energia elétrica sincronizada com frequência da rede elétrica. A sincronia entre o gerador e a rede elétrica é crucial para garantir a qualidade da energia fornecida.

Essa característica os torna ideais para aplicações que exigem alta estabilidade e precisão na frequência, como em sistemas de grande porte e em redes interconectadas. Além disso, a capacidade de controlar a potência reativa dos geradores síncronos os torna ferramentas valiosas para regular a tensão da rede e melhorar a sua estabilidade. Devido a esses atributos, os geradores síncronos são amplamente utilizados em diversas aplicações, como usinas termoeletricas, hidrelétricas, eólicas, além de serem encontrados em locomotivas elétricas, navios e sistemas de geração distribuída. A invenção dos geradores síncronos revolucionou a forma como produzimos e distribuímos energia elétrica. Os primeiros modelos, embora rudimentares em comparação com os atuais, já demonstravam o potencial dessa tecnologia.

O primeiro gerador síncrono foi criado por Hippolyte Pixii, em 1832. A sua construção foi baseada em um projeto de Michael Faraday, onde havia um ímã permanente rotativo, que girava perto de um conjunto de bobinas fixas. No momento em que o ímã girava, era induzida uma corrente alternada nas bobinas, iniciando assim a geração de energia elétrica. O seu desenvolvimento se dá pela evolução da geração de energia elétrica, com o advento da energia elétrica no final do século XIX, eles se tornaram uma tecnologia de extrema importância ao fornecimento de energia de forma eficiente. A invenção de Pixii representou um passo fundamental para o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas e eficientes, como os modernos geradores síncronos que conhecemos hoje. Com o avanço da tecnologia e a crescente demanda por energia elétrica, os geradores síncronos evoluíram significativamente, tornando-se equipamentos essenciais para o fornecimento de energia em larga escala. Suas características e vantagens os tornaram a escolha preferencial para diversas aplicações

Os geradores síncronos apresentam diversas vantagens que os tornam equipamentos indispensáveis nos sistemas de geração de energia elétrica. Sua alta eficiência na conversão de energia mecânica em energia elétrica, aliada à

confiabilidade e durabilidade, resulta em perdas mínimas e menor custo operacional. Além disso, o controle preciso da potência gerada e a capacidade de fornecer potência reativa à rede elétrica contribuem significativamente para a estabilidade e qualidade do sistema. Essas características, combinadas com a capacidade de operar em paralelo com outros geradores, tornam os geradores síncronos a escolha preferencial para grandes usinas de geração. No entanto, como toda tecnologia, os geradores síncronos também apresentam algumas limitações, como a necessidade de sistemas de excitação e a complexidade construtiva

A implementação e operação de geradores síncronos, apesar de suas inúmeras vantagens, apresentam alguns desafios. A complexidade de seus sistemas de controle e excitação exige um cuidado especial na manutenção e operação, visando garantir a estabilidade e a qualidade da energia gerada. Além disso, a necessidade de um sistema de excitação separado pode aumentar os custos operacionais e a complexidade do equipamento. Embora ofereçam alta potência e eficiência em grandes aplicações, os geradores síncronos podem apresentar limitações em termos de densidade de potência, especialmente em equipamentos de menor porte. A escolha do tipo de gerador ideal depende de uma análise cuidadosa das características da aplicação, levando em consideração fatores como potência requerida, espaço disponível, custo e eficiência.

A densidade de potência dos geradores síncronos têm experimentado um crescimento significativo impulsionado por avanços em diversos campos. O desenvolvimento de materiais magnéticos de alta permeabilidade, como ligas metálicas e ímãs de terras raras, tem permitido a construção de máquinas mais compactas e eficientes. Paralelamente, a evolução da eletrônica de potência e dos sistemas de controle tem possibilitado a implementação de estratégias de controle mais sofisticadas, capazes de otimizar o desempenho dos geradores em condições operacionais variáveis. Novos designs de máquinas, com rotores e estatores otimizados, têm contribuído para reduzir as perdas e aumentar a densidade de potência. Essa combinação de avanços tecnológicos têm expandido as aplicações dos geradores síncronos, tornando-os cada vez mais competitivos em relação a outras tecnologias de geração, como os geradores de indução e os geradores de ímãs permanentes. A contínua pesquisa e desenvolvimento nessa área visam superar os desafios existentes e promover a criação de geradores síncronos ainda mais

eficientes, compactos e confiáveis, capazes de atender às demandas crescentes por energia elétrica em um mundo cada vez mais eletrificado.

2.2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GERADOR SÍNCRONO

Segundo Chapman (2013), os enrolamentos de campo ou enrolamentos do rotor são os responsáveis por produzir o campo magnético principal do gerador. Os enrolamentos do rotor, como mencionado anteriormente, são responsáveis por criar o campo magnético principal. Para otimizar a distribuição desse campo, os rotores de muitos geradores são construídos com pólos salientes. Nesses rotores, os enrolamentos de excitação estão alojados em polos de sapata, que são projeções radiais que se estendem do rotor.

A imagem de um gerador elétrico figura 8, revela claramente essas saliências, denominadas sapatas polares. A disposição estratégica dessas sapatas ao longo do estator é fundamental para a criação de um campo magnético uniforme e concentrado, maximizando a eficiência da conversão de energia mecânica em energia elétrica, conforme descrito por Boldea (2020). A escolha do material e do design das sapatas polares influencia diretamente o desempenho do gerador, impactando fatores como a força eletromotriz induzida, as perdas no ferro e a reatância síncrona.



Figura 8 – Rotor de pólos salientes (WEG, 2008).

O rotor de um gerador de pólos salientes é constituído por folhas laminadas de material magnético formando pólos magnéticos e enrolamentos aos quais é

aplicada uma corrente contínua. A utilização de laminações magnéticas ajuda a reduzir significativamente as perdas por correntes parasitas, induzidas pelos campos magnéticos variáveis (CHAPMAN, 2013). Máquinas com maior número de polos, como as utilizadas em hidrelétricas, operam em baixas rotações devido à característica mecânica das turbinas hidráulicas (CHAPALLAZ, 1992).

O excitador brushless, por possuir um circuito de excitação no estator e um circuito de armadura no rotor, permite um controle mais preciso do fluxo magnético, reduzindo o fluxo parasita e melhorando a eficiência do gerador. Além disso, o excitador brushless contribui para reduzir o conteúdo harmônico presente na tensão gerada.

Além dos componentes do rotor, a estrutura do estator também desempenha um papel fundamental no funcionamento do gerador síncrono. A estrutura do estator, composta por chapas de aço laminadas e empilhadas, proporciona a base mecânica para o gerador. As ranhuras no estator abrigam os enrolamentos trifásicos, nos quais é induzida a tensão alternada. A figura 9 ilustra essa estrutura.



Figura 9– Estator de um gerador síncrono (NIEDERLE, 2018).

Uma característica importante dos geradores síncronos é a presença de um único enrolamento de campo de menor potência no rotor e enrolamentos multifásicos de maior potência no estator. Essa configuração permite uma eficiente conversão de energia mecânica em energia elétrica. (UMANS, 2014).

CAPÍTULO 3

3. GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃ PERMANENTE

Um gerador síncrono de ímã permanente (GSIP) é um tipo de gerador elétrico que utiliza ímãs permanentes em seu rotor para criar um campo magnético. Diferentemente dos geradores síncronos tradicionais, que necessitam de uma fonte de excitação externa para gerar um campo magnético, os GSIP eliminam essa necessidade, simplificando sua construção e operação. Essa característica, aliada à velocidade síncrona de operação, garante a geração de energia em uma frequência estável, tornando os GSIP uma opção atrativa para diversas aplicações. (SANKARAN, 2017).

A Figura 10 ilustra a disposição dos ímãs permanentes no rotor de um gerador síncrono de ímã permanente, evidenciando a simplicidade e a eficiência desse tipo de construção.



Figura 10– Rotor com Ímã Permanente (CUPERTINO, 2021).

Os geradores síncronos com ímãs permanentes (GSIP) têm se destacado nas últimas décadas devido à sua alta eficiência e desempenho. Ao utilizar ímãs permanentes para gerar o campo magnético, os GSIP eliminam a necessidade de uma fonte de excitação externa, resultando em uma série de vantagens em comparação com os geradores síncronos tradicionais. (SANKARAN, 2017).

A alta eficiência dos GSIP é atribuída principalmente à ausência de perdas por excitação e à maior densidade de fluxo magnético proporcionada pelos ímãs permanentes. Além disso, a estabilidade do campo magnético gerado pelos ímãs permanentes contribui para um desempenho mais consistente e uma maior eficiência na conversão de energia elétrica (SILVA, J. A. 2018). Consequentemente, os GSIP são menores, mais leves e possuem uma resposta de frequência mais rápida, tornando-os ideais para diversas aplicações.

Apesar de suas vantagens, os GSIP também apresentam alguns desafios. O custo dos ímãs permanentes e a complexidade do projeto podem ser maiores em comparação com os geradores tradicionais. Além disso, a proteção dos ímãs permanentes contra a desmagnetização é um aspecto crucial no projeto desses geradores (PHIPPS; NELSON; SEN, 1994).

Para garantir a confiabilidade e durabilidade dos GSIP, é fundamental um projeto cuidadoso e a implementação de medidas de proteção adequadas. Os enrolamentos, a carcaça e os sistemas de ventilação e resfriamento devem ser projetados para resistir a condições operacionais adversas. Materiais como epóxi, alumínio e ligas de alumínio são comumente utilizados para proteger os componentes elétricos e mecânicos do gerador. Além disso, dispositivos de proteção, como relés térmicos e sistemas de monitoramento, são essenciais para detectar e responder a condições de sobrecarga e garantir a segurança do equipamento.

