

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

RONNE DA CONCEIÇÃO GOUVEIA

**Simulação no Domínio do Tempo de Distúrbios em um
Sistema de Potência de Pequeno-Porte Incluindo Modelo
de Gerador Síncrono Eólico**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

São Luís

2025

RONNE DA CONCEIÇÃO GOUVEIA

**Simulação no Domínio do Tempo de Distúrbios em um
Sistema de Potência de Pequeno-Porte Incluindo Modelo
de Gerador Síncrono Eólico**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Elétrica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: José Eduardo Onoda Pessanha

São Luís

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Gouveia, Ronne da Conceição.

Simulação no Domínio do Tempo de Distúrbios em um Sistema de Potência de Pequeno-Porte Incluindo Modelo de Gerador Síncrono Eólico / Ronne da Conceição Gouveia. - 2025.

75 p.

Orientador(a): José Eduardo Onoda Pessanha.

Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

1. Conversores. 2. Energia Eólica. 3. Geradores Eólicos Síncronos de Ímãs Permanentes (pmsg). 4. Eventos. 5. Simulações Computacionais. I. Pessanha, José Eduardo Onoda. II. Título.

RONNE DA CONCEIÇÃO GOUVEIA

**Simulação no Domínio do Tempo de Distúrbios em um Sistema de Potência
de Pequeno-Porte Incluindo Modelo de Gerador Síncrono Eólico**

BANCA EXAMINADORA

José Eduardo Onoda Pessanha (Orientador)
Professor Doutor Titular, CCET - DEE - UFMA
Universidade Federal do Maranhão

Clóvis Bôsko Mendonça Oliveira
Professor Doutor, CCET - DEE - UFMA
Universidade Federal do Maranhão

Denisson Queiroz Oliveira
Professor Doutor, Engenharia de Computação
Universidade Federal do Maranhão

São Luís
Agosto
2025

À minha família e aos meus amigos, pelo apoio constante e pela confiança depositada em mim ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Esta conquista é nossa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança para enfrentar e superar cada desafio ao longo desta jornada acadêmica.

À minha família, expresso minha mais profunda e sincera gratidão. Em especial, agradeço à minha esposa, Tanielle, por sua paciência, compreensão diante das minhas ausências e, sobretudo, por ser meu alicerce inabalável durante todo esse percurso. À minha mãe, Aldirene, minha eterna gratidão por acreditar em mim incondicionalmente e por sempre incentivar meus sonhos. Aos demais familiares, sou imensamente grato por todo amor, apoio constante e pela torcida inabalável. Esta conquista é reflexo da base sólida e do carinho que sempre recebi de vocês.

Aos colegas e amigos, meu reconhecimento e gratidão. Em especial, ao amigo Erivan, que esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis, oferecendo apoio, escuta e incentivo. As conversas, as trocas de ideias e o companheirismo foram fundamentais não apenas para a realização deste trabalho, mas para minha formação como um todo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha, agradeço profundamente pela confiança depositada em meu potencial, pela paciência e pela orientação técnica e acadêmica ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Estendo meus agradecimentos aos demais professores do curso, com destaque especial à coordenadora, Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima, cuja dedicação e compromisso contribuíram de maneira significativa para minha formação, tanto como professora quanto como coordenadora.

Ao Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, em particular ao DSE - Departamento de Sistemas Eletroenergéticos pela cessão dos programas Anarede e Anatem através de contrato firmado entre a UFMA e este órgão.

A todos vocês, meu muito obrigado.

*“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de
seus sonhos.”*

Eleanor Roosevelt

RESUMO

O crescimento expressivo de inserção de grandes usinas de geração eólica na matriz energética mundial tem aumentado a necessidade de estudos sobre o impacto dinâmico dessas novas tecnologias nas condições de operação dos sistemas elétricos modernos, principalmente as de conversores e inversores baseados em eletrônica de potência. Esta monografia investiga o comportamento dinâmico de Geradores Síncronos Eólicos (GSE) com acionamento direto (*direct-drive*) em resposta a contingências sequenciais tipo abertura de linhas de transmissão (distúrbios internos), bem como perturbações eólicas tipo rajadas e turbulências (distúrbios externos). Foram feitos e são apresentados estudos sobre conceitos fundamentais desse tipo de aerogerador, além de conversores-inversores, visando adquirir conhecimentos para prosseguir com investigações via simulações computacionais usando um sistema-teste hipotético de pequeno-porte modificado. As condições operacionais iniciais foram estabelecidas por meio de um programa de computador de fluxo de carga (Anarede – versão 11.5.5), enquanto o comportamento dinâmico dos aerogeradores e as ações do conversor antes, durante e pós-evento, foram fielmente reproduzidos em um programa de computador de transitórios eletromecânicos (Anatem – versão 12.5.1). Os resultados foram avaliados e analisados com especial interesse nas principais variáveis atuantes no restabelecimento de uma condição de equilíbrio pós-falta.

Palavras-chave: Conversores, Energia Eólica, Eventos, Geradores Eólicos Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSG), Simulações Computacionais.

ABSTRACT

The significant growth in the insertion of large wind power plants into the global energy matrix has increased the need for studies on the dynamic impact of these new technologies on the operating conditions of modern electrical systems, particularly those of power electronics-based converters and inverters. This work investigates the dynamic behavior of direct-drive Wind Synchronous Generators (WSG) in response to sequential contingencies such as transmission line openings (internal disturbances), as well as wind disturbances such as gusts and turbulences (external disturbances). Studies on the fundamental concepts of this type of wind turbine and converter were conducted and are presented to acquire knowledge for further investigations via computer simulations using a modified small-scale test system. The initial operating conditions were established using a load flow software program (Anarede – version 11.5.5), while the dynamic behavior of the wind turbines and the converter actions before, during, and after the event were faithfully reproduced using an electromechanical transient software program (Anatem – version 12.5.1). The results were evaluated and analyzed with particular attention to the main variables involved in reestablishing a post-fault equilibrium condition.

Keywords: Computer Simulations, Converters, Events, Permanent Magnet Synchronous Wind Generators (PMSG), Wind Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 1 - Configuração do sistema de geração de energia eólica com DFIG e conversor de potência de escala parcial	25
Fig. 2 - Estrutura de um sistema de geração de energia eólica sem engrenagens com PMSG e conversor de carga total	26
Fig. 3 – Diagrama das configurações modernas de WECS	28
Fig. 6 – Evolução das turbinas de geração eólica.....	32
Fig. 5 – Conversor em ponte completa.....	35
Fig. 6 – Tensão na saída com forma de onda quadrada e forma de onda da corrente no estado estável para uma carga RL.....	36
Fig. 7 – Inversor trifásico de 2 níveis	37
Fig. 8 – Retificador monofásico em ponte completa.....	41
Fig. 9 – Retificador monofásico em ponte completa.....	42
Fig. 10 – Sistema de interligação <i>back-to-back</i>	43
Fig. 11 – Topologia de um gerador síncrono de velocidade variável	44
Fig. 12 – Aproveitamento eólico utilizando gerador síncrono de velocidade variável	44
Fig. 13 – Modelo representando o gerador síncrono de velocidade variável nas simulações ..	45
Fig. 14 – Esquema simplificado de controle do aerogerador	47
Fig. 15 – Diagrama de controle do regulador de tensão do aerogerador.....	48
Fig. 16 – Diagrama de controle do <i>Chopper</i>	49
Fig. 17 – Diagrama de controle do Inversor do GSE	51
Fig. 18 – Controle do torque de referência Tr_{REF}	52
Fig. 19 – Controle da componente de eixo direto da tensão do inversor (V_{d2}).....	52
Fig. 20 – Controle da Referência de Potência Reativa	53
Fig. 16 – Controle da componente de eixo em quadratura da tensão do inversor (V_{q2})	53
Fig. 22 – Diagrama de controle da turbina do aerogerador	54
Fig. 23 – Malha de controle para conversão e exportação da potência mecânica resultante em torque (EXPORT TMGSE).....	55
Fig. 24 – Malha de controle do ângulo de passo das pás (Beta).....	55
Fig. 25 – Malha de controle da Referência de Velocidade do Rotor (EXPORT WRFGSE)	56
Fig. 26 – Sistema teste original e o modificado utilizado para simulações.....	58
Fig. 27 – Curva de desempenho da turbina	61
Fig. 28– Curva de referência de velocidade ($P \times w$).....	62

Fig. 29 – Grandezas controladas e controladoras a partir do sinal de erro de tensão.....	63
Fig. 30 – Grandezas controladas e controladoras com desligamentos sequenciais.....	64
Fig. 31- Comportamento dinâmico de grandezas controladoras (sinais de erro) e controladas em resposta a rajada de vento	65
Fig. 32 - Comportamento dinâmico de grandezas controladoras (sinais de erro) e controladas em resposta as turbulências na velocidade do vento	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados das Turbinas Eólicas.....	44
Tabela 2 – Dados do Gerador PMSG.....	44
Tabela 3 – Dados da geração eólica.....	44
Tabela 4 – Dados da máquina síncrona.....	45
Tabela 5 – Dados do conversor.....	45
Tabela 6 – Dados do conversor (cont.)	45
Tabela 7 – Dados calculados na pré-simulação.....	46
Tabela 8 – Modelagem da Carga Estática da Barra 2.....	46
Tabela 9 – Parâmetros dos motores.....	46
Tabela 10 – Fluxo de Potência Convergado.....	46
Tabela 11 – Sequência de manobras simuladas.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

β	Ângulo de passo das pás
BTB	Back-to-Back
C_p	Coeficiente de desempenho (potência)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CDU	Controlador Definido pelo Usuário
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
D	Constante de amortecimento
DEESG	Gerador Síncrono de Excitação Elétrica Dupla
DFIG	Gerador de Indução de Dupla Alimentação
DMGE	Dados de Máquina e Elo CC
EESG	Gerador Síncrono Eletricamente Excitado
FEM	Força Eletromotriz
FP	Fator de Potência
GSC	Conversor do Lado da Rede
GSE	Gerador Síncrono Eólico
GWEC	Global Wind Energy Council
H	Constante de inércia
i_{ds}, i_{qs}	Correntes do estator nos eixos direto (d) e quadratura (q)
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
L_{ds}, L_{qs}	Indutâncias do estator nos eixos d e q
λ	Razão de velocidade da ponta da pá (<i>Tip speed ratio</i>)
LER	Leilão de Energia de Reserva
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Metal-Óxido-Semicondutor
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
MSC	Conversor do Lado da Máquina
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P_s	Potência ativa do estator
PCC	Ponto de Conexão Comum
PMSG	Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes
pu	por unidade
PV	Barra de Potência-Tensão
PWM	Modulação por Largura de Pulso

Q_s	Potência reativa do estator
R_s	Resistência do estator
RSC	Conversor do Lado do Rotor
SCIG	Gerador de Indução Gaiola de Esquilo
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
T_e	Torque eletromecânico
u_{ds}, u_{qs}	Tensões do estator nos eixos direto (d) e quadratura (q)
UPS	Fonte de Alimentação Ininterrupta
V_v	Velocidade do vento
VSC	Conversores de Fonte de Tensão
VSI	Inversor Alimentado por Tensão
WECS	Sistema de Conversão de Energia Eólica
ω_m	Velocidade angular do rotor
ψ_{ds}, ψ_{qs}	Fluxos concatenados do estator nos eixos d e q
ψ_{pm}	Fluxo concatenado dos ímãs permanentes

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.1	INTRODUÇÃO	16
1.2	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	17
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>17</i>
1.3.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>18</i>
1.4	METODOLOGIA	18
1.5	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	19
1.6	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2	FUNDAMENTO, APLICAÇÕES E MODELOS DO GERADOR SÍNCRONO DE	
	ÍMA PERMANENTE.....	21
2.1	INTRODUÇÃO	21
2.2	MÁQUINA SÍNCRONA NO MODO GERADOR EÓLICO - ESTADO DA ARTE	21
2.3	TIPOS DE AEROGERADORES.....	23
2.3.1	<i>DFIG com Caixa de Engrenagens de Estágio Único e de Três Estágios</i>	<i>24</i>
2.3.2	<i>PMSG com Caixa de Engrenagens de Estágio Único ou Acionamento Direto</i>	<i>26</i>
2.4	MODELAGEM MATEMÁTICA DO PMSG.....	28
2.5	APLICAÇÕES.....	30
2.6	AVANÇOS RECENTES	31
3	MODELOS DE CONVERSORES E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE	33
3.1	INTRODUÇÃO	33
3.2	FUNDAMENTOS DE CONVERSORES UTILIZADOS NA GERAÇÃO EÓLICA	33
3.2.1	<i>Conversores CC-CA (Inversores).....</i>	<i>33</i>
3.2.2	<i>Elo CC.....</i>	<i>39</i>
3.2.3	<i>Conversores CA-CC (Retificadores)</i>	<i>40</i>
3.2.4	<i>Conversor back-to-back.....</i>	<i>42</i>
3.3	CONVERSORES AGREGADOS AO GSE	43
3.4	MODELO DO AEROGERADOR TIPO GSE.....	44
3.4.1	<i>Diagrama De Controle do Aerogerador</i>	<i>46</i>
3.4.2	<i>Diagrama De Controle do Regulador Automático de Tensão</i>	<i>48</i>

3.4.3	<i>Diagrama de Controle do conversor Chopper.....</i>	<i>49</i>
3.4.4	<i>Diagrama de Controle do Inversor.....</i>	<i>50</i>
3.4.5	<i>Diagrama de Controle da Turbina.....</i>	<i>54</i>
4	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E RESULTADOS	57
4.1	INTRODUÇÃO	57
4.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE.....	57
4.3	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	62
4.3.1	<i>Abertura e Fechamento Sequencial de Circuito</i>	<i>62</i>
4.3.2	<i>Rajada de Vento.....</i>	<i>64</i>
4.3.3	<i>Turbulências na Velocidade do Vento</i>	<i>65</i>
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	67
	BIBLIOGRAFIA	68

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

A participação de energia eólica no Brasil tem apresentado um notável desenvolvimento desde o Leilão de Energia de Reserva (LER) realizado em 2009. Em 2019, enquanto a capacidade média mundial de energia eólica cresceu 34%, o Brasil apresentou um crescimento superior, de 42,7%. Este avanço contínuo levou o país a alcançar a 7ª posição no Ranking Mundial do *Global Wind Energy Council* (GWEC) em 2020. As projeções indicavam que até 2024 a capacidade média nacional atingiria 24,2 GW.

De acordo com o relatório, em 2023, o Brasil foi o terceiro maior instalador de energia eólica, repetindo o desempenho de 2022, ficando novamente atrás apenas da China e dos Estados Unidos (Sousa, 2024). Nesse mesmo ano, o mundo superou a marca de 30% de eletricidade gerada por fontes renováveis, impulsionado pelo crescimento da energia solar e eólica, conforme publicações mais recentes do *think tank* global de energia Ember. Nesse contexto, o Brasil se destacou ao aumentar em 89% a geração a partir de fontes renováveis, quase três vezes a média global, além de registrar o segundo maior aumento na capacidade de energia eólica do mundo, ficando atrás apenas da China.

A participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira atingiu 13% em 2023, um aumento expressivo em relação aos 3,7% registrados em 2015. Tal crescimento significativo destaca a expansão das fontes renováveis no país. Com a expectativa de um aumento significativo de parques eólicos conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), o Brasil poderia reduzir sua dependência de matrizes hidrelétricas e térmicas (ONS, 2024). A primeira é muito dependente da vazão das chuvas, enquanto a segunda exige investimentos elevados e enfrenta fortes restrições ambientais.

Neste contexto de expansão, a tecnologia do Gerador Síncrono Eólicos (GSE) tem merecido destaque. Caracterizada pela ausência de uma caixa de multiplicação (*gearbox*), a tecnologia *direct-drive* GSE oferece maior eficiência e confiabilidade, reduzindo a complexidade mecânica e os custos de manutenção. Tais características tornam sua aplicação particularmente vantajosa em parques de alta potência e parques eólicos *offshore*. O seu sistema de controle, baseado em um conversor de eletrônica de potência de plena potência, desacopla completamente o gerador da rede, permitindo um controle independente e preciso dos seus

parâmetros de geração, como a potência ativa e reativa, o que é fundamental para a operação segura e confiável do sistema (Hojabri; Mokhtari; Chang, 2013).

Diante deste cenário, o presente trabalho investiga por meio de estudos conceituais e simulações computacionais, o comportamento dinâmico de Geradores Síncronos Eólicos em respostas a uma variedade de adversidades operacionais, como contingências sequenciais (aberturas de linhas de transmissão), e distúrbios eólicos (rajadas e turbulências).

1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Grandes parques eólicos compostos por GSEs (Geradores Síncronos Eólicos) estão conectados a redes de alta tensão através de conversores do lado da rede (GSC – do inglês *Grid Side Converter*) e do rotor (RSC – do inglês *Rotor Side Converter*), sendo este último o principal responsável pelo controle de frequência e de tensão devido as variações na velocidade do vento. Quanto mais rápido e eficaz for esses controles, maiores as chances de a rede atingir uma condição de equilíbrio estável pós-falta. Geralmente, o controle da tensão terminal do GSE é feito com base no controle da potência reativa e no sinal de erro gerado pelos desvios dessa tensão em relação a de referência. Entretanto, os limites de MVar podem restringir o controle levando a uma condição de operação instável agravada à medida que demais controladores atingem seus limites. Portanto, estratégias de controle e ajustes adequados nos conversores e demais reguladores são cruciais para evitar que a rede entre em uma região de instabilidade. Há uma certa escassez de estudos envolvendo faltas e distúrbios em redes de alta tensão com participação de GSEs.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Contribuir no aspecto de segurança de operação da rede de alta-tensão com fontes de energias renováveis através de conceitos e simulações computacionais, aproveitando adequadamente os avanços tecnológicos de GSEs, além de investigar suas respostas antes, durante e após distúrbios internos (desligamentos e reenergização de linhas de transmissão) e externos à rede (rajada e turbulência).

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre GSEs, adquirindo conhecimentos sobre seus modelos, conversores, inversores e estratégias de controle aplicadas a determinadas grandezas.
- Estudar e consolidar conhecimentos sobre a operação do GSE em diferentes cenários, avaliando a influência das perturbações elétricas e mecânicas sobre determinadas grandezas elétricas e mecânicas.
- Elaborar e realizar simulações computacionais nos regimes permanente e dinâmico para avaliar o comportamento dos GSEs durante e após evento(s) no sistema de potência.
- Investigar a dinâmica de atuação do sistema de controle do conversor, analisando como as variáveis controladas são moduladas para seguir seus respectivos valores de referência, a fim de restabelecer uma condição operacional segura após a ocorrência de faltas.
- Contribuir com conceitos fundamentais a respeito da tecnologia do GSE e seus conversores-inversores, além das análises dos resultados das simulações computacionais.
- Identificar e documentar as contribuições dos estudos para a comunidade de sistemas elétricos de potência, contribuindo à aplicação prática para desenvolvimento, implementação e teste de medidas preventivas e corretivas.
- Elaborar o texto final da monografia após atender todos os requisitos estipulados, e submetê-lo à coordenação para fins de oficialização da apresentação (defesa).

