

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

BRUNA DOS ANJOS DE CASTRO COSTA

**ANÁLISE DE PROJETO E DESEMPENHO DINÂMICO DO GERADOR SÍNCRONO
À RELUTÂNCIA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**



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: Bruna dos Anjos de Castro Costa

Matrícula: 20161040070147

Título do Trabalho: Análise de Projeto e Desempenho Dinâmico do Gerador Síncrono à Relutância Através de Simulação Computacional

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ 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, 06 / 04 / 2026
Local Data

Bruna dos Anjos de Castro Costa

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Bruna dos Anjos de Castro Costa

**ANÁLISE DE PROJETO E DESEMPENHO DINÂMICO DO GERADOR SÍNCRONO
À RELUTÂNCIA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Itumbiara, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C837a Costa, Bruna dos Anjos de Castro

Análise de projeto e desempenho dinâmico do gerador síncrono à relutância através de simulação computacional. / Bruna dos Anjos de Castro Costa. – Itumbiara, 2026.

59 p.: il.

Trabalho de conclusão do curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas.

1. Energias renováveis. 2. Geradores. 3. Motores síncronos. I. Título. II. Freitas, Marcos Antônio Arantes de. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.042

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684

Termo de Aprovação

Bruna dos Anjos de Castro Costa

ANÁLISE DE PROJETO E DESEMPENHO DINÂMICO DO GERADOR SÍNCRONO À RELUTÂNCIA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

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.

Aprovado em 31 de Março de 2026.

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara Orientador

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Josemar Alves dos Santos Júnior
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Avaliador

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara Avaliador

Documento assinado eletronicamente por:

- Josemar Alves dos Santos Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/04/2026 20:39:30.
- Victor Regis Bernardeli, CHEFE - CD4 - ITU-DAA, em 05/04/2026 20:17:27.
- Marcos Antonio Arantes de Freitas, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/04/2026 20:14:07.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/04/2026. 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: 763858

Código de Autenticação: 754c3fef2a



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5604 (ramal: 5604)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e me ensinaram a ser forte, e aos meus avós, que me ensinaram os valores que tenho hoje e a ter fé na vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e me conceder determinação ao longo do curso e por colocar pessoas incríveis na minha vida.

Aos meus pais, expresso minha mais profunda gratidão, cuja fé em mim era inabalável mesmo quando eu não acreditava em mim mesma. Obrigada por todo amor, respeito, sacrifício e apoio incondicional em toda a minha vida.

A minha irmã, por ser um exemplo acadêmico a ser seguido e que sempre me deu forças e me incentivou, e sempre me lembrando que eu sou mais do que eu acredito.

Ao meu companheiro, que foi a calma em meio à tempestade da minha graduação, compartilhou comigo não só sorrisos, mas também lágrimas, e mesmo distante se fez presente. Obrigada por ser meu porto seguro e minha fonte de apoio e carinho.

Aos meus amigos, pelo companheirismo, amizade, carinho, apoio, incentivo e por estarem sempre ao meu lado. Morar em uma cidade nova tendo pessoas tão incríveis ao meu lado fez com que meus dias fossem mais leves e cheios de paz interior.

Aos meus professores, expresso minha admiração e reconhecimento. Obrigada, por suas orientações, conhecimento e dedicação ao ensino que foi fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Ao meu orientador, por ser paciente e gentil. Obrigada por estar comigo nessa jornada e por não desistir de mim.

Agradeço também a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, mesmo que não diretamente mencionados. Cada gesto de apoio, palavra de encorajamento e ensinamento foi inestimável para minha formação.

RESUMO

O consumo prolongado de fontes energéticas não renováveis intensificou o aquecimento global, aumentando a preocupação em minimizar os efeitos da queima dos combustíveis fósseis. Nesse sentido, as buscas por novas fontes de energia renovável impulsionam o desenvolvimento de sistemas de geração de energia elétrica capazes de operar fora da rede, principalmente os sistemas eólicos. Este trabalho apresenta a análise e o desempenho de um gerador síncrono à relutância autoexcitado acoplado a uma turbina eólica, com ênfase na modelagem matemática e na simulação computacional no MATLAB/Simulink. É desenvolvida a fundamentação teórica, a modelagem da turbina eólica, do gerador no referencial dq, do banco de capacitores responsável pela autoexcitação e da carga elétrica. O sistema é avaliado em diferentes cenários de velocidade do vento e de carga, e os resultados evidenciam a capacidade de autoexcitação e a adaptação do sistema. Portanto, confirma-se a viabilidade do gerador síncrono à relutância autoexcitado para geração de energia eólica em sistemas isolados, destacando-se pela robustez, simplicidade construtiva e comportamento dinâmico estável.

Palavras-chave: Gerador síncrono à relutância autoexcitado. Energia eólica. Autoexcitação. Simulação computacional. Sistemas isolados.

ABSTRACT

The prolonged use of non-renewable energy sources has intensified global warming, increasing concern about minimizing the effects of fossil fuel combustion. In this context, the search for new renewable energy sources drives the development of electrical power generation systems capable of operating off-grid, especially wind systems. This work presents the analysis and performance of a self-excited synchronous reluctance generator coupled to a wind turbine, with emphasis on mathematical modeling and computational simulation in MATLAB/Simulink. The theoretical foundation is developed, along with the modeling of the wind turbine, the generator in the dq reference frame, the capacitor bank responsible for self-excitation, and the electrical load. The system is evaluated under different wind speed and load conditions, and the results demonstrate the self-excitation capability and system adaptability. Therefore, the feasibility of the self-excited synchronous reluctance generator for wind power generation in isolated systems is confirmed, highlighting its robustness, simple construction, and stable dynamic behavior.

Keywords: Self-excited synchronous reluctance generator. Wind energy. Self-excitation. Computational simulation. Isolated systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rotor do motor síncrono convencional de relutância de polos salientes.....	19
Figura 2 - Fluxo magnético em material anisotrópico.....	20
Figura 3 - Fluxo magnético nos eixos d e q.....	21
Figura 4 - Rotor de Polos Salientes	24
Figura 5 - Rotor de Barreiras de fluxo.....	24
Figura 6 - Topologia de Laminação Axial	25
Figura 7 - Gráfico da Potência de Saída da Turbina x Velocidade da Turbina.....	27
Figura 8 - Circuito equivalente ao referencial do rotor de um gerador de relutância autoexcitado. (a) eixo q (b) eixo d	29
Figura 9 - Modelo do WDSERG	33
Figura 10 - Características de Magnetização do eixo d.....	38
Figura 11 - Curva de Magnetização com capacitores de Excitação	39
Figura 12 - Modelo completo do SERG acoplado a turbina eólica.....	40
Figura 13- Subsistema de Saturação.....	40
Figura 14- Subsistema da Corrente	41
Figura 15- Subsistema de Capacitância de Excitação	41
Figura 16 - Subsistema de Carga RL.....	42
Figura 17- Subsistema de Torque Eletromagnético	42
Figura 18 - Subsistema de Velocidade do Rotor	43
Figura 19- Subsistema q-d para abc	43
Figura 20 - Modelo de Turbina Eólica	44
Figura 21 - WDSERG $V_w=10$ m/s sem carga.....	45
Figura 22 - WDSERG $V_w=10$ m/s com carga ($R=400$ ohms e $L=30$ mH)	47
Figura 23 - WDSERG redução de Velocidade de 10 m/s para 8 m/s com carga ($R=400$ ohms e $L=30$ mH).....	49
Figura 24 - WDSERG Aumento de Velocidade de 10 m/s para 10,2 m/s com carga ($R=400$ ohms e $L=30$ mH).....	51
Figura 25 - WDSERG com Velocidade de 10 m/s fixa e variação de carga de 400Ω e 30mH para 300Ω e 105mH	54
Figura 26 – Ampliação dos gráficos do WDSERG operando sem carga.....	62
Figura 27 - Ampliação dos gráficos do WDSERG operando com carga ($R = 400 \Omega$ e $L = 30$ mH).....	63

Figura 28 - Ampliação dos gráficos do WDSERG frente à redução da velocidade do vento (10 m/s para 8 m/s) com carga.....	64
Figura 29 - Ampliação dos gráficos do WDSERG com o aumento da velocidade do vento (10 m/s para 10,2 m/s) com carga. Em (a), visão geral da tensão do SERG e corrente do estator; em (b), detalhe do aumento na amplitude da tensão	65
Figura 30 - Vista ampliada dos gráficos do WDSERG durante variação de carga (de 400 Ω e 30 mH para 300 Ω e 105 mH)	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros da Máquina à relutância	37
Tabela 2 - Parâmetros da Turbina Eólica	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GIAE	Gerador de Indução Autoexcitado
SERG	Gerador Síncrono à Relutância Autoexcitado
SynRG	Gerador Síncrono à Relutância
WDSERG	Gerador Síncrono à Relutância Autoexcitado Movido pelo Vento
SynRM	Motor Síncrono à Relutância
MI	Motor de Indução
SRM	Motor de Relutância Variável Comutado
WECS	Sistema de Conversão de Energia Eólica

LISTA DE SÍMBOLOS

d	Eixo Direto
q	Eixo de Quadratura
L_d	Indutância Eixo Direto
L_q	Indutância Eixo Quadratura
X_d	Reatância Eixo Direto
X_q	Reatância Eixo Quadratura
P_m	Potência Mecânica de Saída da Turbina (W)
C_p	Coeficiente de Desempenho
λ	Razão da Velocidade da Ponta da Turbina
β	Ângulo de Passo da pá (rad)
ρ	Densidade do Ar (kg/m^3)
A	Área Varrida da Pá da Turbina (m^2)
V_w	Velocidade do Vento (m/s)
ω_t	Velocidade Angular da Turbina (rad/s)
R	Raio da Pá da Turbina (m)
T_m	Torque Mecânico da Turbina (N.m)
V_{qs}	Tensão do Eixo q (V)
V_{ds}	Tensão do Eixo d (V)
i_{ds}	Corrente do Estator do Eixo d (A)
i_{qs}	Corrente do Estator do Eixo q (A)
R_s	Resistência do Estator (Ω)
L_{mq}	Indutância Mútua do Estator Eixo q (H)
L_{md}	Indutância Mútua do Estator Eixo d (H)
L_{ls}	Indutância de Vazamento do Estator (H)
ϕ_{qs}	Fluxo do Estator Eixo q (Wb)
ϕ_{ds}	Fluxo do Estator Eixo d (Wb)
ω_r	Velocidade do Rotor em Radianos Elétricos (rad/s)
T_e	Torque Eletromagnético (N.m)
P	Número de Polos da Máquina
B	Constante de Atrito do Sistema
J_t	Inércia Concentrada (kg.m^2)

i_{dC}	Corrente do Eixo d Puxada pelo Capacitor (A)
i_{qC}	Corrente do Eixo q Puxada pelo Capacitor (A)
i_{dL}	Corrente do Eixo d Puxada pela Carga (A)
i_{qL}	Corrente do Eixo q Puxada pela Carga (A)
i_{ds}	Corrente do Eixo d do Estator (A)
i_{qs}	Corrente do Eixo q do Estator (A)
V_m	Tensão Magnetizante (V)
$L_d(i_{ds})$	Indutância no Eixo Direto (H)
V_c	Tensão do Capacitor (V)
P_G	Potência do Gerador (hp)
n	Velocidade Nominal (rpm)
f	Frequência Nominal (Hz)
T_{base}	Torque Base (N.m)
I_{base}	Corrente Base (A)
C_{cri}	Capacitância Crítica (F)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	16
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. OBJETIVO GERAL	17
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. INTRODUÇÃO À MÁQUINA SÍNCRONA À RELUTÂNCIA	19
2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	20
2.3. GERADOR SÍNCRONO À RELUTÂNCIA AUTOEXCITADO (SERG).....	22
2.4. TOPOLOGIAS DE ROTOR	23
2.4.1. TOPOLOGIA DE POLO SALIENTE	23
2.4.2. TOPOLOGIA DE BARREIRAS DE FLUXO.....	24
2.4.3. TOPOLOGIA DE LAMINAÇÕES AXIAIS	24
3. METODOLOGIA	26
3.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DA TURBINA EÓLICA	26
3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA DO SERG	28
3.2.1. EQUAÇÕES DE TENSÃO.....	28
3.2.2. EQUAÇÃO DE TORQUE ELETROMAGNÉTICO.....	30
3.2.3. EQUAÇÃO DE ACOPLAMENTO	30
3.2.4. CAPACITÂNCIA DE EXCITAÇÃO E MODELO DE CARGA	30
3.3. SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA PROPOSTO.....	32
3.4. CONDIÇÃO DE AUTOEXCITAÇÃO DO GERADOR SERG	34
3.5. DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE CAPACITORES DE EXCITAÇÃO	35
4. SIMULAÇÃO	37
4.1. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO	37

4.1.1.	SERG	37
4.1.2.	TURBINA EÓLICA.....	38
4.1.3.	BANCO DE CAPACITORES	38
4.2.	SUBSISTEMAS DA SIMULAÇÃO.....	39
5.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	45
5.1.	WDSERG EM VELOCIDADE DO VENTO CONSTANTE.....	45
5.2.	WDSERG EM VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DO VENTO	49
5.2.1.	DIMINUIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO.....	49
5.2.2.	AUMENTO DA VELOCIDADE DO VENTO	51
5.3.	WDSERG EM VARIAÇÃO DE CARGA	53
6.	CONCLUSÃO	57
7.	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – VELOCIDADE DO VENTO 10 M/S SEM CARGA.....	62
	APÊNDICE B – VELOCIDADE DO VENTO 10 M/S COM CARGA.....	63
	APÊNDICE C – REDUÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO PARA 8 M/S.....	64
	APÊNDICE D – AUMENTO DA VELOCIDADE DO VENTO PARA 10,2 M/S	65
	APÊNDICE E – VARIAÇÃO DE CARGA	67

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

A exploração das fontes de combustíveis fósseis por um longo período de tempo tem contribuído significativamente para o aquecimento global, tornando-se uma ameaça ambiental global. Para tentar mitigar os efeitos das mudanças climáticas, devido à queima de combustíveis fósseis, e para atender à crescente demanda de energia, têm surgido muitas pesquisas investigativas envolvendo a geração de energia a partir de fontes renováveis. Assim sendo, a exploração de fontes renováveis de energia, como hídrica, solar, eólica e geotérmica, ganhou atenção mundial (Ferraz, 2002; Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016).

O uso de gerador de indução autoexcitado (GIAE) em sistemas eólicos isolados ganhou destaque nos últimos anos. Em grande parte, o amplo emprego dessa máquina deve-se às suas vantagens, se comparadas aos geradores síncronos convencionais, que incluem: construção simples, ausência de escovas, robustez pelo fato de possuir um rotor gaiola de esquilo. Além disso, os geradores de indução autoexcitados têm custo inicial e de manutenção relativamente baixos, autoproteção contra sobrecargas excessivas e contingências de curto-circuito (A. I. ALOLAH, 1991). Outro aspecto relevante é que os GIAE não empregam fontes externas de corrente contínua para excitação e regulação de tensão e têm melhores desempenhos transitórios (Kuo, et al., 2002).

Em contrapartida, existem desvantagens que oneram o uso dos GIAE, das quais podem ser citadas: apresentam uma pobre regulação de tensão e frequência sob condições variáveis de velocidade e carga da máquina principal; sua frequência de saída e tensão gerada são dependentes da velocidade do motor principal, daí a necessidade de estabilização de frequência e tensão e circuitos de controle, que invariavelmente aumentam o custo de instalação (Obe, et al., 2023) (Abu-Elhaija, 2006).

Frente às desvantagens dos geradores de indução e dos geradores síncronos, a comunidade científica vem propondo e estudando máquinas especiais para o processo de geração de energia. Nesse cenário, outra máquina autoexcitada que tem se tornado competitiva para a geração eólica, sobretudo para eletrificação rural, é o gerador síncrono à relutância autoexcitado (SERG) (Adjei-Frimpong, et al., 2025).

Os motores à relutância são máquinas, cujo funcionamento baseia-se exclusivamente no princípio de relutância magnética. Geralmente, estas máquinas suprimem os mecanismos de excitação eletromagnética ou ímãs permanentes, comuns em máquinas síncronas,

proporcionando melhores características e maior rendimento. Os enrolamentos do estator são similares aos enrolamentos de qualquer máquina convencional, síncrona ou assíncrona (Ferraz, 2002).

Por outro lado, o gerador síncrono à relutância possui estrutura simples e robusta, exigindo baixa manutenção e produzindo altos rendimentos. Estas vantagens fizeram com que estas máquinas se destacassem e permitiram maior controle em aplicações de velocidade variável, ideal para setores de energia renovável. Para melhorar ainda mais o desempenho da máquina síncrona à relutância, também houve melhorias nos projetos eletromagnéticos que trouxeram diferentes configurações geométricas do rotor. Por causa desses projetos aprimorados, a máquina síncrona à relutância pode competir favoravelmente com a máquina de indução e as máquinas síncronas (Adjei-Frimpong, et al., 2025).

Nesse sentido, os geradores síncronos à relutância, do inglês Synchronous Reluctance Generator (SynRG), tornam-se viáveis em aplicações que exijam variações de velocidades, elevados níveis de conjugados e robustez. Portanto, em aplicações com velocidades variáveis, estas máquinas produzem elevados níveis de densidade de conjugado com baixa magnitude de oscilação, ausência de perdas no rotor e melhor eficiência (Deepu Vijay M, 2018).

Diante disso, neste trabalho será apresentado o uso do gerador síncrono à relutância autoexcitado (SERG) no aproveitamento de energia eólica, com o modelo matemático detalhado da máquina e a implementação da simulação computacional com o uso do MATLAB/Simulink. Será simulado o sistema completo com um modelo típico de turbina eólica integrado ao Gerador Síncrono à Relutância e, com isso, a plataforma é utilizada para investigar o comportamento diante de diferentes cenários de velocidade do vento e condições de carga.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma simulação computacional para realizar estudos referentes a diferentes parâmetros do SERG, sendo operado em regime isolado da rede elétrica e sendo excitado apenas por um banco de capacitores.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Embasamento teórico por meio de levantamento bibliográfico para identificar a metodologia disponível na literatura para a simulação das máquinas síncronas à relutância;
- Elaboração do modelo matemático que represente o comportamento dinâmico do gerador síncrono à relutância;
- Implementação do modelo matemático no ambiente computacional MATLAB/Simulink;
- Análise e interpretação dos resultados das simulações em diferentes cenários de velocidade e carga.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Neste trabalho, será analisada a máquina SynRG operando em regime de autoexcitação que será denominada SERG, e quando acoplada à turbina eólica será referida como WDSERG. Dessa forma, esse trabalho de conclusão de curso está organizado da seguinte maneira: a introdução, apresenta toda a problemática do uso de fontes poluidoras e a inserção do uso de energias mais limpas e renováveis. O capítulo de máquina síncrona à relutância apresenta o contexto histórico de desenvolvimento, e seu princípio de funcionamento e suas vantagens e desvantagens no decorrer da história. Já em metodologia, é apresentada toda a modelagem matemática do gerador síncrono à relutância autoexcitado usado neste trabalho. Posteriormente, no capítulo de simulação, são apresentadas as montagens dos blocos no Simulink/Matlab. Com isso, vem a apresentação dos resultados das simulações sendo trabalhados com diferentes cenários para avaliar o desempenho do gerador. Por último, a conclusão, que fecha todo o trabalho com a análise de tudo obtido.