Após garantir a robustez e a durabilidade dos geradores síncronos com ímãs permanentes através de um projeto cuidadoso e de medidas de proteção adequadas, como discutido anteriormente, é possível explorar sua ampla gama de aplicações. Os geradores síncronos de ímã permanente são amplamente utilizados em aplicações como turbinas eólicas, sistemas de energia solar, veículos elétricos, dispositivos portáteis e outras aplicações onde eficiência, tamanho pequeno e resposta rápida são necessários (ZHANG; GENG; YUAN, 2001). Em aplicações externas ou ambientes agressivos, as medidas de proteção devem ser adotadas para resistir à exposição à poeira, umidade, substâncias químicas e outros elementos corrosivos.

Os geradores síncronos de ímã permanente (GSIP) têm se mostrado uma tecnologia promissora para a geração de energia elétrica, oferecendo alta eficiência, densidade de potência e simplicidade de construção. Sua ampla gama de aplicações, desde sistemas eólicos e solares até veículos elétricos, demonstra seu potencial para

transformar o cenário energético global. Com o avanço da tecnologia e a contínua pesquisa, os GSIP prometem desempenhar um papel cada vez mais importante na construção de um futuro energético mais sustentável.

Para compreender mais profundamente o funcionamento desses dispositivos, é fundamental aprofundar nosso conhecimento sobre a frequência síncrona. Este conceito, como, desempenha um papel crucial na determinação da velocidade de rotação dos GSIP e na qualidade da energia gerada.

3.1 FREQUÊNCIA SÍNCRONA

A frequência síncrona, definida como a velocidade constante de rotação do campo magnético girante em uma máquina elétrica, é um conceito fundamental em sistemas de potência. Essa grandeza, diretamente relacionada à frequência da tensão aplicada e ao número de pólos da máquina, garante a sincronização entre os diversos equipamentos da rede elétrica, assegurando a qualidade e a estabilidade do fornecimento de energia. A manutenção da frequência síncrona é crucial para evitar oscilações, harmônicos e, conseqüentemente, danos aos equipamentos e interrupções no serviço. (KUNDUR, P., 1994)

Em geradores síncronos de ímã permanente (GSIP), a frequência síncrona exerce influência direta sobre a tensão e a potência geradas. Aumentando a velocidade de rotação, aumenta-se tanto a tensão quanto a potência, desde que o fluxo magnético se mantenha constante. No entanto, a relação entre torque e velocidade é inversamente proporcional: para manter a velocidade constante em diferentes cargas, o torque deve variar.

A frequência síncrona é calculada pela equação 3.1:

$$f = \frac{n * p}{120} \quad (3.1)$$

Onde:

f = Frequência síncrona em Hertz (Hz);

n : Velocidade de rotação em rotações por minuto (rpm)

p : Número de pólos do gerador.

A frequência síncrona de um GSIP é um parâmetro fundamental que determina a velocidade de rotação do rotor e, conseqüentemente, a frequência da tensão elétrica gerada. Essa relação direta decorre do princípio de funcionamento do GSIP, onde a interação entre o campo magnético girante criado pelos ímãs permanentes e as bobinas do estator induz uma força eletromotriz alternada. A velocidade de rotação do rotor deve ser sincronizada com a frequência da tensão da rede elétrica para que o gerador possa operar em paralelo com outros geradores e alimentar a carga conectada.

3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática é uma ferramenta essencial no estudo de sistemas elétricos. Para entender e controlar um GSIP, é fundamental construir modelos matemáticos que descrevam seu comportamento. Através desses modelos, é possível analisar o desempenho do gerador em diferentes condições de operação, prever falhas e otimizar o sistema de controle.

Para modelar o comportamento dinâmico da GSIP, são comumente utilizados modelos de espaço de estados de segunda ordem. Dois modelos matemáticos predominantes para o GSIP são o modelo senoidal e o modelo trapezoidal. O modelo senoidal simplifica a análise, assumindo que a distribuição de fluxo magnético no entreferro é senoidal e, conseqüentemente, a força eletromotriz induzida nas bobinas estatóricas também é senoidal. Por outro lado, o modelo trapezoidal considera uma distribuição de fluxo mais realista, resultando em uma forma de onda de força eletromotriz trapezoidal.

A implementação desses modelos envolve um conjunto de equações diferenciais que descrevem as relações entre as variáveis de estado como fluxos, correntes e velocidade e as grandezas de entrada, tensões e torques.

As equações do modelo senoidal trifásico são dadas pela equação 3.2:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}i_d &= \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_m i_q \\
\frac{d}{dt}i_q &= \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_m i_d - \frac{\lambda p\omega_m}{L_q} \\
T_e &= 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

Onde:

L_q, L_d = Indutâncias;

R = Resistência dos enrolamentos do estator;

i_q, i_d = Correntes;

v_q, v_d = Tensões;

ω_m = Velocidade angular do rotor;

λ = Amplitude do fluxo induzido pelos ímãs permanentes;

p = Números de polos;

T_e = Torque eletromagnético.

As indutâncias L_q e L_d , representam a relação entre a indutância de fase e a posição do rotor devido a saliência do rotor. A indutância medida entre a fase a e b é dada pela equação 3.3:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d)\cos\left(2\theta_e + \frac{\pi}{3}\right) \tag{3.3}$$

Onde:

θ = Ângulo elétrico.

3.3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E CONSTRUÇÃO

Um gerador síncrono de ímãs permanentes (GSIP) é composto por um rotor, a parte móvel que contém os ímãs permanentes. A escolha desses ímãs influencia diretamente a potência do gerador. O estator, parte estacionária, abriga as bobinas de cobre. A quantidade e o tipo de enrolamento nessas bobinas determinam a tensão e a corrente de saída. O eixo conecta o rotor à fonte de energia mecânica, como o vento ou a água. Os mancais sustentam o eixo, permitindo uma rotação suave. A caixa protege os componentes internos e facilita a conexão com o sistema elétrico (SAY, M. G. (2002).

Os princípios de funcionamento do gerador síncrono permanente são fundamentais para compreender sua operação eficiente na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Este tipo de gerador baseia-se na presença de um rotor equipado com ímãs permanentes, que cria um campo magnético constante (BUMBY, J. R. e MARTIN, R., 2005). Esse campo magnético, ao interagir com o estator, induz uma força eletromotriz que gera a corrente elétrica. O estator, por sua vez, é composto por enrolamentos de fio condutor onde essa corrente é induzida, de acordo com a lei de Faraday da indução eletromagnética. Além disso, a velocidade de rotação do rotor, sincronizada com a frequência da rede elétrica, garante a geração de energia elétrica na frequência desejada.

A interação entre rotor e estator é fundamental para o funcionamento do gerador síncrono permanente. O rotor, com seus ímãs permanentes, cria um campo magnético rotativo que induz uma força eletromotriz no estator. Esse campo magnético induz uma corrente alternada nos enrolamentos do estator, convertendo energia mecânica em energia elétrica (BUMBY, J. R. e MARTIN, R., 2005).

3.4 GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES PARA USO EM GERAÇÃO EÓLICA

Os geradores síncronos de ímãs permanentes (GSIP) têm se consolidado como uma tecnologia de ponta para a geração de energia eólica, superando as limitações de modelos convencionais. A ausência de excitação elétrica, proporcionada pela utilização de ímãs permanentes no rotor, simplifica o design e

aumenta a eficiência na conversão de energia mecânica em elétrica (FERNANDES, 2013).

Uma característica crucial dos geradores síncronos de ímãs permanentes é sua resposta rápida às variações na velocidade do vento. A inércia reduzida desses geradores possibilita uma adaptação ágil às mudanças nas condições atmosféricas, permitindo que as turbinas eólicas otimizem a produção de energia em tempo real. Além disso, a ausência de partes móveis complexas, como escovas e anéis coletores, resulta em uma menor necessidade de manutenção periódica, proporcionando maior confiabilidade operacional e redução de custos associados à manutenção. Essa robustez contribui para a durabilidade dos sistemas eólicos, refletindo em uma vida útil prolongada. (FERNANDES, 2013).

A resistência mecânica desses geradores torna-os aptos a operar em condições climáticas adversas, como temperaturas extremas e a presença de gelo ou neve. Além disso, a capacidade desses geradores de se integrarem a sistemas de controle avançado em turbinas eólicas possibilita ajustes precisos e rápidos, otimizando a produção de energia de maneira eficiente. Em última análise, os geradores síncronos de ímãs permanentes apresentam-se como uma solução tecnologicamente avançada e sustentável para impulsionar o setor de geração de energia eólica em direção a um futuro mais eficiente e ecologicamente consciente (FERNANDES., 2013).

CAPÍTULO 4

4. SIMULAÇÃO

Com base na teoria apresentada nos capítulos anteriores, nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da implementação de geradores síncronos de ímã permanente aplicados a energia eólica, obtidos através de simulação de um modelo computacional proveniente do *software MATLAB*. De início é apresentado a introdução com os principais atributos e elementos de sua composição. Posteriormente será analisada a viabilidade e eficiência do sistema sob as condições simuladas.

4.1 O USO DO PMSM NO MATLAB

O PMSM representa a sigla para Motor Síncrono de Ímã Permanente. No contexto do *MATLAB*, um PMSM caracteriza um modelo matemático desse tipo de motor que pode ser simulado e analisado dentro do ambiente do *software*. O *MATLAB*, oferece um ambiente eficaz para a modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, como geradores elétricos.

A modelagem de geradores possibilita uma análise profunda e precisa de seu comportamento em diversas condições operacionais. Ao simular diferentes cargas, velocidades e tensões, é possível prever a resposta do sistema e identificar possíveis gargalos. Além disso, a modelagem permite o desenvolvimento e teste de algoritmos de controle mais eficientes, a simulação de cenários de falha para avaliar a robustez do sistema e a otimização dos parâmetros do gerador para atingir o desempenho desejado. Essa flexibilidade torna a modelagem uma ferramenta indispensável no projeto, desenvolvimento e operação de geradores.

A modelagem do PMSM no *MATLAB*, envolve equações diferenciais que descrevem o comportamento elétrico e mecânico do motor, que são implementadas em blocos do *Simulink*. Os parâmetros do motor, como resistência, indutância, constante de torque e momento de inércia, são definidos em seus blocos correspondentes.