1.4 METODOLOGIA

A metodologia adotada foi estruturada em etapas sequenciais, visando uma análise completa e sistemática do sistema de potência proposto. A primeira etapa consistiu em uma revisão bibliográfica aprofundada sobre a dinâmica de sistemas elétricos, tecnologias de geração eólica, com foco no Geradores Síncronos Eólicos, e as estratégias de controle associadas a conversores de eletrônica de potência.

Subsequentemente, foi realizado o estudo e a parametrização dos modelos computacionais no programa Anatem. Esta fase envolveu a caracterização detalhada do modelo

do GSE e de seus sistemas de controle, incluindo o conversor de plena potência e as malhas de controle de torque e de potência reativa.

A terceira etapa foi a definição dos cenários de simulação, na qual foram estabelecidas as contingências e os distúrbios a serem aplicados ao sistema. Foram selecionados eventos representativos de faltas elétricas (curto-circuito trifásico), manobras operacionais (abertura e fechamento de linhas) e perturbações na fonte primária (rajadas e turbulência de vento).

Na sequência, foram estabelecidas as condições operacionais de regime permanente para cada cenário, utilizando o programa Anarede para a solução do fluxo de potência. Os casos base serviram como ponto de partida para as simulações dinâmicas no domínio do tempo, executadas no Anatem.

Por fim, a última etapa compreendeu a análise detalhada dos resultados obtidos nas simulações dinâmicas. O foco foi a avaliação do comportamento de variáveis críticas do sistema, como perfis de tensão, resposta de frequência e fluxos de potência, com o objetivo de investigar o desempenho dinâmico do sistema e a eficácia do controle do PMSG em manter a operação segura e confiável após cada perturbação.

1.5 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Tem-se notado com base na literatura uma certa escassez de conhecimentos e entendimentos dos impactos das respostas dos GSEs nas condições de equilíbrio do sistema antes, durante e após eventos originados de fontes internas ou externas. Com base nisso, o trabalho visa fornecer informações claras e objetivas que podem ser úteis para aqueles com pouco ou nenhum conhecimento nos assuntos acima, como:

- Material didático informativo sobre GSE e conversores-inversores;
- Sistema-teste de pequeno porte com dados completos, condições de operação e eventos simulados;
- Ações de controle do conversor-inversor na recuperação de grandezas controladas;
- Procedimentos para investigar a trajetória do ponto de operação pré-evento até uma condição de equilíbrio estável pós-evento.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A monografia está organizada como segue:

Capítulo 2: Fundamentos teóricos do GSE, princípios de funcionamento e modelos matemáticos que descrevem seu comportamento dinâmico;

Capítulo 3: Modelos de conversores eletrônicos utilizados no controle do GSE e as ações para monitorar, controlar e recuperar grandezas;

Capítulo 4: Simulações computacionais para analisar o comportamento dinâmico do GSE em resposta a evento(s) no sistema de potência;

Capítulo 5: Conclusão e recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTO, APLICAÇÕES E MODELOS DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMA PERMANENTE

2.1 INTRODUÇÃO

Apesar dos benefícios ambientais e econômicos, a integração dos geradores eólicos aos sistemas de potência impõe desafios técnicos, como a variabilidade da geração e a necessidade de controle dinâmico diante de distúrbios severos (Hansen; Michalke, 2021). Portanto, o estudo de tecnologias como as dos Geradores Síncronos Eólicos (GSE) são importantes devido a elevada eficiência e controlabilidade para aplicações em parques eólicos de grande porte.

Apresenta-se nas subseções seguintes componentes e tecnologias essenciais à geração de energia eólica. A subseção 2.2 examina o estado da arte dos geradores síncronos, destacando os avanços e desafios na área. Na seção 2.3, são abordados os diferentes tipos de aerogeradores, com ênfase nos geradores GSE, muito empregados pelas características acima. A seção 2.4 discorre sobre a modelagem matemática do GSE, fundamental para proceder com análises de desempenho e aplicação em sistemas elétricos. A seção 2.5 explora as aplicações desses geradores na geração de energia eólica, evidenciando sua relevância para o setor. Por fim, a seção 2.6 apresenta uma síntese dos avanços mais recentes nos modelos de aerogeradores, destacando as inovações tecnológicas e tendências futuras da área.

2.2 MÁQUINA SÍNCRONA NO MODO GERADOR EÓLICO - ESTADO DA ARTE

Os geradores eólicos síncronos têm se consolidado como uma tecnologia promissora na geração de energia eólica, destacando-se pela sua eficiência energética e capacidade de operação em uma ampla faixa de velocidades do vento. Esses geradores são compostos por duas partes principais: uma parte fixa, denominada estator, e uma parte móvel, chamada rotor.

No estator, encontram-se três enrolamentos distribuídos de forma simétrica, espaçados entre si por 120° em uma estrutura cilíndrica. Esses enrolamentos são responsáveis por conduzir a corrente elétrica induzida pelo campo magnético rotativo. Já o rotor pode ser construído de duas formas distintas: com um enrolamento de excitação ou com ímãs permanentes. No primeiro caso, o gerador é classificado como Gerador Síncrono Eletricamente Excitado (EESG, do inglês *Electrically Excited Synchronous Generator*), enquanto o segundo é Gerador Síncrono de Ímã Permanente (PMSG, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator*). Em ambos os casos, o rotor possui uma estrutura cilíndrica sólida e concêntrica com o estator.

O rotor com enrolamento de excitação ou rotor bobinado apresenta duas configurações fundamentais: polos salientes ou polos lisos. No primeiro, os enrolamentos são realizados ao redor de estruturas que se projetam radialmente da superfície do rotor, criando saliências. Em contraste, nos polos lisos, as bobinas são alojadas em ranhuras usinadas no corpo do rotor, resultando em uma superfície externa perfeitamente cilíndrica. Essa diferença construtiva tem implicações significativas no desempenho e nas aplicações de cada tipo de rotor. Segundo Boldea (2015), geradores com rotores de polos lisos são tipicamente construídos com 2 ou 4 polos, sendo aplicados em condições de alta velocidade, como em turbogeradores encontrados em usinas termoeletricas. Por outro lado, os modelos com rotores de polos salientes, que possuem mais de 4 polos, são empregados em condições de baixa velocidade, como ocorre em hidrogeradores e aerogeradores.

O funcionamento de geradores síncronos em aplicações eólicas fundamenta-se no fenômeno da indução eletromagnética, regido pela Lei de Faraday-Lenz, em que a variação do fluxo magnético através de um circuito condutor induz uma força eletromotriz (FEM). Nos geradores síncronos, o rotor atua como fonte primária do campo magnético, cuja geração, como citado anteriormente, ocorre tradicionalmente por duas metodologias distintas:

- i. Excitação Eletromagnética (EESG): um enrolamento no rotor é alimentado por corrente contínua (CC), gerando um campo magnético estático no referencial do rotor.
- ii. Ímãs Permanentes (PMSG): Ímãs de alta coercividade como ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) são fixados no rotor, produzindo um campo magnético intrínseco sem necessidade de excitação externa.

Em sistemas de geração eólica, o PMSG é uma das principais opções utilizadas (Pinto, 2014). O rotor dessa máquina é acoplado mecanicamente ao eixo da turbina eólica, cujo movimento é impulsionado pela energia cinética do vento convertida em torque mecânico pelas pás. Tal acoplamento é realizado pela caixa de engrenagem (do inglês *gearbox*), ou sem engrenagens (do inglês *direct drive*), sendo que ambas as configurações são amplamente utilizadas, dependendo da aplicação e potência do sistema. No caso do *direct drive*, a eliminação da caixa de engrenagens é possível graças às características construtivas do PMSG, que permite operação em baixas velocidades de rotação, além de possuir um sistema eficiente de controle de potência.

Com o avanço das tecnologias aplicadas à geração de energia elétrica e a crescente demanda por sistemas mais eficientes e de baixa manutenção, os geradores síncronos com

excitação sem escovas (do inglês *brushless*) vêm ganhando destaque na literatura técnica e científica. Uma contribuição relevante nesse contexto é o trabalho de Zhu *et al.* (2022) o qual introduziu um gerador síncrono de excitação elétrica dupla (DEESG) com uma excitatriz tipo *brushless* embutido, visando eliminar o uso de escovas sem comprometer a capacidade de controle da excitação. A estrutura proposta combina enrolamentos de excitação adicionais no estator com dois conjuntos de enrolamentos no rotor – o de excitação pulsante e o principal – operando em conjunto para fornecer corrente contínua ao campo rotórico por meio de retificação direta via diodos. Essa configuração permite a geração de um campo magnético eficaz no rotor, com melhor desempenho dinâmico e menor variação da tensão de saída sob diferentes condições de carga.

Outro estudo relevante na literatura é o de Kahla *et al.* (2020), que propõe uma estrutura de controle inovadora voltada à extração da potência máxima (do inglês MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) em turbinas eólicas baseadas em geradores síncronos de ímãs permanentes. O método se baseia em uma técnica de linearização por realimentação com ordem fracionária, uma abordagem matemática que introduz maior flexibilidade e robustez ao controle dinâmico de sistemas não lineares, como os sistemas de conversão de energia eólica.

A literatura tem apresentado diversas estratégias de controle aplicadas ao PMSG, enfatizando a maximização de extração de potência e na estabilidade do sistema frente a variações de carga (Liang *et al.*, 2022). Contudo, ainda é limitada a quantidade de estudos que abordam de forma abrangente o impacto de eventos externos — como rajadas de vento, turbulências e rampas — ou distúrbios originados na rede elétrica, especialmente no que se refere à participação, ao comportamento dinâmico e à capacidade de controle da tensão terminal dessas máquinas em ambientes eólicos complexos.

2.3 TIPOS DE AEROGERADORES

Os tipos de configurações de turbinas eólicas mais comumente aplicadas são classificadas tanto por sua capacidade de controle de velocidade quanto pelo tipo de controle de potência que utilizam. Esta classificação permite compreender as diferentes arquiteturas e suas características operacionais específicas. Para isso, além do gerador elétrico e do conversor de eletrônica de potência, geralmente inclui-se um transformador elevador para estabelecer a conformidade com a tensão da rede. No entanto, a estrutura do projeto do sistema de geração

de energia depende do tipo de Sistema de Conversão de Energia Eólica (WECS, do inglês *Wind Energy Conversion System*) e de sua interface com a rede.

As configurações gerais dos WECSs atuais baseiam-se na combinação de dois critérios:

- A velocidade aplicável do gerador elétrico com referência à velocidade variável.
- O tipo de integração mecânica entre o eixo da turbina e do gerador.

Além disso, estas configurações incluem cinco sistemas de controle:

1. WECS de Velocidade Constante com Caixa de Engrenagens de três estágios
2. WECS de Velocidade Variável em escala parcial com Caixa de Engrenagens de três estágios
3. WECS de Velocidade Variável em escala completa sem Caixa de Engrenagens
4. WECS de Velocidade Variável em escala parcial com Caixa de Engrenagens de estágio único
5. WECS de Velocidade Variável em escala completa com Caixa de Engrenagens de estágio único

Em relação aos tipos de turbinas eólica, existem dois tipos dominantes que utilizam diferentes tipos de geradores: Gerador de Indução de Dupla Alimentação (DFIG, do inglês *Doubly Fed Induction Generator*) e Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes (PMSG, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator*). Cada um destes tipos apresenta características particulares que os tornam adequados para diferentes aplicações. As estruturas, vantagens e desvantagens destes WECSs estão discutidas nas subseções a seguir.

2.3.1 DFIG com Caixa de Engrenagens de Estágio Único e de Três Estágios

A Fig. 1 apresentada a estrutura geral do WECS utilizando DFIGs e conversores eletrônicos de potência. Neste sistema, a energia é fornecida à rede tanto pelos enrolamentos do estator quanto do rotor. O conversor no circuito do rotor é dimensionado para processar aproximadamente 30% da potência nominal do gerador elétrico, o que representa a potência de escorregamento. Esta característica de processamento parcial da potência oferece vantagens significativas, como redução de custos, peso e espaço necessário na nacele.

O sistema de conversão emprega dois Conversores de Fonte de Tensão (VSCs, do inglês *Voltage Source Converters*) conectados em configuração *back-to-back* (BTB). Nesta configuração, o Conversor do Lado do Rotor (RSC, do inglês *Rotor Side Converter*) é

responsável pelo controle do torque/velocidade do gerador ou da potência ativa/reativa, enquanto o Conversor do Lado da Rede (GSC, do inglês *Grid Side Converter*) mantém a regulação da tensão do barramento CC (Desalegn; Gebeyehu; Tamrat, 2022). Entretanto, este sistema apresenta algumas limitações operacionais. Devido ao único nível de maximização da velocidade, o gerador opera em velocidade relativamente baixa e alto torque, exigindo que o SG-DFIG seja projetado com maior diâmetro e entreferro. Como consequência, ocorre geração de corrente de magnetização substancial e consideráveis perdas de potência.

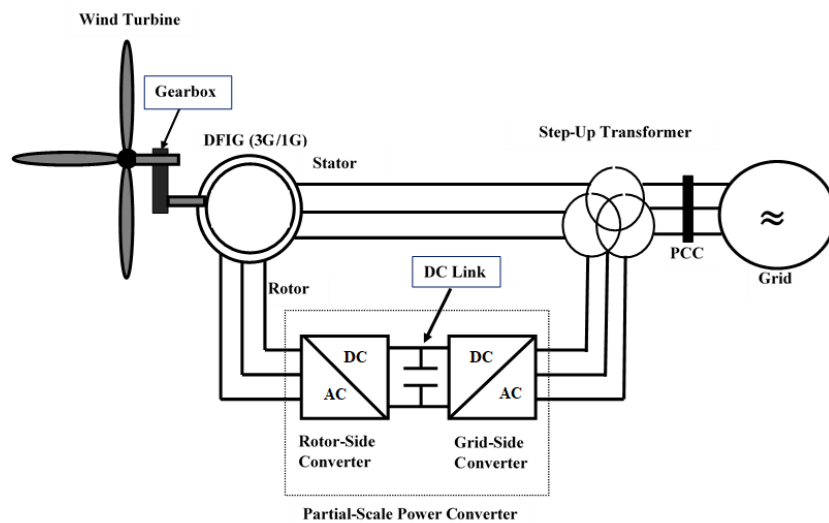


Fig. 1 - Configuração do sistema de geração de energia eólica com DFIG e conversor de potência de escala parcial

Fonte: Desalegn; Gebeyehu; Tamrat (2022).

Os sistemas DFIG apresentam características operacionais distintivas. A principal é a capacidade de operação em velocidade variável através do controle bidirecional de potência no circuito do rotor, permitindo uma faixa de operação de $\pm 30\%$ em relação à velocidade síncrona. Esta característica otimiza a geração de energia e minimiza os esforços mecânicos nos componentes do sistema.

A interface de potência, constituída pelo conversor eletrônico, proporciona controle dinâmico do fluxo de potência reativa, eliminando a necessidade de compensação capacitiva externa e dispositivos de partida suave. Contudo, o DFIG apresenta limitações técnicas específicas. A complexidade do sistema aumenta devido à necessidade do conversor eletrônico de potência, embora este seja dimensionado para apenas 30% da potência nominal. Em aplicações offshore, a presença de anéis coletores e escovas, associada à caixa de multiplicação

de velocidade de três estágios, impõe requisitos de manutenção mais frequentes (Cheng; Zhu, 2014).

No âmbito do controle, o acoplamento direto do estator à rede elétrica, combinado com o dimensionamento parcial do conversor, apresenta desafios significativos para o controle de suportabilidade a afundamentos de tensão (FRT, do inglês *Fault Ride-Through*), impactando a estabilidade do sistema durante perturbações na rede (Ackermann, 2012).

2.3.2 PMSG com Caixa de Engrenagens de Estágio Único ou Acionamento Direto

A configuração do PMSG conectado à rede — tanto com caixa de engrenagens de estágio único quanto sem engrenagens — com um gerador eólico e um conversor de potência de escala de conversão completa, composto pelo conversor do lado da máquina (MSC), capacitor de ligação CC e conversor do lado da rede (GSC), é ilustrada na Fig. 2. Diferentemente dos sistemas de conversão de energia eólica (WECSs) baseados em DFIG, nos quais o conversor de potência está conectado ao circuito do rotor para gerar potência de escorregamento, os WECSs baseados em PMSG utilizam um conversor de potência nos terminais do estator do gerador eólico e na rede elétrica, permitindo o gerenciamento de toda a energia elétrica gerada. Como resultado, a eficiência do conversor de potência aumenta de 30% para 100%.

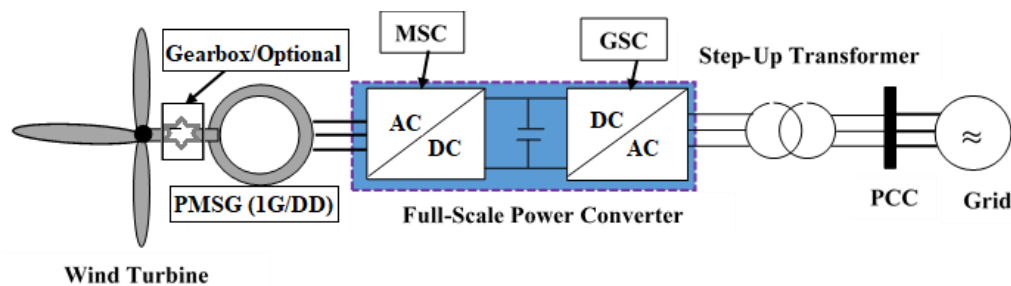


Fig. 2 - Estrutura de um sistema de geração de energia eólica sem engrenagens com PMSG e conversor de carga total

Fonte: Desalegn; Gebeyehu; Tamrat (2022).

O custo comercial de um conversor de potência em DFIGs e em PMSGs é de aproximadamente 5% e 7-12% (dependendo da versão da tecnologia do conversor) do custo total de cada WECS, respectivamente. Um conversor de carga total (100%) permite uma escala de velocidade totalmente variável (0% a 100%), e a potência gerada pelos WECSs de PMSG é extremamente alta. Comparado a outros grupos de geradores eólicos, o PMSG destaca-se como

o mais proeminente em WECSs de velocidade variável com conversores de potência de escala total (Ulutaş; Duru, 2019).