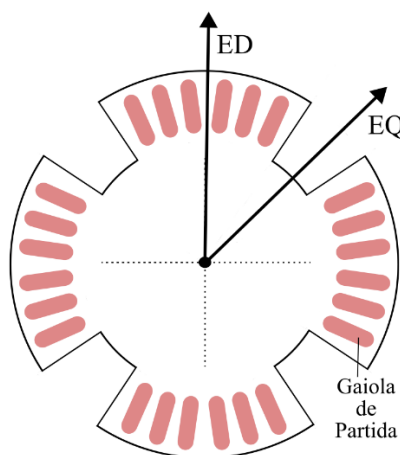
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. INTRODUÇÃO À MÁQUINA SÍNCRONA À RELUTÂNCIA

No início dos anos 1960, iniciaram-se estudos acerca da teoria e do desempenho das máquinas de relutância polifásica, e isso abriu caminho para um aprofundamento sobre a máquina. A maioria dos estudos realizados, no entanto, concentrou-se no motor de relutância, até o início dos anos 1980, quando foi relatado que a máquina de relutância também poderia ser operada como um gerador de relutância autoexcitado (SERG), conceito associado ao gerador síncrono à relutância (SynRG) em regime de autoexcitação (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016).

Os primeiros motores síncronos à relutância possuíam uma construção simples, na qual o estator era essencialmente igual ao da máquina de indução, e o rotor apresentava polos salientes, sem enrolamento de excitação. Com isso, o aspecto construtivo era simples, robusto, confiável e de baixo custo de fabricação. Contudo, devido ao seu acionamento ser realizado diretamente na rede ou através de inversores de malha aberta, e o seu rotor projetado com gaiola de partida, resultou em um desempenho inferior quando comparado a outros tipos de motores (Ferraz, 2002).

Figura 1 - Rotor do motor síncrono convencional de relutância de polos salientes



Fonte: Ferraz, 2002 (adaptado)

Com a acessibilidade dos inversores de frequência, surgiu um interesse renovado nas máquinas síncronas à relutância (SynRM). No entanto, com o advento dos ímãs permanentes de terras raras e as vantagens inerentes a essa tecnologia, o motor síncrono à relutância foi novamente suprimido por tecnologias mais modernas. Contudo, entre 2008 e 2010, uma anomalia nos preços de terras raras, devido ao monopólio da China, fez com que os preços disparassem mais de 300%, com grandes oscilações de valor. O custo caiu desde 2011, porém

com a incerteza do mercado emergente de terras raras o SynRM ganhou destaque em novos estudos (Donaghy-Spargo, 2016).

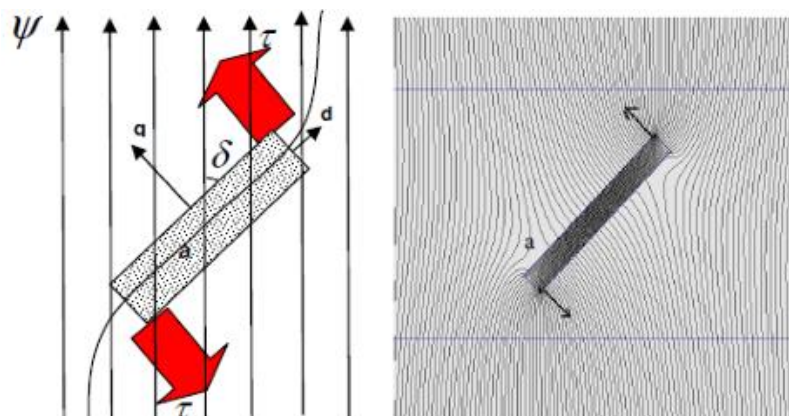
O SynRM normalmente é equipado com um rotor simples sem enrolamentos, de polo saliente, laminado e funcionando de forma síncrona. As perdas do rotor são minimizadas, o que melhora a eficiência. Embora os SynRM tenham sido utilizados principalmente como motor, as características mencionadas são desejáveis para geradores, por essa razão, sua construção mais simples e sem escovas torna o uso como gerador uma alternativa potencial em aplicações como usinas hidrelétricas de pequena escala ou usinas eólicas (Pyrhönen, et al., 2016) (Moncada, et al., 2014).

2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O SynRM é uma máquina elétrica cujo funcionamento é realizado pela variação da relutância magnética do circuito, não utilizando enrolamentos ou ímãs no rotor. O torque eletromagnético é produzido pela tendência natural do fluxo magnético de percorrer o caminho de menor relutância, o que diferencia este tipo de motor dos motores síncronos de ímãs permanentes e dos motores de indução (MI) (Matos, 2014).

O princípio de funcionamento baseia-se na existência de variações de relutância no espaço de ar, de modo que a oposição à passagem do fluxo magnético é mínima ao longo do eixo direto (d), e máxima ao longo do eixo eletricamente perpendicular, chamado eixo de quadratura (q). Assim, diz-se que o rotor é magneticamente anisotrópico. A tendência do eixo direto de se alinhar com o eixo do campo magnético rotativo fornecido pelo estator forma a base para o funcionamento desta máquina (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016).

Figura 2 - Fluxo magnético em material anisotrópico



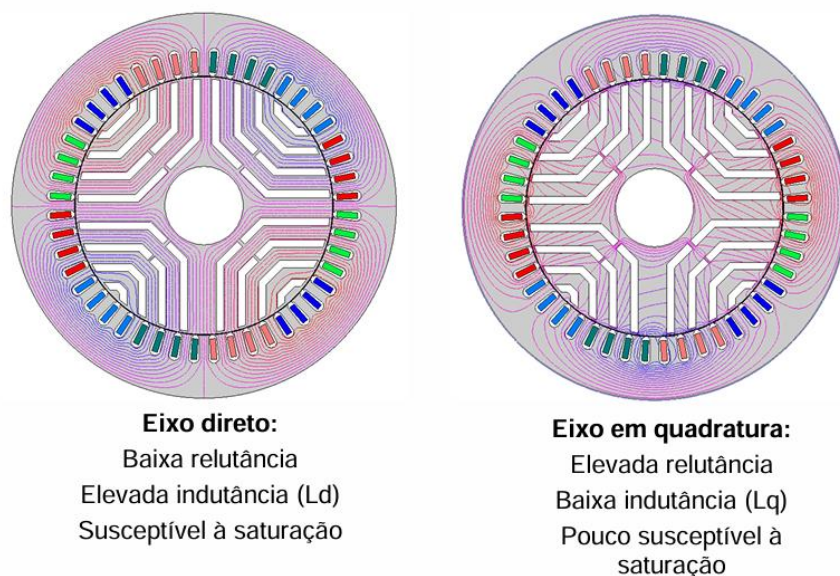
Fonte: (Nau, 2017)

Quando o estator é alimentado por um sistema trifásico equilibrado, cria-se uma força magnetomotriz girante no entreferro. O campo magnético resultante tende a posicionar o rotor de modo que a relutância do circuito magnético seja mínima, levando-o a girar em sincronismo com o campo aplicado. O sincronismo é, portanto, alcançado pelo conjugado de relutância desenvolvido devido à interação entre o campo girante do estator e a anisotropia magnética do rotor (Martins, 2003; Ferraz, 2002).

A produção de conjugado no motor síncrono de relutância ocorre sempre que o eixo de menor relutância do rotor não se encontra alinhado com o campo magnético do estator. Esse desalinhamento é caracterizado pelo chamado ângulo de carga, que depende das condições mecânicas da máquina, como a inércia, e do conjugado da carga aplicada. Quanto maior for a diferença entre as indutâncias ou reatâncias associadas aos eixos direto e de quadratura, maior será o conjugado eletromagnético desenvolvido (Matos, 2014).

O desempenho do SynRM está fortemente relacionado com o fator de saliência, definida pela relação entre as indutâncias síncronas dos eixos direto (L_d) e de quadratura (L_q), ou, de forma equivalente, entre as reatâncias X_d e X_q . Projetos de rotores com barreiras de fluxo buscam maximizar essa relação, otimizando o aproveitamento da energia reativa e melhorando a eficiência da máquina, tornando o motor síncrono de relutância competitivo em relação ao motor de indução convencional (Santos Jr, 2018) (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016).

Figura 3 - Fluxo magnético nos eixos d e q



Fonte: (Nau, 2017)

Para aplicações com controle de velocidade, o rotor do SynRM deve apresentar elevada razão de saliência, tipicamente situada entre 6 e 10, a fim de garantir desempenho comparável ao de motores de indução de mesma potência. Configurações simples de rotor, derivadas de motores de indução do tipo gaiola de esquilo, apresentam razões de saliência reduzidas e, conseqüentemente, desempenho limitado, sendo necessárias geometrias mais elaboradas para maximizar a diferença entre L_d e L_q (Pyrhönen, et al., 2016).

A inexistência de enrolamentos de excitação no rotor elimina as perdas por efeito Joule nessa parte da máquina, contribuindo para menores níveis de aquecimento e maior durabilidade dos componentes. Embora a magnetização do rotor, realizada pelo estator, resulte em maior absorção de corrente reativa, o balanço global das perdas mostra-se favorável, conduzindo, em geral, a rendimentos superiores aos observados em motores de indução convencionais (Matos, 2014).

2.3. GERADOR SÍNCRONO À RELUTÂNCIA AUTOEXCITADO (SERG)

Com as características vantajosas da máquina SynRM, como a construção mais simples, robustez, ausência de escovas coletoras de corrente, baixo custo e operação livre de manutenção, aliadas ao interesse em utilizar fontes renováveis de energia no cenário mundial atual, vem sendo influenciada a sua utilização como gerador síncrono à relutância autoexcitado (SERG). Portanto, com a união dos dois interesses e a capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica em uma ampla faixa de velocidades, o SynRM tornou-se candidato ideal para a conversão de geração eólica.

O SERG apresenta o mesmo processo de autoexcitação da máquina de indução, no qual a autoexcitação é iniciada através de capacitores adequados que são conectados nos terminais do estator. A autoexcitação supera a necessidade de uma fonte de alimentação externa para produzir o campo magnético de excitação. À medida que o rotor gira, o fluxo residual no rotor induz uma pequena quantidade de força eletromotriz nos enrolamentos do estator. Com capacitores adequados conectados entre os terminais do estator, uma pequena quantidade de corrente flui nos enrolamentos do estator, o que então aumenta o fluxo magnético na máquina. A tensão, então, se acumula dessa forma até que o núcleo magnético fique saturado. Com isso, duas condições devem ser satisfeitas para que a autoexcitação e o acúmulo de tensão ocorram: (i) o rotor deve ter magnetismo residual suficiente e (ii) o valor da capacitância deve ser

adequado. A indutância magnetizante é um fator importante para o acúmulo de tensão e para a estabilização da tensão gerada, tanto em condições de carga quanto em vazio (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016) (Mosaad Mohiedden ALI, 2016).

Uma grande vantagem desse tipo de gerador é que, para cargas dentro de sua capacidade de carga, a frequência da tensão desenvolvida tem uma relação bem definida com o número de polos e a velocidade de operação do gerador (Obe, et al., 2023).

Nesse sentido, os SERG além de serem simples, robustos e baratos, possuem vantagens em relação à baixa perda no núcleo, baixo ruído e baixa perda de cobre no rotor. Eles apresentam uma relação bem definida entre a velocidade do rotor e a frequência de saída e não possuem torque de engrenagem, o que permite alcançar um comportamento de partida suave em baixa velocidade do vento (Mosaad Mohiedden ALI, 2016).

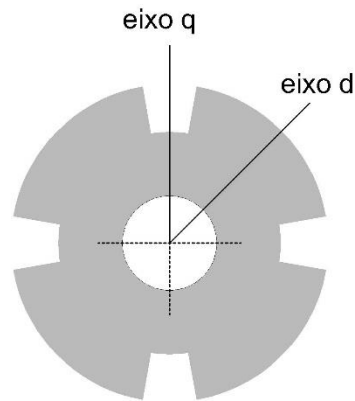
2.4. TOPOLOGIAS DE ROTOR

Os aspectos construtivos do SynRM são bastante conhecidos devido à sua semelhança com qualquer outro motor, sendo modificado apenas o rotor, devido à necessidade da indução eletromagnética e aos eixos direto e de quadratura. Com base nisso, serão vistas algumas topologias principais.

2.4.1. TOPOLOGIA DE POLO SALIENTE

O rotor de polo saliente é utilizado mais em motores de relutância variável comutado (SRM), possui estrutura de fácil fabricação e uma boa robustez, porém possui baixos valores de saliência e problema de vibração por sua distribuição desigual. Com isso, o desempenho dele, quando comparado ao motor de indução é ruim (Ferraz, 2002) (Matos, 2014) (Moncada, et al., 2014).

Figura 4 - Rotor de Polos Salientes

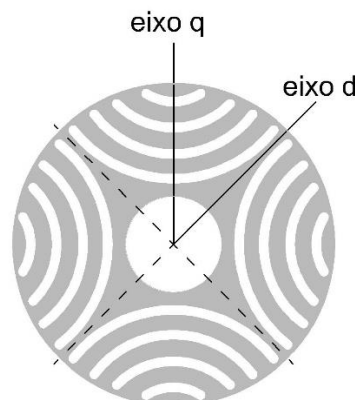


Fonte: Matos, 2014 (adaptado)

2.4.2. TOPOLOGIA DE BARREIRAS DE FLUXO

O rotor de barreiras de fluxo é preenchido por ar ao longo do eixo q, esse método permite que apresente bons índices de saliência com valores entre cinco e dez, obtendo um bom desempenho, além disso, é o modelo mais disponível no mercado (Moncada, et al., 2014). Pesquisas recentes demonstram que um projeto otimizado dessas barreiras, aliado ao controle do ângulo da corrente não apenas maximiza a potência de saída, mas também atua ativamente na redução da oscilação do torque (Rezk, et al., 2021).

Figura 5 - Rotor de Barreiras de fluxo



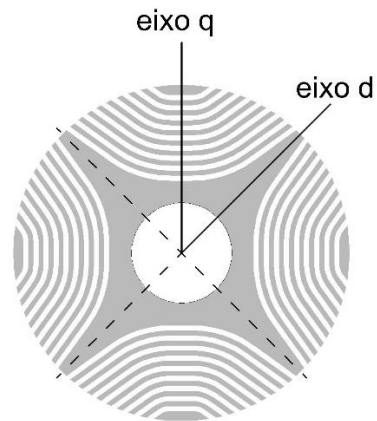
Fonte: Matos, 2014 (adaptado)

2.4.3. TOPOLOGIA DE LAMINAÇÕES AXIAIS

O rotor axial laminado é um conjunto de lâminas sobrepostas e dispostas axialmente em torno do veio e sempre isoladas entre si, suportadas pelo aparafusamento das mesmas na secção central do veio, que assegura sua fixação. Essa configuração pode atingir relações de saliência

entre 10 e 20, porém a sua fabricação é de difícil execução e devido ao aparafusamento afeta a resistência e limita a velocidade angular máxima da máquina (Moncada, et al., 2014) (Matos, 2014).

Figura 6 - Topologia de Laminação Axial



Fonte: Matos, 2014 (adaptado)

3. METODOLOGIA

3.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DA TURBINA EÓLICA

A energia eólica é uma das principais fontes de energia renovável do planeta e no Brasil ela ocupa o segundo lugar de geração de energia, ficando atrás das usinas hidrelétricas. Nos últimos anos, houve um crescimento no aproveitamento da geração eólica. (Meng, et al., 2012). A potência instalada aumentou de 7,5 GW em 1997 para mais de 1245 GW em junho de 2025 em todo o mundo, de acordo com a World Wind Energy Association (WWEA). O crescimento significativo se deve ao processo mundial de transição energética em busca de fontes mais limpas e que garantam maior independência energética, considerando que o vento é um recurso genuinamente nacional (Castro, et al., 2019).

Diante desse contexto, é fundamental compreender a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica por meio da modelagem matemática da turbina eólica. Assim sendo, a potência mecânica de saída da turbina (em Watts) é dada por:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A V_w^3 \quad (W) \quad (1)$$

Em que C_p é o coeficiente de desempenho da turbina, λ é a razão de velocidade da ponta (TSR), β é o ângulo de passo da pá, ρ é a densidade do ar em kg/m^3 , A é a área varrida da turbina em m^2 , e V_w é a velocidade do vento em m/s . O coeficiente de desempenho (C_p) da turbina é uma medida de quanta potência mecânica pode ser obtida do vento, ou seja, a eficiência aerodinâmica da turbina. Ele representa a fração da energia cinética do vento que é convertida em energia mecânica. É uma função da razão velocidade da ponta (λ) e do ângulo de inclinação da lâmina (β) dados por:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_1}} + C_6 \lambda \quad (2)$$

Em que

$$\lambda_1 = \frac{(\beta^3 + 1)(\lambda + 0,08 \beta)}{\beta^3 - 0,028 \beta - 0,035 \lambda + 1} \quad (3)$$

Os coeficientes C_1 a C_6 são $C_1=0,5176$; $C_2=116$; $C_3=0,4$; $C_4=5$; $C_5=21$; $C_6=0,0068$. A TSR é a razão entre a velocidade linear da pá da turbina e a velocidade do vento:

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{V_w} \quad (4)$$

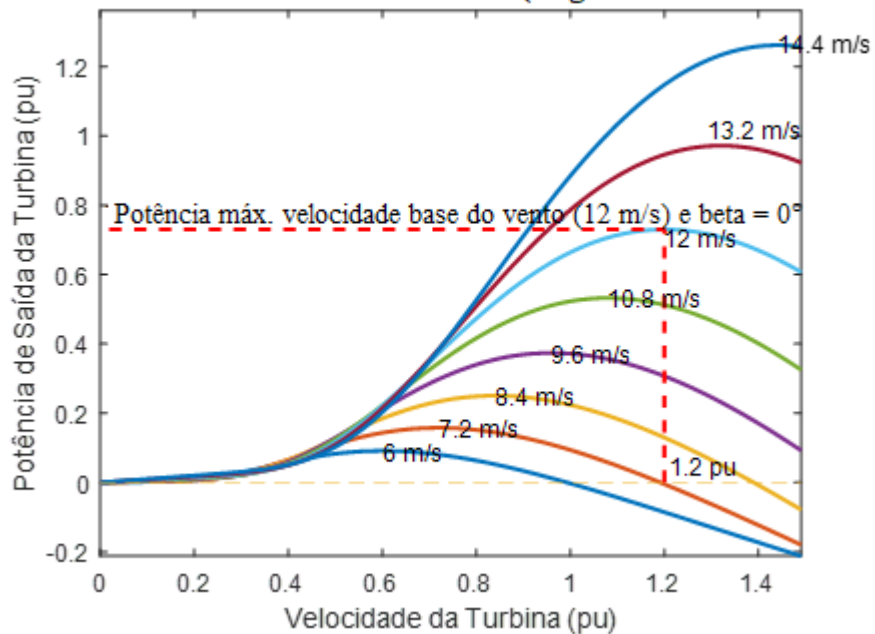
Em que ω_t é a velocidade angular da turbina em rad/s, e R é o raio da pá da turbina. O torque mecânico desenvolvido pela turbina eólica é dado como:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_t} = \frac{0,5 C_p(\lambda, \beta) \rho A V_w^3}{\omega_t} \quad (5)$$

As características de potência da turbina para diferentes valores de velocidade do vento e para o ângulo de inclinação da pá especificado (β) são mostrados a seguir:

Figura 7 - Gráfico da Potência de Saída da Turbina x Velocidade da Turbina

Características de Potência da Turbina (Ângulo de Passo Beta = 0°)



Fonte: autora

3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA DO SERG

Seguindo as modelagens matemáticas, para o SERG adotam-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

- i. Somente a indutância de magnetização do eixo direto será afetada pela saturação magnética
- ii. A perda do núcleo é insignificante
- iii. Serão insignificantes os harmônicos espaciais no fluxo de entreferro, e os harmônicos de tempo na força eletromotriz e nas formas de onda de corrente.