Um PMSM é um tipo de motor elétrico que, além de converter energia elétrica em energia mecânica, também pode operar na função inversa, convertendo

energia mecânica em energia elétrica. Essa característica o torna uma opção atrativa para a geração de energia em diversas aplicações, como sistemas eólicos, hidrelétricos e em veículos elétricos.

Nas condições normais do PMSM, a energia elétrica é convertida em mecânica. No entanto, o processo pode ser invertido, quando um torque externo é aplicado ao eixo do motor, fazendo-o girar, o PMSM funciona como um gerador, convertendo a energia mecânica em energia elétrica.

A geração de energia elétrica em um PMSM se baseia no princípio de indução eletromagnética, descrito pela Lei de Faraday. Quando um condutor corta as linhas de um campo magnético, uma força eletromotriz é induzida nesse condutor. No PMSM, os ímãs permanentes geram um campo magnético, e os enrolamentos do estator cortam essas linhas de campo à medida que o rotor gira, induzindo assim uma tensão nas fases do estator. Neste capítulo, será apresentado os detalhes dos aspectos encontrados através da simulação, com foco na análise de sistemas com carga conectada.

4.2 GERADOR PMSM COM CARGA CONECTADA

Um PMSM operando como gerador converte a energia mecânica em energia elétrica e ao conectar diferentes tipos de cargas, como resistivas e resistivas-indutivas, observamos diferentes comportamentos em nível de corrente e torque eletromagnético. O tipo de carga conectado ao gerador, tem um impacto significativo no comportamento do sistema, cargas resistivas resultam em um comportamento mais simples e eficiente, enquanto as cargas resistivas-indutivas acrescentam complexidades devido a natureza indutiva da carga.

Ao adicionar uma carga resistiva, a corrente e torque eletromagnético, são influenciadas. O nível da corrente em uma carga resistiva é diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional a resistência. Ao conectar uma carga resistiva a um PMSM operando como gerador, a corrente induzida nos enrolamentos do estator fluirá através da resistência, gerando uma queda de tensão.

O torque eletromagnético, se opõe ao torque mecânico aplicado. A magnitude do torque eletromagnético é proporcional ao produto da corrente do estator e do fluxo magnético do rotor. Em uma carga puramente resistiva, o ângulo entre a corrente e a tensão é zero, o que resulta em um torque eletromagnético máximo para uma dada corrente.

As cargas resistivas-indutivas, ao serem adicionadas, atrasam a corrente em relação a tensão, devido a indutância da carga, resultando assim em um fator de potência menor que um. A magnitude da corrente depende da frequência da tensão, do valor da resistência e da indutância. Seu torque é reduzido em comparação a uma carga puramente resistiva, isso se dá, pois a presença da indutância causa um deslocamento angular entre a corrente e o fluxo magnético do rotor.

4.3 PMSM COMO GERADOR EÓLICO

O princípio de funcionamento se baseia no momento em que o vento atua sobre as pás de uma turbina eólica, o rotor gira, acoplado ao rotor da turbina o rotor do gerador PMSM também gira, induzindo uma força eletromotriz nos enrolamentos do estator, gerando uma corrente elétrica que pode ser usada para alimentar cargas ou ser injetada na rede elétrica.

Um sistema eólico do tipo PMSM possui a turbina eólica que captura a energia cinética do vento e transmite o movimento rotacional ao eixo do gerador, que converte a energia mecânica em elétrica e o sistema de controle regula a velocidade da turbina e potência gerada, otimizando o desempenho do sistema.

A simulação do sistema de geração eólica com um PMSM representa uma etapa fundamental, permitindo a validação do modelo matemático e através dela é possível investigar o comportamento do sistema em diversas condições de operação e realizar ajustes para obter o desempenho desejado. Os parâmetros utilizados na simulação foram extraídos da ficha técnica do motor. O esquema de simulação utilizado é apresentado na figura 11, apresentada abaixo:

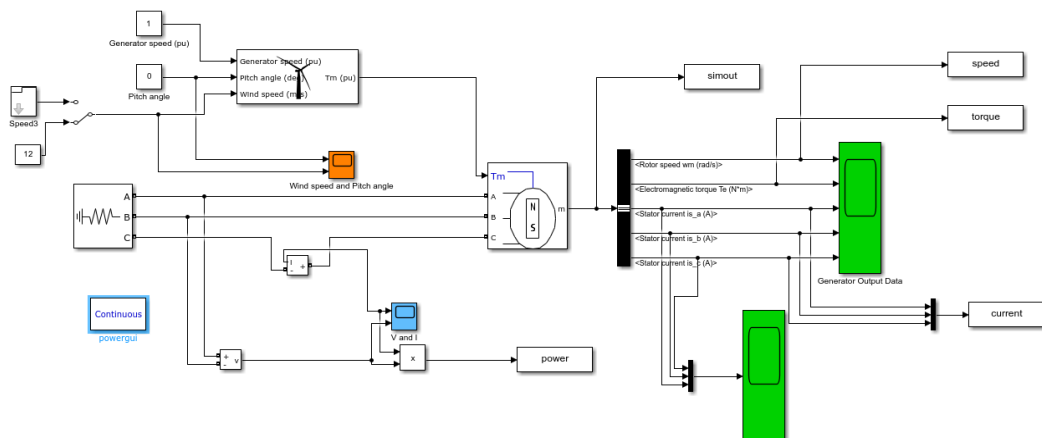


Figura 11: Esquema geral de simulação no *MATLAB-Simulink*. (AUTOR).

O bloco Speed3, representa a entrada de velocidade do vento (Wind Speed Input), ou seja, é utilizada em sistemas eólicos como porta de entrada para a variável que caracteriza a velocidade do vento durante um tempo em segundo (s), ele é fundamental para modelar as condições reais de operação do aerogerador e verificar o comportamento em resposta às variações da velocidade do vento e calcular a energia eólica disponível.

Inicialmente, o bloco gera um sinal que representa a velocidade do vento, que pode ser uma função constante, senoidal ou ainda um sinal complexo, como por exemplo o vento real medido em campo. O sinal de saída do bloco é usado como porta de entrada para outros blocos do esquema de simulação, como o de turbina eólica.

O sinal constante representa uma velocidade contínua de vento ao decorrer da simulação, possibilitando a análise da conduta do sistema em condições estacionárias. Na hipótese de sinal senoidal, é simulado as variações periódicas na velocidade do vento, a título de exemplo as rajadas de vento. O sinal aleatório, possui variações, que simulam as condições reais do vento, que tem alto índice de variação, assim como os sinais obtidos em campo, que são obtidos a partir de dados reais, permitindo uma simulação lógica.

O bloco Entrada de Ângulo de Pás (Pitch Angle Input), serve como porta de acesso para a variável que caracteriza o ângulo de inclinação das pás da turbina eólica. Esse ângulo é um parâmetro fundamental para o controle da potência gerada pela turbina, proteção da mesma em casos de ventos excessivos, e permite modelar diferentes estratégias.

A princípio o bloco gera um sinal que exprime o ângulo das pás ao longo do tempo, que pode ser sinal senoidal, complexo ou perfil de controle pré definido. O sinal de saída do bloco é utilizado como entrada para outros blocos do modelo, como o de aerodinâmica das pás.

O sinal constante refere-se a um ângulo constante das pás ao longo da simulação. O sinal senoidal simula variações nos ângulos das pás em alguns períodos, simulando estratégias de controle específicas. O controlador, ajusta o ângulo das pás em tempo real, otimizando a captura de energia ou até mesmo para a proteção da turbina e por último os dados reais são obtidos através da importação dos dados de ângulos das pás, engendrando em uma simulação real.

O bloco Cálculo do Torque Aerodinâmico (Aerodynamic Torque Calculation), quantifica a força rotativa exercida sobre as pás da turbina eólica, onde ele processa a velocidade do vento e o ângulo de pás para calcular o torque aerodinâmico, que é a força gerada pelo vento sobre as pás do rotor. Esse processo é fundamental para determinar a potência mecânica gerada pela turbina e por conseguinte a energia eólica produzida.

A fundamentação do bloco, é embasada no cálculo do torque aerodinâmico a partir de vários parâmetros, como a velocidade do vento, ângulo das pás, diâmetro do rotor e coeficientes aerodinâmicos. Após o cálculo, o bloco é usado dedicado a uma nova entrada para outros modelos de bloco, como o eixo do gerador.

O modelo do gerador (Generator Model) representa um componente fundamental na modelagem de sistemas de energia elétrica, ele simula o comportamento elétrico e mecânico de um gerador, permitindo a análise detalhada do seu desempenho em diferentes condições de operação.

Em sua operação, o gerador é modelado, incluindo um circuito elétrico, que representa as bobinas do estator e rotor, resistências, reatâncias e as conexões realizadas entre elas. suas entradas incluem o Torque aerodinâmico e os parâmetros elétricos como a corrente elétrica nas fases A, B e C. Já na saída, o gerador observa a velocidade do rotor, o torque eletromagnético e as correntes do estator.

O bloco de medição e corrente e tensão (Current and Voltage Measurement), tem como finalidade monitorar as grandezas elétricas em um circuito ou sistema. Ele possibilita a análise de valores instantâneos, eficazes e demais características das tensões e correntes nas fases do gerador, que são usadas para calcular a potência gerada.

Inicialmente o bloco concede a opção de verificar se o circuito está funcionando normalmente e ou identificar os possíveis problemas. Logo após, auxilia na validação de modelos teóricos e comparação de resultados simulados com dados experimentais. Permite ajustar os parâmetros para obter o desempenho desejado e é aplicado ao monitoramento da funcionalidade de sistemas em tempo real.

O bloco de medição, atua como um voltímetro ou amperímetro. Ele pode ser inserido em série para medir corrente, ou em paralelo para medir a tensão nos pontos do circuito onde se deseja obter esses dados. Ao iniciar a simulação o bloco captura os valores instantâneos da tensão ou corrente e os condicionam para posterior análise.