Além disso, o WECS de PMSG sem engrenagens é atualmente a tecnologia mais promissora tendo em vista que, na configuração PMSG sem engrenagens, não requer ativação externa nem anéis coletores, o que resulta em uma capacidade de captação de energia e desempenho dinâmico superiores em comparação a outras configurações. Outra vantagem do PMSG de acionamento direto (DD-PMSG) em relação aos WECSs com caixa de engrenagens de estágio único e triplo é a minimização do ruído da turbina, uma vez que se trata de uma tecnologia sem engrenagens com um sistema de ativação independente. No entanto, até recentemente, a indústria eólica enfrentava desafios para projetar geradores eólicos com diâmetro externo aumentado devido a complicações logísticas e tecnológicas, o que pode limitar o avanço dos WECSs sem engrenagens com alta capacidade de potência na escala de megawatts (MW) (Yaramasu; Wu, 2017)

Nos WECSs de PMSG, o uso de transformadores de elevação pode ser evitado por meio da configuração dos conversores de potência em escala de média tensão (MV) (Ulutaş; Duru, 2019). Em geral, as principais vantagens e desvantagens das tecnologias de PMSG com conversor de potência de escala total são as seguintes.

Vantagens:

- Eficiência superior na captação de energia e ausência de carga de fadiga nos subsistemas mecânicos, graças à implementação de aplicação de carga total (0% a 100%).
- A regulação autônoma de potência ativa e reativa contribui para uma capacidade excepcional de operação durante faltas na rede (FRT).
- A máquina elétrica está completamente isolada da rede, e os conversores de potência garantem uma integração suave à rede.

Desvantagens:

- O uso de um conversor de potência de escala total aumenta o custo inicial, a necessidade de espaço na nacelle e a complexidade geral do sistema.
- O aumento das perdas de potência no conversor reduz o desempenho global do sistema de potência.

- A complexidade do projeto do sistema de controle digital para os conversores de potência é maior.

A Fig. 3 resume os WECS conforme as diferentes configurações, cada uma com características específicas que influenciam diretamente sua eficiência e aplicabilidade.

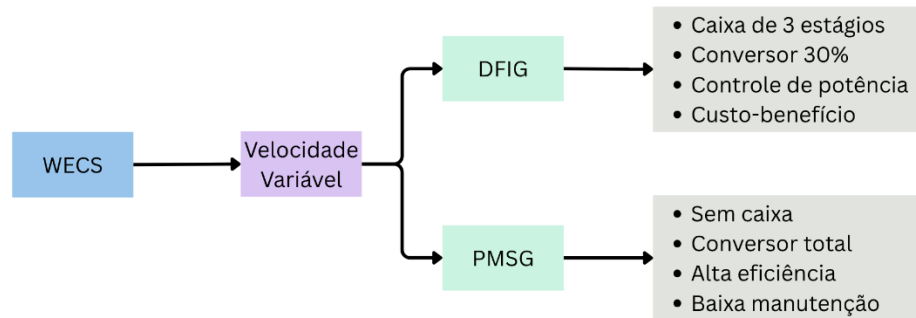


Fig. 3 – Diagrama das configurações modernas de WECS

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os estudos desenvolvidos neste trabalho abordaram o tipo de gerador (DD-PMSG), o qual é apresentado com mais detalhes nas seções seguintes.

2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PMSG

Inicialmente, para a modelagem matemática do PMSG, são estabelecidas as seguintes hipóteses aplicáveis ao modelo de cada tipo de turbina eólica:

- Hipótese a: nos sistemas de velocidade variável, toda a massa em rotação é representada por um elemento, utilizando-se a chamada representação "massa fixa".
- Hipótese b: em ambos os sistemas de velocidade variável, os VSC com circuitos de controle de corrente são modelados como fontes de corrente.
- Hipótese c: na turbina eólica de transmissão direta, o gerador síncrono não tem enrolamentos amortecedores.
- Hipótese d: quando se utiliza um retificador de diodos na turbina eólica de transmissão direta, a comutação é negligenciada.

A hipótese (a) justifica-se porque as propriedades mecânicas e elétricas das turbinas eólicas de velocidade variável são dissociadas pelos conversores eletrônicos de potência. Consequentemente, as propriedades do eixo dificilmente se refletem na interação com a rede, que é o principal ponto de interesse nos estudos do sistema de energia (Ackermann, 2012).

As hipóteses (b) e (c) são utilizadas para modelar a eletrônica de potência em software de simulação e são habitualmente aplicadas em simulações de dinâmica de sistemas de potência (Kundur, 1994). Para simplificar o estudo da resposta do PMSG, é conveniente transformar as equações da estrutura estacionária do estator para o eixo d-q usando as transformadas de Park (Sauer; Pai; Chow, 2018). De acordo com Kundur (1994), o modelo matemático do PMSG pode ser descrito no sistema de referência d-q por meio das equações (2.1), (2.2) e (2.3), que representam a tensão de um gerador síncrono de rotor bobinado no sistema de referência dq, dadas por:

$$u_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (2.1)$$

$$u_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (2.2)$$

$$u_{fs} = R_{fd} i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (2.3)$$

Onde ω_m é a frequência angular do rotor do gerador e do motor da turbina eólica com *direct drive*, u é a tensão, i é a corrente, R é a resistência e ψ é o fluxo. Todas as quantidades estão em por unidades (pu). Os subscritos d e q representam os componentes nos eixos direto e quadratura, respectivamente, o subscrito s representam o estator e fd indica as grandezas de campo do rotor.

A convenção do gerador é usada nessa equação, o que significa que uma corrente que sai da máquina é positiva, enquanto uma corrente que entra na máquina é negativa. O oposto da convenção do gerador é a convenção do motor, em que uma corrente que entra na máquina é positiva, enquanto uma corrente que sai da máquina é negativa. As equações de fluxo são:

$$\psi_{ds} = -(L_{dm} + L_{\sigma s})i_{ds} + L_{dm}i_{fd} \quad (2.4)$$

$$\psi_{qs} = -(L_{qm} + L_{\sigma s})i_{qs} \quad (2.5)$$

$$\psi_{fd} = L_{fd}i_{fd} \quad (2.6)$$

Nessas equações, ψ é o fluxo de ligação e L é a indutância. Os índices m , r e σ significam mútuo, rotor e fuga, respectivamente. No caso de um rotor de ímã permanente, as expressões para u_{fs} e ψ_{fd} nas Equações (2.1) - (2.6) desaparecem porque se referem a grandezas de campo. Dessa forma, a expressão para ψ_{ds} nas Equações (2.4) - (2.6) se torna:

$$\psi_{ds} = -(L_{ds} + L_{\sigma s})i_{ds} + \psi_{pm} \quad (2.7)$$

em que ψ_{pm} é a quantidade de fluxo dos ímãs permanentes montados no rotor que é acoplado ao enrolamento do estator. Ao negligenciar os termos $\frac{d\psi}{dt}$ nas equações de tensão do estator, as relações de fluxo de tensão se tornam as equações (2.8) - (2.10):

$$u_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_m (L_{qm} + L_{\sigma s}) i_{qs} \quad (2.8)$$

$$u_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_m (L_{dm} + L_{\sigma s}) i_{ds} \quad (2.9)$$

$$u_{fs} = R_{fd} i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (2.10)$$

Os termos $\frac{d\psi}{dt}$ nas expressões de u_{ds} e u_{qs} são desprezados porque as constantes de tempo q_s associadas são pequenas, e considerá-las resultaria na necessidade de desenvolver uma representação detalhada do conversor eletrônico de potência. Essa representação incluiria fenômenos que não são interessantes para essa modelagem (Ackermann, 2012). A equação (2.11) fornece o torque eletromecânico:

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (2.11)$$

Com base nessa equação, o ponto de ajuste para as correntes do estator pode ser calculado a partir de um ponto de ajuste de torque gerado pelo controlador de velocidade do rotor (Hossain *et al.*, 2017). As potências ativas e reativas de um gerador síncrono são dadas pelas equações (2.12) e (2.13):

$$P_s = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} \quad (2.12)$$

$$Q_s = u_{qs} i_{ds} + u_{ds} i_{qs} \quad (2.13)$$

Nessa configuração, o gerador é totalmente desacoplado da rede pelo conversor eletrônico de potência. Portanto, o fator de potência do gerador não afeta o fator de potência reativa na conexão da rede (Ackermann, 2012). O último é determinado pelo lado da rede do conversor e não pelo ponto de operação do gerador. A expressão de Q_s na Equação (2.13) é, portanto, de interesse limitado ao estudar a interação com a rede, mas é importante ao dimensionar o conversor.

2.5 APLICAÇÕES

O líder de mercado, no que tange à utilização em parques eólicos comerciais, é o DFIG. Como grande vantagem, este requer apenas um conversor de conexão, o qual se encontra conectado entre a rede e o rotor e com potência nominal de, aproximadamente, 35 % da potência

da máquina de indução. Contudo, o DFIG necessita de uma caixa multiplicadora de velocidade, implicando em manutenção extra, além de apresentar maior susceptibilidade a distúrbios na rede externa ao parque eólico (Oliveira, 2018).

Essas características aliadas à maior eficiência do GSE (Pinto, 2014) e a ausência de caixa multiplicadora de velocidade, o que implica maior confiabilidade e menos manutenção, justificam a escolha do GSE com principal gerador aplicado na geração eólica de energia elétrica em turbinas *offshore* (além da costa marítima) e em turbinas de alta capacidade (Wagner, 2017).

Além da ausência da caixa multiplicadora reduz consideravelmente os componentes do gerador. Como consequência, a manutenção torna-se mais simples quando comparado com outros tipos de máquinas com sistema de excitação.

2.6 AVANÇOS RECENTES

Nos últimos anos, os avanços na tecnologia de materiais e na eletrônica de potência têm impulsionado significativamente o desenvolvimento de geradores síncronos, tornando-os mais eficientes e confiáveis. A integração de sistemas de controle avançados permitiu uma operação mais precisa e otimizada, aumentando a captação de energia e melhorando a estabilidade da rede elétrica.

A Fig. 6 ilustra essa evolução, apresentando de forma sintetizada a capacidade de geração desde 1979 (30 kW) até meados de 2022 (15 MW). A Fig. destaca o aumento da altura das turbinas ao longo dos anos, uma mudança crucial para o melhor aproveitamento dos ventos, especialmente em ambientes *offshore*.

Alguns exemplos atuais de turbinas eólicas de grande porte são os modelos V236 15.0 MW da Vestas, a HALIADE-X 14 MW da GE *Renewable Energy* (*General Electric*) e a SG 14-222 DD da Siemens Gamesa. A turbina produzida pela Vestas tem uma capacidade de geração média de 15 MW, sendo capaz de gerar até 80 GWh por ano. Este modelo opera com velocidades variáveis entre 3 e 31 m/s, possui pás com 107 metros de comprimento e uma área de varredura de 43.742 m² (Vestas, 2025).

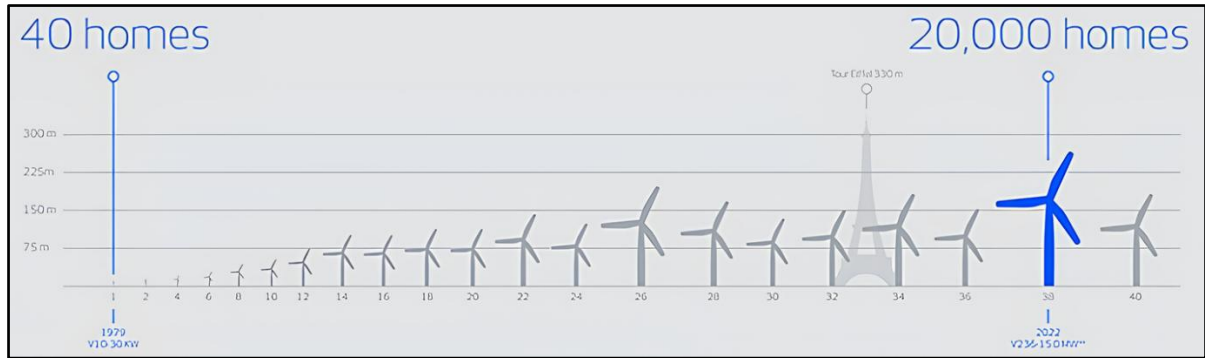


Fig. 4 – Evolução das turbinas de geração eólica

Fonte: Vestas (2025).

A HALIADE-X 14 MW ainda está em desenvolvimento, mas sabe-se que terá uma capacidade de 14 MW, com geração anual estimada em 74 GWh. Suas pás possuem 107 metros de comprimento e uma área de varredura de 38.000 m². No entanto, o grande destaque deste modelo é o fator de capacidade, que pode chegar a 61% (General Electric, 2025). Conforme Tong (2010), um fator de capacidade razoável seria de 25 a 30% e um fator de capacidade muito bom seria de cerca de 40%. Isso evidencia a evolução significativa em termos de rendimento dos aerogeradores atuais.

O modelo SG 14-222 DD, da Siemens Gamesa, possui uma capacidade de geração de 14 MW, podendo alcançar até 15 MW com uma tensão de 820V. A turbina opera com velocidades entre 3 e 32 m/s, sendo a velocidade média de operação de 12 m/s. As pás têm 108 metros de comprimento e uma área de varredura de 39.000 m². No entanto, não há informações disponíveis sobre sua geração anual (Siemens Gamesa, 2022).

Todos os modelos citados são indicados para geração *offshore* e possuem geradores do tipo DD-PMSG com *pitch control* e operação com velocidade variável.

3 MODELOS DE CONVERSORES E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

3.1 INTRODUÇÃO

Esta seção apresenta uma visão geral sobre a importância da integração eficiente da energia eólica à rede elétrica moderna. São discutidos os benefícios dos Geradores Síncronos Eólicos em aplicações eólicas, destacando suas vantagens, como alta densidade de potência, baixa manutenção e capacidade de operação em velocidades variáveis.

Além disso, é abordada a relevância das topologias dos conversores eletrônicos de potência e das estratégias de controle para o desempenho desses sistemas. São introduzidos os principais modelos de conversores, como retificadores, inversores e a configuração *back-to-back* (3.2), e discutida a integração desses conversores ao GSE (3.3). Por fim, será detalhado o modelo do aerogerador GSE (3.4) utilizado para as simulações e seu sistema de conversão.

3.2 FUNDAMENTOS DE CONVERSORES UTILIZADOS NA GERAÇÃO EÓLICA

Em geradores do tipo GSE, os conversores podem ser retificadores não controlados conectados ao estator do gerador compartilhando o mesmo elo de corrente contínua com um inversor trifásico conectado à rede, observando que há mais um estágio entre esses dois conversores. Nesses estágios, são inseridos conversores elevador e abaixador de tensão. Podem ser do tipo *booster* ou *back-to-back*, essencial para flexibilizar a geração de energia elétrica, tanto ativa quanto reativa. O último, que corresponde ao tipo utilizado nas simulações do Capítulo 4, consiste em um conversor CA-CC, um elo de corrente contínua e um conversor CC-CA, permitindo uma conexão segura à rede CA (Datta *et al.*, 2020; Hassanzadeh *et al.*, 2017).

3.2.1 Conversores CC-CA (Inversores)

Os conversores CC-CA, comumente chamados de inversores, são dispositivos eletrônicos de potência responsáveis por converter energia elétrica de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA). Mais precisamente, os inversores transferem potência de uma fonte CC para uma carga CA (Hart, 2012). A função desses dispositivos é transformar uma tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA simétrica, com amplitude e frequência desejadas (Rashid, 2014). No contexto da geração eólica, essa conversão é essencial devido à variação da velocidade do vento, que causa flutuações na frequência da corrente gerada pela máquina elétrica. A conversão para CC permite estabilizar essa energia, facilitando seu

gerenciamento e transmissão (Datta *et al.*, 2020). Além dessa aplicação, os inversores também são utilizados em acionamentos de motores CA com ajuste de rotação, fontes de alimentação ininterruptas (UPS) e no funcionamento de aparelhos CA a partir da bateria de automóveis (Hart, 2012).

O esquema básico de um inversor é composto por uma fonte de tensão CC, dispositivos semicondutores chaveados ligados em forma de ponte H e uma saída CA. Podem ser classificados em dois tipos: monofásicos e trifásicos, podendo empregar diversos dispositivos semicondutores de chaveamento controlado, incluindo transistores bipolares (BJTs), MOSFETs, IGBTs, tiristores controlados por MOS (MCTs), transistores estáticos de indução (SITs) e tiristores desligáveis por *gate* (GTOs). A operação desses inversores normalmente se baseia em técnicas de modulação por largura de pulso (PWM) para gerar a forma de onda CA desejada na saída. Neste contexto, os inversores são classificados segundo suas características de alimentação (Rashid, 2014):

- Inversor alimentado por tensão (VSI, do inglês *voltage source inverters*): Opera com uma tensão de entrada constante.
- Inversor alimentado por corrente (CSI, do inglês *current source inverters*): Mantém uma corrente de entrada constante.
- Inversor com barramento CC variável: Possui tensão de entrada controlável.

Uma categoria especial é o inversor de pulso ressonante, que incorpora um circuito LC ressonante para forçar a passagem da tensão ou corrente de saída por zero durante a comutação (Rashid, 2014).

A Fig. 5 contém um esquema de um inversor de ponte completa, com uma saída CA sintetizada a partir de uma entrada CC pelo fechamento e abertura de chaves numa sequência adequada mostrado na Tabela 1. A tensão na saída v_0 pode ser $+V_{cc}$ quando as chaves S_1 e S_2 estão ligadas simultaneamente, $-V_{cc}$ quando as chaves S_3 e S_4 estão ligadas simultaneamente ou zero, dependendo de quais chaves estão fechadas. Uma combinação que deve ser evitada é ligar as chaves S_1 e S_4 ou S_3 e S_2 simultaneamente, visto que essa ligação resulta em um curto-circuito na fonte CC.

As chaves reais não desligam ou ligam instantaneamente, o que faz com que os tempos de transição de chaveamento ou comutação precisem ser acomodados no controle das chaves (Hart, 2012). Uma definição envolvendo o tempo permitido de chaveamento é chamado de tempo branco (ou tempo morto).

Tabela 1 – Tensões na saída para combinações de chaves

Chaves fechadas	Tensão na saída v_o
S_1 e S_2	$+V_{cc}$
S_3 e S_4	$-V_{cc}$
S_1 e S_3	0
S_2 e S_4	0

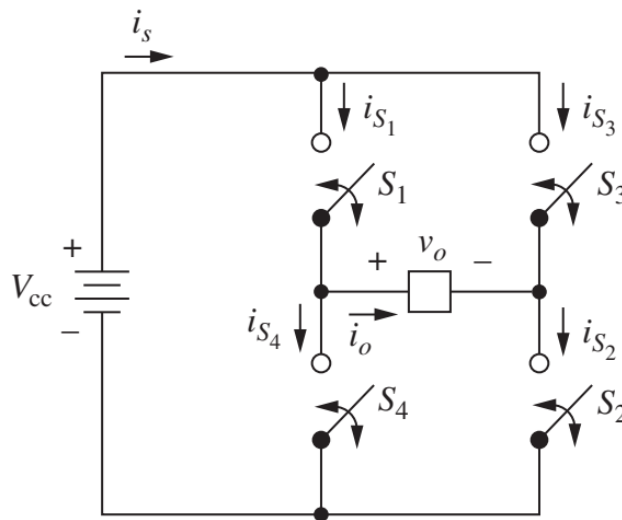


Fig. 5 – Conversor em ponte completa

Fonte: Hart (2012).