3.2.1. EQUAÇÕES DE TENSÃO

As equações são baseadas no modelo matemático dinâmico da máquina síncrona de relutância no referencial d-q síncrono, o que simplifica a análise ao tratar as indutâncias variáveis no tempo como constantes, facilitando a simulação do comportamento dinâmico do sistema (Santos Jr, 2018). São obtidas a partir do modelo da máquina síncrona de campo enrolado, com a eliminação dos termos associados ao circuito de campo, uma vez que o rotor não possui condutores ou excitação independente (Pyrhonen, et al., 2008) (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016). Com isso, as equações podem ser escritas da seguinte forma:

$$V_{qs} = -r_s i_{qs} + \omega_r \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \quad (6)$$

$$V_{ds} = -r_s i_{ds} - \omega_r \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \quad (7)$$

$$\Phi_{qs} = -L_q i_{qs} \quad (8)$$

$$\Phi_{ds} = -L_d i_{ds} \quad (9)$$

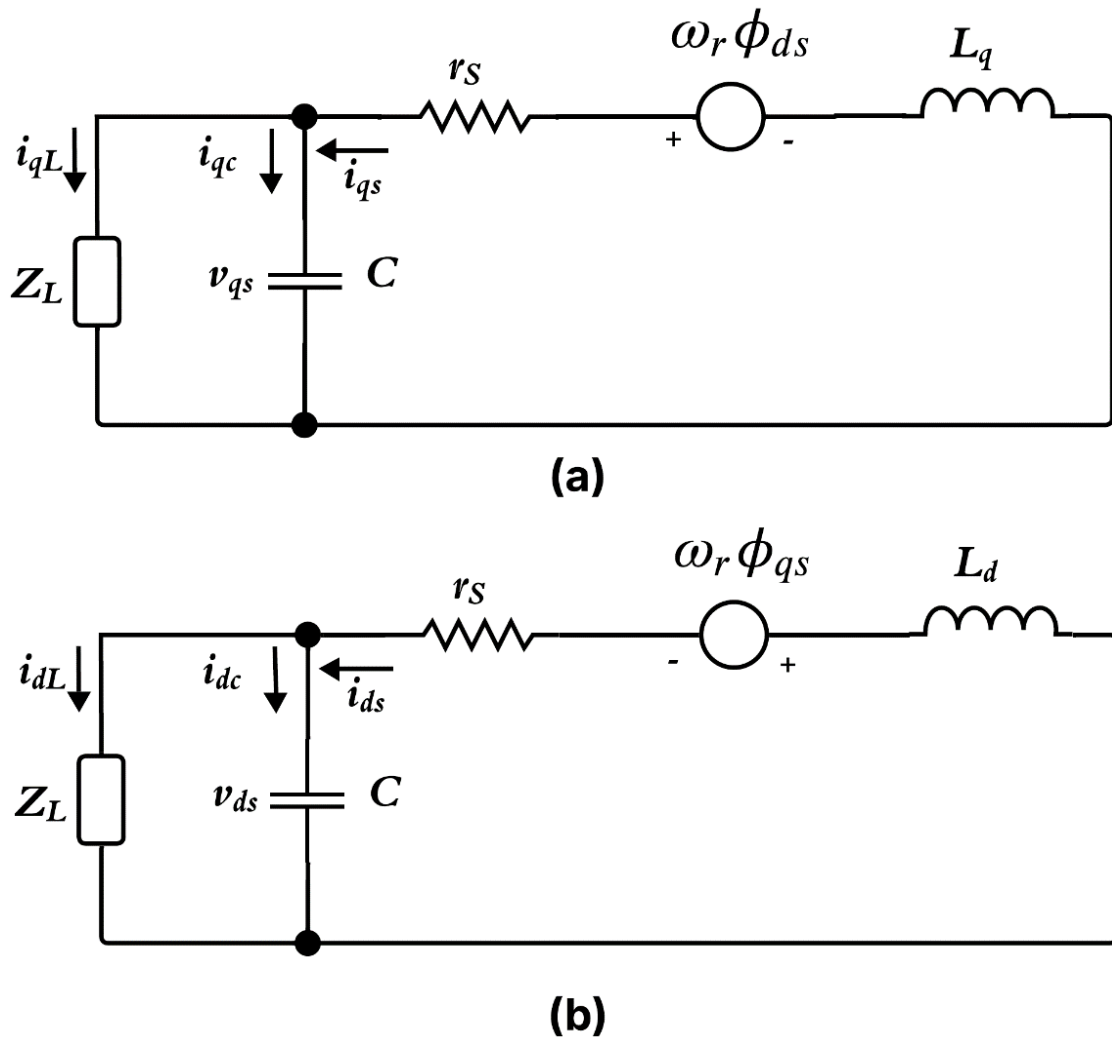
$$L_q = L_{ls} + L_{mq} \quad (10)$$

$$L_d = L_{ls} + L_{md} \quad (11)$$

Em que: V_{qs} (V_{ds}) é a tensão do estator no eixo q (eixo d), i_{qs} (i_{ds}) é a corrente do estator no eixo q (eixo d), r_s é a resistência do estator, L_q (L_d) é a indutância do estator no eixo q (eixo d), L_{mq} (L_{md}) é a indutância mútua do estator no eixo q (eixo d), L_{ls} é a indutância de vazamento do estator, ϕ_{qs} (ϕ_{ds}) é a ligação de fluxo do estator no eixo q (eixo d), ω_r é a velocidade elétrica do rotor e $\frac{d}{dt}$ é o operador diferencial.

O circuito equivalente q-d do gerador de relutância sem enrolamento amortecedor no rotor conforme as equações (6) e (9) é mostrado abaixo. Como um gerador está sendo considerado aqui, a direção da corrente do estator é considerada fora dos terminais do estator da máquina.

Figura 8 - Circuito equivalente ao referencial do rotor de um gerador de relutância autoexcitado. (a) eixo q (b) eixo d



3.2.2. EQUAÇÃO DE TORQUE ELETROMAGNÉTICO

O Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador pode ser escrito como:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) [\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}] \quad (12)$$

Se substituirmos a (8) e (9) na (12), obteremos:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) [(L_q - L_d) i_{qs} i_{ds}] \quad (13)$$

Sendo P o número de polos do rotor do SERG. Com a direção de corrente assumida pelo estator, essa expressão de torque é positiva para funcionamento de gerador e negativa para funcionamento de motor.

3.2.3. EQUAÇÃO DE ACOPLAMENTO

No sistema de conversão de energia eólica, a turbina eólica e o gerador elétrico encontram-se mecanicamente acoplados por meio de um sistema de transmissão, com o intuito de converter as velocidades de rotação mais baixas da turbina eólica em uma alta velocidade no lado do gerador, para produção de energia elétrica. Dessa forma, a dinâmica entre os dois passa a ser determinada pelo equilíbrio entre eles (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016). Portanto, a equação de acoplamento que é a relação entre a velocidade do gerador e a velocidade da ponta da pá da turbina é dada:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J_t} \left(T_m - T_e - \frac{2}{P} B \omega_r \right) \quad (14)$$

Onde B é a constante de atrito do sistema. A turbina eólica é representada como uma única inércia concentrada, J_t , na equação (14). Isso inclui as massas inerciais das pás da turbina, da caixa de câmbio e do gerador, referidos ao lado do gerador.

3.2.4. CAPACITÂNCIA DE EXCITAÇÃO E MODELO DE CARGA

Os sistemas de geração síncrona à relutância autoexcitados precisam de um banco de capacitores conectados ao terminal do estator, paralelo à carga. Esse banco de capacitores é

responsável por fornecer a magnetização da máquina e estabelecer tensão nos terminais do gerador em regime isolado. As equações que relacionam as tensões terminais com as correntes do estator e as correntes de carga são apresentadas a seguir. A partir da análise do circuito equivalente apresentado na Figura 8, a equação nodal no ponto comum entre estator-capacitor-carga é obtida pela aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff como:

$$i_{dC} = i_{ds} - i_{dL} \quad (15)$$

$$i_{qC} = i_{qs} - i_{qL} \quad (16)$$

i_{dC} (i_{qC}) e i_{dL} (i_{qL}) são as correntes do eixo d (eixo q) puxadas pelos capacitores de excitação e pela carga, respectivamente.

Uma representação geral da capacitância de excitação no referencial do rotor é dada em forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} i_{qC} \\ i_{dC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pC & \omega_r C \\ -\omega_r C & pC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qL} \\ V_{dL} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Em que p é o operador diferencial que denota $\frac{d}{dt}$.

Em que, as tensões são expressas:

$$pV_{qL} = -\omega_r V_{dL} + \frac{i_{qs} - i_{dL}}{C} \quad (18)$$

$$pV_{dL} = \omega_r V_{qL} + \frac{i_{ds} - i_{dL}}{C} \quad (19)$$

Tomando a carga como um RLC típico, um modelo geral de carga balanceado pode ser representado por:

$$V = i R + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (20)$$

R_L e L_L respectivamente, representam a resistência e indutância da carga. O modelo de carga RL pode ser obtido a partir de (20) e é expresso no referencial do rotor como:

$$i_{qL} = \int \frac{1}{L_L} [V_{qL} - i_{qL} R_L - \omega_r L_L i_{dL}] dt \quad (21)$$

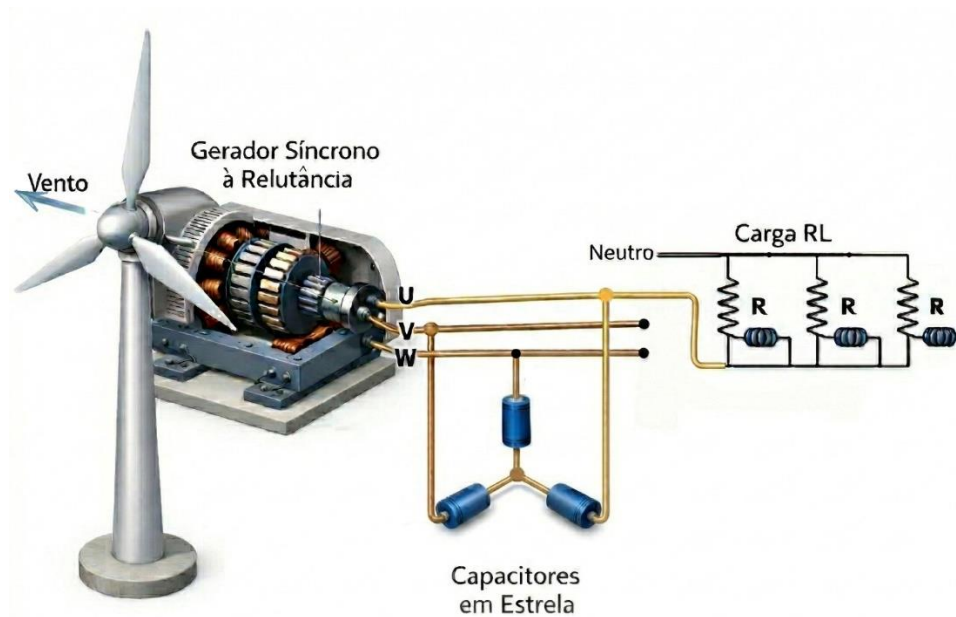
$$i_{dL} = \int \frac{1}{L_L} [V_{dL} - i_{dL} R_L + \omega_r L_L i_{qL}] dt \quad (22)$$

3.3. SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA PROPOSTO

A conversão de energia cinética do vento para energia mecânica é responsável pelos sistemas de conversão de energia eólica (WECS). Em tese, ele é composto por subsistemas interligados, sendo eles: turbina eólica, sistema de transmissão mecânica, gerador elétrico e sistema de condicionamento e utilização de energia gerada. De certa forma, esses elementos operam de forma integrada para obter uma conversão de energia eficiente com base no vento em potência elétrica (Filho, et al., 2014).

A Figura 9 apresenta o Gerador Síncrono a Relutância acoplado a uma turbina eólica (WDSERG), configurando um sistema de conversão de energia operando em regime isolado e destinado ao suprimento de uma carga trifásica do tipo RL. O acionamento mecânico do gerador é realizado pela turbina eólica, responsável pela conversão da energia cinética do vento em potência mecânica rotacional aplicada ao eixo da máquina elétrica. Essa topologia permite a análise do comportamento do sistema sob diferentes perfis de velocidade do vento, possibilitando a investigação de condições dinâmicas e transitórias associadas à variabilidade do recurso eólico.

Figura 9 - Modelo do WDSERG



Fonte: autora (adaptado)

Neste trabalho, a estrutura geral do sistema segue um modelo típico de sistemas eólicos isolados, em que a energia gerada é direcionada diretamente ao suprimento de cargas locais, sem conexão com a rede elétrica convencional. Nesse tipo de sistema, a tensão terminal é influenciada pelo banco de capacitores responsável pelo fornecimento de potência reativa necessária à magnetização da máquina, enquanto a frequência permanece diretamente associada à velocidade mecânica do conjunto turbina-gerador, viabilizando a operação em regime isolado (Caixeta, et al.).

O gerador síncrono à relutância é caracterizado por possuir rotor desprovido de enrolamentos de campo e de ímãs permanentes. A produção de conjugado eletromagnético decorre da diferença de relutância magnética entre os eixos direto (d) e em quadratura (q), fenômeno associado à não uniformidade magnética estrutural do rotor. Essa característica construtiva resulta em uma máquina estruturalmente simples, mecanicamente robusta e com reduzida demanda de manutenção, além de eliminar a necessidade de sistemas auxiliares de excitação no rotor.

Nos terminais trifásicos do gerador encontra-se conectado um banco de capacitores interligado em configuração estrela (Y), elemento essencial para a operação em regime isolado. O banco capacitivo fornece a potência reativa necessária ao processo de autoexcitação, permitindo o estabelecimento e a sustentação do fluxo magnético no entreferro da máquina.

Como consequência, viabiliza-se a construção, elevação e estabilização da tensão nos terminais do gerador, garantindo condições adequadas para o fornecimento de energia à carga.

A potência elétrica gerada é então suprida a uma carga trifásica equilibrada do tipo RL, sendo cada fase constituída por uma resistência (R) em série com uma indutância (L). Esse modelo representa, de forma simplificada, cargas com comportamento predominantemente indutivo, tais como motores de indução e dispositivos eletromagnéticos. Adicionalmente, a configuração adotada possibilita a realização de estudos sob diferentes condições de carregamento, incluindo variações abruptas em degrau, permitindo a análise da resposta dinâmica do sistema frente a perturbações na carga.

3.4. CONDIÇÃO DE AUTOEXCITAÇÃO DO GERADOR SERG

O SynRG quando não conectado à rede elétrica não é capaz de iniciar a operação por não ter um fornecimento de potência reativa. Com isso, essa operação em regime isolado faz-se necessário o processo de autoexcitação que viabiliza a operação do gerador (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016).

A autoexcitação é um fenômeno que ocorre através da interação entre o magnetismo residual presente no rotor e o banco de capacitores conectado no terminal do estator. Assim sendo, mesmo após o desligamento da máquina, uma pequena quantidade de fluxo magnético permanece no núcleo do rotor, o que induz uma pequena força eletromotriz causada pela rotação da turbina eólica.

Os capacitores conectados em paralelo ao estator fornecem uma potência reativa ao sistema, devido à tensão inicial gerada, o fluxo magnético da máquina aumenta e, conseqüentemente, a tensão induzida se eleva nos terminais do gerador. Dessa forma, o processo ocorre de forma cumulativa, com um sistema de realimentação positiva até que o circuito magnético atinja a região de saturação, chegando ao momento em que a tensão terminal se estabiliza (Alolah, 1991).

Conforme apresentado anteriormente, para que o processo de autoexcitação aconteça é necessário que duas condições sejam atendidas:

- i. Existência de magnetismo residual suficiente no núcleo da máquina;
- ii. Presença da capacitância mínima de excitação conectada ao estator.

A capacitância de excitação tem um papel essencial no fornecimento de potência reativa necessária para a magnetização do circuito magnético. Caso esse valor de capacitância seja inferior a um valor crítico, o processo de autoexcitação não ocorre, o que impossibilita o estabelecimento da tensão terminal do gerador (Abu-Elhaija, 2006).

3.5. DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE CAPACITORES DE EXCITAÇÃO

O SERG operando em regime isolado necessita de um banco de capacitores conectado aos terminais do estator, sendo responsável por fornecer a potência reativa para estabelecer o fluxo magnético, e conseqüentemente o surgimento da tensão terminal do gerador. Com isso, a escolha adequada da capacitância é essencial para que ocorra o processo de autoexcitação adequada e que a tensão se mantenha em níveis aceitáveis em diferentes condições de carga e velocidade (Alolah, 1991; Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016).

Dessa forma, existe um valor mínimo de capacitância, denominado capacitância crítica (C_{crit}). Esse valor serve como referência, pois abaixo dele não ocorre o acúmulo de tensão, acima desse valor, a autoexcitação é possível e a tensão tende a aumentar com a capacitância, dentro dos limites impostos pela saturação magnética e pelo sistema (Abu-Elhaija, 2006) (RAHIM, 2010).

Neste trabalho, foi determinado o valor do banco de capacitores por meio do critério gráfico, baseado na intersecção entre a curva de magnetização da máquina e as características do capacitor, procedimento comum usado para geradores autoexcitados (Alolah, 1991) (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016). Considerando a relação aproximada entre a tensão induzida e a corrente de magnetização no eixo direto, pode-se representar qualitativamente a característica de magnetização por:

$$V_m(i_{ds}) \approx \omega_r L_d(i_{ds}) i_{ds} \quad (23)$$

Em que ω_r é a velocidade elétrica e $L_d(i_{ds})$ representa a indutância no eixo direto dependente da corrente, incorporando o efeito de saturação.

A característica do banco de capacitores pode ser expressa, pela relação de tensão e corrente reativa fornecida pelo capacitor.

$$V_C(i_{ds}) \approx \frac{i_{ds}}{\omega_r C} \quad (24)$$

Portanto, o ponto de operação em vazio (ou carga leve) é definido pela condição:

$$V_m(I_d) = V_c(I_d) \quad (25)$$

No gráfico de $V_m(i_{ds})$ e das retas $V_C(i_{ds})$ para diferentes valores de C, identifica-se o menor valor de capacitância que suas características cruzam a curva de magnetização nos valores de operação do gerador. O valor para o banco de capacitores (C) deve ser escolhido ligeiramente acima de C_{crit} para assegurar a autoexcitação mesmo com variações de parâmetros, dispersões e mudanças de regime (Abu-Elhaija, 2006) (Mosaad Mohiedden ALI, 2016).

A escolha de C influencia o nível da tensão do gerador sob carga. Os valores de capacitância muito baixos podem resultar em dificuldade de autoexcitação e queda de tensão com aumento de carga, já valores excessivos podem provocar um aumento da tensão e o aumento de correntes internas, o que agrava oscilações e transitórios (Y. H. A. Rahim, 2010) (Mosaad Mohiedden ALI, 2016). Portanto, com a definição do valor inicial do critério gráfico, o valor final de C é refinado por simulação com a avaliação dos parâmetros do gerador e da turbina sob diferentes cenários.