O bloco de Powergui é uma interface gráfica do usuário (GUI), projetada para a modelagem e simulação de sistemas de potência, permitindo a análise e configuração dos parâmetros. Ele permite a utilização de ferramentas e blocos de construção pré-definidos, que facilitam a criação de modelos de sistemas elétricos, como redes de distribuição, sistemas de transmissão e de geração de energia.

Em seu funcionamento, o Powergui disponibiliza uma biblioteca de componentes elétricos pré definidos, como linhas de transmissão, transformadores, geradores, cargas e dispositivos de proteção. A interface permite a configuração de cada parâmetro, tal como impedância, tensão nominal, potência e outros mais, permitindo assim ajustar o sistema com características existentes. Ao executar a simulação ele resolve as equações diferenciais que descrevem o comportamento do sistema elétrico, possibilitando a análise de como o sistema responde a diferentes situações, faltas, variações de cargas e mudanças no tipo da rede. Além disso, após a simulação, é possível ver os resultados com gráficos de tensão, corrente e fluxo de potência. Isso permite a identificação de problemas e desempenho, viabilizando a sua otimização.

O bloco de saída do sistema (System Outputs), é um elemento de extrema importância para a visualização e análise de resultados de uma simulação. Atua como ponto de coleta dos sinais de saída da modelagem, as saídas de interesse, como a velocidade do rotor (speed), torque (torque), e corrente (current), são registradas para análise posterior.

Após a montagem do sistema, o bloco de saída é conectado a um subsistema, bloco ou sinal do modelo e durante a simulação ele irá coletar o valor das variáveis conectadas em cada instante de tempo, por último, os dados coletados podem ser vistos de forma clara e eficiente em gráficos, tabelas ou escopos.

O bloco de simulação e cálculo de potência (Multiplication and Power Calculation) é uma ferramenta fundamental nas operações como multiplicação e exponenciação entre sinais. Essa funcionalidade permite que os valores de tensão e corrente sejam multiplicados para calcular a potência instantânea gerada pelo sistema. A sua operação inicia quando o bloco recebe dois ou mais sinais de entrada e emite um sinal de saída, resultando na multiplicação de ambos.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este estudo visa analisar o comportamento de um gerador eólico sob diferentes condições de operação, através de simulações computacionais. Serão comparados dois cenários principais: variação de carga e variação de velocidade. Inicialmente, o foco será na análise da influência da carga, avaliando o desempenho do sistema em três condições: carga nominal 10000W, 20% de sobrecarga 12000W e 20% abaixo da nominal 8000W, nos três casos a velocidade será constante em 10 metros por segundo (m/s). A visualização do comportamento das grandezas como, velocidade, correntes e tensões do gerador eólico, serão obtidos através de gráficos.

O gráfico apresentado ilustra as correntes elétricas nas três fases (A, B e C) de um gerador eólico durante uma simulação sob condições específicas: velocidade do vento constante de 10 m/s e carga nominal de 10.000 watts.

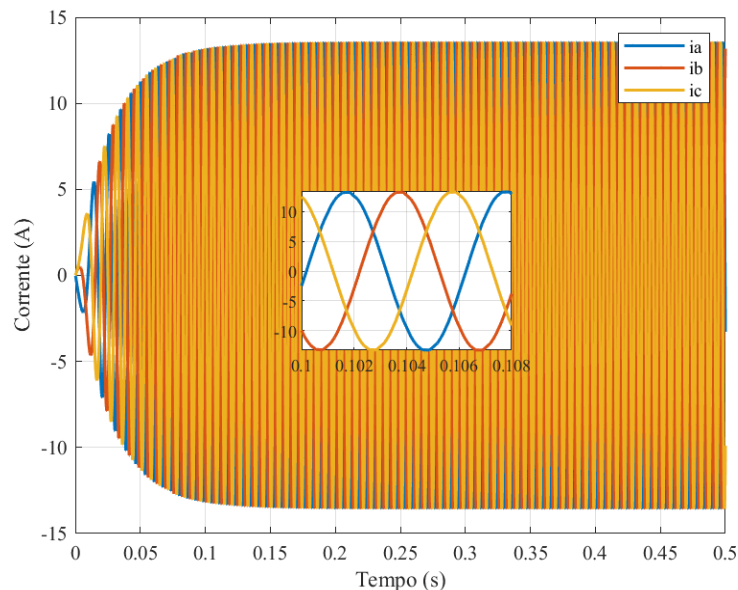


Gráfico 2- Comportamento da corrente com carga nominal (AUTOR).

O gráfico apresentado, mostra o comportamento do gerador eólico, o eixo horizontal representa o tempo em segundos (s) e o eixo vertical representa as correntes das fases A, B e C medidas em Amperes (A). Cada linha no gráfico representa a corrente elétrica em uma das fases ao longo do tempo. Observa-se que elas possuem uma forma de onda senoidal, que é típica de sistemas de corrente alternada, isso indica que o gerador está convertendo a energia mecânica do vento em energia elétrica de forma eficiente. A amplitude das correntes, isto é, o valor máximo que elas alcançam, permanece relativamente constante ao longo do tempo, isso significa que a intensidade da corrente elétrica sendo gerada é estável nas condições simuladas. As três fases estão defasadas em 120 graus, uma em relação a outra, que é uma característica de sistemas trifásicos balanceados e garante que a potência total fornecida pelo gerador seja constante ao longo do tempo. O gerador está operando de forma eficiente e produzindo energia elétrica de forma estável, eficiente e com boa qualidade de energia gerada.

Logo após, foram analisadas as tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} do gerador eólico, nas mesmas condições da simulação anterior: velocidade constante 10 m/s e carga nominal de 10000W, que podem ser observados no gráfico 3.

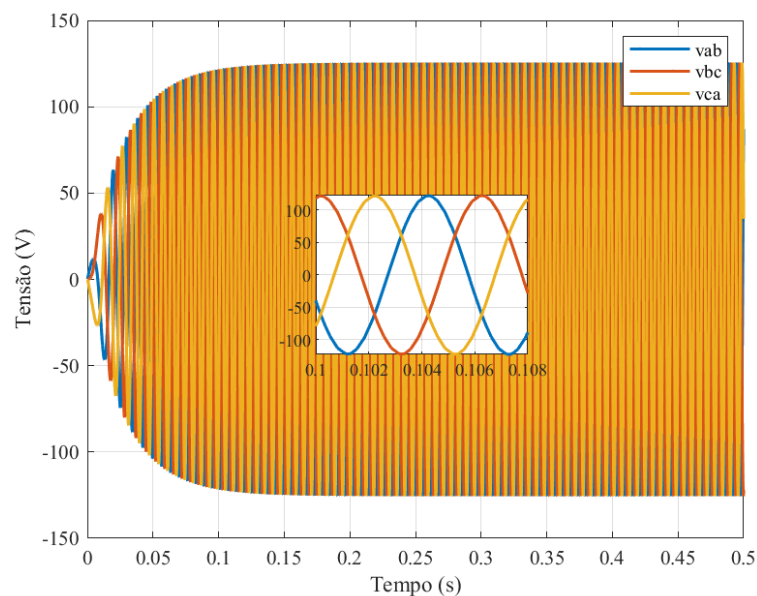


Gráfico 3- Comportamento da tensão com carga nominal (AUTOR).

O gráfico representa o comportamento da tensão, sendo o eixo horizontal representando o tempo em (s) e o eixo vertical representa a tensão medida em Volts (V). As tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} apresentam praticamente o mesmo comportamento

das correntes, isto é, uma forma de onda senoidal, amplitude constante e deslocamento de 120 graus entre as fases. Os resultados indicam um funcionamento ideal do gerador eólico.

Em seguida, foi analisado o torque eletromagnético, medido em Newton-metro (Nm) do gerador eólico, nas mesmas condições de simulação: velocidade constante 10 m/s e carga nominal de 10000W, que podem ser observados no gráfico 4.

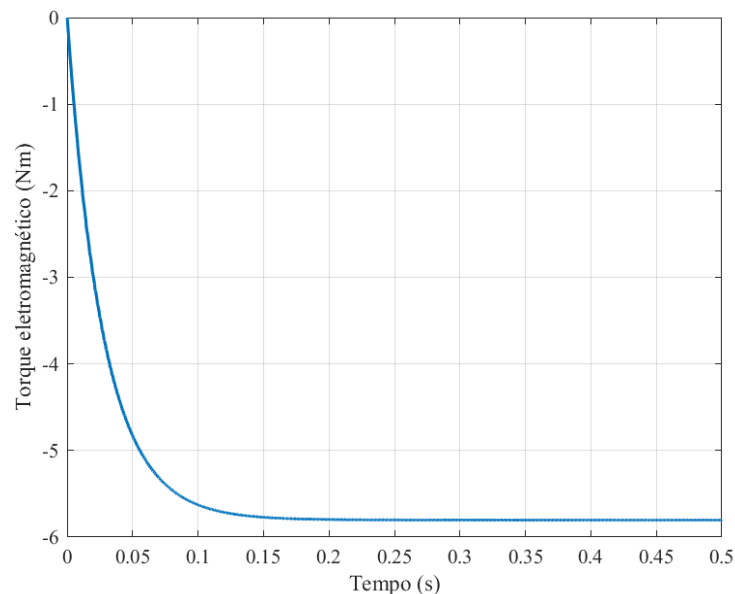


Gráfico 4- Comportamento do torque com carga nominal (AUTOR).

O gráfico apresentado mostra o comportamento do torque, o eixo horizontal representa o tempo em (s) e o eixo vertical representa o torque em (Nm), que é a força rotativa realizada por um gerador, ele apresenta um decaimento exponencial, que sugere que o sistema está passando por um processo de transiente, onde o torque diminui até um valor de regime permanente, o valor negativo indica que a força está se opondo ao movimento, no caso de um gerador o torque eletromagnético deve ser contrário ao torque mecânico aplicado pelo vento para gerar energia elétrica. Após o declínio, o torque se estabiliza em um valor negativo constante que representa o torque necessário para manter o gerador operando na velocidade nominal e fornecendo a potência requerida pela carga.

Posteriormente, o gerador eólico foi submetido a uma sobrecarga de 20%, ou seja aumentando a demanda de energia para 12000W, com a velocidade constante de 10 m/s, obtendo um comportamento de corrente que pode ser observado no gráfico 5.