O esquema de chaveamento mais simples para um conversor em ponte completa gera uma tensão de saída em forma de onda quadrada. A carga é conectada a $+V_{cc}$ quando os interruptores S_1 e S_2 estão fechados, ou a $-V_{cc}$ quando S_3 e S_4 estão fechados. Esse chaveamento periódico entre $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ resulta em uma forma de onda quadrada na carga. Embora essa saída não seja senoidal, ela pode ser adequada como forma de onda CA para determinadas aplicações (Hart, 2012).

A forma de onda da corrente na carga depende das características dos componentes da carga. Em uma carga puramente resistiva, a corrente segue a mesma forma de onda da tensão de saída. Já em uma carga indutiva, a corrente tende a ser mais próxima de uma senoidal, devido à propriedade de filtragem da indutância. No caso de cargas indutivas, é necessário considerar aspectos específicos no projeto das chaves do circuito em ponte completa, pois as correntes que circulam pelas chaves devem ser bidirecionais (Hart, 2012).

Para uma carga RL em série e uma tensão de saída em forma de onda quadrada, suponha que as chaves S_1 e S_2 da Fig. 8-1a sejam fechadas no instante $t=0$. A tensão aplicada à carga será $+V_{cc}$, e a corrente começará a aumentar tanto na carga quanto nas chaves S_1 e S_2 . Essa corrente pode ser descrita como a soma das respostas forçada e natural do circuito Hart (2012).

$$i_0(t) = i_f(t) + i_n(t) \quad (3.1)$$

$$i_0(t) = \frac{V_{cc}}{R} + Ae^{-t/\tau} \text{ para } 0 \leq t \leq T/2 \quad (3.2)$$

onde A é uma constante avaliada a partir da condição inicial em $\tau = L/R$. Quando o circuito é energizado pela primeira vez, com corrente inicial nula no indutor, ocorre um regime transitório antes que a corrente na carga atinja o estado estacionário. No estado estacionário, a corrente i_0 torna-se periódica e aproximadamente simétrica em torno de zero como ilustrado na figura 6 (Hart, 2012).

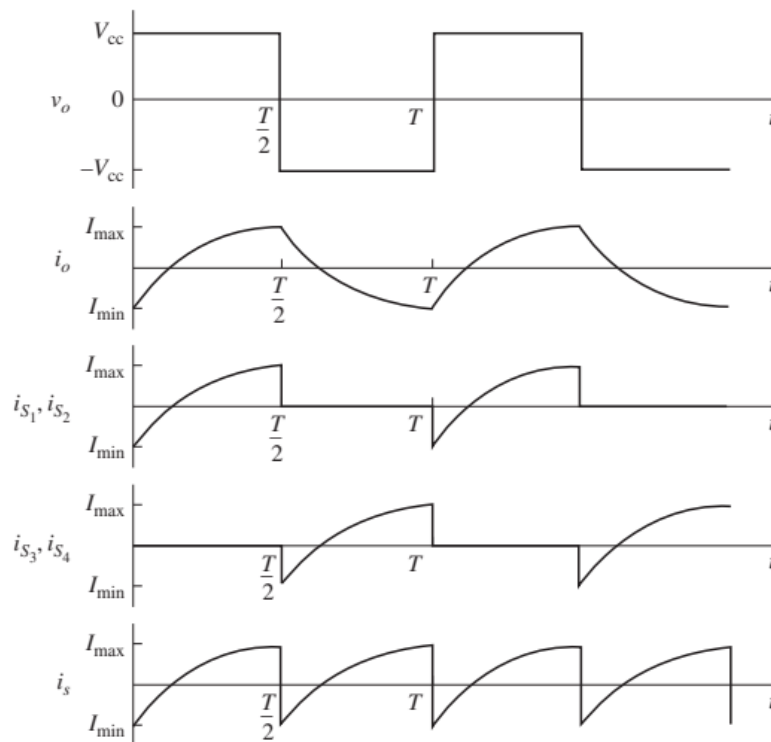


Fig. 6 – Tensão na saída com forma de onda quadrada e forma de onda da corrente no estado estável para uma carga RL

Fonte: Hart (2012).

Uma das configurações mais utilizadas em aplicações de conversão de energia é o inversor trifásico de dois níveis, conforme ilustrado na Fig. 7. Ele é composto por seis transistores (Q1 a Q6), distribuídos entre os três ramos: a, b e c. Os dispositivos semicondutores empregados como chaves incluem Transistores Bipolares de Junção (BJTs), Transistores de

Efeito de Campo de Óxido Metálico (MOSFETs) e Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBTs). Cada chave possui um diodo conectado em antiparalelo, que garante um caminho para a corrente indutiva quando a chave que conduzia essa corrente é desligada. Além disso, há capacitores em paralelo que armazenam energia na forma de tensão contínua e proporcionam um caminho de baixa indutância para correntes de rápida variação que circulam pelas chaves semicondutoras (Rocha, 2018).

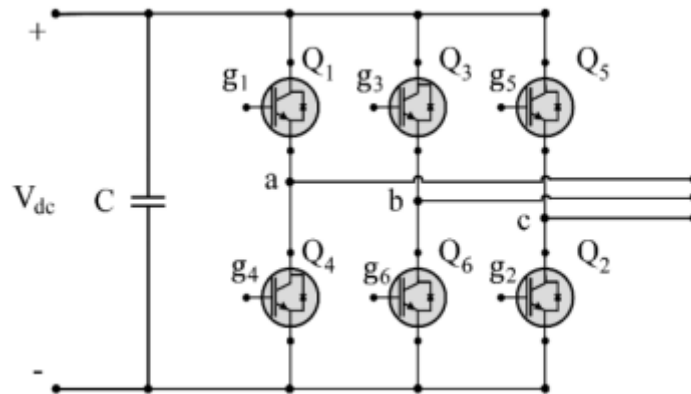


Fig. 7 – Inversor trifásico de 2 níveis

Fonte: Rashid (2014)

O circuito ilustrado opera por meio da comutação ativa das chaves, controladas por sinais enviados aos drivers dos transistores nos módulos. Os sinais de acionamento e bloqueio das chaves Q1 a Q6 são definidos pelos valores binários (0 ou 1) aplicados às entradas de controle, denominadas g1 a g6. Para evitar curto-circuitos na fonte de alimentação, as chaves de um mesmo ramo do inversor não devem ser acionadas simultaneamente. Por isso, durante a operação do inversor, as chaves de cada ramo devem funcionar de forma complementar, garantindo que apenas uma chave por ramo esteja ativa em um dado instante (Rashid, 2014).

Em condições ideais, a tensão (ou corrente) de saída deveria ser uma onda senoidal CA pura, mas, na prática, ela contém harmônicas ou ondulações. O inversor somente extrai corrente da fonte de entrada CC quando conecta a carga à fonte de alimentação, e assim a corrente de entrada não é CC pura, contendo harmônicas (Rashid, 2014). A qualidade de um inversor é geralmente avaliada em termos dos parâmetros de desempenho vistos a seguir.

A potência de saída é dada por:

$$P_{CA} = I_0 V_0 \cos \theta \quad (3.3)$$

$$P_{CA} = I_0^2 R \quad (3.4)$$

Onde V_0 e I_0 são a tensão e a corrente rms da carga, θ é o ângulo da impedância dela e R é a resistência. A potência de entrada CA do inversor é:

$$P_s = I_s V_s \quad (3.5)$$

Onde V_s e I_s são a tensão e a corrente média de entrada respectivamente. A ondulação rms da corrente de entrada é:

$$I_r = \sqrt{I_i^2 - I_s^2} \quad (3.6)$$

Onde I_i e I_s são os valores rms e médio da corrente de alimentação CC respectivamente. O fator de ondulação ou de *ripple* da corrente é:

$$FR_s = \frac{I_r}{I_s} \quad (3.7)$$

A eficiência de energia, que é a relação entre a potência de saída e a de entrada, depende das perdas de chaveamento, que, por sua vez, dependem da frequência de chaveamento do inversor (Rashid, 2014). O fator harmônico que é uma medida da contribuição individual de uma harmônica, é definido como:

$$FH_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}} \text{ para } n > 1 \quad (3.8)$$

Onde V_{o1} representa o valor eficaz (rms) da componente fundamental, e V_{on} o valor eficaz da n-ésima componente harmônica. A distorção harmônica total (THD), que quantifica o quão próxima uma forma de onda está de sua componente fundamental, é definida como:

$$DHT = \frac{1}{V_{o1}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_{on}^2} \quad (3.9)$$

A DHT fornece o conteúdo total de harmônicas presentes, mas não revela o nível individual de cada componente harmônica. Caso um filtro fosse aplicado na saída do inversor, as harmônicas de ordem mais elevada poderiam ser atenuadas com maior eficiência. Por isso, é essencial conhecer tanto a frequência quanto a amplitude de cada harmônica. O FD representa a quantidade de distorção harmônica remanescente em uma forma de onda específica após as harmônicas terem sido atenuadas por um fator de segunda ordem (ou seja, divididas por n^2). Dessa forma, o FD é uma métrica da eficácia na redução de harmônicas indesejadas, sem a

necessidade de especificar os parâmetros de um filtro de carga de segunda ordem (Rashid, 2014), sendo definido como:

$$FD = \frac{1}{V_{o1}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{on}}{n^2}\right)^2} \quad (3.10)$$

O controle das chaves para a saída de um PWM necessita de dois sinais principais (Hart, 2012):

- Sinal de Referência: Também conhecido como sinal de modulação ou controle, que neste caso é uma senoide. Este sinal determina a amplitude e a forma da onda de saída do PWM.
- Sinal Portador: Uma onda triangular que controla a frequência de chaveamento. A frequência do sinal portador define a frequência de operação do PWM e, portanto, a resolução do controle.

O funcionamento do PWM baseia-se na comparação contínua entre o sinal de referência e o sinal portador. Quando o valor do sinal de referência é maior que o valor do sinal portador, a chave é ligada, gerando um pulso na saída. Quando o valor do sinal de referência é menor, a chave é desligada. Tal processo resulta em uma série de pulsos cuja largura varia de acordo com a amplitude do sinal de referência, permitindo o controle preciso da potência entregue à carga (Hart, 2012). Essa técnica elimina os harmônicos de baixa frequência, fazendo com que os primeiros harmônicos significativos apareçam apenas próximos à frequência de chaveamento do inversor ou retificador (Ackermann, 2012).

No contexto da geração eólica, especialmente em sistemas baseados em geradores síncronos de ímãs permanentes (PMSG), os inversores desempenham papel fundamental na interligação entre o aerogerador e a rede elétrica.

3.2.2 Elo CC

O elo CC, também conhecido como link DC, é um elemento essencial em sistemas de conversão de energia que envolvem múltiplos estágios de processamento entre fontes e cargas. Ele atua como uma interface entre o estágio de retificação e o estágio de inversão, permitindo o desacoplamento dinâmico entre essas etapas e facilitando o controle independente da potência ativa e reativa.

Em configurações modernas, como em sistemas de geração eólica com controle eletrônico, o elo CC é composto por um capacitor de barramento que armazena energia na forma de tensão contínua. Essa tensão é regulada por um conversor CC-CC, geralmente do tipo *boost* (*chopper*), que ajusta o nível de tensão conforme as exigências operacionais. O controle da tensão do elo CC é essencial para garantir a estabilidade do sistema e a operação eficiente dos inversores (Mascarenhas, 2018).

O inversor conectado ao elo CC é normalmente do tipo fonte de tensão (VSI – Voltage Source Inverter), que permite a operação em velocidade variável da máquina elétrica, ajustando a potência ativa injetada no sistema. Além disso, o VSI pode controlar a tensão ou o fator de potência na barra terminal por meio da regulação da potência reativa (Rashid, 2014).

Para garantir a operação segura e eficiente, o elo CC deve ser projetado com atenção à capacidade de armazenamento de energia, à resposta dinâmica dos controles e à proteção contra sobrecorrentes e sobretensões. Em sistemas com cargas indutivas ou fontes variáveis, como turbinas eólicas, o elo CC também contribui para a filtragem de harmônicas e a suavização de transientes (Mascarenhas, 2018).

No GSE, o elo CC funciona como uma fonte CC para o inversor. Após a retificação, a energia passa pelo elo constituído por capacitor de potência de corrente contínua, que atua como um buffer. Tal componente intermediário armazena a energia em forma de corrente contínua, garantindo que a transmissão entre os dois conversores seja estável e contínua. O elo de corrente contínua é crucial para manter a consistência da energia transmitida, independentemente das variações na geração inicial (Hassanzadeh *et al.*, 2017).

Modelos computacionais avançados permitem simular com precisão o comportamento do elo CC e seus componentes associados, incluindo o controle do *chopper*, do inversor e da excitação da máquina. Assim, o elo CC desempenha um papel estratégico na integração de fontes renováveis, no controle da qualidade da energia e na flexibilidade operacional dos sistemas de potência modernos.

3.2.3 Conversores CA-CC (Retificadores)

Um retificador é um circuito que converte um sinal CA em um sinal unidirecional, ou seja, é um conversor CA-CC. Também pode ser considerado um conversor de valor absoluto. Na Fig. 8, um exemplo de um retificador monofásico não controlado é mostrado. Observa-se uma fonte de tensão CA que alimenta uma ponte de diodo e uma carga resistiva na saída do

circuito. Um retificador monofásico pode ser de meia onda ou de onda completa. O tipo monofásico de meia onda é o mais simples, mas geralmente não é usado em aplicações industriais (Rashid, 2014).

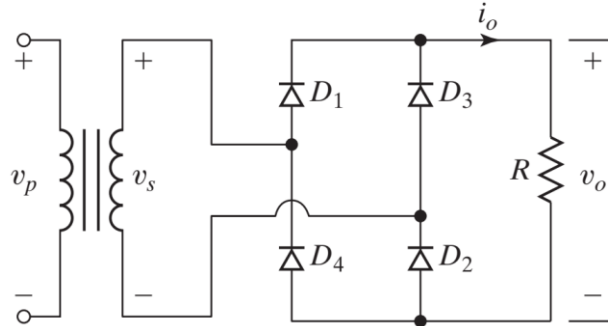


Fig. 8 – Retificador monofásico em ponte completa

Fonte: Rashid (2014).

Em circuito conversor como o da Fig. 9, se v_s é uma tensão de entrada CA, a forma de onda da tensão de saída v_o tem o mesmo formato, mas a parte negativa aparecerá como um valor positivo. Isto é, $v_o = |v_s|$. Com relação a operação, durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, a potência é fornecida para a carga através dos diodos D_1 e D_2 . Enquanto durante o semiciclo negativo, os diodos D_3 e D_4 conduzem. A forma de onda da tensão de saída está representada na Fig. 9. A lei da tensão de Kirchhoff em torno da malha contendo a fonte D_1 e D_3 mostra que eles não podem conduzir ao mesmo tempo, da mesma forma que D_2 e D_4 também não podem. A corrente na carga pode ser positiva ou zero, mas nunca pode ser negativa (Hart, 2012).

Idealmente, a tensão de saída de um retificador deveria ser CC pura, porém, na prática, contém harmônicos e ondulações. Para eliminar as ondulações, costuma-se inserir um filtro depois da ponte (Ahmed, 2009). Um retificador deve fornecer uma tensão CC com mínimo conteúdo harmônico e manter a corrente de entrada senoidal e em fase com a tensão de entrada, para um fator de potência próximo de um. A qualidade do processamento de energia é avaliada pelo conteúdo harmônico da corrente de entrada, tensão de saída e corrente de saída.

No contexto da geração eólica, os conversores CA-CC, têm a função de converter a energia elétrica em corrente alternada, gerada pelo PMSG, em corrente contínua. Essa etapa é essencial nos sistemas de geração eólica de velocidade variável, onde a frequência da tensão gerada varia com a rotação do eixo da turbina e não pode ser diretamente conectada à rede elétrica, que opera em frequência constante.

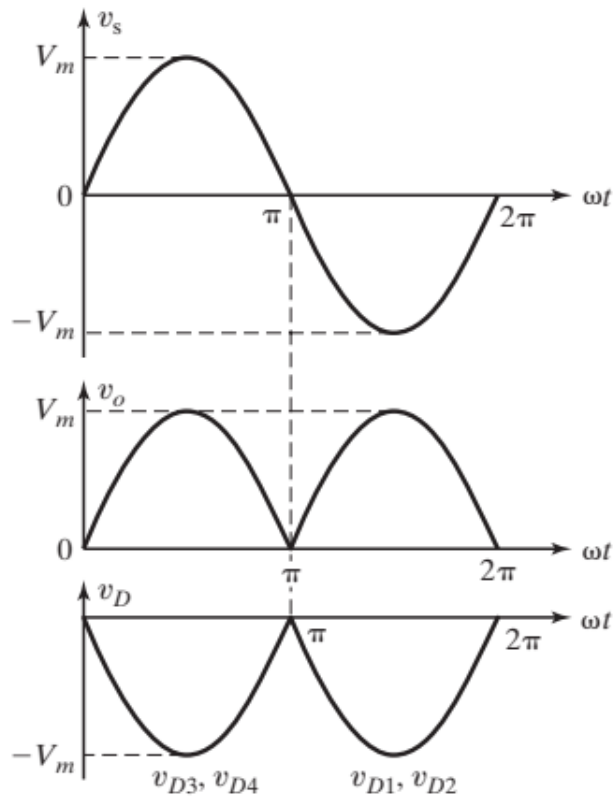


Fig. 9 – Retificador monofásico em ponte completa

Fonte: Rashid (2014).

No caso dos geradores síncronos de ímãs permanentes (PMSG), a tensão alternada trifásica gerada é enviada a um retificador — geralmente do tipo retificador controlado com transistores IGBT ou diodos — que realiza a conversão para corrente contínua. Essa corrente é armazenada temporariamente no elo CC, que atua como intermediário antes da etapa de reconversão para CA pelo inversor.

Em seguida, o conversor CC-CA transforma a corrente contínua em corrente alternada, com frequência e tensão equilibradas, fundamental para assegurar que a energia gerada pelo PMSG possa ser integrada de forma segura e eficiente à rede, de acordo com os padrões regulados pelas agências locais (Datta *et al.*, 2020). Por fim, antes de a corrente alternada ser injetada na rede elétrica, existe uma passagem por um filtro indutivo, melhorando a sua qualidade, atenuando ou eliminando ruídos e distorções (Hassanzadeh *et al.*, 2017).

3.2.4 Conversor back-to-back

Um conversor *back-to-back*, também conhecido como conversor de fonte de tensão (VSC), é constituído por dois conversores conectados através de um barramento CC. Como pode ser observado na Fig. 10, o primeiro conversor (retificador), converte a potência de CA

para CC. O segundo conversor (inversor) realiza a conversão inversa, transformando a potência de CC de volta para CA, porém, nos padrões específicos da rede. Entre esses dois conversores, utilizam-se capacitores para estabilizar e interligar o barramento CC.