4. SIMULAÇÃO

4.1. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

4.1.1. SERG

Adotando parâmetros de uma máquina de 2 hp (1,5 kW), 4 polos de 60Hz com todos os parâmetros obtidos em (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016) serão utilizados nas simulações desta subseção. Os parâmetros são fornecidos com a Tabela 1:

Tabela 1- Parâmetros da Máquina à relutância

Parâmetro	Símbolo	Valor
Potência	P_G	2 hp
Tensão	V	120 V
Velocidade nominal	n	1800 rpm
Número de polos	P	4
Frequência nominal	f	60 Hz
Torque base	T_{base}	7,9577 N.m
Corrente base	I_{base}	4,1667 A
Resistência do estator	R_s	3,77 Ω
Indutância eixo q	L_q	0,081 H
Momento de inércia	J	0,1 kg.m ²

As equações derivadas nas seções anteriores estão organizadas em formas adequadas para simulação. Para fins de clareza, as equações de tensão foram rearranjadas abaixo. Substituindo equações (8) e (9) em (6) e (7) respectivamente, as correntes podem ser expressas como:

$$i_{qs} = \frac{-\phi_{qs}}{L_q} = - \int \frac{1}{L_q} [V_{qs} + R_s i_{qs} + \omega_r L_d i_{ds}] dt \quad (26)$$

$$i_{ds} = \frac{-\phi_{ds}}{L_d} = - \int \frac{1}{L_d} [V_{ds} + R_s i_{ds} - \omega_r L_q i_{qs}] dt \quad (27)$$

4.1.2. TURBINA EÓLICA

Os parâmetros da turbina eólica utilizada no modelo de simulação acoplado ao SERG seguem na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros da Turbina Eólica

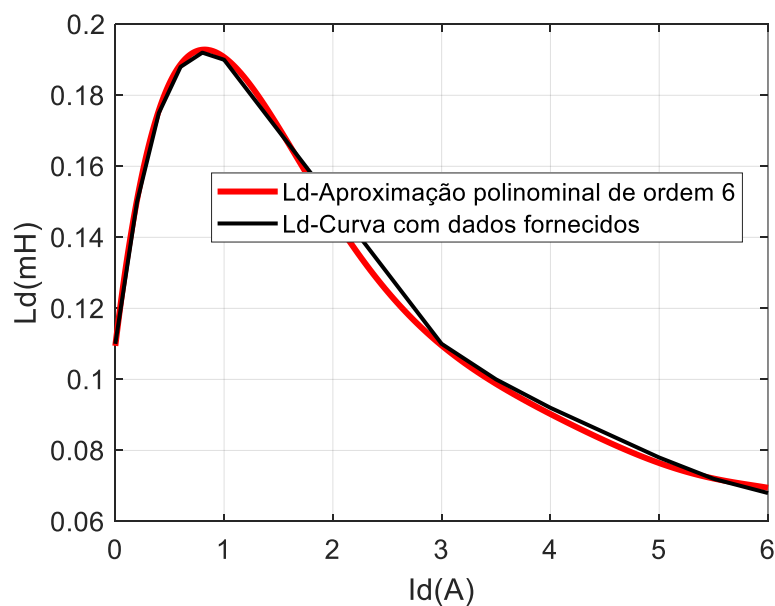
Parâmetro	Símbolo	Valor
Densidade do ar	ρ	1,1 kg/m ³
Raio da turbina	R	1,5 m
Ângulo de passo	β	0°

4.1.3. BANCO DE CAPACITORES

As características de magnetização da máquina são dadas pela curva $L_d \times I_d$ mostrada na figura 11. O polinômio de ajuste de curva de 6ª ordem foi usado para aproximar a relação (Ayodeji S.O. Ogunjuyigbe, 2016). Isso permite que o efeito de saturação seja levado em consideração. O polinômio é dado como:

$$L_d = -0,10007i_d^6 + 2,3788i_d^5 - 22,52i_d^4 + 107,06i_d^3 - 259,15i_d^2 + 253,62i_d + 109,44 \quad (28)$$

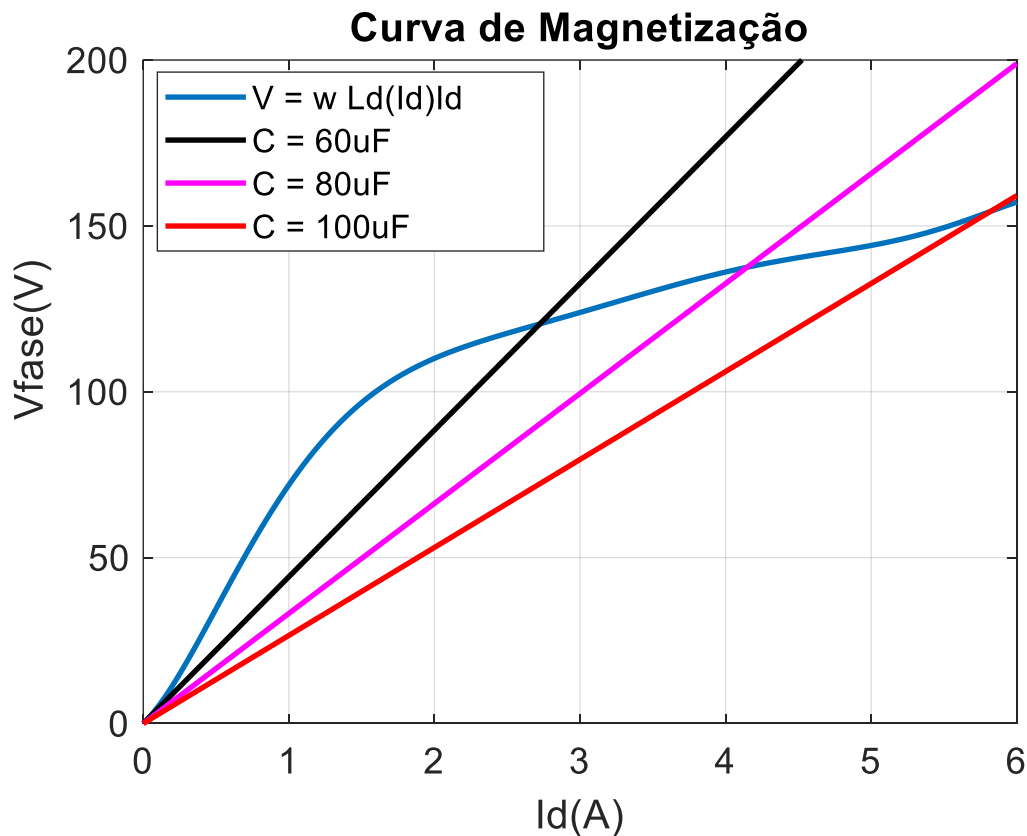
Figura 10 - Características de Magnetização do eixo d



Fonte: autora

A escolha do valor do capacitor de excitação para o SERG foi feita por meio do critério gráfico. Portanto, a figura 11 é a curva de $V_m \times I_d$ obtida pela equação 23 tendo como base o L_d de magnetização acima. Observando a figura, são considerados três valores de capacitância sendo eles 60, 80 e 100 μF . O capacitor de 60 μF possui uma inclinação elevada, não tendo uma intersecção na curva próxima à região de operação (próximo do I_{base}), o que impede a autoexcitação. O de 80 μF aproxima-se significativamente da região de operação (próximo do I_{base}), contudo se encontra bem próximo da região limite, sendo considerado próximo do C_{crit} . Portanto, o valor do capacitor precisa ser ligeiramente maior que o C_{crit} , adotando-se um capacitor de 85 μF , que fornece uma margem reativa maior que estabelece um ponto de equilíbrio estável, garantindo maior robustez e confiabilidade no processo de autoexcitação.

Figura 11 - Curva de Magnetização com capacitores de Excitação

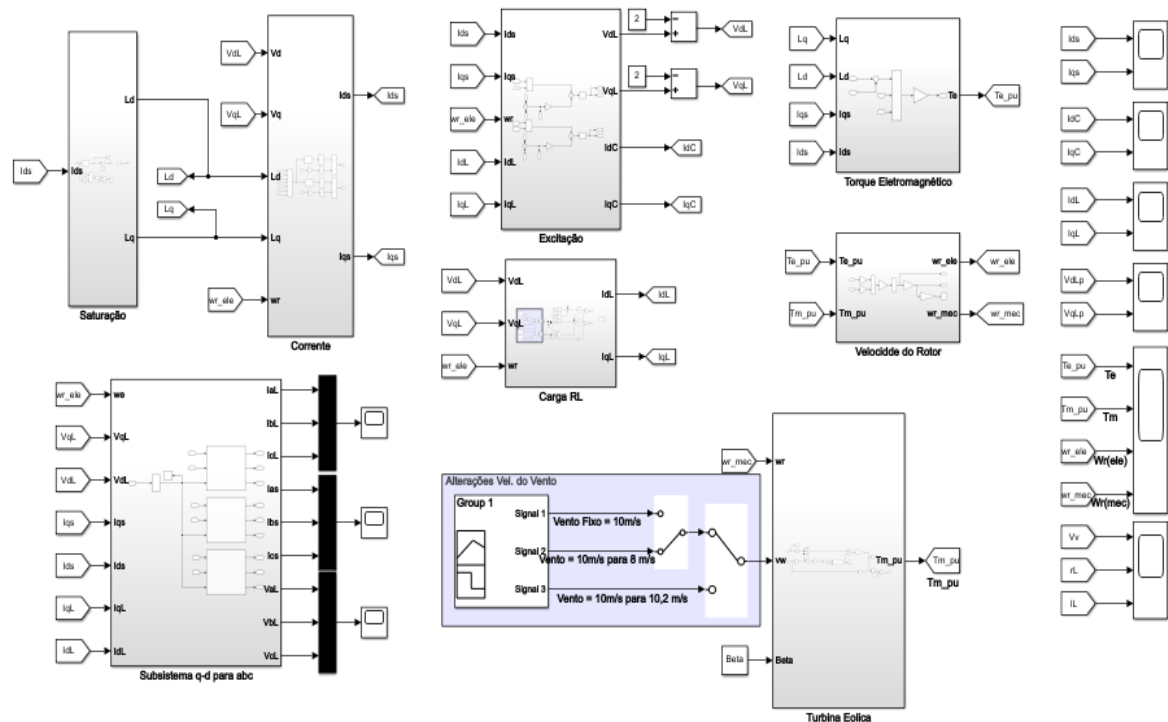


Fonte: autora

4.2. SUBSISTEMAS DA SIMULAÇÃO

Com base nas características do SERG, turbina eólica e do capacitor de excitação acima, serão apresentadas, no modelo detalhado MATLAB/Simulink, desenvolvido e utilizado para realizar as simulações do SERG acoplado a turbina eólica conforme apresentado na figura 12.

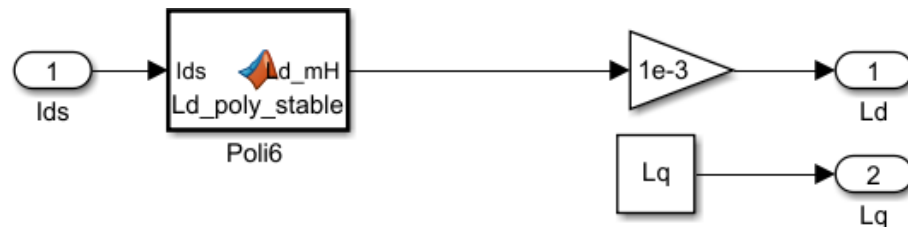
Figura 12 - Modelo completo do SERG acoplado a turbina eólica



Fonte: autora

O bloco de Saturação, apresentado na figura 13, é responsável por representar os efeitos não lineares do circuito magnético da máquina. Internamente, esse subsistema modela a variação da indutância de eixo direto em função da corrente, equação (28), incorporando a característica de saturação do material ferromagnético. Dessa forma, o modelo se aproxima mais do comportamento real da máquina, especialmente em regimes de alta excitação.

Figura 13- Subsistema de Saturação

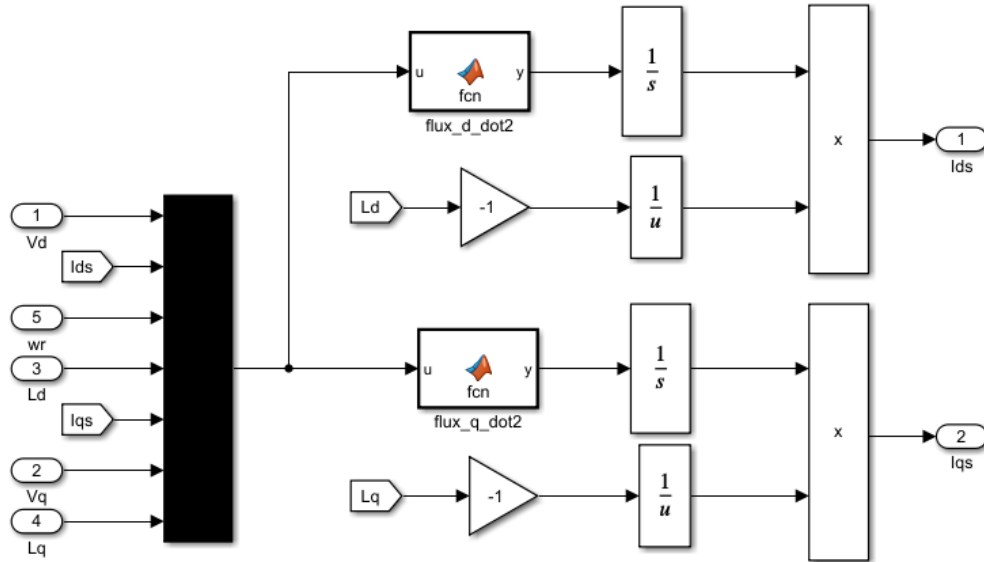


Fonte: autora

O subsistema nominado por “Corrente”, figura 14, implementa as equações elétricas (26) e (27) da máquina no referencial síncrono (dq). Nesse bloco são processadas as tensões de eixo direto e em quadratura, bem como as indutâncias L_d e L_q , resultando nos cálculos das

correntes i_d e i_q . As equações diferenciais são resolvidas por meio de integradores, permitindo a obtenção da dinâmica transitória das correntes do estator.

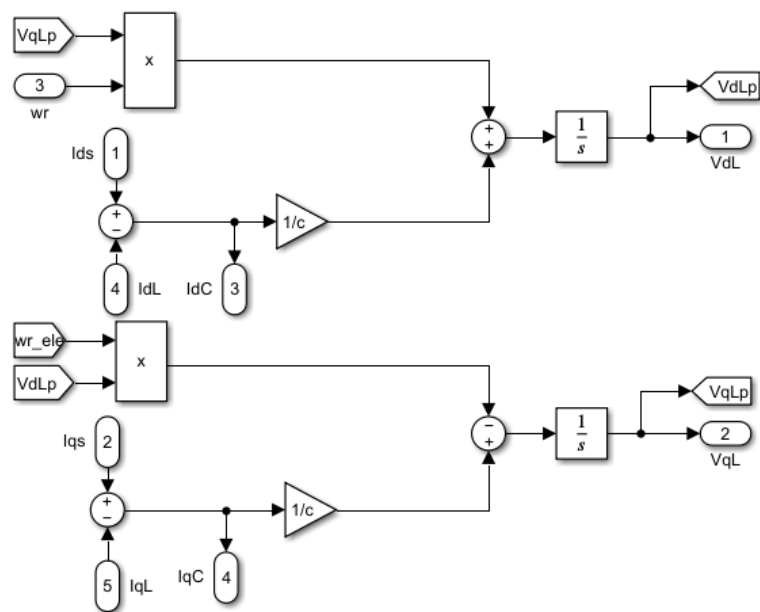
Figura 14- Subsistema da Corrente



Fonte: autora

O bloco “Excitação”, figura 15, modela o banco de capacitores responsável pelo fornecimento da potência reativa necessária à auto excitação do gerador. Internamente, são implementadas as equações que relacionam tensão, corrente e reatância capacitiva, possibilitando a análise da formação da tensão terminal em regime isolado.

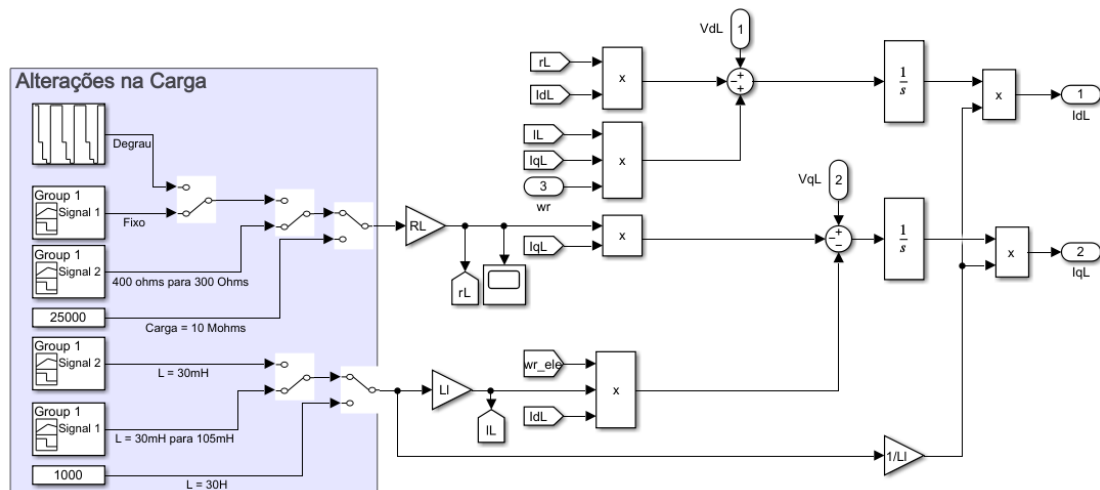
Figura 15- Subsistema de Capacitância de Excitação



Fonte: autora

Além disso, o modelo contempla um subsistema de “Carga RL”, figura 16, no qual são implementadas resistências e indutâncias representando a carga conectada ao gerador. Também há um bloco responsável pelas alterações da velocidade do vento, permitindo simular diferentes cenários (vento constante, degraus de velocidade e variações dinâmicas), o que possibilita avaliar o desempenho do sistema em condições transitórias.

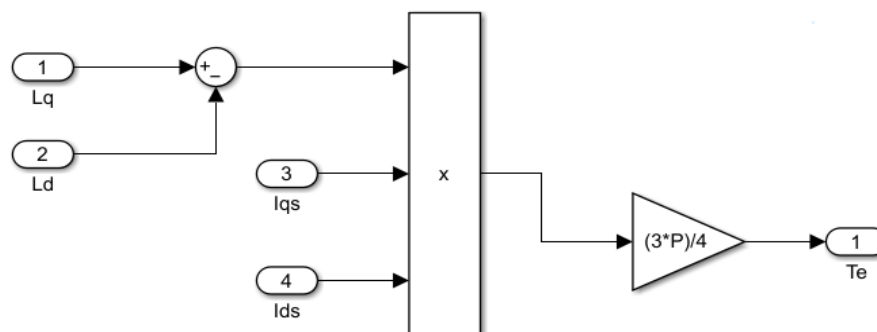
Figura 16 - Subsistema de Carga RL



Fonte: autora

O bloco “Torque Eletromagnético”, figura 17, realiza o cálculo do torque desenvolvido pela máquina a partir das correntes e fluxos no referencial (dq), equação (13). O torque é obtido com base nas equações clássicas da máquina, considerando o acoplamento entre os eixos direto e em quadratura. Esse conjugado é então utilizado como entrada para o subsistema mecânico.

Figura 17- Subsistema de Torque Eletromagnético

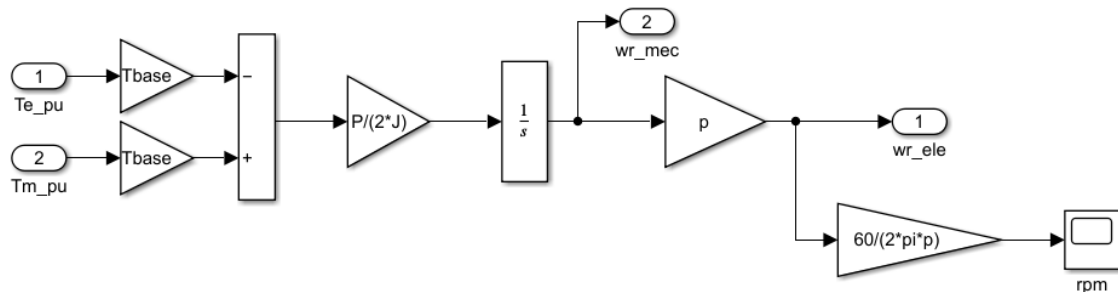


Fonte: autora

O subsistema “Velocidade do Rotor”, figura 18, implementa as equações mecânicas considerando o conjugado eletromagnético, o conjugado mecânico aplicado pela turbina eólica, levando em consideração o número de polos da máquina e parâmetros mecânicos como

momento de inércia. Internamente, a equação diferencial da dinâmica rotacional (14) é resolvida para determinar a velocidade angular elétrica e mecânica do rotor.