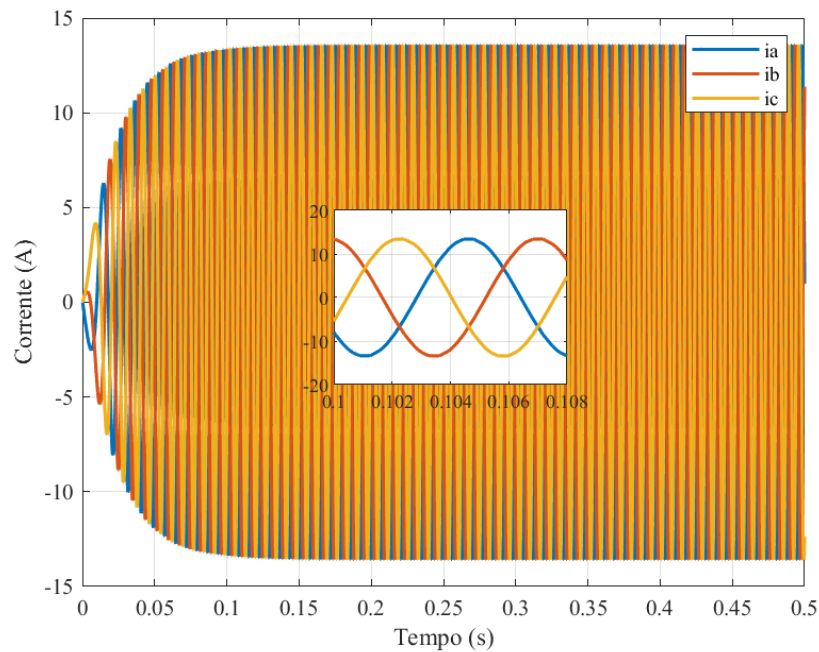


Gráfico 5- Comportamento das correntes com 20% de sobrecarga (AUTOR).

O gráfico fornece informações do comportamento do gerador, operando em uma condição de sobrecarga, ou seja, com uma demanda de potência superior à sua capacidade nominal. Ao realizar a análise, percebe-se que na velocidade constante de 10 m/s o gerador atua de forma eficaz para mantê-la, mesmo com a sobrecarga. Nas correntes, é possível identificar que a forma de onda senoidal é mantida, indicando que o gerador opera de forma balanceada, porém elas apresentam uma amplitude maior que o normal e isso ocorre porque para fornecer mais potência é necessário aumentar a intensidade da corrente elétrica. A sobrecarga pode levar à saturação do material magnético do gerador, que implica em distorções na forma de onda das correntes, essas distorções podem ser observadas como um achatamento dos picos da onda. O deslocamento de fase é mantido em 120 graus, no entanto ele sofre pequenas variações.

Nesse mesmo cenário, as tensões podem ser observadas no gráfico 6.

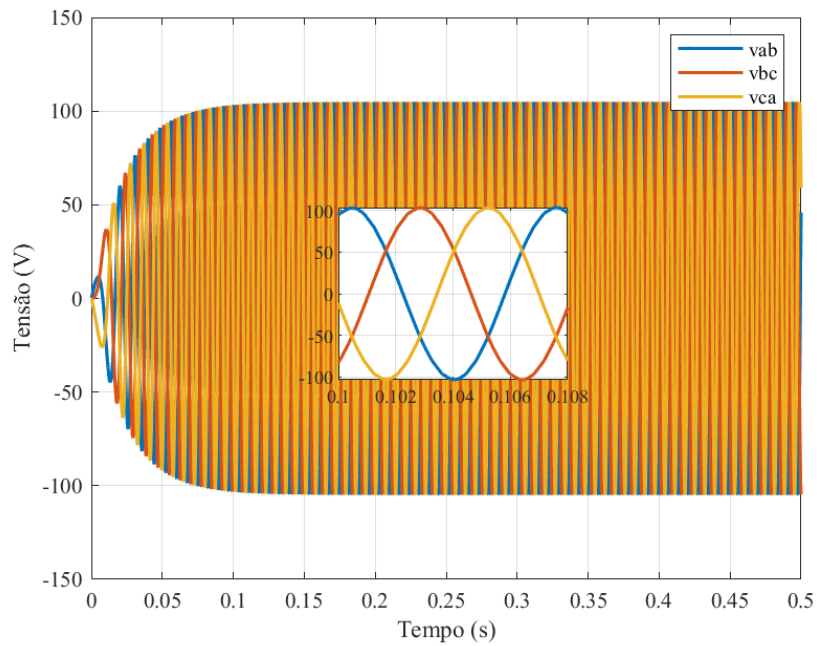


Gráfico 6- Comportamento da tensão com 20% de sobrecarga (AUTOR).

Semelhante ao comportamento das correntes, as tensões em condições de sobrecarga, tem pequenas flutuações na amplitude, devido a resposta do sistema de controle e às características do gerador. Isso implica no aquecimento do gerador, reduzindo sua vida útil, as perdas do efeito Joule aumentam, diminuindo a eficiência do gerador.

O gráfico 7 irá apresentar o comportamento do torque nesse segundo caso.

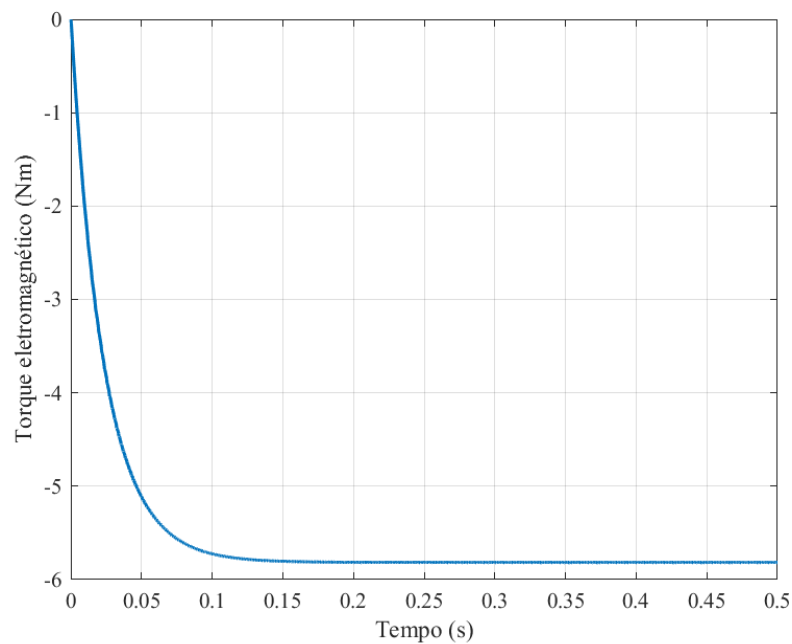


Gráfico 7- Comportamento do torque com 20% de sobrecarga (AUTOR).

Nesse caso, observa-se que o aumento da carga resulta em um pico de torque um pouco maior, houve um aumento no tempo para atingir o estado estacionário.

Em outro momento, foi realizada a simulação, com 20% de subcarga, ou seja 2000W a menos que a capacidade nominal do gerador, isso significa que ele está produzindo menos energia que sua capacidade. Ele irá operar com 8000W, e sua corrente pode ser analisada no gráfico 8.

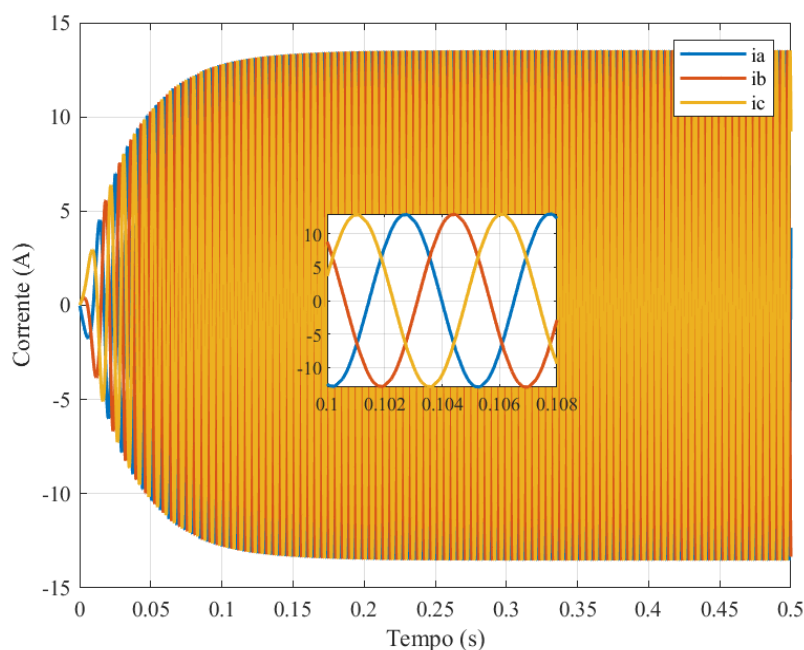


Gráfico 8- Comportamento da corrente com 20% de subcarga (AUTOR).

Com o gerador eólico em operação com 20% de subcarga, a principal característica é a redução na amplitude das ondas da corrente em cada fase, isso ocorre pois para fornecer menos potência, é necessário diminuir a intensidade da corrente elétrica. Idealmente, a forma de onda senoidal e o deslocamento se mantêm indicando um funcionamento normal, porém, algumas pequenas distorções podem ser visualizadas devido às variações de carga.

A análise foi expandida para as tensões, que pode ser vista no gráfico 9, ao comparar as grandezas tem-se uma análise mais completa do comportamento do sistema sob essas condições.