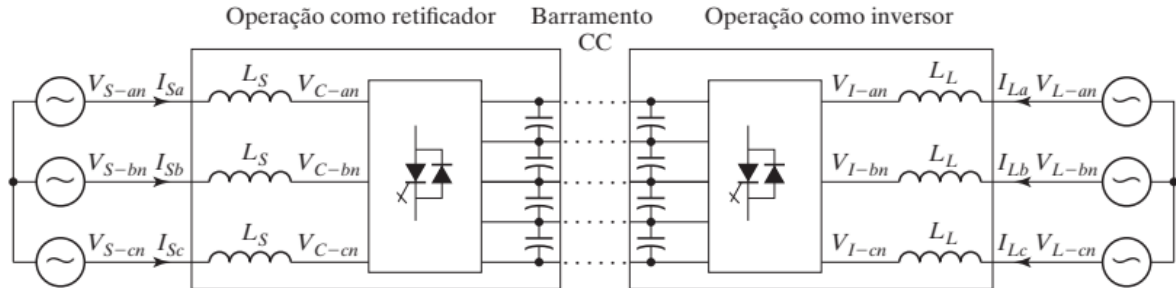


Fig. 10 – Sistema de interligação *back-to-back*

Fonte: Rashid (2014).

A interligação *back-to-back* que conecta dois sistemas assíncronos pode ser considerada um variador de frequência, um comutador de fase ou um controlador de fluxo de potência (Rashid, 2014). Em relação ao caso do fluxo de potência entre dois sistemas, o conversor pode ser controlado de forma bidirecional. Por esse motivo, o conversor é amplamente utilizado para controlar o fluxo de potência e a tensão entre dois sistemas de energia, o que permite uma interconexão eficiente e flexível entre redes elétricas.

3.3 CONVERSORES AGREGADOS AO GSE

A conexão do Gerador Síncrono de velocidade variável a um sistema elétrico CA com frequência fixa requer conversão CA/CC/CA, que normalmente é realizada por dois inversores, um retificador e um inversor, de quatro quadrantes operando como fontes de tensão e interligados pelos terminais CC (Letcher, 2017). A configuração foi tratada no tópico anterior e é a denominada *back-to-back*, onde o retificador é ligado ao gerador, o inversor ao sistema e os seus barramentos CC são conectados entre os conversores, com ilustrado na Fig. 11. No sistema, há ainda o controle do campo do rotor, o qual é feito por uma fonte de tensão CC controlada.

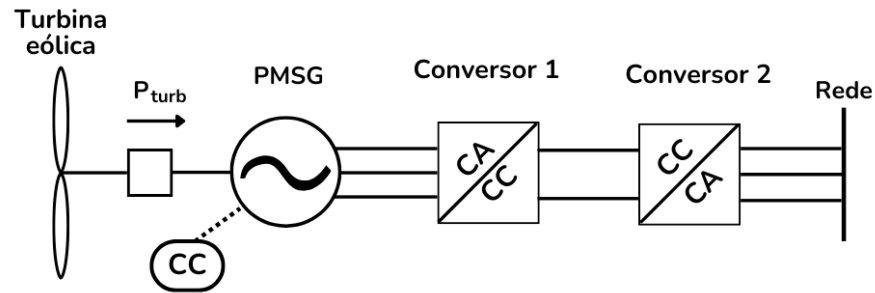


Fig. 11 – Topologia de um gerador síncrono de velocidade variável

Fonte: baseado em Rocha e Monaro (2022)

3.4 MODELO DO AEROGERADOR TIPO GSE

O esquema básico dos equipamentos envolvidos no modelo de gerador síncrono eólico utilizado para as simulações neste trabalho é apresentado na Fig. 12, na qual o conversor está dividido em três partes. A primeira representa um retificador (conversor 1) de onda completa (ponte de diodos) que transforma a corrente alternada de frequência variável em corrente aproximadamente contínua. Na segunda etapa, após passar pelo retificador, a corrente retificada tem seu valor controlado por um *chopper*, conversor CC-CC do tipo *boost* para controlar a tensão do capacitor CC, que mantém a corrente contínua em um valor constante desejado.

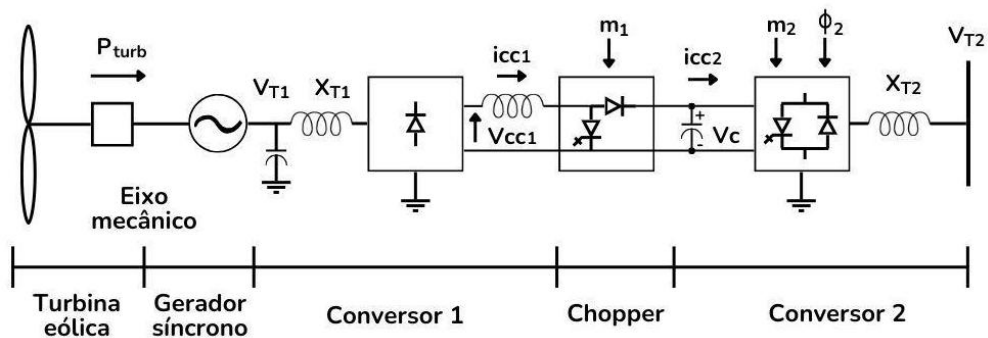


Fig. 12 – Aproveitamento eólico utilizando gerador síncrono de velocidade variável

Fonte: baseado em Manual do Usuário (2024).

Na última parte, um inversor (conversor 2) do tipo fonte de tensão (VSI) controla a velocidade do rotor (operação em velocidade variável) aumentando ou diminuindo a potência ativa injetada no sistema, além disso, permite através da sua potência reativa controlar a tensão ou o fator de potência na barra terminal (Manual do Usuário, 2024). Além disso, este equipamento converte a corrente contínua disponibilizada em corrente alternada, com frequência de 60 Hz.

A Fig. 13 mostra os blocos representados por modelos não flexíveis (built-in) com fundo branco e os blocos representados por modelos flexíveis (CDU) com fundo azul. A flexibilidade aqui se refere à possibilidade de implementar ajustes nos parâmetros dos blocos.

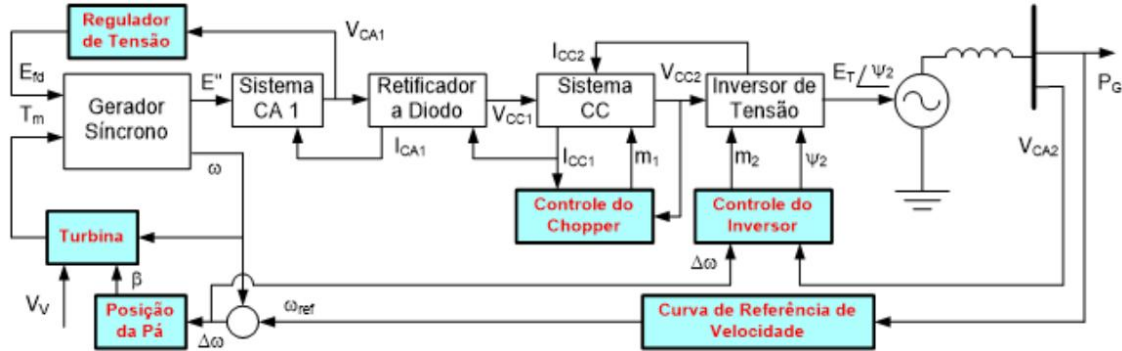


Fig. 13 – Modelo representando o gerador síncrono de velocidade variável nas simulações

Fonte: Manual do Usuário (2024).

O diagrama de controle da Fig. 13 detalha a operação e regulação do aerogerador, assegurando tanto a eficiência na extração de energia quanto a estabilidade na conexão à rede. Os principais blocos de controle e suas funções são:

- **Regulador de Tensão:** Responsável por controlar a tensão de campo do gerador (E_{fd}) para manter a tensão CA de saída do Gerador Síncrono (V_{CA1}) em um nível desejado e estável. Uma função essencial é ajustar a excitação do gerador para que a tensão de saída seja adequada.
- **Controle do Chopper:** Atua diretamente no barramento de corrente contínua, que integra um capacitor para estabilização de tensão. O controle modula um *chopper* (conversor CC-CC) para regular a tensão no elo CC (V_{CC2}), dissipando o excesso de energia em casos de sobretensão ou variações de carga/geração.
- **Controle do Inversor:** É um controle estratégico que gerencia o Inversor de Tensão, componente responsável por converter a energia CC do barramento para CA e injetá-la na rede elétrica. Recebe o desvio da velocidade ($\Delta\omega$) e a referência de velocidade (ω_{ref}) para ajustar dois parâmetros críticos:
 - **Ângulo de Fase (ψ_2):** A principal finalidade é controlar a potência ativa (PG) injetada na rede. A variação do ângulo de fase da tensão do inversor em relação à rede possibilita o controle do fluxo de potência real.

- Fator de Modulação (m_2): Utilizado para ajustar a amplitude da tensão CA de saída do inversor, impactando diretamente a potência reativa trocada com a rede.
- Posição da Pá (*Pitch Control*): Ajusta o ângulo das pás da turbina (β) em resposta a desvios de velocidade ($\Delta\omega$). A função primária consiste em limitar a potência mecânica sob condições de vento forte para proteger o aerogerador, além de otimizar a extração de energia em velocidades nominais.
- Curva de Referência de Velocidade: Fornece a velocidade ideal (ω_{ref}) para a turbina, com o objetivo de maximizar a captação de energia eólica em diferentes condições de vento (seguindo o princípio de MPPT). O desvio entre a velocidade real da turbina (ω) e esta referência ($\Delta\omega$) alimenta as malhas de controle da Posição da Pá e do Inversor.

Os controles atuam em conjunto para assegurar que o aerogerador opere de maneira eficiente, protegida e em sincronia com a rede elétrica, adaptando-se às variações do vento e às demandas do sistema de potência. A seguir, são apresentados os diagramas modelados no CDU para o aerogerador síncrono bem com suas principais estratégias de controle envolvendo a geração.

3.4.1 Diagrama De Controle do Aerogerador

O diagrama de controle ilustrado na Fig. 14 representa a estratégia de regulação integrada de um aerogerador de velocidade variável, fundamental para garantir a operação eficiente e segura sob diferentes condições de vento. O sistema é composto por duas malhas de controle principais que atuam de forma coordenada: o Controle de Posição da Pá (Controle Aerodinâmico) e o Controle do Conversor (Controle Elétrico). O objetivo central do sistema é duplo: maximizar a extração de energia em velocidades de vento abaixo da nominal e limitar a potência de saída em velocidades de vento acima da nominal para proteger os componentes mecânicos e elétricos.

A malha de Controle do Conversor é a principal responsável pela otimização da potência em condições de vento normais (abaixo da velocidade nominal). A sua atuação é rápida e precisa, baseada na manipulação das variáveis elétricas do gerador. Seu funcionamento ocorre por meio da comparação da velocidade angular do rotor (ω) continuamente medida com um valor de referência de velocidade. Esta referência é calculada por um algoritmo de

Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT), que determina a velocidade de rotação ideal para extrair a máxima energia para uma dada velocidade de vento.

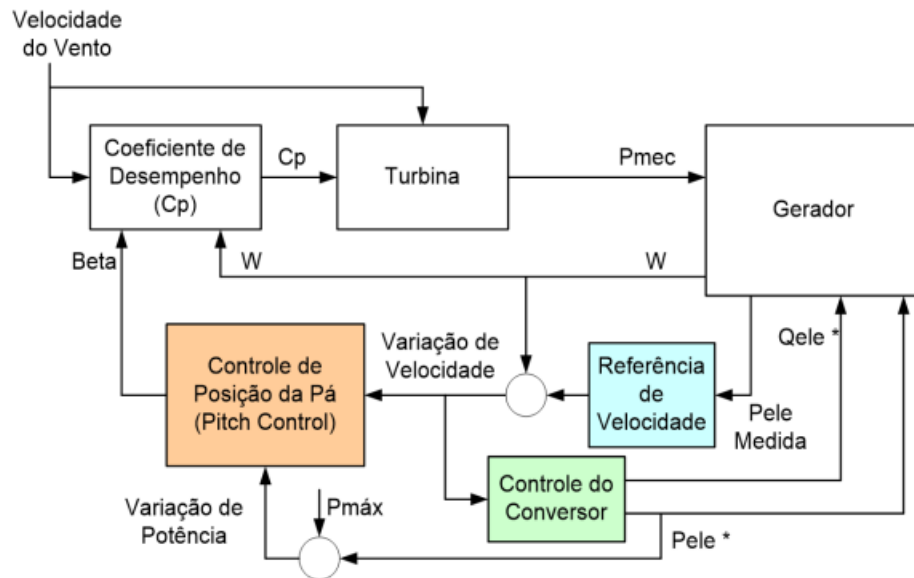


Fig. 14 – Esquema simplificado de controle do aerogerador

Fonte: Manual do Usuário (2024).

O desvio entre a velocidade medida e a de referência (Variação de Velocidade) gera um sinal de erro que alimenta o Controle do Conversor. Em resposta a este erro, o controle ajusta a potência elétrica de saída do gerador (P_{ele}^*), o que, na prática, significa modular o torque eletromagnético. Ao controlar o torque, o conversor força a velocidade do rotor a seguir a referência ótima, garantindo a máxima eficiência de conversão.

A malha de Controle de Posição da Pá atua primariamente em condições de vento forte (acima da velocidade nominal), funcionando como um sistema de proteção e limitação de potência. A sua resposta é mais lenta que a do controle elétrico, devido à inércia mecânica das pás.

Seu funcionamento ocorre por meio dois sinais de entrada recebidos pelo controle: a Variação de Velocidade e uma Variação de Potência (diferença entre a potência máxima permitida, $P_{máx}$, e a potência medida). Quando a velocidade do vento e, conseqüentemente, a potência mecânica excedem os limites nominais, o controlador atua para aumentar o ângulo das pás (Beta). Ao girar as pás, ele reduz a sua eficiência aerodinâmica (o Coeficiente de Desempenho C_p). Isso limita a potência mecânica (P_{mec}) transferida ao gerador, protegendo o sistema de sobrecargas e mantendo a velocidade de rotação dentro de limites seguros.

A eficácia do sistema reside na sinergia entre estas duas malhas. Em ventos baixos e médios, o *Pitch Control* mantém as pás no ângulo ótimo, e o Controle do Conversor realiza o ajuste fino para o MPPT. Em ventos fortes, o Controle do Conversor limita a potência elétrica ao seu valor nominal, enquanto o *Pitch Control* assume a regulação principal, ajustando as pás para dissipar o excesso de energia e evitar a sobrevelocidade do rotor. Esta arquitetura de controle coordenada é, portanto, essencial para a operação robusta e eficiente dos aerogeradores modernos.

3.4.2 Diagrama De Controle do Regulador Automático de Tensão

O diagrama de controle ilustrado na Fig. 15 representa um Regulador Automático de Tensão (AVR) do tipo estático simplificado, utilizado para controlar a tensão terminal de um gerador síncrono. A sua função primordial é ajustar continuamente a tensão de campo da máquina para manter a tensão nos seus terminais o mais próximo possível de um valor de referência pré-definido, garantindo assim a regulação de tensão no ponto de conexão com a rede.

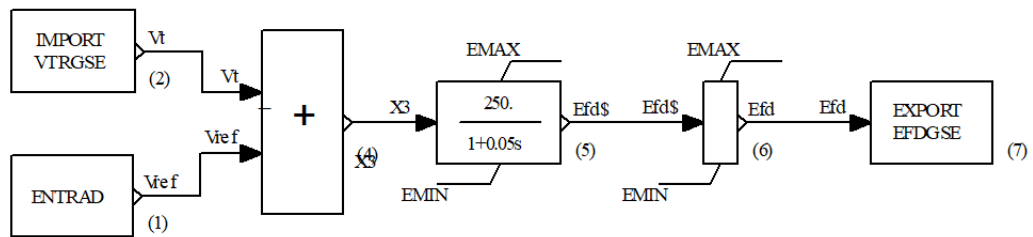


Fig. 15 – Diagrama de controle do regulador de tensão do aerogerador

Fonte: Manual do Usuário (2024).

O funcionamento desta malha de controle de realimentação negativa pode ser descrito pela seguinte sequência de operações:

- **Medição e Comparação:** A tensão terminal do gerador (V_t) é continuamente medida pelo bloco IMPORT VTRGSE. Este valor medido é então comparado, em um ponto de soma, com a tensão de referência (V_{ref}), que é um valor pré-definido (tipicamente 1,0 p.u.) fornecido pelo bloco ENTRAD. A diferença entre estes dois sinais ($V_{ref} - V_t$) resulta no sinal de erro de tensão, aqui representado pela variável X_3 .
- **Amplificação e Excitação:** O sinal de erro X_3 é então processado por um bloco que representa o sistema de excitação, modelado por uma função de transferência de primeira ordem com ganho elevado (250) e uma constante de tempo (0.05s). Este bloco

amplifica o erro e gera a tensão de campo desejada (Efds), que será aplicada ao enrolamento de campo do gerador.

- **Limitação e Saída:** Para garantir que a tensão de campo permaneça dentro dos limites físicos e operacionais do equipamento, o sinal Efds passa por blocos limitadores que o restringem entre um valor máximo (EMAX) e mínimo (EMIN). O sinal resultante é a tensão de campo final (Efd).
- **Atuação no Gerador:** Este valor final Efd é enviado ao modelo do gerador síncrono através do bloco EXPORT EFDGSE, alterando o fluxo magnético da máquina e, conseqüentemente, a sua tensão terminal, fechando assim a malha de controle.

Em suma, esta arquitetura opera de forma contínua: qualquer desvio na tensão terminal gera um erro que é amplificado para corrigir a tensão de campo, atuando para anular o erro e manter a tensão regulada. Este é o princípio fundamental por trás da regulação de tensão em sistemas de potência.

3.4.3 Diagrama de Controle do conversor *Chopper*

O diagrama de controle da Figura 16 detalha a estratégia de regulação do aerogerador síncrono, assegurando tanto a eficiência na extração de energia quanto a operação segura na conexão à rede. O sistema é composto por duas malhas de controle principais que atuam de forma coordenada, gerenciando o fluxo de potência através do retificador, do conversor CC-CC (*chopper*) e do inversor.