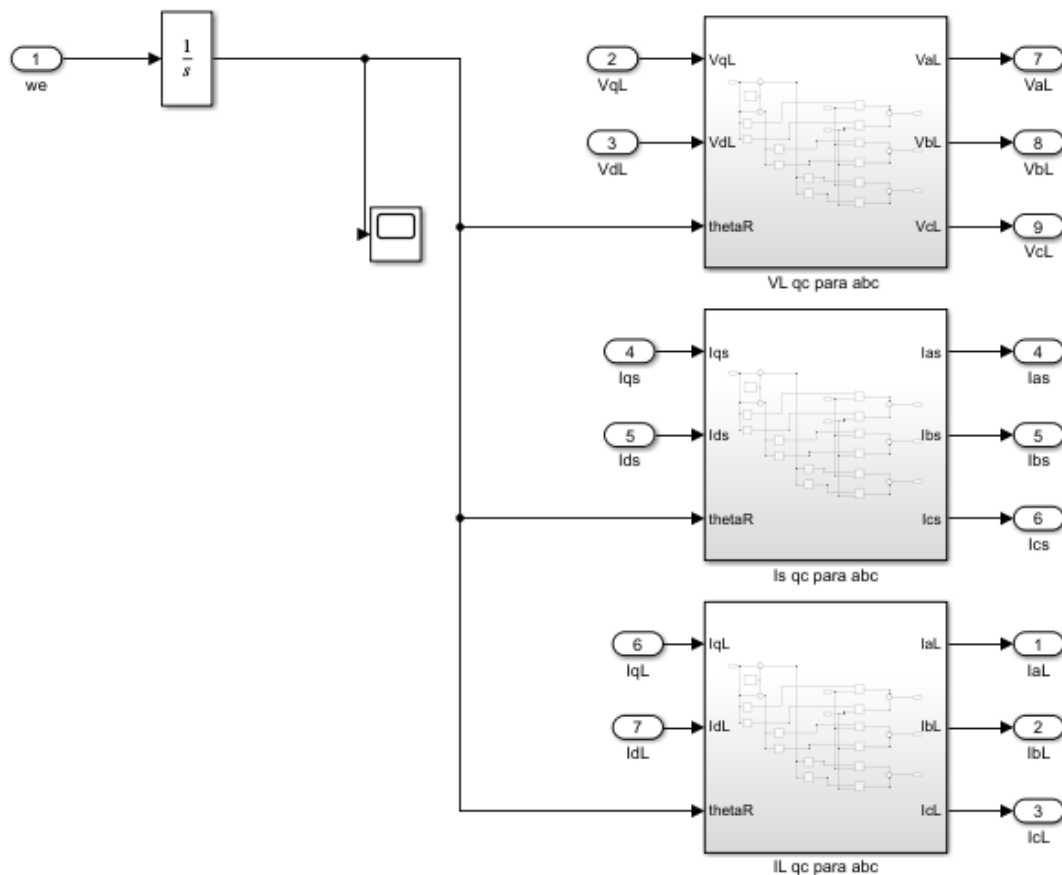
Figura 18 - Subsistema de Velocidade do Rotor



Fonte: autora

O bloco nomeado como “Subsistema q-d para abc”, figura 19, realiza a transformação inversa de Park, convertendo as grandezas no referencial síncrono para o sistema trifásico estacionário. Isso permite a visualização das correntes e tensões de fase, facilitando a análise dos sinais elétricos no domínio real abc.

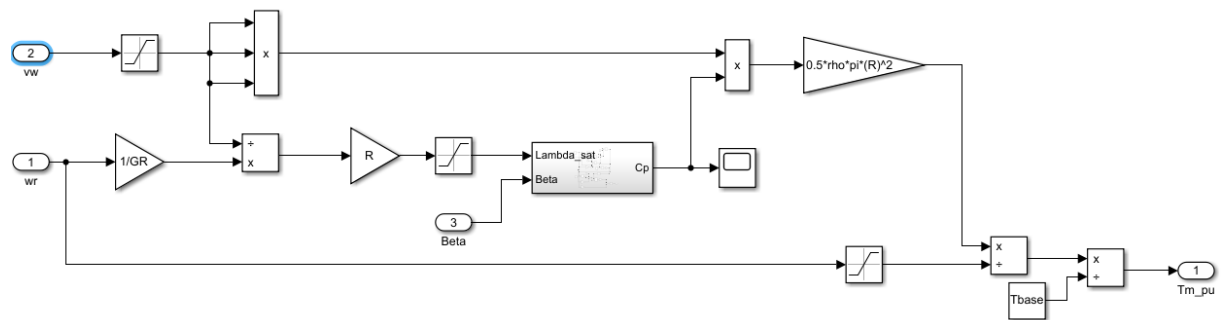
Figura 19- Subsistema q-d para abc



Fonte: autora

A “Turbina Eólica”, figura 20, é modelada a partir da equação aerodinâmica que relaciona potência capturada, coeficiente de potência (C_p), densidade do ar, área varrida e velocidade do vento. O modelo inclui a razão de velocidade específica e converte a potência extraída do vento em conjugado mecânico aplicado ao eixo do gerador.

Figura 20 - Modelo de Turbina Eólica



Fonte: autora

Dessa forma, a estrutura completa do modelo possibilita a análise integrada dos fenômenos elétricos, magnéticos, mecânicos e aerodinâmicos envolvidos no sistema de conversão de energia eólica, permitindo estudar tanto o regime permanente quanto o comportamento dinâmico diante de variações de vento e carga.

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para a análise do desempenho do WDSERG (Gerador Síncrono à Relutância Autoexcitado movido pelo Vento) foi realizada uma simulação usando o MATLAB/Simulink para os seguintes cenários:

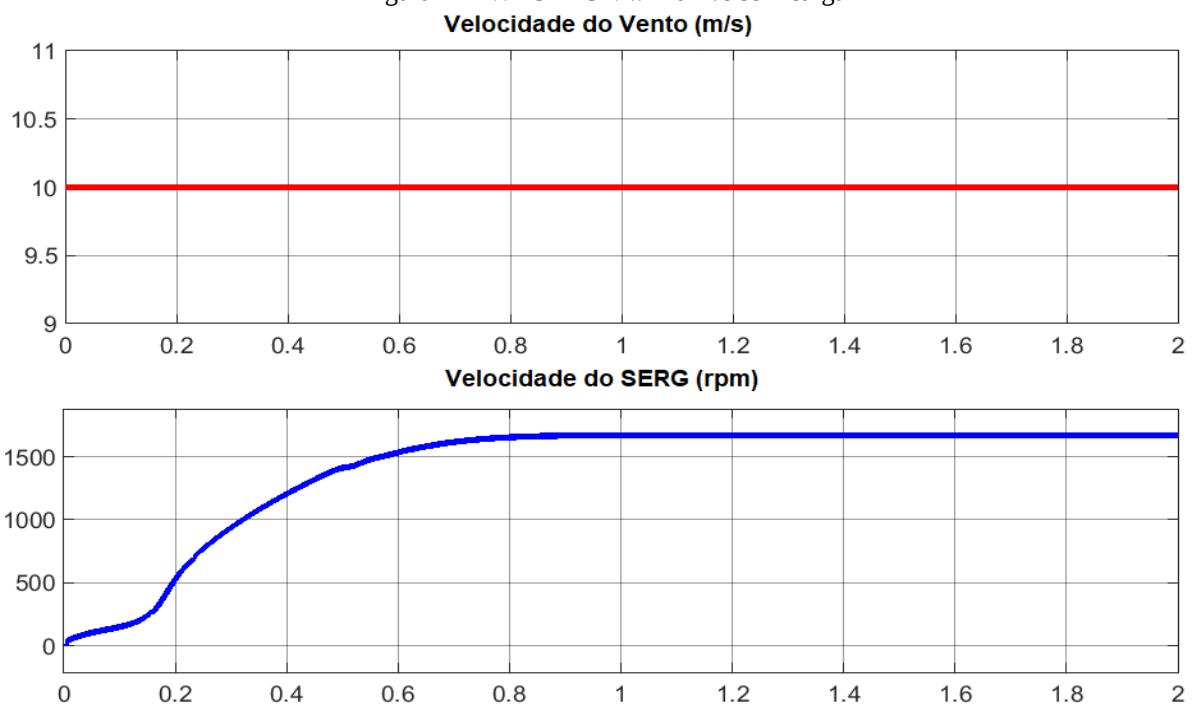
- Velocidade Constante do Vento;
- Variação de Velocidade do Vento;
- Variações de Carga

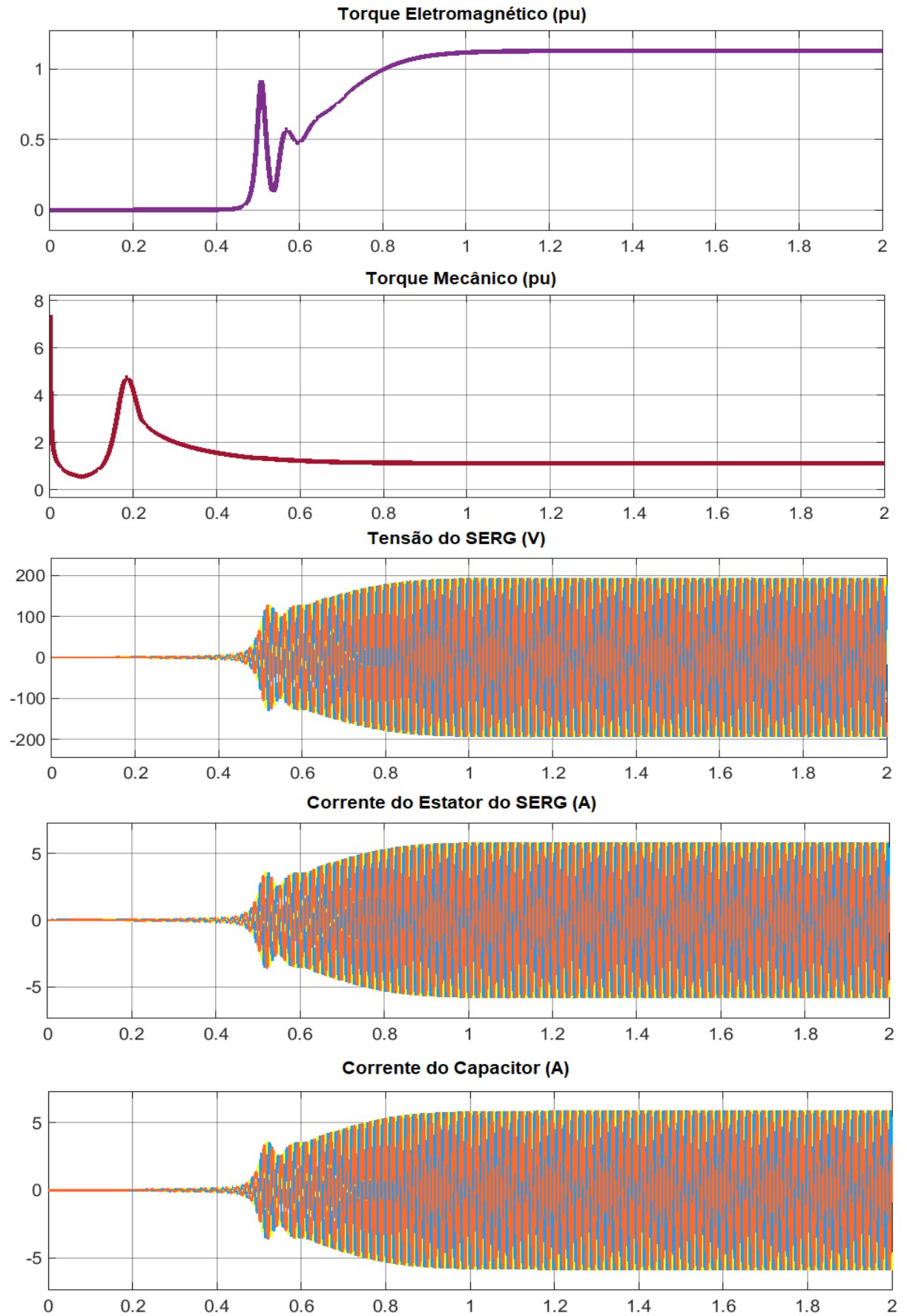
Conforme analisado acima, foi conectado um banco de capacitância balanceada em estrela no valor de $85 \mu\text{F}$ por fase. E também, foi aplicado um acúmulo de tensão residual de 2V para que a excitação seja bem-sucedida.

5.1. WDSERG EM VELOCIDADE DO VENTO CONSTANTE

Foi aplicada uma velocidade do vento constante de 10 m/s com dois cenários diferentes. O primeiro em um cenário com a carga RL no valor de $10\text{M}\Omega$ de resistência e 30H, que com valores de impedância terminal extremamente alta pode ser considerado como um circuito aberto, portanto sem carga. E, o segundo cenário é de uma carga RL constante de 400Ω e 30mH.

Figura 21 - WDSERG $V_w=10$ m/s sem carga





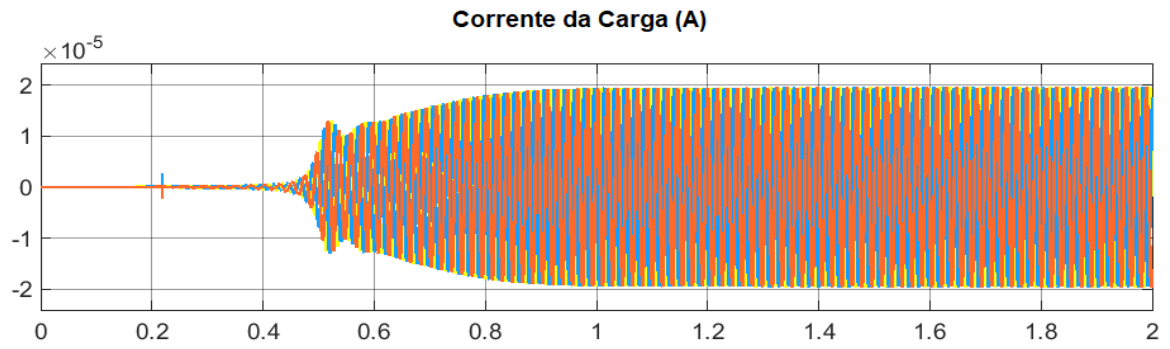
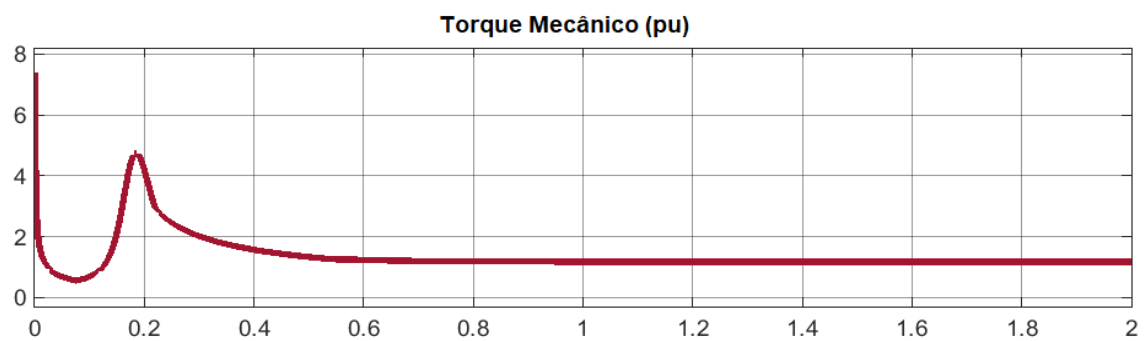
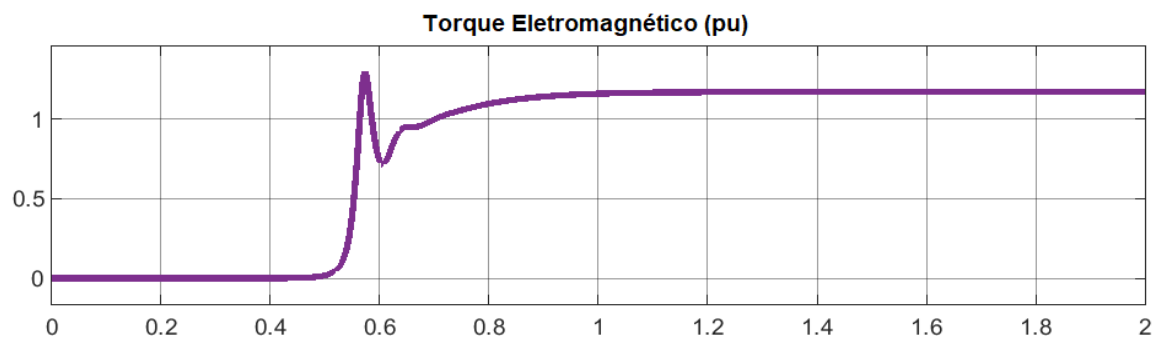
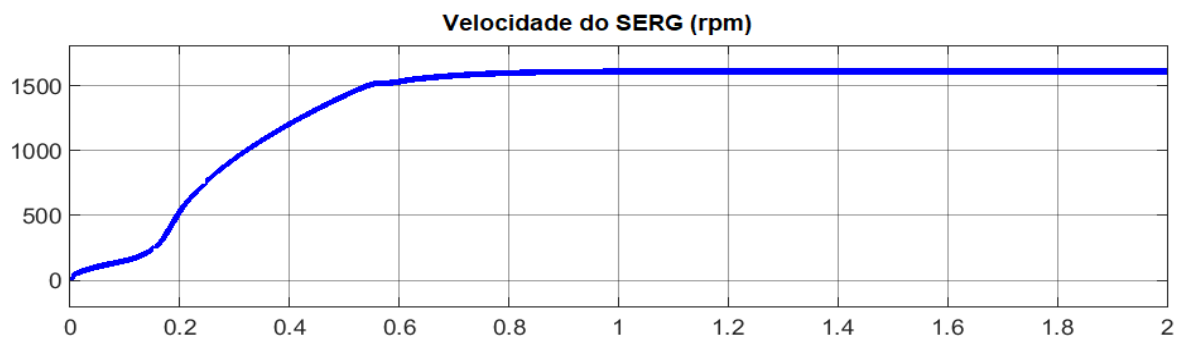
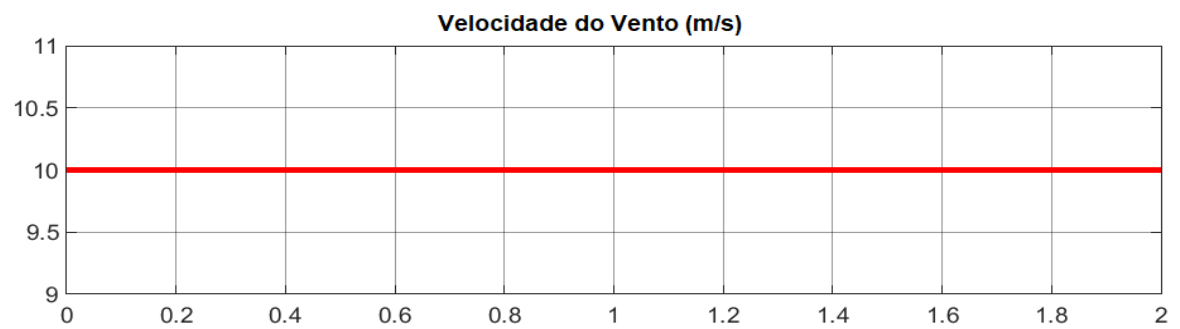
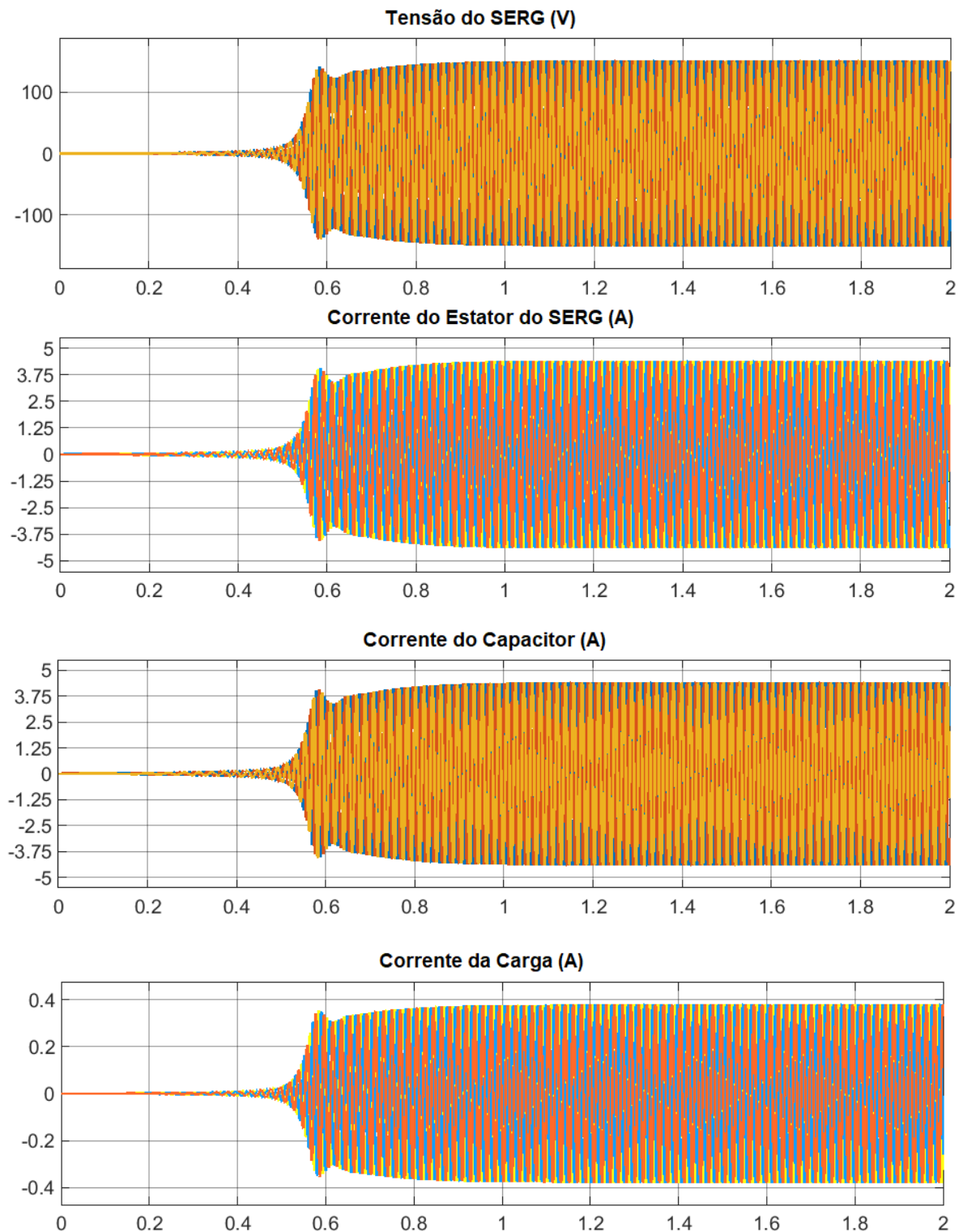