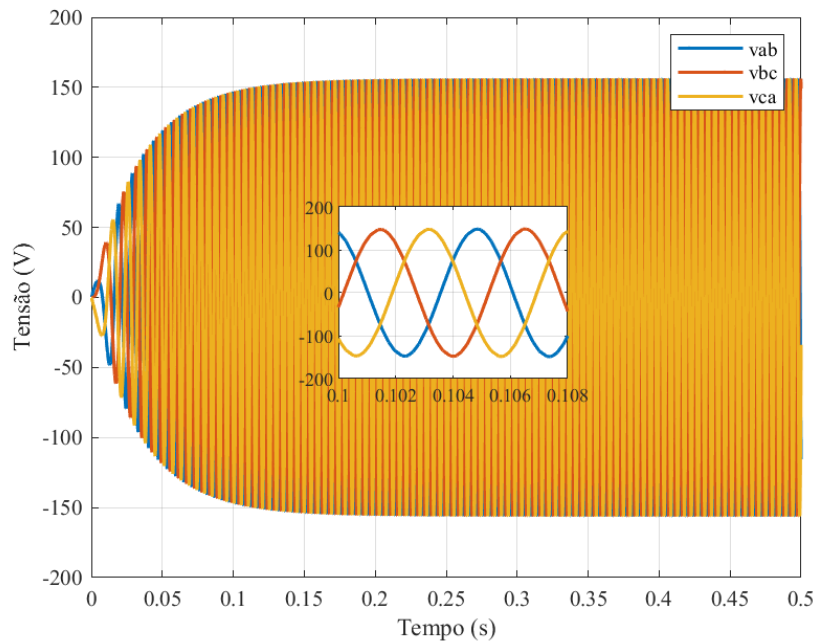


Gráfico 9- Comportamento da tensão com 20% de subcarga (AUTOR).

Tanto na análise da corrente quanto da tensão observa-se a redução na amplitude, que está diretamente ligada à redução da carga, a forma de onda e o deslocamento se mantêm podendo ter pequenas oscilações ao longo do tempo. De acordo com a lei de Ohm que estabelece uma relação direta entre tensão e corrente, portanto, a redução das correntes está diretamente ligada à redução das tensões, considerando a impedância constante do sistema.

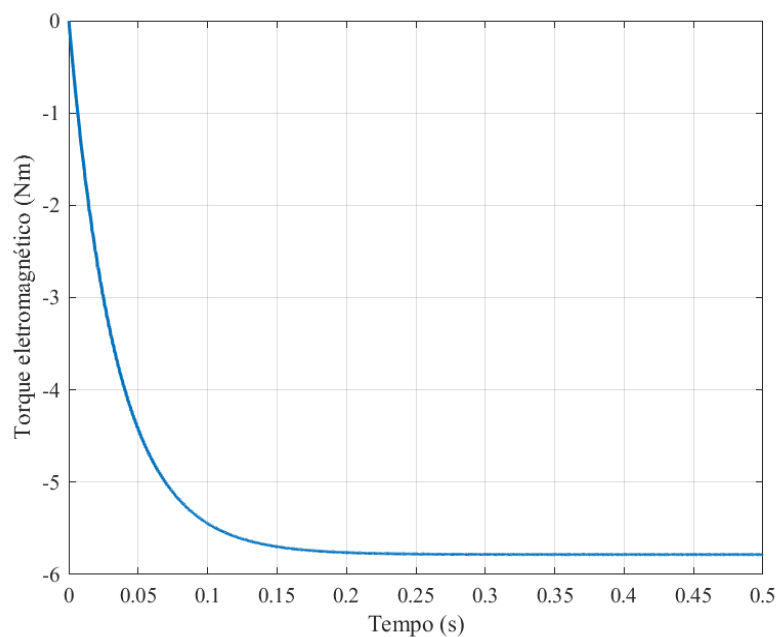


Gráfico 10- Comportamento do torque com 20% de subcarga (AUTOR).

Como esperava-se, ao diminuir a carga o valor do torque também diminui, pois ele é diretamente proporcional à potência mecânica exigida. O sistema atinge o estado estacionário mais rapidamente quando a carga é menor.

Em seguida, a configuração dos testes foi invertida, foram realizadas simulações com carga fixa nominal de 10000W e uma velocidade variável de 5 m/s, 10 m/s e 15 m/s.

A primeira análise das correntes pode ser observada no gráfico 11, onde a velocidade utilizada foi de 5m/s

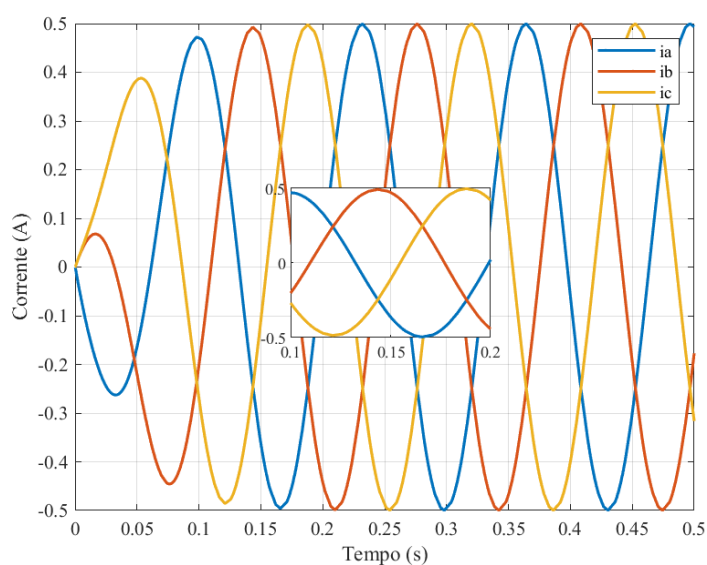


Gráfico 11- Comportamento da corrente com velocidade 5 m/s (AUTOR).

A segunda análise foi realizada com velocidade de 10 m/s, mantendo a carga fixa, que pode ser observado no gráfico 12.

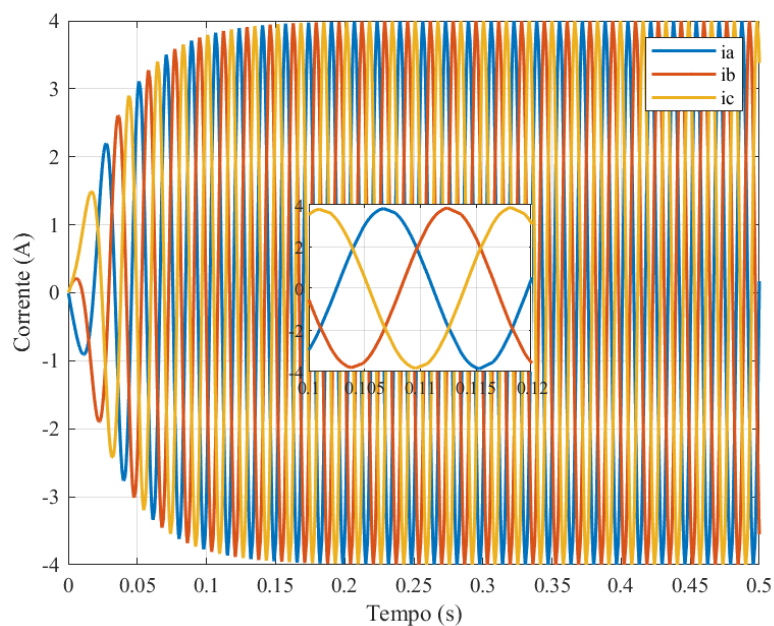


Gráfico 12- Comportamento da corrente com velocidade 10 m/s (AUTOR).

Por último foram vistos os aspectos em uma velocidade de 15 m/s, evidenciado no gráfico 13.

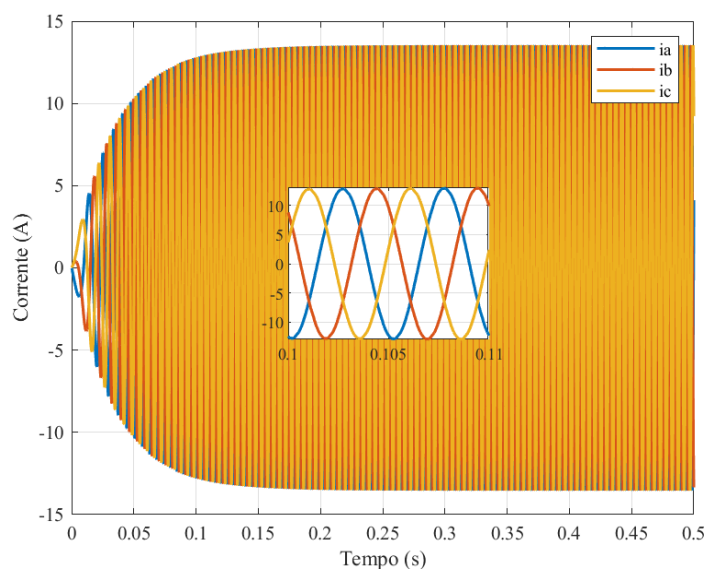


Gráfico 13- Comportamento da corrente com velocidade 15 m/s (AUTOR).

A análise dos gráficos das correntes do gerador eólico revelou um comportamento esperado com o aumento da velocidade, que resulta em um aumento da amplitude da corrente gerada, as formas de onda são predominantemente senoidal, indicando um ótimo funcionamento do sistema, nas diferentes condições de

operação. Conforme a velocidade do vento aumenta, a energia cinética disponível para o rotor também aumenta. Isso resulta em um maior torque mecânico no eixo do gerador, o que, por sua vez, induz uma corrente elétrica maior nos enrolamentos do gerador, embora a corrente tende a aumentar com a velocidade do vento, ela não aumenta indefinidamente. O sistema de controle do gerador eólico possui mecanismos para limitar a corrente a valores seguros, evitando sobrecargas nos componentes.

De maneira semelhante, foram analisadas as tensões nas condições apresentadas. No gráfico 14, observa-se o comportamento da tensão, com velocidade de 5 m/s.