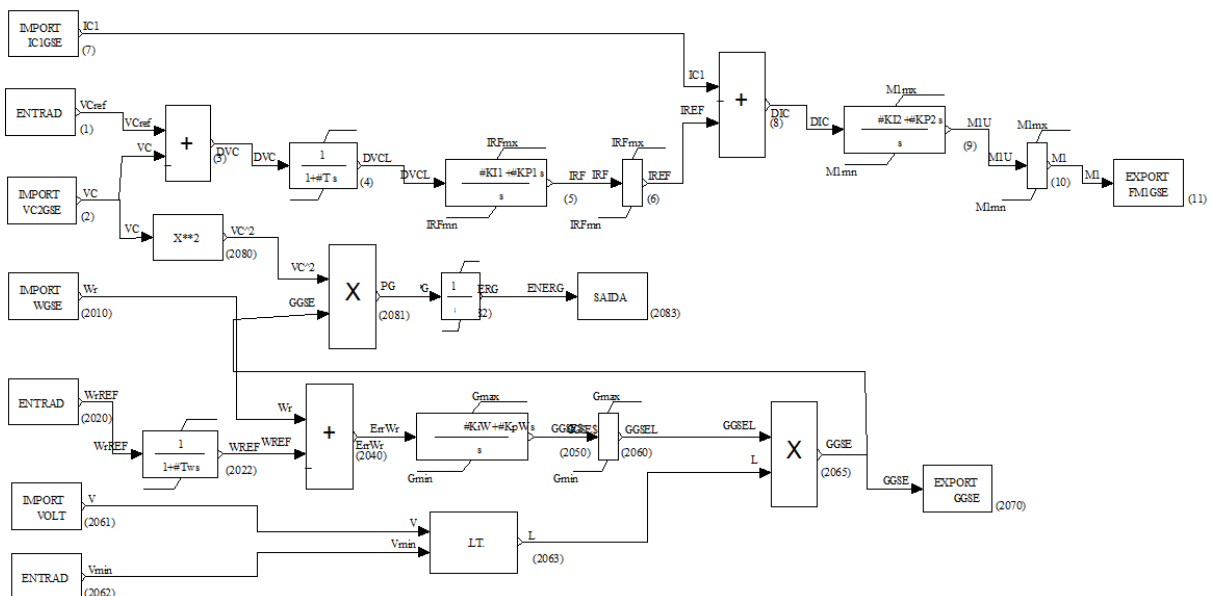


Fig. 16 – Diagrama de controle do *Chopper*

Fonte: Manual do Usuário (2024).

A malha de controle superior do diagrama é responsável por regular a tensão do barramento de corrente contínua (VC), que é um ponto crítico para a estabilidade do sistema. A sua atuação é baseada em uma estrutura de controle em cascata:

- **Malha Externa (Controle de Tensão):** A tensão medida no elo CC (VC) é comparada com um valor de referência (V_{Cref}). O erro resultante (DVC) alimenta um controlador PI que gera uma referência de corrente para o elo CC (IRF). Esta malha garante que a tensão no barramento permaneça estável, independentemente das flutuações de potência.
- **Malha Interna (Controle de Corrente):** A corrente de referência (IRF) é comparada com a corrente medida (IC1). O erro desta comparação alimenta um segundo controlador PI, que gera o sinal de modulação (M1) para o *chopper*. Esta malha interna, por ser mais rápida, garante uma resposta precisa e ágil do conversor. O sinal final M1 é exportado (EXPORT FM1GSE) para controlar o *chopper* e, assim, regular a energia que flui para o elo CC.

A malha de controle inferior é responsável por implementar a estratégia de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT), controlando o torque e a potência do gerador. Nesse caso, a velocidade angular medida do rotor (W_r) é comparada com uma referência (W_{REF}), que representa a velocidade ótima para a máxima extração de energia. O erro ($ErrW_r$) alimenta um controlador PI que determina uma referência de potência (GGSEL). Este sinal é então multiplicado por um fator de limitação (L), derivado da tensão terminal (V), para garantir que a potência injetada não exceda os limites seguros durante distúrbios na rede. O sinal final (GGSE) representa a ordem de potência ativa que é exportada (EXPORT GGSE) para o inversor, que por sua vez irá controlar a injeção de potência na rede.

A atuação conjunta destes dois sistemas de controle é o que confere ao PMSG a sua alta performance: o Controle do *Chopper* mantém o elo CC estável, criando uma base sólida para que o Controle do Inversor possa extrair a máxima potência do vento de forma segura e eficiente.

3.4.4 Diagrama de Controle do Inversor

O diagrama de controle apresentado na Fig. 17 detalha a estratégia de regulação do inversor do aerogerador síncrono eólico, implementada no Controlador Definido pelo Usuário

(CDU) do Anatem. A arquitetura baseia-se no princípio do controle vetorial no referencial síncrono (d-q), que permite o controle desacoplado e independente da potência ativa e da potência reativa injetadas na rede. A lógica é dividida em dois canais principais que operam em paralelo: Canal de Potência Ativa (controle de velocidade e torque) e Canal de Potência Reativa (controle de tensão).

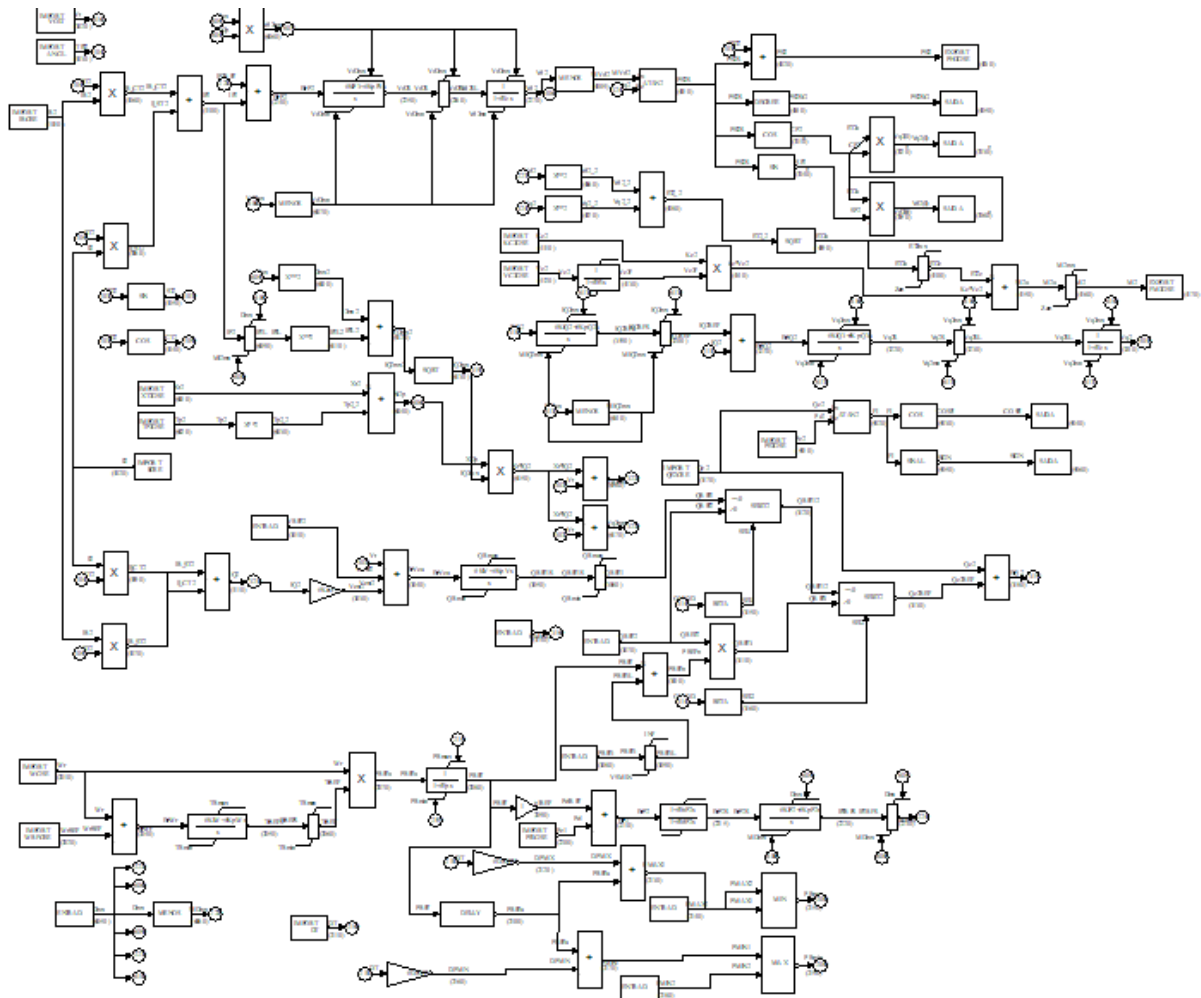


Fig. 17 – Diagrama de controle do Inversor do GSE

Fonte: Manual do Usuário (2024).

O Canal de Potência Ativa tem como objetivo principal implementar a estratégia de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT), o que é feito através da regulação precisa da velocidade do rotor do gerador. A estrutura utiliza um controle em cascata com múltiplas malhas:

- **Malha Externa de Velocidade:** Como pode ser observado na Fig. 18, a velocidade angular medida do rotor (W_r) é comparada com a sua referência (W_{rREF}), gerando um sinal de erro (Err_{Wr}). Este erro é processado por um controlador Proporcional-Integral

(PI) que define a Referência de Torque (Tr_{REF}) necessária para corrigir o desvio de velocidade.

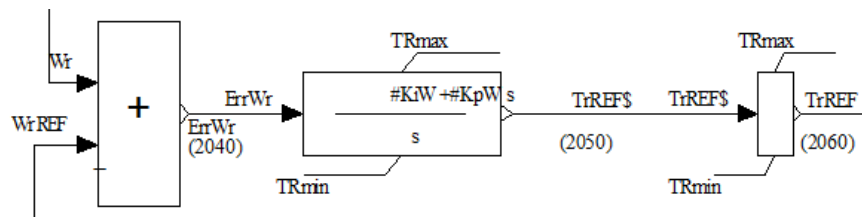


Fig. 18 – Controle do torque de referência Tr_{REF}

Fonte: Manual do Usuário (2024).

- **Malhas Internas de Potência e Corrente:** A referência de torque é convertida em uma referência de potência ativa. A fig. 19 mostra que esta, por sua vez, é comparada com a potência medida para gerar uma referência para a componente ativa da corrente ($IP2_{REF}$). Finalmente, esta referência de corrente é comparada com a corrente medida, e um último controlador PI determina a componente de eixo direto da tensão do inversor ($Vd2$). Esta estrutura em cascata garante uma resposta rápida e estável.

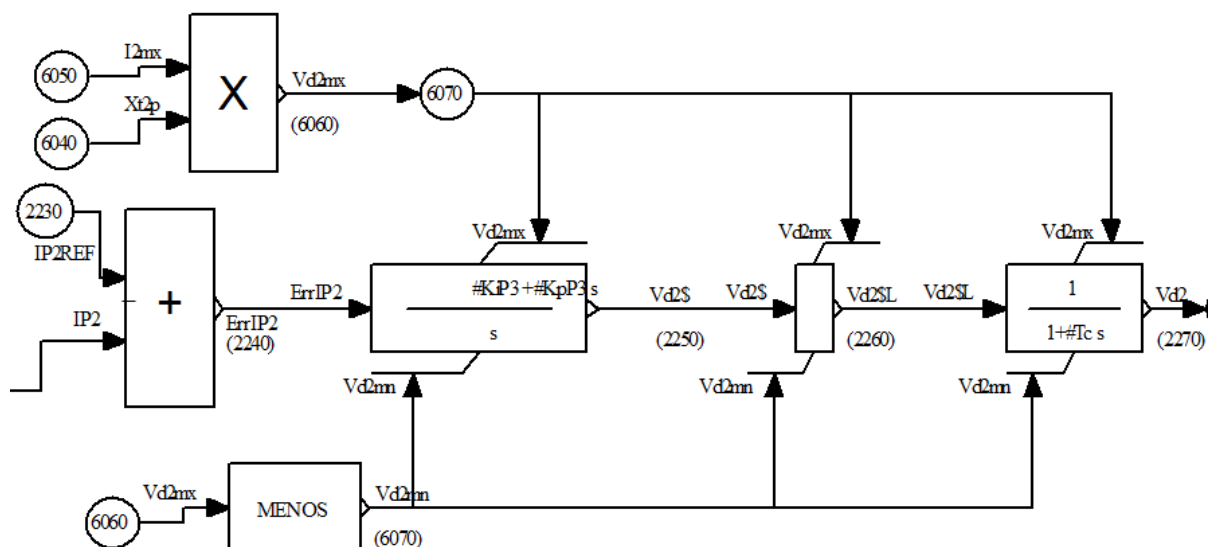


Fig. 19 – Controle da componente de eixo direto da tensão do inversor ($Vd2$)

Fonte: Manual do Usuário (2024).

Por outro lado, o Canal de Potência Reativa é responsável pela regulação da tensão no ponto de conexão, o que é alcançado através da modulação da potência reativa. A estrutura é similar à do canal de potência ativa, também utilizando um controle em cascata:

- **Malha Externa de Tensão:** Na Fig. 20, a tensão medida no terminal do gerador (V_t) é comparada com a sua referência (V_{REF2}), gerando um sinal de erro ($ErrV_{ca}$). Um controlador PI processa este erro e define a Referência de Potência Reativa (Q_{c2REF}). O sistema pode ser configurado para outros modos, como controle de fator de potência, mas o controle de tensão é o principal.

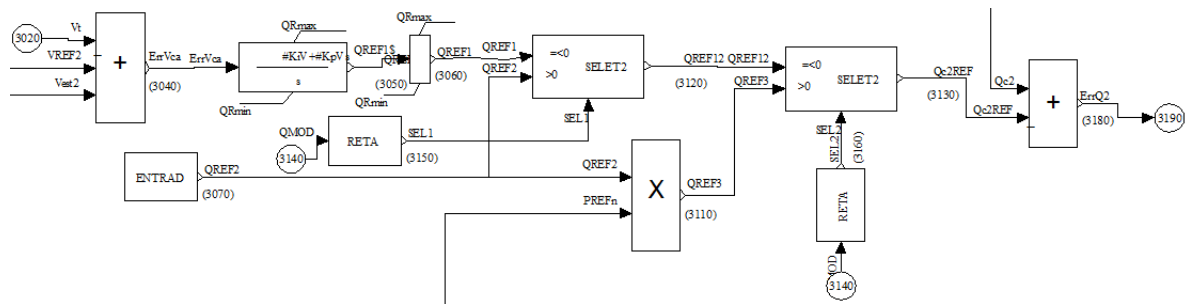
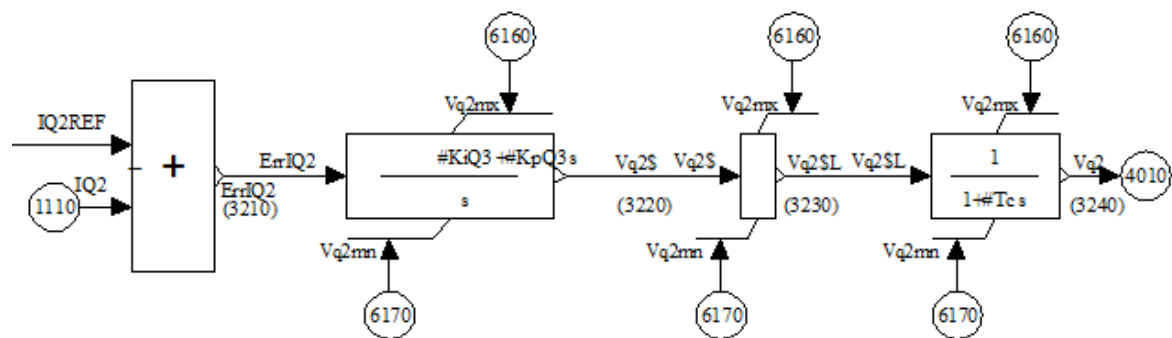


Fig. 20 – Controle da Referência de Potência Reativa

Fonte: Manual do Usuário (2024).

- **Malhas Internas de Potência Reativa e Corrente:** Como pode ser observado na Fig. 2 e de forma análoga ao canal ativo, a referência de potência reativa gera uma referência para a componente reativa da corrente (I_{Q2REF}). Esta é comparada com a corrente medida, e um controlador PI final determina a componente de eixo em quadratura da tensão do inversor (V_{q2}).

Fig. 21 – Controle da componente de eixo em quadratura da tensão do inversor (V_{q2})

Fonte: Manual do Usuário (2024).

As saídas dos dois canais, V_{d2} e V_{q2} , são as componentes ortogonais do vetor de tensão que o inversor deve sintetizar. Estes sinais são então convertidos de coordenadas retangulares (d-q) para coordenadas polares, resultando em um Fator de Modulação ($M2$) e um Ângulo de Fase (Ψ_{I2}). Estes dois valores são exportados para comandar o modulador PWM do inversor,

que irá gerar os pulsos para os semicondutores de potência e, finalmente, produzir a tensão CA desejada na conexão com a rede.

3.4.5 Diagrama de Controle da Turbina

O diagrama de controle apresentado na Fig. 22 detalha a estratégia de regulação da turbina eólica, implementada no Controlador Definido pelo Usuário (CDU) do Anatem. A sua função é gerenciar a conversão da energia cinética do vento em potência mecânica, com dois objetivos principais que dependem da condição de operação: maximizar a extração de energia em ventos de baixa a média intensidade e limitar a potência em ventos fortes para proteger o equipamento. A arquitetura é composta por um modelo aerodinâmico e duas malhas de controle principais que atuam de forma coordenada: Modelo Aerodinâmico e Geração de Torque, Malha de Controle de Passo (*Pitch Control*) e Malha de Controle de Potência (MPPT).

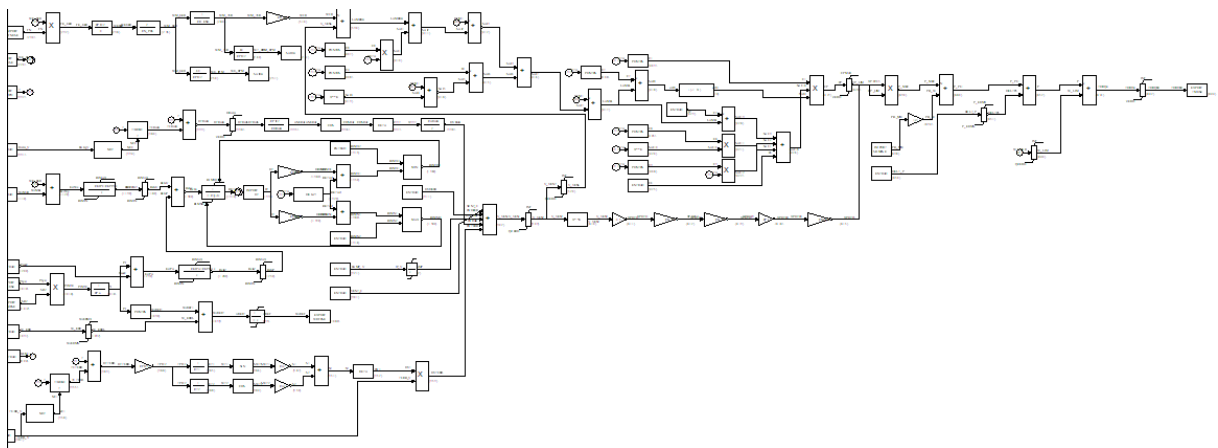


Fig. 22 – Diagrama de controle da turbina do aerogerador

Fonte: Manual do Usuário (2024).