Figura 22 - WDSERG $V_w=10$ m/s com carga ($R=400$ ohms e $L=30$ mH)





Fonte: autora

O desempenho do WDSERG com uma velocidade constante do vento a 10 m/s em dois cenários diferentes que evidenciam o impacto da inserção de carga no funcionamento do WDSERG. Na figura 21 é possível ver os resultados com base em uma operação sem carga, o que apresenta uma maior velocidade de operação, menor torque eletromagnético e maior nível

de tensão terminal, pois a potência fornecida pelo capacitor é destinada exclusivamente à magnetização da máquina. Já na figura 22, a carga RL é conectada, apresentando uma redução na velocidade, aumento do torque eletromagnético para 1,19 pu e aumento do torque mecânico, e queda na tensão terminal do gerador. Essa redução ocorre, pois, o banco de capacitores passa a suprir a potência reativa de magnetização e da carga, o que diminui o fluxo magnetizante disponível.

Para uma visualização mais detalhada das formas de onda da tensão terminal operando sob velocidade de vento constante, evidenciando a defasagem das fases e a amplitude da tensão gerada, os apêndices A e B apresentam as ampliações dos gráficos correspondentes às condições de operação em vazio e com a inserção de carga, respectivamente.

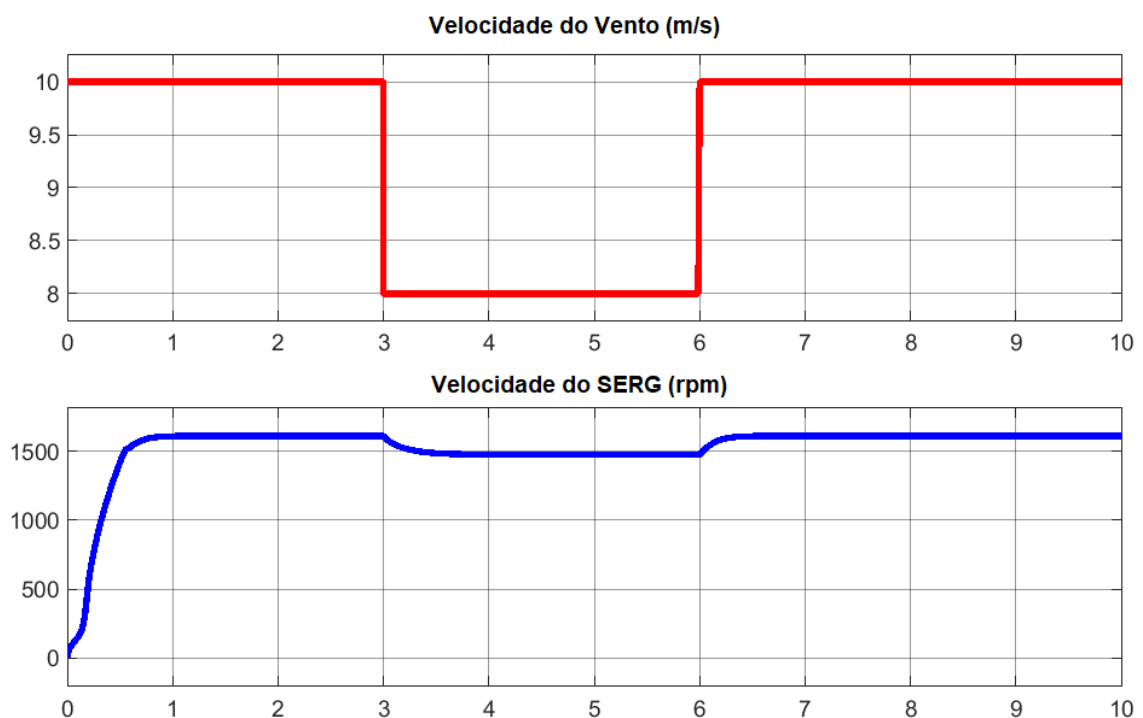
5.2. WDSERG EM VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DO VENTO

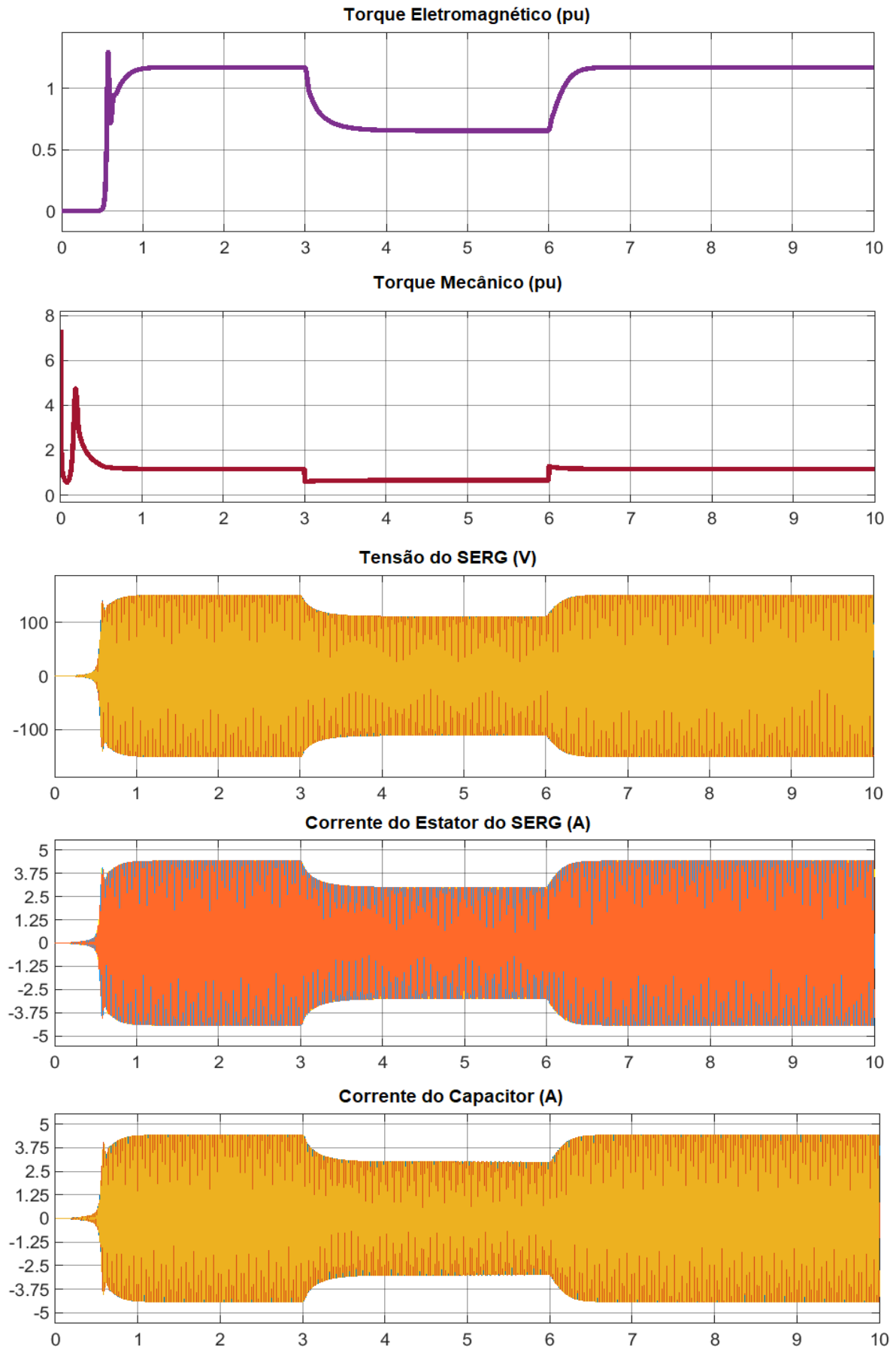
Nesta análise, serão aplicados dois possíveis casos de diminuição da velocidade do vento e do aumento da velocidade do vento, que serão vistos a seguir:

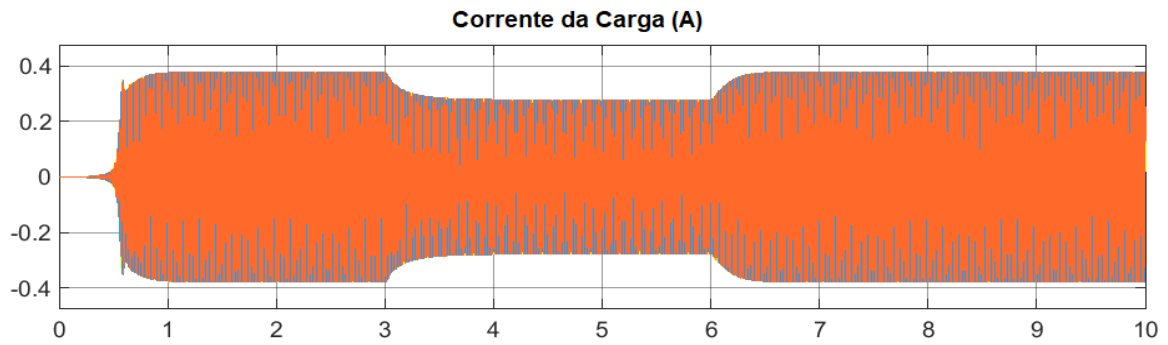
5.2.1. DIMINUIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO

Foi aplicada uma velocidade do vento de 10 m/s com uma diminuição para 8 m/s com uma carga RL constante de 400Ω e 30mH.

Figura 23 - WDSERG redução de Velocidade de 10 m/s para 8 m/s com carga (R=400 ohms e L=30mH)







Fonte: autora

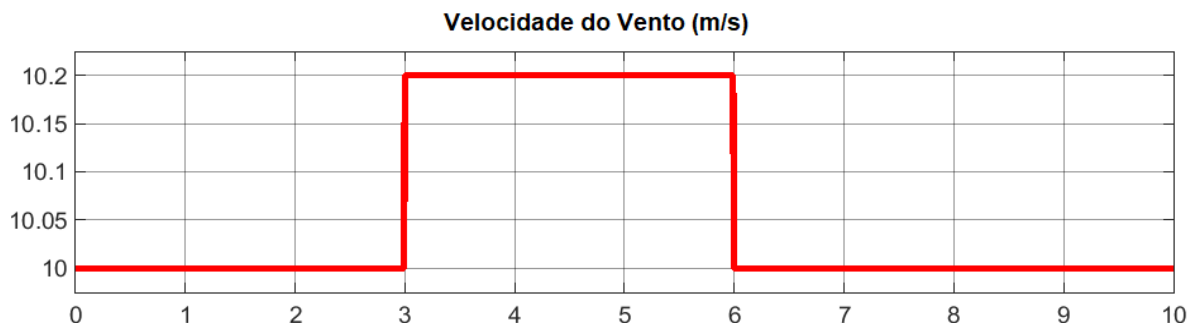
A resposta dinâmica quando houve a redução de velocidade do vento de 10 m/s para 8 m/s provocou uma mudança significativa na operação do WDSERG. Na figura 23, observa-se que, com a diminuição do vento a velocidade de rotação vai de 1611 rpm para 1474 rpm, acompanhado pela queda do torque eletromagnético de 1,16 pu para 0,65 pu, o que indica uma menor potência convertida pelo gerador. Em consequência disso, a tensão terminal também reduz de 150 V para 110 V, juntamente com a corrente do estator que passa de 4,41 A para 2,98 A. Quando a velocidade retorna para 10 m/s, todas as grandezas restabelecem os seus níveis anteriores.

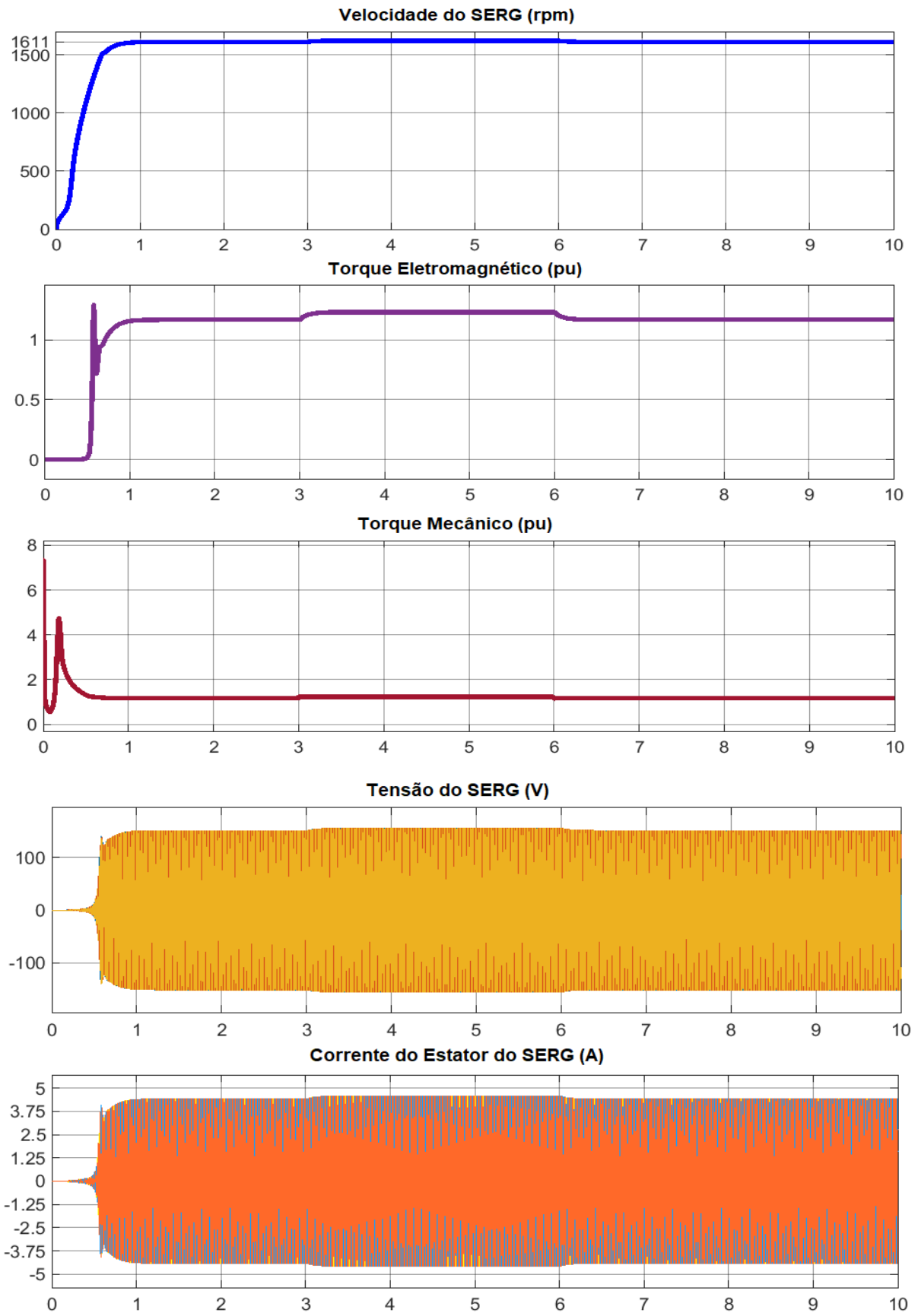
A resposta dinâmica detalhada da tensão frente a este decréscimo de velocidade pode ser analisada em maior escala no apêndice C, onde é ilustrado o comportamento das fases durante o regime transitório.