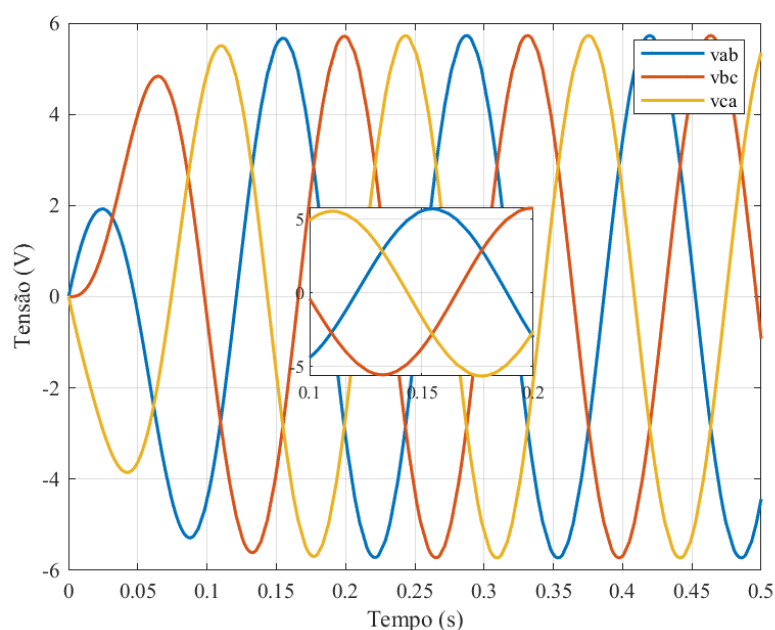


Gráfico 14- Comportamento da tensão com velocidade 5 m/s (AUTOR).

Posteriormente, o gerador foi submetido a uma velocidade de 10 m/s, mantendo a carga nominal, a tensão gerada pode ser observada no gráfico 15.

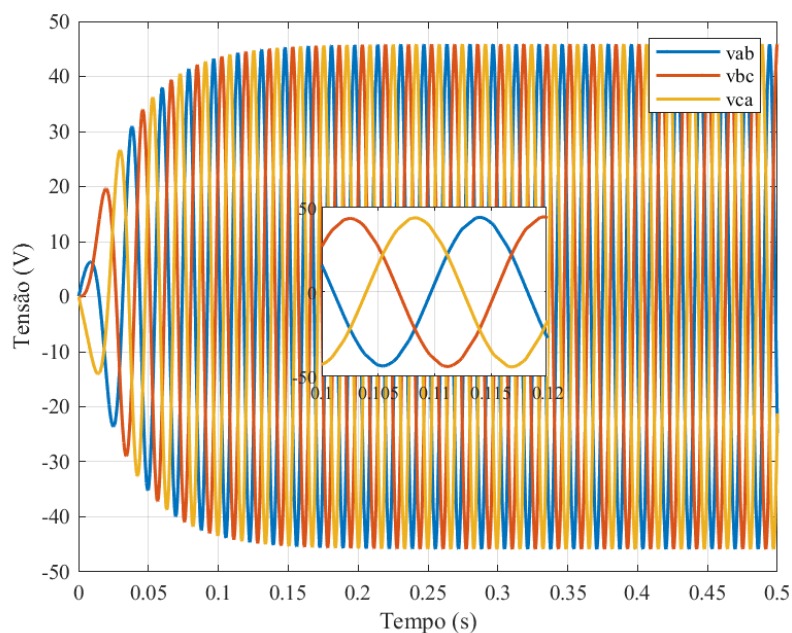


Gráfico 15- Comportamento da tensão com velocidade 10 m/s (AUTOR).

Por fim, o gerador operou com uma velocidade de 15 m/s também mantendo a carga nominal e o desempenho das tensões é demonstrado no gráfico 16.

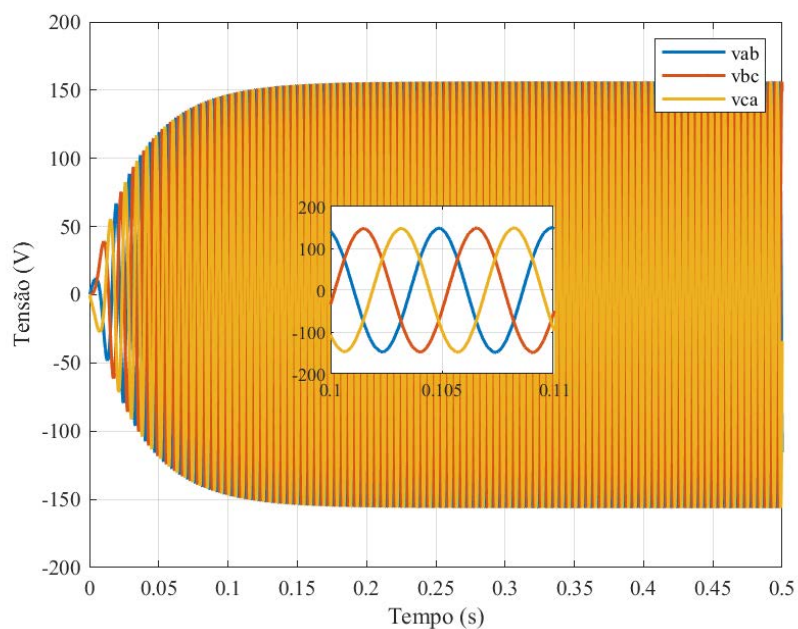


Gráfico 16- Comportamento da tensão com velocidade 15 m/s (AUTOR).

A tensão gerada também foi influenciada pela velocidade, ela aumenta até devido momento, após um período ela pode se estabilizar ou até mesmo diminuir devido a saturação magnética do gerador. A eficiência do gerador varia de acordo

com a velocidade do vento, velocidades muito baixas ou muito altas podem resultar em uma eficiência reduzida, as variações de tensão podem afetar na qualidade de energia gerada e causar problemas em equipamentos conectados à rede.

Outrossim, foi realizada a análise do torque eletromecânico nas condições apresentadas. O gráfico 17 apresenta o comportamento do torque com carga nominal e velocidade 5 m/s.

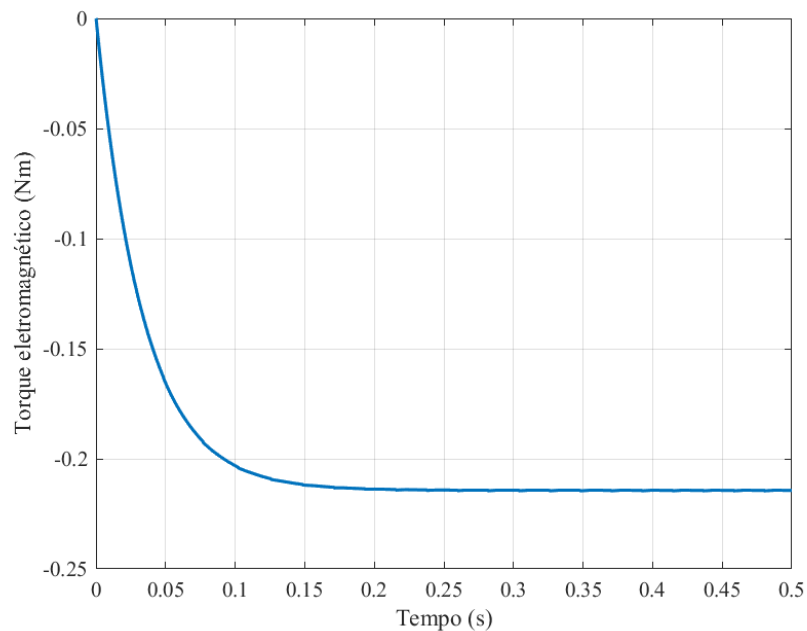


Gráfico 17- Comportamento do torque com velocidade 5 m/s (AUTOR).

Em seguida, o gerador foi submetido a uma velocidade de 10 m/s, ainda com carga nominal, onde o comportamento do torque nessas condições é apresentado no gráfico 18.

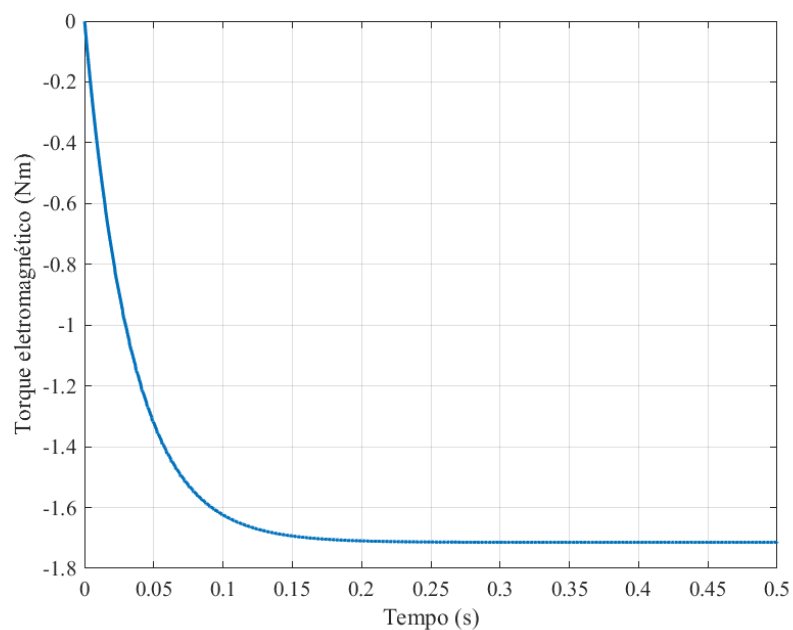


Gráfico 18- Comportamento do torque com velocidade 10 m/s (AUTOR).

Finalmente o torque foi analisado com velocidade de 15 m/s, que pode ser visto no gráfico 19.