O núcleo do Modelo Aerodinâmico e Geração de Torque é a conversão da velocidade do vento (V_VENT) em torque mecânico ($TMGSE$). Este processo é regido pela eficiência aerodinâmica da turbina, representada pelo Coeficiente de Desempenho (C_p). O valor de C_p não é constante; ele é uma função complexa da razão de velocidade da ponta da pá (λ - Lambda) e do ângulo de passo das pás (β - Beta). A malha de controle mostrada na Fig. 23 calcula continuamente o valor de Lambda, que depende da velocidade do rotor e do vento, para determinar o C_p correspondente. A potência mecânica resultante é então convertida em torque e exportada ($EXPORT\ TMGSE$) para o modelo do gerador.

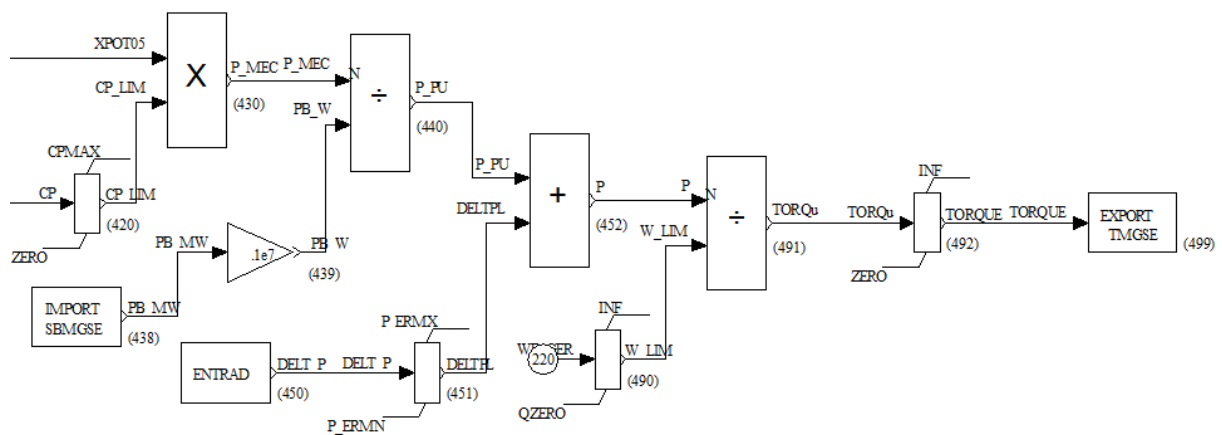


Fig. 23 – Malha de controle para conversão e exportação da potência mecânica resultante em torque (EXPORT TMGSE)

Fonte: Manual do Usuário (2024).

A Malha de Controle de Passo (Fig. 24) é a principal malha de controle para operação em ventos fortes (acima da velocidade nominal). A sua função é limitar a potência mecânica para que não exceda os limites nominais do gerador. O controle monitora o erro de velocidade do gerador (ErrWp). Quando a velocidade do rotor ultrapassa o seu valor de referência, indicando um excesso de potência, um controlador Proporcional-Integral (PI) atua para aumentar o ângulo de passo das pás (Beta). Ao aumentar Beta, as pás giram em torno de seu próprio eixo, reduzindo sua eficiência aerodinâmica. Isso diminui o Cp, limitando o torque mecânico transferido ao gerador, mantendo a velocidade e a potência dentro de limites seguros.

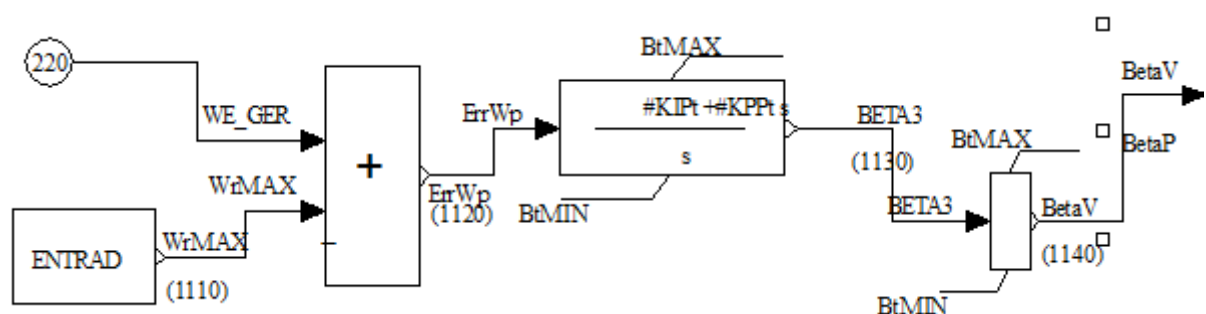


Fig. 24 – Malha de controle do ângulo de passo das pás (Beta)

Fonte: Manual do Usuário (2024).

A Malha de Controle de Potência (MPPT) atua em ventos de baixa a média intensidade, com o objetivo de maximizar a extração de energia. Como mostra a Fig. 25, o controle utiliza a potência elétrica medida (Ptpu) para ajustar a Referência de Velocidade do Rotor (WRFGSE). A lógica segue uma curva de otimização pré-definida (curva de MPPT), que para cada nível de

potência, determina qual a velocidade de rotação que resulta na máxima eficiência aerodinâmica. Esta referência de velocidade é então exportada para o controle do inversor (discutido na seção anterior), que irá modular o torque elétrico para forçar o rotor a operar nesta velocidade ótima.

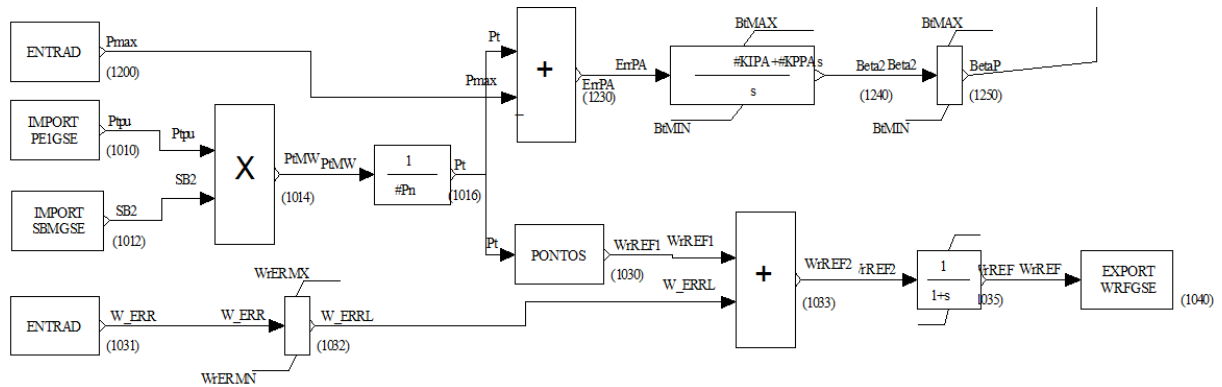


Fig. 25 – Malha de controle da Referência de Velocidade do Rotor (EXPORT WRFGSE)

Fonte: Manual do Usuário (2024).

A atuação sinérgica destas malhas permite que o aerogerador opere com máxima eficiência quando possível e de forma segura quando necessário, adaptando-se dinamicamente às constantes variações do vento.

4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Uma contribuição importante está no sistema-teste modificado, apresentado e simulado aqui, mesmo sendo de pequeno-porte, sem que houvesse a necessidade de alterar os parâmetros do GSE, do conversor-inversor, e da impedância equivalente conectando as barras do parque eólico à barra infinita do sistema original. A estrutura original do sistema-teste está disponibilizada na biblioteca de exemplos da versão dos programas Anarede (Manual do usuário, 2023) e Anatem (Manual do usuário, 2024). A modificação principal inseriu novas barras para acomodar cargas estáticas e dinâmicas (motores de indução) a fim de ampliar os estudos. A partir do sistema modificado, o programa Anarede computou os estados de operação em regime-permanente através do fluxo de potência convencional, enquanto o Anatem reproduziu por meio de simulações individuais o comportamento no domínio do tempo dos GSEs em resposta a uma sequência de abertura e fechamento de circuitos de transmissão, além de perturbações eólicas como rajada e turbulências. O objetivo principal dessas condições adversas de operação é verificar a condição de equilíbrio pós-distúrbio para cada um dos eventos, com foco no comportamento de variáveis controladas específicas.

4.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE

A Figura 26 apresenta o sistema elétrico utilizado nas análises, que consiste em uma modificação do sistema-teste original do Anatem. Para aumentar a representatividade do modelo em relação a um sistema real, foram inseridos quatro (4) barramentos intermediários, cinco (5) circuitos duplos de linhas de transmissão e cargas compostas, incluindo modelos estáticos e dinâmicos de motores de indução. Tal modificação é metodologicamente importante, pois a presença de múltiplos barramentos e cargas com diferentes características dinâmicas permite uma investigação mais aprofundada sobre o impacto de contingências, como a propagação de afundamentos de tensão e a interação entre a geração eólica e as cargas do sistema.

Especificações básicas das turbinas e dos aerogeradores estão nas Tabelas 2, 3 e 4, e os parâmetros dos modelos dinâmicos e algébricos da turbina eólica, do gerador, conversores de potência, transformadores e demais componentes do sistema, além de dados computados na pré-simulação, estão nas Tabelas 5, 6, 7 e 8, respectivamente. Para a Barra 2, foi definida uma carga estática de $2 \text{ MW} + j0.5 \text{ MVar}$. A modelagem desta carga foi realizada utilizando o

modelo ZIP, que a decompõe em parcelas de impedância constante, corrente constante e potência constante, cujos percentuais estão na Tabela 9. Esta abordagem é superior a modelos mais simples, pois reflete com maior precisão a natureza mista das cargas reais em uma rede — que incluem desde equipamentos resistivos até cargas eletrônicas e motores — cada qual com uma sensibilidade distinta às variações de tensão.

As Barras 3, 4 e 5 agregam grupos de motores de indução, dados na Tabela 10. Houve uma distribuição equilibrada das cargas com base na original, para que não comprometesse os ajustes dos GSEs e dos conversores, sem a necessidade de ajustes. Por fim, a Tabela 11 apresenta os resultados do fluxo de potência convergido no programa Anarede.

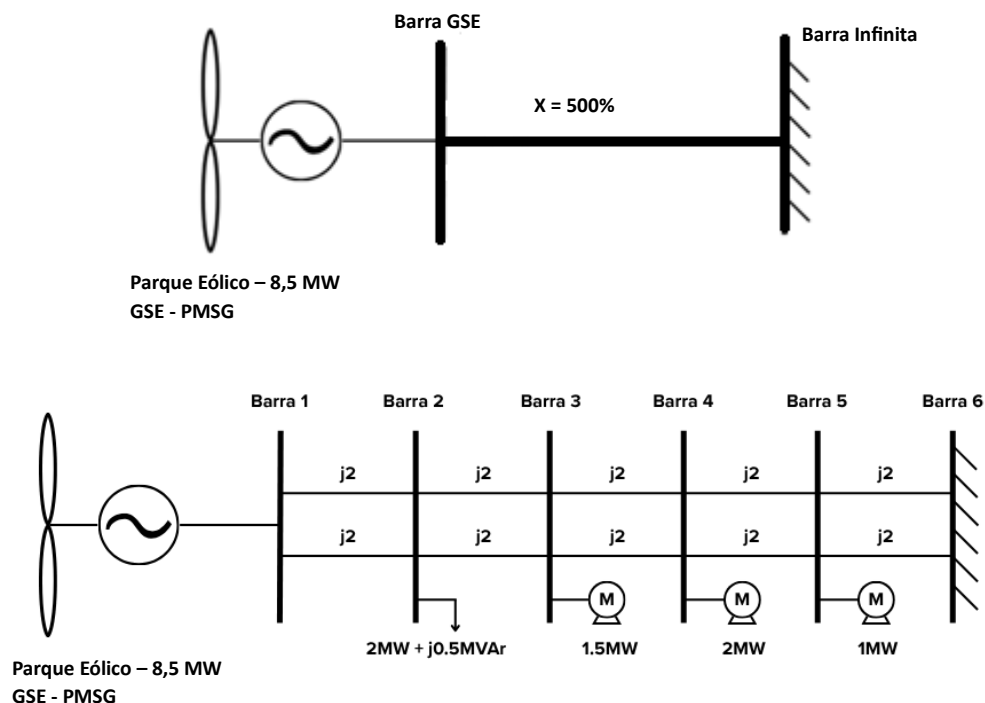


Fig. 26 – Sistema teste original e o modificado utilizado para simulações

Tabela 2 - Dados das Turbinas Eólicas

<i>Grandeza</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
ρ_{ar}	Densidade do ar	kg/m ²	1,225
R_r	Raio das pás	m	29
R_c	Relação de engrenagens (ω_g/ω_t)	adimensional	1

Tabela 3 - Dados do Gerador PMSG

<i>Grandeza</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
-----------------	------------------	----------------	--------------

Capítulo 4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E RESULTADOS

f_0	Frequência nominal do estator	Hz	20
N_p	Número de polos da máquina	adimensional	90
$P_{nominal}$	Potência nominal do gerador (1 unid.)	kW	850

Tabela 4 - Dados da geração eólica

<i>Grandeza</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
P_{total}	Potência total	MW	8,5
N_{un}	Número de unidades	adimensional	10
P_{un}	Potência em cada unidade	kW	850
		pu	1,0

Tabela 5 - Dados da máquina síncrona

<i>Grandeza</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
Ld	Indutância síncrona de eixo direto	%	113.8
Lq	Indutância síncrona de eixo em quadratura	%	68.1
L'd	Indutância transitória de eixo direto	%	35.
L''d	Indutância subtransitória de eixo direto	%	28.8
Ll	Indutância de dispersão da armadura	%	15.8
T'd	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto	s	5.6
T''d	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto	s	0.08
T''q	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto	s	0.15

Tabela 6 – Dados do conversor

<i>Grandeza</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
Ra	Resistência do enrolamento de armadura	%	0.0
H	Constante de inércia do conjunto gerador/turbina	s	3.50
D	Constante de amortecimento	pu/pu	0.0
MVA	Potência aparente nominal da máquina	MVA	0.895
Freq	Frequência nominal da máquina	Hz	20
Bf	Admitância shunt correspondente a filtro nos terminais do gerador	pu	0.0
C	Indica se será considerado (S) ou não (N) a correção com a frequência nas equações de oscilações eletromecânica e nas equações elétricas do gerador	S ou N	S
Pbcc	Potência base do sistema CC	MW	1.0
Vbcc	Tensão base do sistema CC	kV	1.8
Rs	Resistência do reator do <i>chopper</i>	Ohm	0.02
Ls	Reatância do reator do <i>chopper</i>	mH	5.0
Cvsi	Capacitância CC do inversor	mF	5.0

Tabela 7 – Dados do conversor (cont.)

<i>Grandeza</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
N	Número de pontes de 6 pulsos no retificador	adimensional	1
Xtr1	Reatância de transformar do conversor 1 (retificador)	%	10.0
Tap1	Tap de transformador do conversor 1 (retificador) no lado do secundário	Pu	1.0
Vtr1	Tensão base no lado do secundário do transformador do conversor 1 (retificador)	kV	1.0
Str1	Potência base do transformador do conversor 1 (retificador)	MVA	1.0
Xtr2	Reatância de transformar do conversor 2 (inversor)	%	10.0
Tap2	Tap de transformador do conversor 2 (inversor) no lado do secundário	Pu	1.0
Vtr2	Tensão base no lado do secundário do transformador do conversor 2 (inversor)	kV	0.690
Str2	Potência base do transformador do conversor 2 (inversor)	MVA	1.0

Tabela 8 – Dados calculados na pré-simulação

<i>Grandeza</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
V	Velocidade do vento	m/s	9,40
W _{inicial}	Velocidade inicial	pu	0,9259
		Hz	19,0580
C _p	Coefficiente de desempenho	adimensional	0,4743
λ	Tip ratio	adimensional	8,2095

Tabela 9 – Modelagem da Carga Estática da Barra 2

<i>Parcela</i>	<i>Potência</i>	<i>Corrente</i>	<i>Impedância</i>
	<i>Constante</i>	<i>Constante</i>	<i>Constante</i>
Ativa (%)	60	15	25
Reativa (%)	60	15	25

Tabela 10 – Parâmetros dos motores

<i>Grupos</i>	<i>Barra</i>	<i>Tipo</i>	<i>R_s</i>	<i>X_s</i>	<i>X_m</i>	<i>R_r</i>	<i>X_R</i>	<i>FP</i>	<i>Potência base (HP)</i>
			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		
Industrial Pequeno (Grupo 10)	3	1	3,1	10	320	1,8	18	0,852	108
Industrial Grande (Grupo 20)	4	4	7,8	6,5	267	4,4	4,9	0,940	170
Industrial Pequeno II (Grupo 30)	4	5	0,1	23	300	2	23	0,758	65
Residencial Agregado (Grupo 40)	5	6	7,7	10,7	222	7,9	9,8	0,870	125

R_s - resistência do estator; X_s - reatância do estator; X_m - reatância de magnetização; R_r - resistência do rotor; X_R - reatância do rotor e FP - Fator de Potência.

Tabela 11 – Fluxo de Potência Convergado

Barra	Tensão (pu)	Âng. (graus)	C. Ativ. (MW)	C. Reat. (Mvar)	G. Ativ. (MW)	G. Reat. (Mvar)	Shunt (Mvar)	Mot. Ind. (MW)	Mot. Ind. (Mvar)
1	1,0	15,15	0,00	0,00	8,50	2,80	0,00	0,00	0,00
2	0,98	10,16	1,96	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,98	6,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,95
4	0,98	3,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	1,23
5	0,98	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,56
6	1,0	0,00	0,00	0,00	-2,04	2,19	0,00	0,00	0,00

No processo de inicialização, além dos dados do parque, são utilizadas as curvas de desempenho e de velocidade para determinação do ponto inicial de operação do sistema no Anatem. As Fig. 27 e 28 mostram as curvas usadas para inicialização do sistema durante as simulações realizadas.