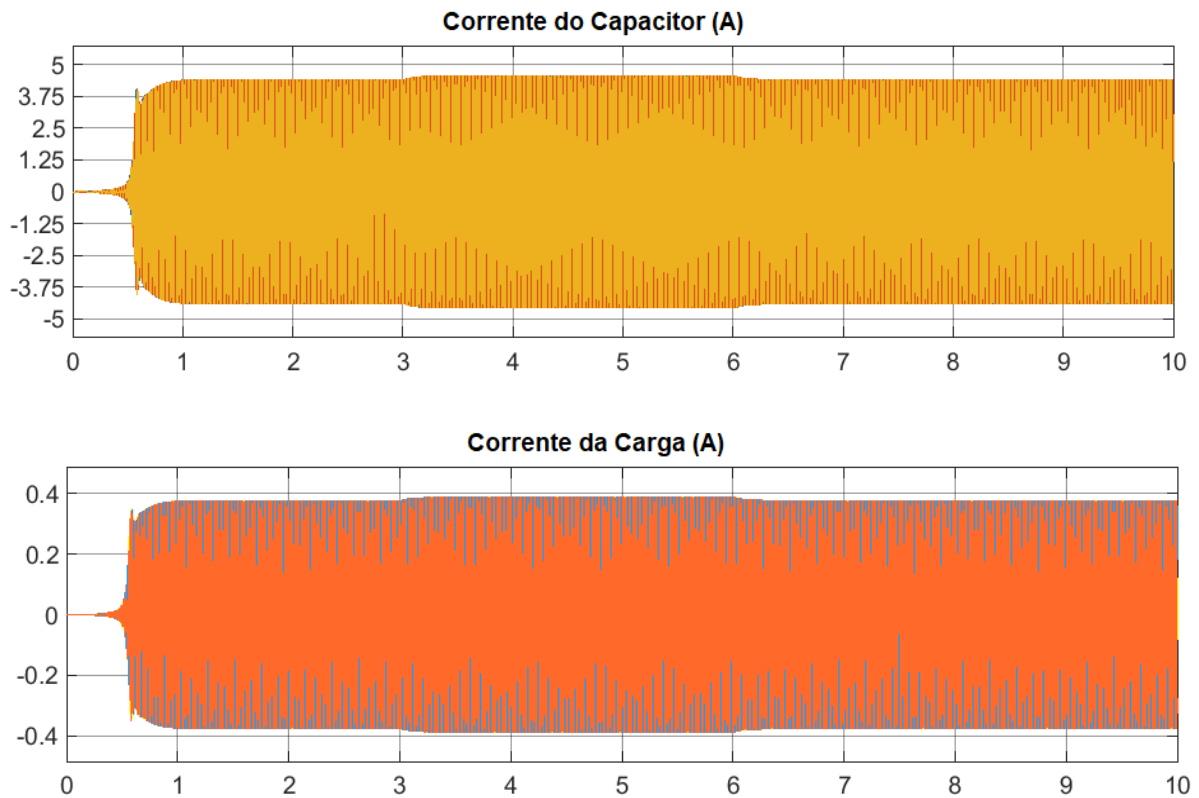
5.2.2. AUMENTO DA VELOCIDADE DO VENTO

Foi aplicada uma velocidade do vento de 10 m/s com aumento para 10,2 m/s com uma carga RL constante de 400Ω e 30mH.

Figura 24 - WDSERG Aumento de Velocidade de 10 m/s para 10,2 m/s com carga (R=400 ohms e L=30mH)







Fonte: autora

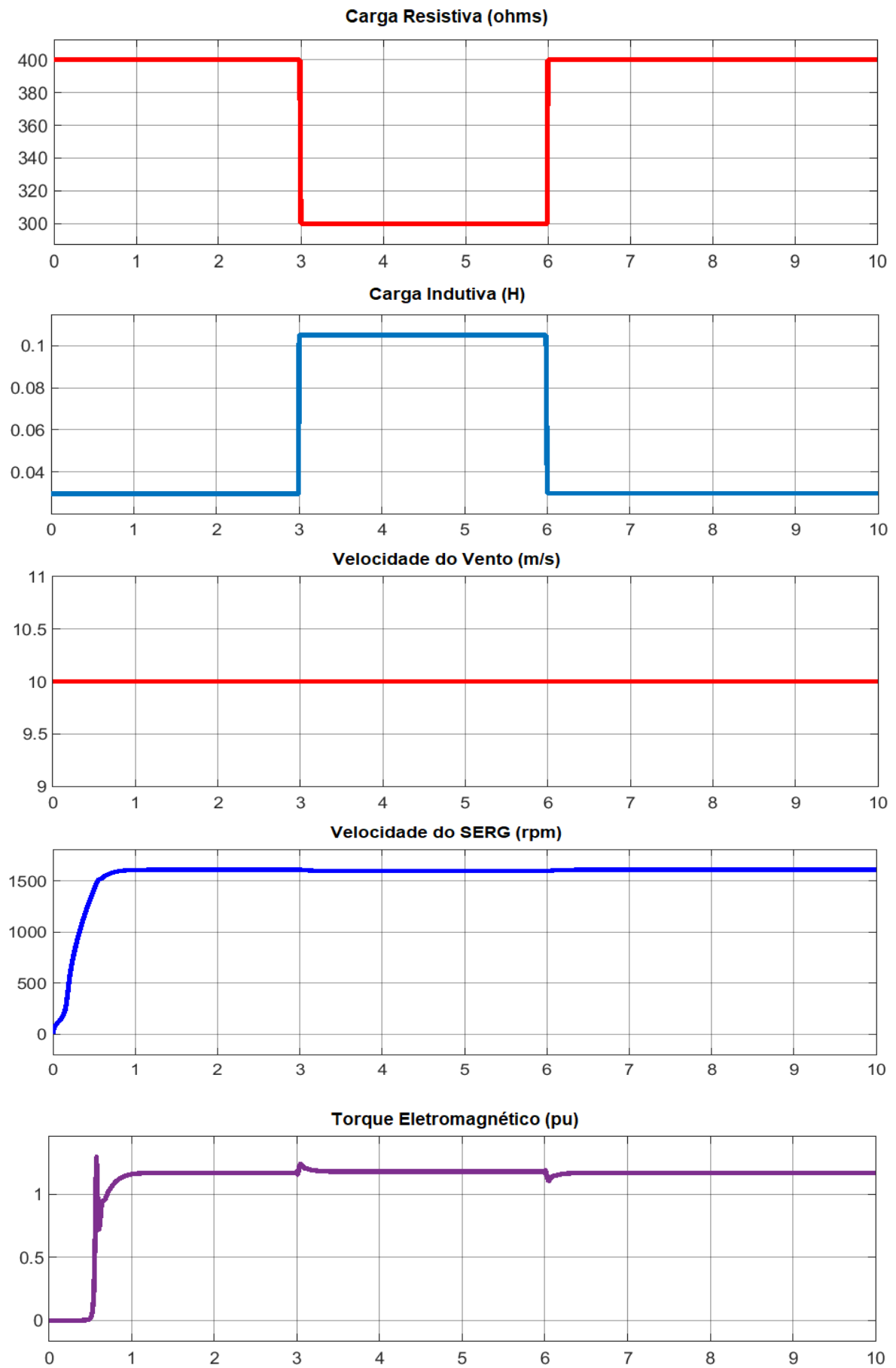
Na figura 24, já temos o aumento da velocidade do vento de 10 m/s para 10,2 m/s o que provoca um pequeno deslocamento do ponto de operação do WDSERG, o que evidencia a sensibilidade do sistema às variações na potência mecânica disponível. Dessa forma, é possível ver um aumento da velocidade de 1611 rpm para 1621 rpm, acompanhado pelo aumento do torque eletromagnético de 1,16 pu para 1,23 pu. Portanto, como consequência a tensão terminal aumentou de 150 V para 154 V e a corrente aumentou de 4,41 A para 4,50 A. Após o retorno da velocidade ao valor inicial, todas as grandezas retornaram para o valor inicial, o que demonstra uma boa capacidade do sistema de manter estabilidade.

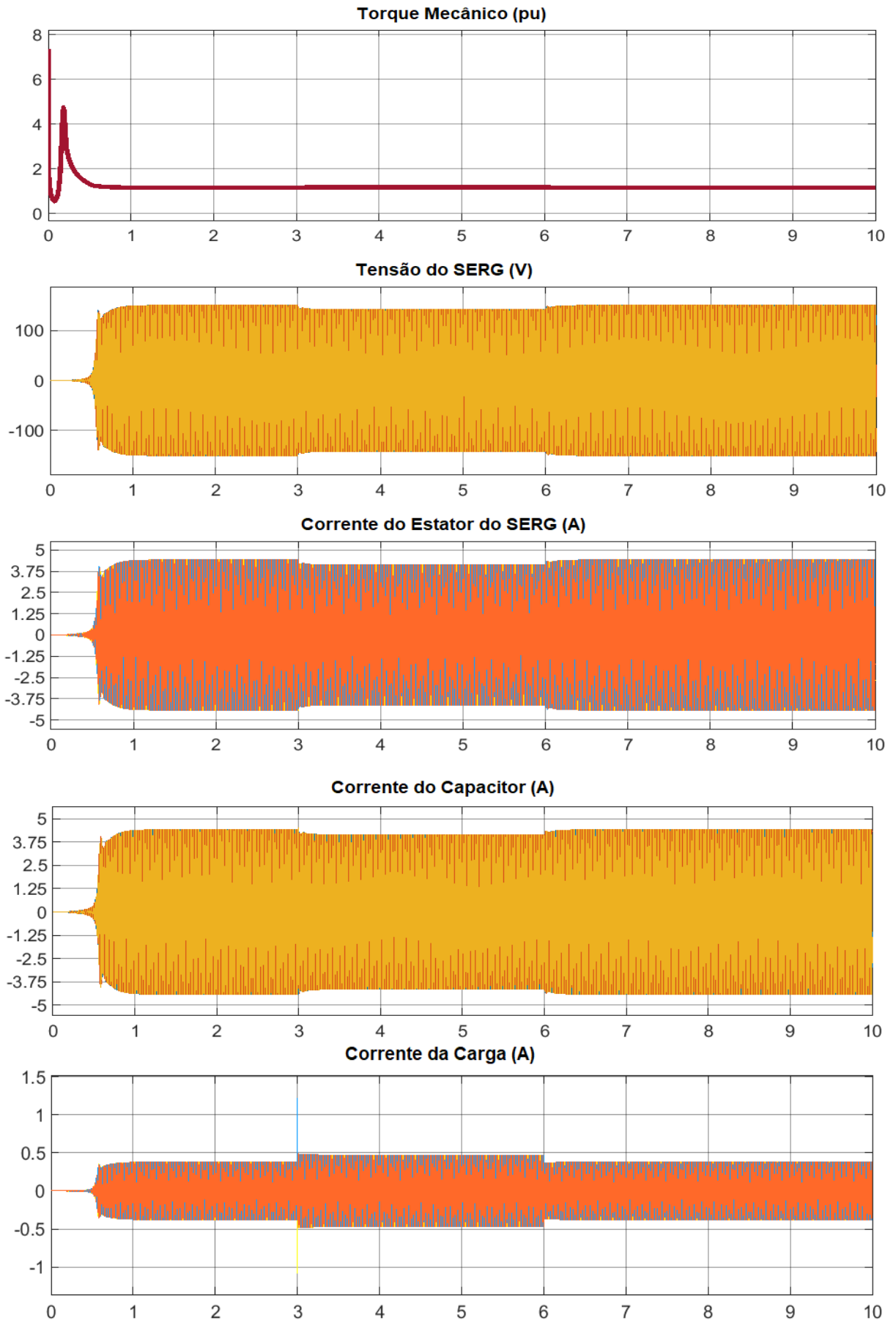
Os detalhes da acomodação da tensão terminal durante este aumento repentino da velocidade do vento, incluindo a análise do defasamento, estão ilustrados na ampliação presente no apêndice D.

5.3. WDSERG EM VARIAÇÃO DE CARGA

Foi aplicada uma velocidade do vento de 10 m/s constante com um aumento da carga RL de 400Ω e 30mH para o valor de 300Ω e 105mH e depois retorna aos valores iniciais.

Figura 25 - WDSERG com Velocidade de 10 m/s fixa e variação de carga de 400Ω e 30mH para 300Ω e 105mH





O desempenho do WDSERG sob carga variada é mostrado na figura 25. Foi aplicada uma carga RL de 400 ohms e 30mH no período de 0 a 3 segundos quando mudou repentinamente para 300 ohms e 105mH no período de 3 a 6 segundos e posteriormente voltando à carga inicial. Observa-se uma leve redução da velocidade de rotação que sai de 1611 rpm para 1599 rpm, enquanto o torque eletromagnético aumenta de 1,16 pu para 1,17 pu, indicando um aumento da potência ativa pelo sistema. Portanto, a tensão terminal do gerador sofre uma redução de 150 V para 142 V e a corrente do estator diminui de 4,40 A para 4,11 A. Após o retorno dos valores iniciais da carga, o sistema restabelece seus mesmos níveis anteriores. Esse comportamento corrobora com a literatura recente, que demonstra a capacidade do gerador de relutância síncrona de manter a estabilidade frente a perturbações transitórias, preservando a forma de onda, vide apêndice E, e restabelecendo sua operação de forma robusta após variações abruptas de carga (Obe, et al., 2023).

6. CONCLUSÃO

A proposta desse trabalho é mostrar as vantagens do Gerador Síncrono à Relutância autoexcitado (SERG) no uso de sistemas eólicos. Atualmente, são usados os geradores de indução autoexcitados, porém esses apresentam uma grande instabilidade na tensão e na frequência, devido a ser um gerador assíncrono. A presença do escorregamento e sua forte dependência da velocidade mecânica torna o sistema sensível a perturbações, o que ocasiona oscilações acentuadas de tensão.

Dessa forma, o modelo desenvolvido, Gerador Síncrono à Relutância Autoexcitado acoplado à turbina eólica (WDSERG) demonstrou com base nas simulações um desempenho dinâmico estável e condizente com a máquina síncrona, o que confere maior previsibilidade à frequência elétrica e reduz a sensibilidade à variação de carga. Sendo assim, sua capacidade de autoexcitação foi confirmada com a tensão residual em cenários com e sem carga.

Na análise da variação da velocidade do vento, o sistema respondeu de forma estável, ajustando o torque eletromagnético toda vez que havia variação na potência mecânica disponível. Apesar de a tensão terminal apresentar oscilações diante das condições diferentes do vento e carga, constatou-se que o sistema estabelece novos pontos de equilíbrio sem grandes instabilidades, portanto um sistema dinâmico estável.

Portanto, com os resultados obtidos nas simulações e nos estudos, conclui-se que o WDSERG é uma alternativa consistente para uso em geração eólica isolada da rede, obtendo uma simplicidade construtiva, ausência de escovas, autoexcitação independente de fontes externas e um comportamento dinamicamente estável.

7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste estudo, foram observadas possibilidades de trabalhos futuros. Portanto, a seguir são apresentados alguns temas que podem ser explorados, com o objetivo de aprofundar a análise e ampliar as aplicações do sistema estudado:

- Implementação prática do sistema de geração eólica com gerador síncrono à relutância autoexcitado, visando a validar os resultados obtidos por simulação computacional;
- Desenvolvimento e aplicação de técnicas de controle para regulação de tensão e frequência em sistemas isolados utilizando o gerador síncrono à relutância autoexcitado;
- Investigação da aplicação de máquinas síncronas à relutância em sistemas de tração de veículos elétricos, considerando a eficiência, o controle e a comparação com outras topologias utilizadas na indústria automotiva.

REFERÊNCIAS

- ALOLAH, A. I. Capacitance requirements for three-phase self-excited reluctance generator. *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, v. 138, p. 193–198, 1991.
- ABU-ELHAIJA, W. S. Capacitance requirement of single-phase self-excited reluctance generator using eigenvalues criterion. In: *IEEE PES Transmission and Distribution Conference & Exposition*. Dallas, Texas, 2006. p. 21–25.
- ADJEI-FRIMPONG, Samuel; MUTEBA MBIKA. Performance analysis of a synchronous reluctance generator with a slitted-rotor core for off-grid wind power generation. *Electricity*, Johannesburg, v. 6, n. 2, 2025.
- ALOLOH, A. I. Capacitance requirements for three-phase self-excited reluctance generators. *IEE Proceedings C*, 1991. v. 138.
- OGUNJUYIGBE, A. S. O.; AYODELE, T. R.; ADETOKUN, B. B.; JIMOH, A. A. Wind-driven self-excited reluctance generator for rural electrification, 2016.
- CAIXETA, D. A. et al. Modelagem computacional de um sistema de conversão de energia eólica isolado via ATP. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica; Curitiba: LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.
- CASTRO, Nivalde; OLIVEIRA, Carlos. A energia eólica no Brasil e no mundo: desafios e perspectivas. Rio de Janeiro: Agência CanalEnergia, 2019.
- DEEPU, Vijay M.; SINGH, Bhim; BHUVANESWARI, G. Position sensor-less synchronous reluctance generator based grid-tied wind energy conversion system with adaptive observer control. *IEEE*, 2019.
- DONAGHY-SPARGO, C. M. Synchronous reluctance motor technology: industrial opportunities, challenges and future direction, 2016.
- FERRAZ, Carlos Alberto Medon Dias. Contribuição ao estudo do motor síncrono de relutância com gaiola. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- SGUAREZI FILHO, Alfeu; CARDOSO, Jaqueline Gomes. Energia eólica: tipos de geradores e conversores usados atualmente. *IEEE*, 2014.
- KUO, S. C.; WANG, L. Analysis of isolated self-excited induction generator. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, v. 149, p. 90–97, 2002.

MARTINS, Carlos E. G. Motores síncronos de relutância com barreiras de fluxo e partida assíncrona. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

MATOS, Diogo Melo Bento. Controlo vetorial de motores síncronos de relutância. Covilhã: [s.n.], 2014.

OZDAL, Onur Meng; ALTAS, Ismail Hakkı. Fuzzy logic control for a wind/battery renewable energy production system. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, v. 20, n. 2, 2012.

MONCADA, R. H. et al. Operation analysis of synchronous reluctance machine in electric power generation. *IEEE*, 2014.

ALI, Mohiedden Mosaad; ALLAM, Said Mahmoud; ABDEL-MONEIM, Talaat Hamdan. Dynamic characteristics of an isolated self-excited synchronous reluctance generator driven by a wind turbine. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2016.

NAU, Sebastião L. Motores síncronos de relutância. 2017. Material didático.

OBE, Pauline Ijeoma et al. Performance of synchronous reluctance generators with series and shunt stator connections. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, Palapye, v. 14, 2023.

OGUNJUYIGBE, A. S. O.; AYODELE, T. R.; ADETOKUN, B. B. Steady state analysis of wind-driven self-excited reluctance generator for isolated applications. *Renewable Energy*, v. 114, 2017.

PYRHONEN, Juha et al. Design of rotating electrical machines. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2008.

PYRHÖNEN, Juha; HRABOVCOVÁ, Valéria; SEMKEN, R. Scott. Electrical machine drives control. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2016.

RAHIM, Y. H. A. Analysis of self-excited induction generator under different load conditions. In: *International Conference on Science and Engineering Technology (ICSET)*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2010.

REZK, Hegazy et al. Optimal rotor design of synchronous reluctance machines considering the effect of current angle. *Mathematics*, v. 9, 2021.

SANTOS JUNIOR, Josemar Alves. Construção, acionamento, controle e análise de desempenho dinâmico de um motor síncrono a relutância. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. Disponível em: <https://www.wwindea.org/>. Acesso em: 15 abr. 2026.