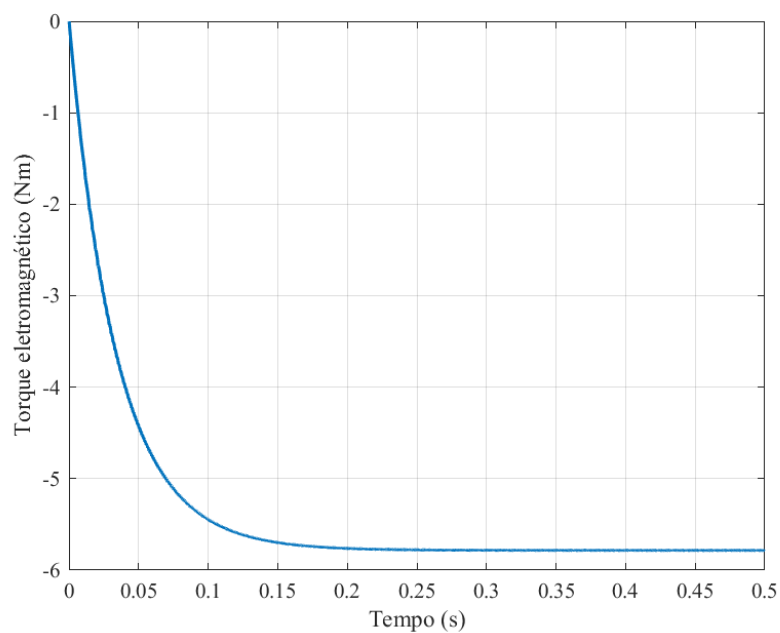


Gráfico 19- Comportamento do torque com velocidade 15 m/s (AUTOR).

A análise dos gráficos de torque em função da velocidade apresenta uma relação direta entre as duas variáveis em geradores elétricos. Ao aumentarmos a velocidade de rotação do rotor, observamos, em geral, um aumento correspondente

no torque eletromagnético gerado. Essa relação fundamental se explica pela lei da indução eletromagnética de Faraday, que estabelece que a força eletromotriz induzida em um circuito é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético que o atravessa. Quanto maior a velocidade de rotação, maior a variação do fluxo magnético e, conseqüentemente, maior o torque gerado.

Os resultados apresentados provenientes da simulação, demonstram de forma clara a influência direta da velocidade e da carga sobre o desempenho do gerador eólico. A variação destas grandezas impacta significativamente a geração de energia, eficiência do sistema e vida útil dos componentes.

A carga ideal é aquela que permite ao gerador operar máxima eficiência, sem sobrecarga ou subcarga. Uma carga excessiva pode levar ao sobreaquecimento dos componentes e à redução da vida útil do gerador. Uma carga muito baixa pode resultar em uma baixa eficiência energética. A operação em sobrecarga pode causar danos aos enrolamentos do gerador, superaquecimento dos componentes e redução da vida útil do equipamento, já a operação em subcarga pode levar à geração de harmônicos e a uma menor eficiência energética.

No caso da velocidade, existe uma velocidade ideal para cada gerador eólico, na qual a potência geral é máxima. Abaixo dessa velocidade, a potência gerada é baixa devido a falta de energia cinética do vento. Em velocidades muito baixas, o gerador pode não iniciar a geração de energia ou gerar uma potência insuficiente para atender à demanda, no caso de velocidades excessivas podem causar sobrecarga mecânica nos componentes do gerador, levando a falhas prematuras e reduzindo a vida útil do equipamento.

As simulações realizadas demonstram a importância de dimensionar corretamente um gerador eólico e de implementar sistemas de controle eficientes para garantir sua operação segura e otimizada. Ao compreender a influência da velocidade do vento e da carga no desempenho do gerador, é possível tomar decisões mais precisas sobre a seleção do equipamento, a instalação e a manutenção do sistema eólico.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

A análise desenvolvida neste trabalho teve como objetivo, aprofundar o conhecimento e realizar a análise da viabilidade do uso de Geradores Síncronos de Ímã Permanente (GSIP) na conversão de energia eólica em energia elétrica, com o intuito de avaliar a viabilidade e potencial para expansão da matriz energética renovável. As simulações computacionais foram fundamentais para modelar e explorar o tema e a capacidade do sistema, bem como para atingir velocidade, tensão, corrente e torque ideal.

O entendimento do princípio de funcionamento do GSIP, possibilitou uma visão abrangente do funcionamento e composição desse gerador. A observação de seus aspectos construtivos, estrutura do rotor e estator, contribuiu para o entendimento de como esses elementos influenciam no funcionamento do gerador. Os resultados alcançados mostram que os GSIP apresentam um conjunto de vantagens que os tornam altamente atraentes para a aplicação em sistemas eólicos. A alta densidade de potência, eficiência elevada, robustez e a rápida resposta dinâmica são características marcantes desses geradores.

As simulações computacionais evidenciaram a alta eficiência, em diferentes velocidades do vento e com diferentes cargas adicionadas, os GSIP são capazes de operar de forma estável e eficiente. Comparados a outras tecnologias de energia eólica, como os geradores de indução, demonstra vantagens em termo de eficiência, densidade de potência e robustez. O seu menor custo de manutenção e maior eficiência ao longo de sua vida útil, são fatores que compensam o investimento.

REFERÊNCIAS

1. PASSINI, Aline Ferrão Custodio et al. A IMPORTÂNCIA DO USO CONSCIENTE E EFICIENTE DA ENERGIA ELÉTRICA EM RESIDÊNCIAS. *Engenharia Urbana em Debate*, v. 2, n. 2, p. 36-50, 2021.
2. PAGEL, UR. Análise dos principais desafios ao desenvolvimento das energias renováveis no Brasil. Disponível em: <https://engenhariaedesenvolvimentosustentavel.ufes.br/sites/engenhariaedesenvolvimentosustentavel.ufes.br/files/field/anexo/artigo_analise_dos_principais_desafios_2.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2024.
3. SILVA, Camilla Martins Ramos da. Segurança energética, diversificação estratégica e energias renováveis: um estudo comparado entre Brasil e Japão. 2018.
4. GWEC. Global Wind Report 2023. Disponível em: <<https://gwec.net/globalwindreport2023/>>. Acesso em: 5 abr. 2024
5. GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista Usp*, n. 72, p. 6-15, 2007.
6. LOSEKANN, Luciano; HALLACK, Michelle Carvalho Metanias. Novas energias renováveis no Brasil: desafios e oportunidades. 2018.
7. QUEIROZ, Eduardo Henrique Moreira de. Turbinas eólicas: evolução da análise aerodinâmica e desafios encontrados. 2021.
8. DINIZ NETO, Carlos Menezes. Energia eólica: uma revisão bibliográfica com ênfase na tecnologia dos aerogeradores. BS thesis. 2014.
9. ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Energia Eólica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br>. Acesso em 30 de setembro de 2023.

10. Parques Eólicos Lagoa dos Ventos . Disponível em: <<https://afaplan.com/projecto?id=352>>. Acesso em: 3 abr. 2024.
11. ENGIE Brasil . Disponível em: <<https://www.engie.com.br/>>. Acesso em: 3 abr. 2024.
12. Complexo Eólico Santa Vitória do Palmar e Chuí . Disponível em: <<https://neutralize.itrackbrasil.com.br/complexo-eolico-santa-vitoria-do-palmar-e-chui/>>. Acesso em: 3 mar. 2024.
13. PORCIÚNCULA, Káthia Rosa da. Análise dos Impactos Ambientais Causados pela Energia Eólica: Um Estudo de Caso no Parque Eólico Cerro Chato de Santana do Livramento-RS. 2019.
14. PAULO, S.; DE, J. IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL. Disponível em: <https://epbr.com.br/wp-content/uploads/2021/02/ABEEolica_GO-Associados-V.-Final.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2024.
15. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA - The global energy authority. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: 5 abr. 2024
16. MUNDO EDUCAÇÃO. Circulação Atmosférica. Disponível em: <https://www.google.com/amp/s/mundoeducacao.uol.com.br/amp/geografia/circulacao-atmosferica.htm>. Acesso em: 20 jul. 2024.
17. CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2013.
18. SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. Modeling and analysis with induction generators. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2014.
19. MAGALHAES, A. S. et al. Parametric regression in synchronous and induction generators.

20. FRANCISCO, António M. S. Motores Eléctricos. 3. ed. rev. e atual. [S. l.]: ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2010. 192 p. v. 2.
21. JORDÃO, R. G. Máquinas Síncronas. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
22. CHAPALLAZ, J. M. et al. Manual on Motors Used as Generators. MHPG Series: Vieweg+Teubner Verlag, n. 10, 1992.
23. UMANS, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: [s.n.], 2014.
24. BOLDEA, I. Induction Machines Handbook: Transients, Control Principles, Design and Testing. [S.l.]: CRC press, 2020.
25. WEG. DT-5 – Características e Especificações de Geradores. <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>, 2020. Acesso em: 20 Dezembro 2023.
26. NIEDERLE, D. Implantação de um Gerador de Ímãs Permanentes e levantamento de suas características sob Carga Resistiva. [hidroenergia.com.br](http://www.hidroenergia.com.br), Maio 2018. Disponível em: <http://www.hidroenergia.com.br/implantacao-de-um-gerador-de-imas-permanentes-e-levantamento-de-suas-caracteristicas-sob-carga-resistiva/>. Acesso em: 01 Novembro 2023.
27. SANKARAN, C. Power quality. [S.l.]: CRC press, 2017.
28. SILVA, J. A. (2018). Análise do desempenho de geradores síncronos de ímã permanente em sistemas eólicos. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

29. PHIPPS, J. K.; NELSON, J. P.; SEN, P. K. Power quality and harmonic distortion on distribution systems. IEEE transactions on industry applications, v. 30, p. 476-484, 1994.
30. ZHANG, F.; GENG, Z.; YUAN, W. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system. IEEE transactions on power delivery, v. 2, 2001.
31. KUNDUR, P. (1994). Power system stability and control. McGraw-Hill.
32. SAY, M. G. (2002). Máquinas Elétricas. McGraw-Hill.-Outro livro de referência, com abordagens teóricas e práticas sobre máquinas elétricas.
33. BUMBY, J.R. & MARTIN, R.. (2005). Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbine. Electric Power Applications, IEE Proceedings -. 152. 1065 - 1075. 10.1049/ip-epa:20050094.
34. FERNANDES, J. P. T. et al. Genetic Algorithm Solution for Optimization of the Power Generation. IEEE: Congress on Evolutionary Computation, 2013.