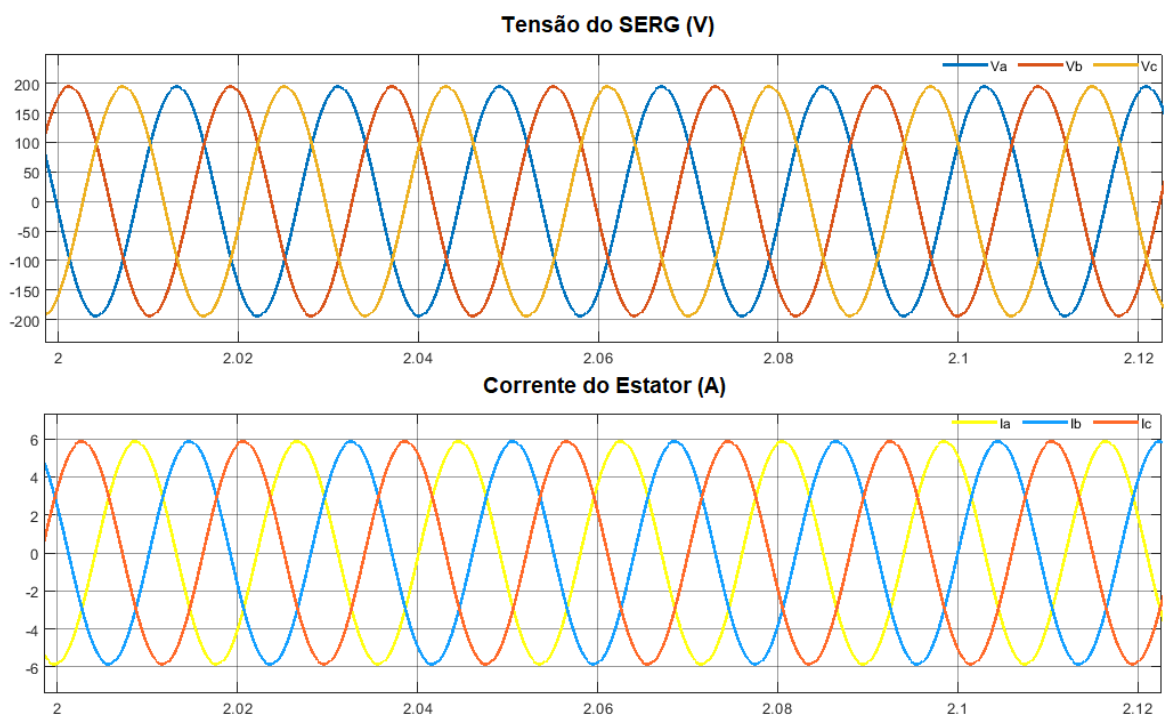
RAHIM, Y. H. A.; FLETCHER, J. E.; HASSANAIN, N. E. A. M. Performance analysis of salient-pole self-excited reluctance generators using a simplified model. *IET Renewable Power Generation*, v. 4, p. 253–260, 2010.

APÊNDICE A – VELOCIDADE DO VENTO 10 M/S SEM CARGA

A figura 26 mostra o comportamento do gerador síncrono à relutância autoexcitado operando sem carga conectada aos seus terminais, sob uma velocidade de vento constante de 10 m/s. Através deste gráfico aproximado, é possível atestar a qualidade da energia gerada, evidenciada pelas formas de onda senoidais e livres de distorções harmônicas significativas.

A ampliação permite visualizar a simetria do sistema trifásico, destacando o defasamento elétrico de 120 graus entre as fases A, B e C, tanto para a tensão quanto para a corrente. Esta corrente evidencia a troca contínua de potência reativa entre o gerador e o banco de capacitores, fenômeno fundamental que garante a magnetização contínua e a manutenção do processo de autoexcitação da máquina.

Figura 26 – Ampliação dos gráficos do WDSERG operando sem carga



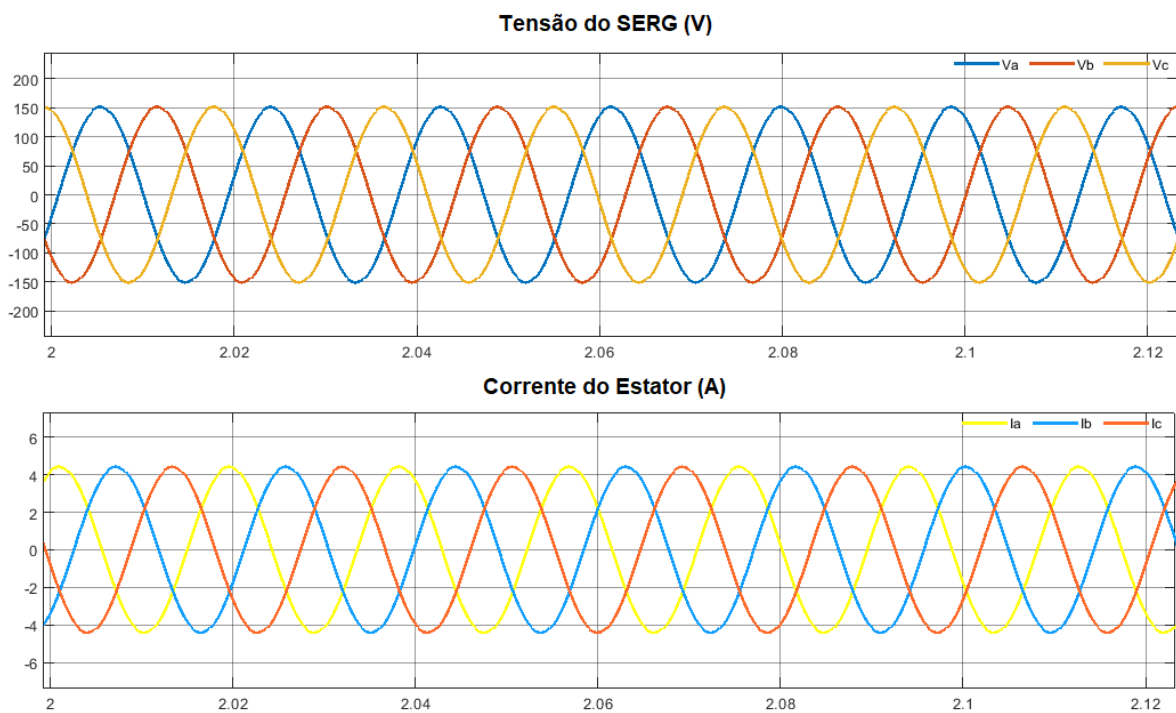
Fonte: autora

APÊNDICE B – VELOCIDADE DO VENTO 10 M/S COM CARGA

A figura 27 apresenta o gerador síncrono à relutância operando com uma carga RL conectada aos seus terminais, com velocidade do vento de 10 m/s. Através desta visualização detalhada, é possível notar claramente o impacto físico da inserção da carga no sistema autoexcitado.

Ao comparar as formas de onda com a operação a vazio, a exigência de potência pela carga resulta em uma diminuição na amplitude da onda de tensão terminal. Simultaneamente, o gráfico inferior evidencia uma diminuição da corrente do estator e uma alteração nítida no ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente, devido ao caráter indutivo da carga acoplada. Apesar dessa demanda, as formas de onda mantêm-se estabilizadas, senoidais e com defasamento de 120 graus entre as fases A, B e C, comprovando que o banco de capacitores consegue sustentar o sistema.

Figura 27 - Ampliação dos gráficos do WDSERG operando com carga ($R = 400 \, \Omega$ e $L = 30 \, \text{mH}$)



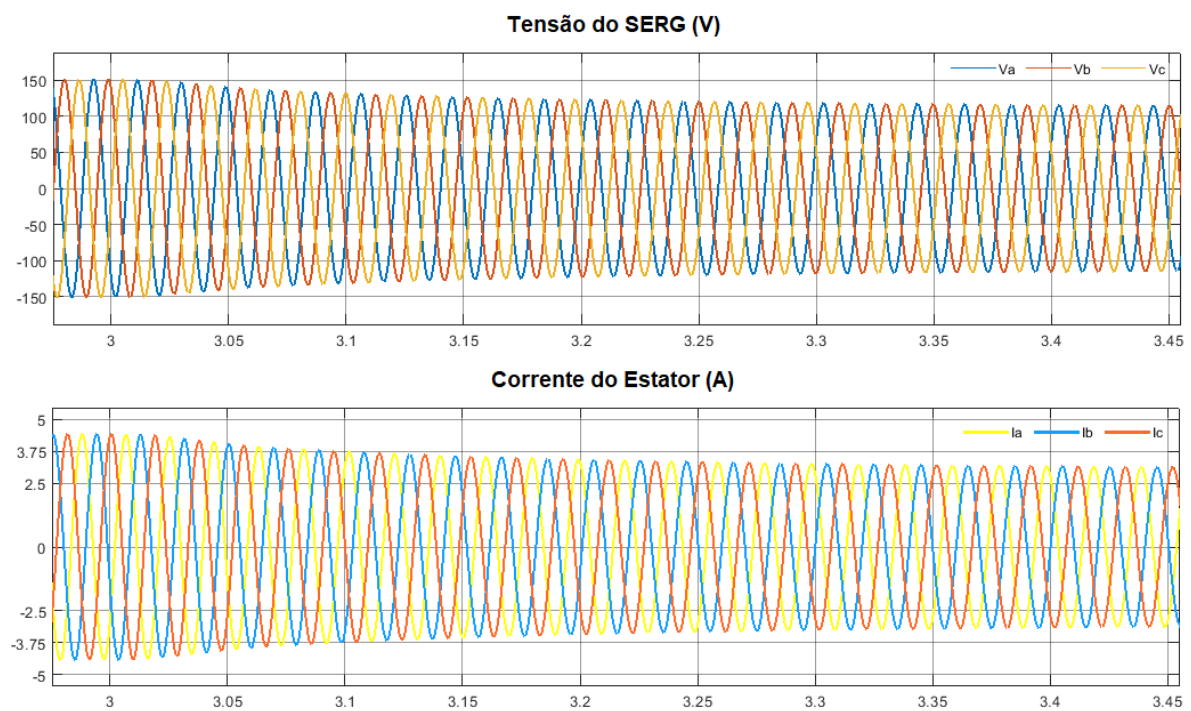
Fonte: autora

APÊNDICE C – REDUÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO PARA 8 M/S

A figura 28 mostra a redução abrupta da velocidade do vento de 10 m/s para 8 m/s, ocorrida no instante $t = 3,0$ s. Dessa forma, é possível constatar visualmente o impacto da diminuição da potência mecânica fornecida pela turbina, que resulta em uma queda imediata e suave na amplitude das tensões e correntes geradas.

Além da variação de amplitude, a ampliação permite observar um ligeiro alargamento das formas de onda após o instante da perturbação. Este aumento reflete a diminuição da frequência elétrica, uma característica inerente a este tipo de gerador, cuja frequência de saída possui forte dependência da velocidade do rotor. Apesar da diminuição da velocidade, o gerador síncrono à relutância autoexcitado demonstra excelente estabilidade: as formas de onda permanecem contínuas e o defasamento de 120 graus entre as fases é mantido de forma simétrica, comprovando que o banco de capacitores sustenta a excitação da máquina de maneira segura e sem colapsos.

Figura 28 - Ampliação dos gráficos do WDSERG frente à redução da velocidade do vento (10 m/s para 8 m/s) com carga



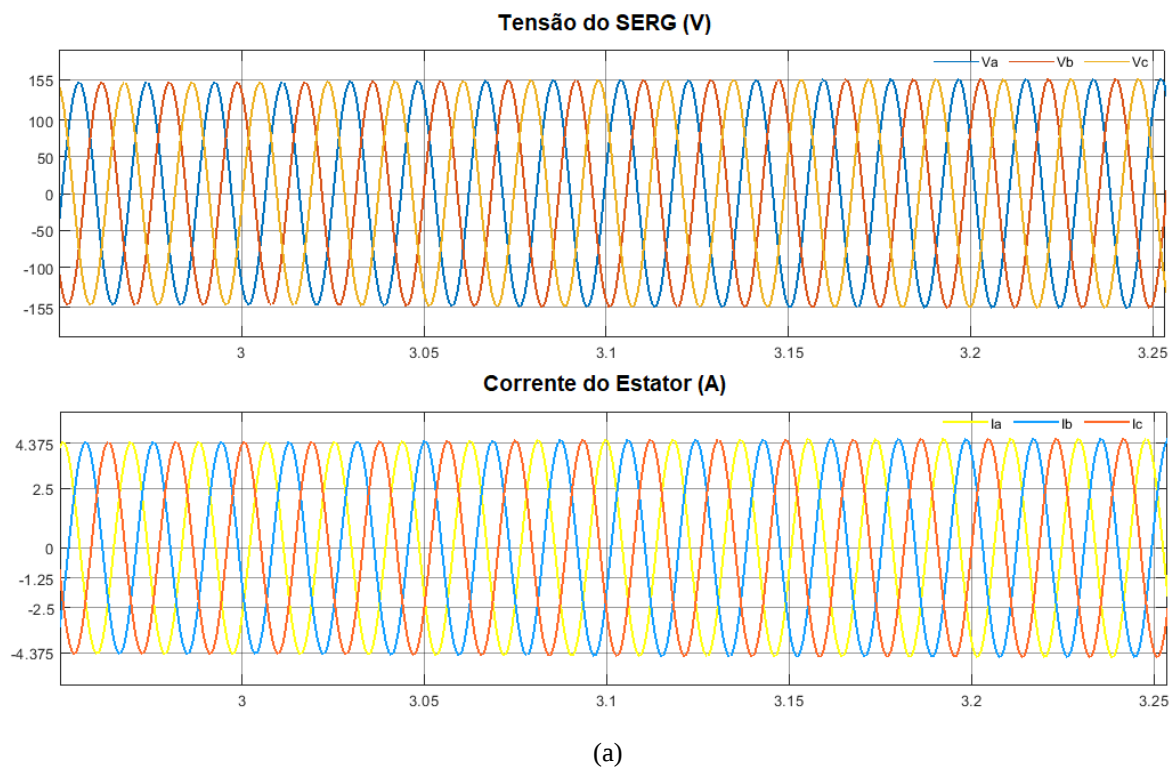
Fonte: autora

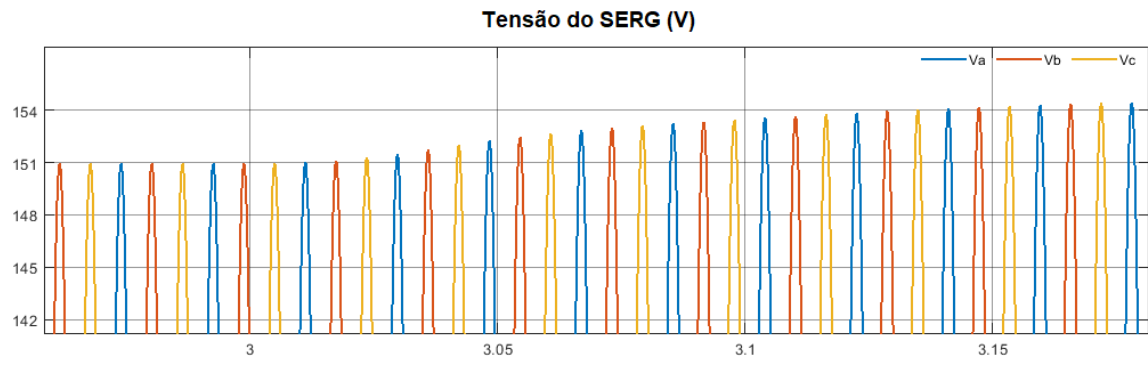
APÊNDICE D – AUMENTO DA VELOCIDADE DO VENTO PARA 10,2 M/S

A figura 29 mostra o aumento abrupto da velocidade do vento de 10 m/s para 10,2 m/s, ocorrida no instante $t = 3,0$ s. Através desta ampliação (b), é possível observar que o aumento da potência mecânica de entrada reflete-se no aumento imediato e proporcional da amplitude das fases, tanto para a tensão quanto para a corrente.

Destaca-se que não há distorções harmônicas severas ou picos de sobretensão destrutivos no momento da transição. A máquina encontra o seu novo ponto de operação rapidamente, mantendo rigorosamente a simetria e o defasamento elétrico de 120 graus entre as fases A, B e C. Esta aproximação permite atestar visualmente a continuidade das formas de onda senoidais, sem degraus, comprovando a robustez do sistema de autoexcitação capacitiva frente a fortes ventos e acelerações da turbina.

Figura 29 - Ampliação dos gráficos do WDSERG com o aumento da velocidade do vento (10 m/s para 10,2 m/s) com carga. Em (a), visão geral da tensão do SERG e corrente do estator; em (b), detalhe do aumento na amplitude da tensão





(b)

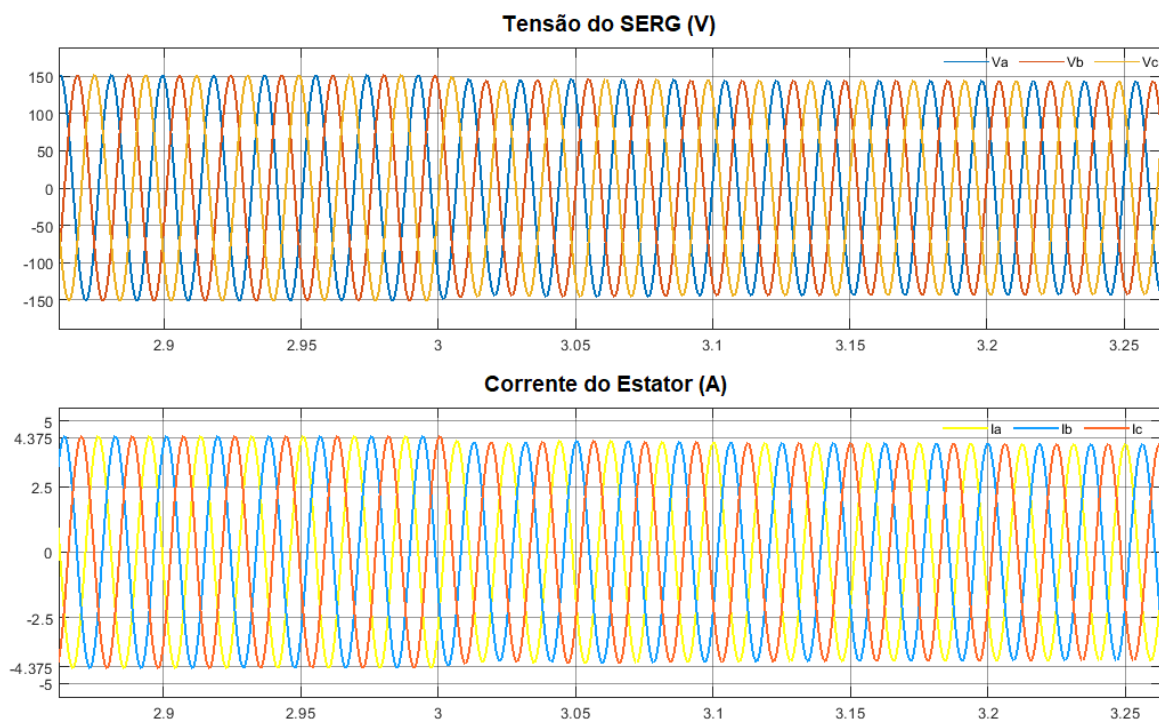
Fonte: autora

APÊNDICE E – VARIAÇÃO DE CARGA

A figura 30 mostra o comportamento do gerador no instante em que ocorre uma alteração da carga RL conectada aos seus terminais no tempo $t = 3,00$ s, observando o impacto imediato da alteração da impedância do sistema. Com a entrada da nova configuração de carga (que possui uma característica fortemente mais indutiva), nota-se a redução instantânea na amplitude da tensão terminal e a readequação da corrente do estator.

Além das alterações de amplitude, evidencia a mudança no ângulo de defasamento entre as ondas de tensão e corrente após o instante da alteração, um reflexo direto do aumento da exigência de potência reativa pela carga. O sistema não apresenta colapso da tensão ou perda de magnetização, restabelecendo a simetria trifásica e a estabilidade das formas de onda em poucos ciclos, o que comprova a robustez do processo de autoexcitação capacitiva perante flutuações em redes isoladas.

Figura 30 - Vista ampliada dos gráficos do WDSERG durante variação de carga (de $400\ \Omega$ e 30 mH para $300\ \Omega$ e 105 mH)



Fonte: autora