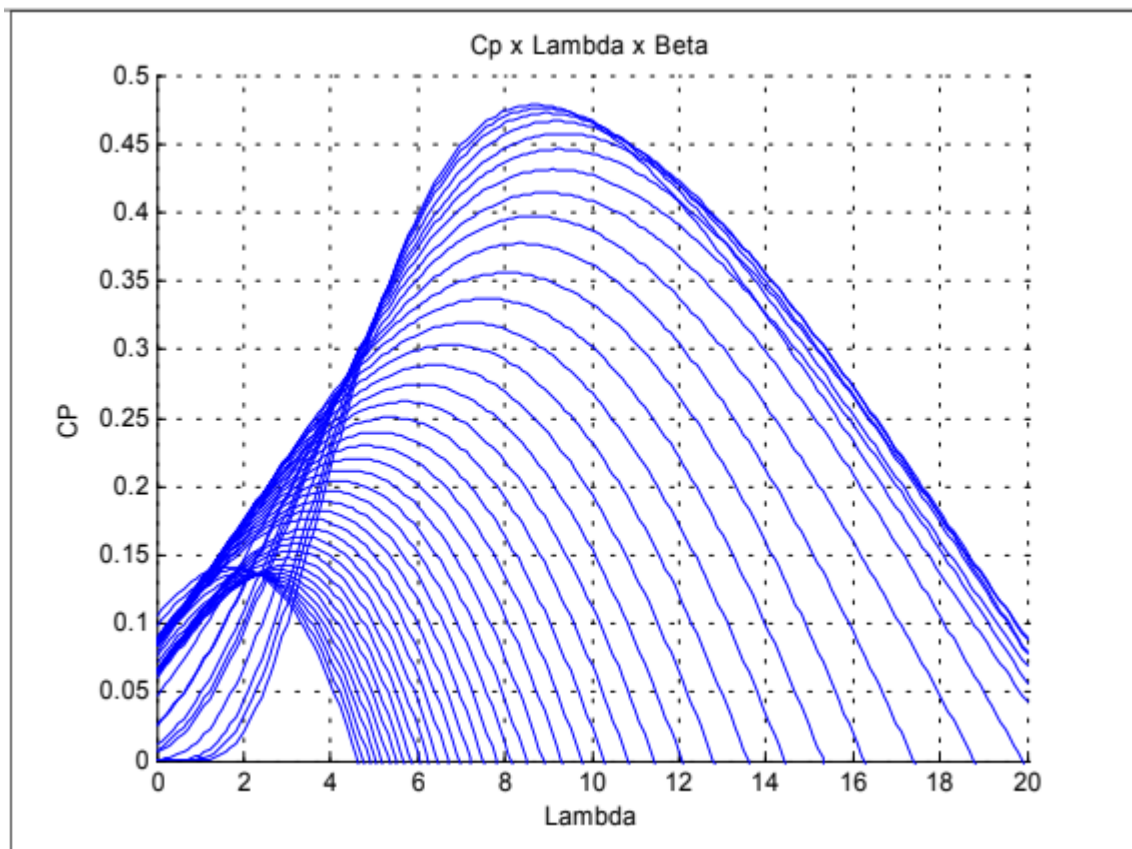


Fig. 27 – Curva de desempenho da turbina

Fonte: Manual do Usuário (2024).

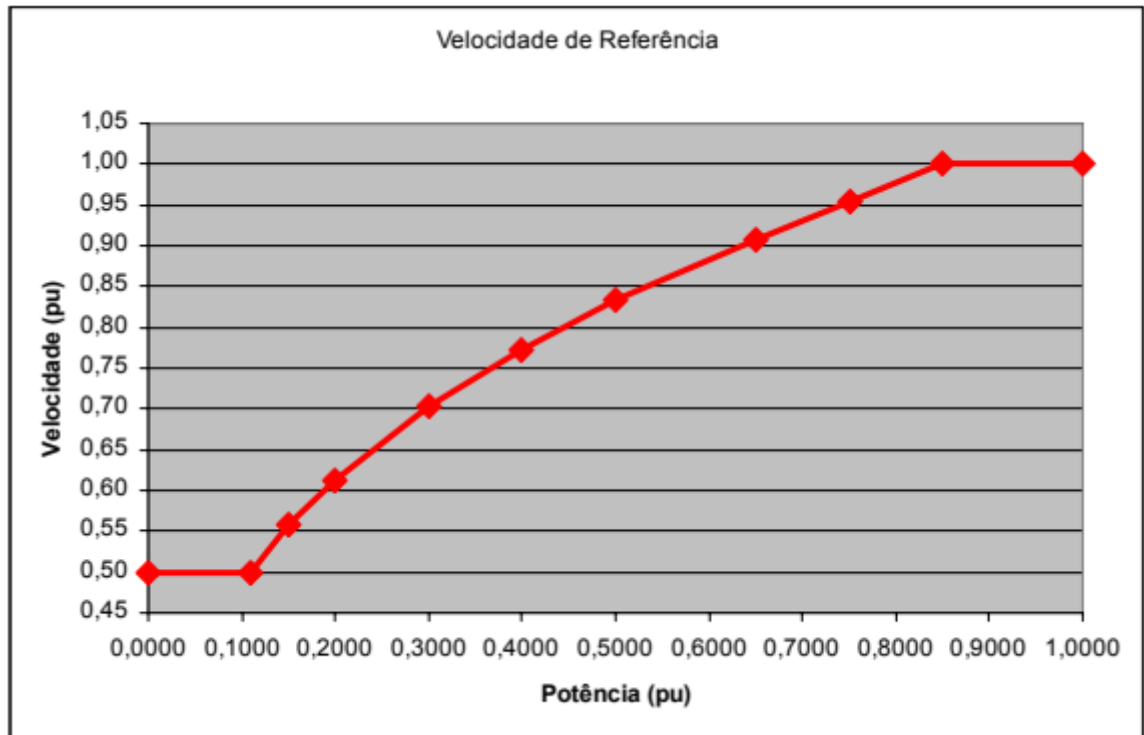


Fig. 28– Curva de referência de velocidade (P x w)

Fonte: Manual do Usuário (2024).

4.3 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

4.3.1 Abertura e Fechamento Sequencial de Circuito

O comportamento dinâmico do GSE e conversor-inversor (Fig. 13) é investigado em resposta a uma sequência de operações de manobra na rede, reproduzindo aberturas e fechamentos de diferentes circuitos em diferentes instantes de tempo (Tabela 12). Os resultados apresentados por meio de gráficos de grandezas selecionadas estão Fig. 29.

Tabela 12 – Sequência de manobras simuladas

<i>Barra</i>		# circuito	<i>Instantes de Abertura e de Fechamento (seg.)</i>	
<i>Origem/Receptora</i>				
1	2	2	1,26	1,70
5	6	2	2,50	3,50

A barra do parque eólico conectado à rede, bem como a barra infinita (não plotada no gráfico #1 uma vez que a sua tensão não apresenta qualquer tipo de desvio), são do tipo tensão controlada, o que justifica o fato de as demais experimentarem afundamentos de tensão até as

linhas de transmissão serem religadas. Os diagramas de blocos das Figuras 19 – 21 são os de interesse nesse conjunto de simulações, cujos parâmetros estão disponíveis nos arquivos CDU de controle.

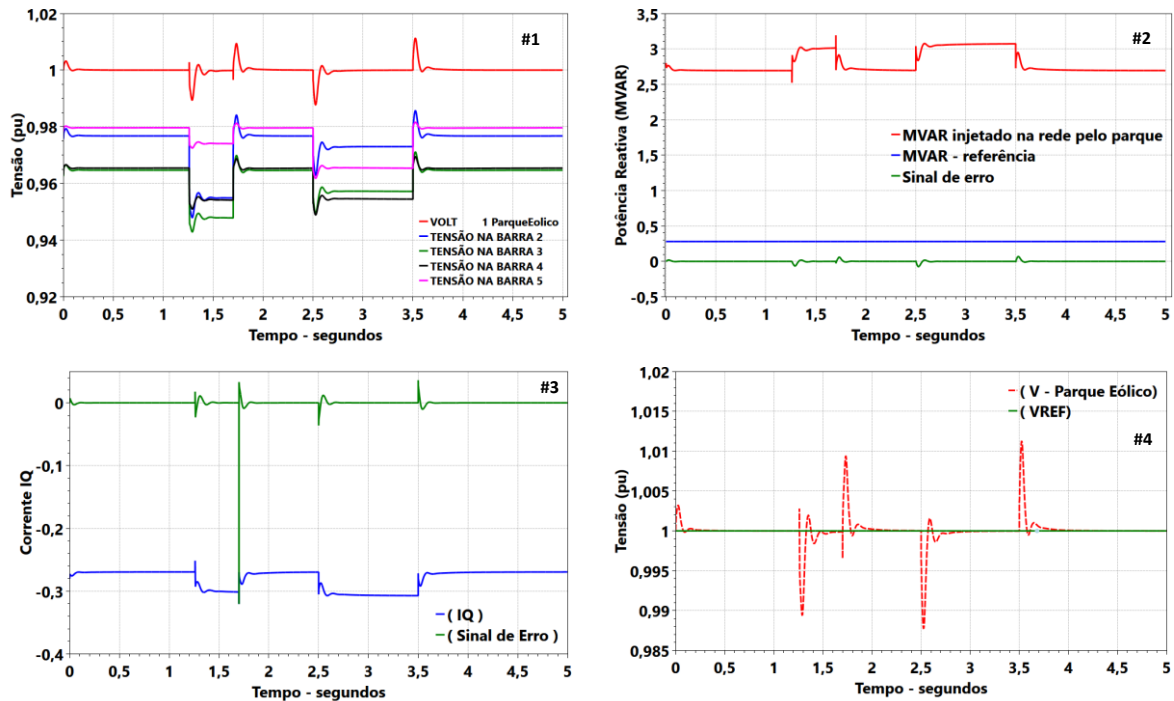


Fig. 29 – Grandezas controladas e controladoras a partir do sinal de erro de tensão

O modo de controle da tensão terminal do parque eólico selecionado é através de ajustes da potência reativa com base no sinal de erro de tensão gerado devido aos desvios experimentados em relação ao valor da tensão de referência. O sinal de erro de tensão gera um sinal de erro de desvio da potência reativa injetada na rede em relação a de referência (#2), iniciando ações de controle para restabelecer a tensão terminal do parque para o valor de referência, ou o mais próximo possível. Essas ações englobam ajustes na corrente de eixo em quadratura (I_q) do inversor (#3), que por sua vez ajusta a sua tensão de eixo “d”, restabelecendo com êxito a tensão terminal do parque (#4), ou seja, a condição de equilíbrio pré-distúrbio foi restabelecida no pós-distúrbio.

Caso houvesse desligamentos de forma ordenada entre uma linha localizada entre as barras 1 e 2, 2 e 3, 3 e 4 e 4 e 5 com um intervalo de 0,5s entre cada manobra e sem que fosse religado, a condição de equilíbrio pós-distúrbio seria diferente da pré com o sistema experimentando declínios de tensão a cada desligamento (#1), apresentando valores abaixo do limite de tensão (Fig. 30) nas barras 2, 3, 4 e 5, caso estabelecido em 0,95 pu, além de as oscilações de tensão na barra do parque eólico terem sido mais severas (#2). A cada desligamento de um circuito, a demanda de potência reativa na rede aumenta (#3), com forte

participação dos motores de indução. Houve muito mais participação das ações de controle neste caso como corroborado pelo comportamento das grandezas controladoras, com destaque para a corrente I_q (#4). Dispositivos de proteção de subtensão desligariam as barras 2, 3, 4 e 5 colapsando totalmente o sistema.

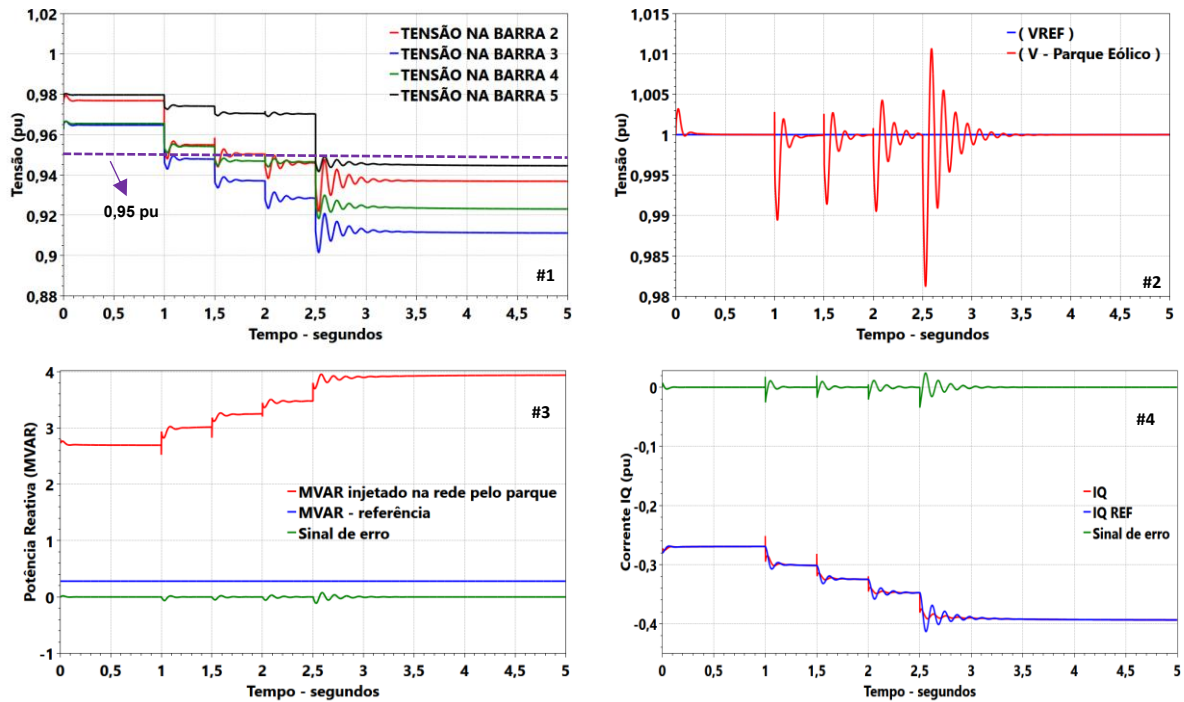


Fig. 30 – Grandezas controladas e controladoras com desligamentos sequenciais

4.3.2 Rajada de Vento

O presente estudo analisa a resposta dinâmica dos GESs do parque eólico quando submetido a uma perturbação eólica (externa) caracterizada por uma rajada de vento. O objetivo é investigar o comportamento do GSE e avaliar a eficácia das estratégias de controle representadas nos diagramas de blocos das Figuras 22 – 25. Os parâmetros dos blocos controladores podem ser encontrados nos respectivos arquivos CDU na biblioteca do programa Anatem. Uma rajada de vento é um movimento brusco e repentino do ar. Conforme define o CLIMATEMPO (2025), é um vento de curta duração, geralmente inferior a 20 segundos, com velocidade de, no mínimo, 18,5 km/h (aproximadamente 5,14 m/s) acima da média observada anteriormente. No entanto, aqui os dados da rajada são os pré-ajustados no arquivo CDU correspondente, ou seja, amplitude de 4 m/s com duração de 2 segundos ($T_{inc} = 1\text{ s} - T_{fin} = 3\text{ s}$). Uma vez que os níveis de tensão não experimentam desvios que gerassem sinais de erro, não houve a necessidade de analisar essas grandezas.

Os gráficos para este caso estão na Fig. 31, onde se observa que a rajada provoca um desvio na velocidade angular das máquinas (são equivalentes), gerando um sinal de erro devido ao desvio em relação a de referência (#1), refletindo nas grandezas da turbina (#2), no torque mecânico (#3), e consequentemente nas potências mecânica e elétrica das máquinas (#4). No caso anterior, o controle de tensão/potência reativa foi através da componente "d" da tensão do inversor (Fig. 19), enquanto neste caso o controle de velocidade é feito através da componente "q" da tensão do conversor conectado à rede (Fig. 21).

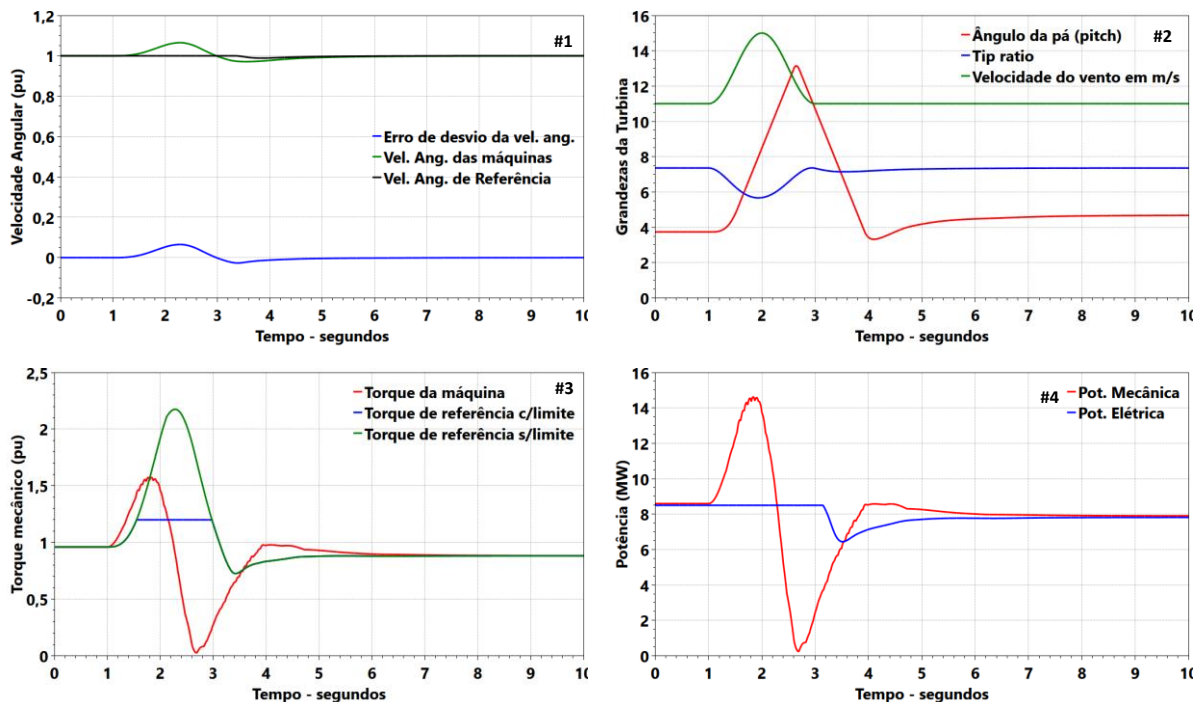


Fig. 31- Comportamento dinâmico de grandezas controladoras (sinais de erro) e controladas em resposta a rajada de vento

Um fator interessante observado nessas curvas é que os desvios do torque e da potência mecânica são severos e acompanham os desvios das grandezas de #2, como esperado. O sistema atinge um ponto de equilíbrio estável pós-rajada, mas que poderia ter sido diferente caso o tempo de sustentação e a amplitude em relação a velocidade inicial sob fossem aumentados. Esse cenário não faz parte do escopo das simulações, mas fica como sugestão para investigações futuras.

4.3.3 Turbulências na Velocidade do Vento

Neste caso, o evento simulado reproduz turbulências na velocidade do vento com duração de 9s, distúrbio também modelado no arquivo CDU da turbina do GSE. O objetivo é similar ao dos casos anteriores, ou seja, investigar o impacto desse evento na operação dos

aerogeradores, as respectivas ações de controle com base nos diagramas de blocos, bem como na condição de equilíbrio do sistema durante e após o evento. Os gráficos para este caso estão na Fig. 32, onde se observa que a turbulência provoca vários desvios na velocidade angular das máquinas (#1), gerando sinais de erros que refletem nas grandezas controladas da turbina (#2), no torque mecânico (#3), e nas potências mecânica e elétrica das máquinas (#4).

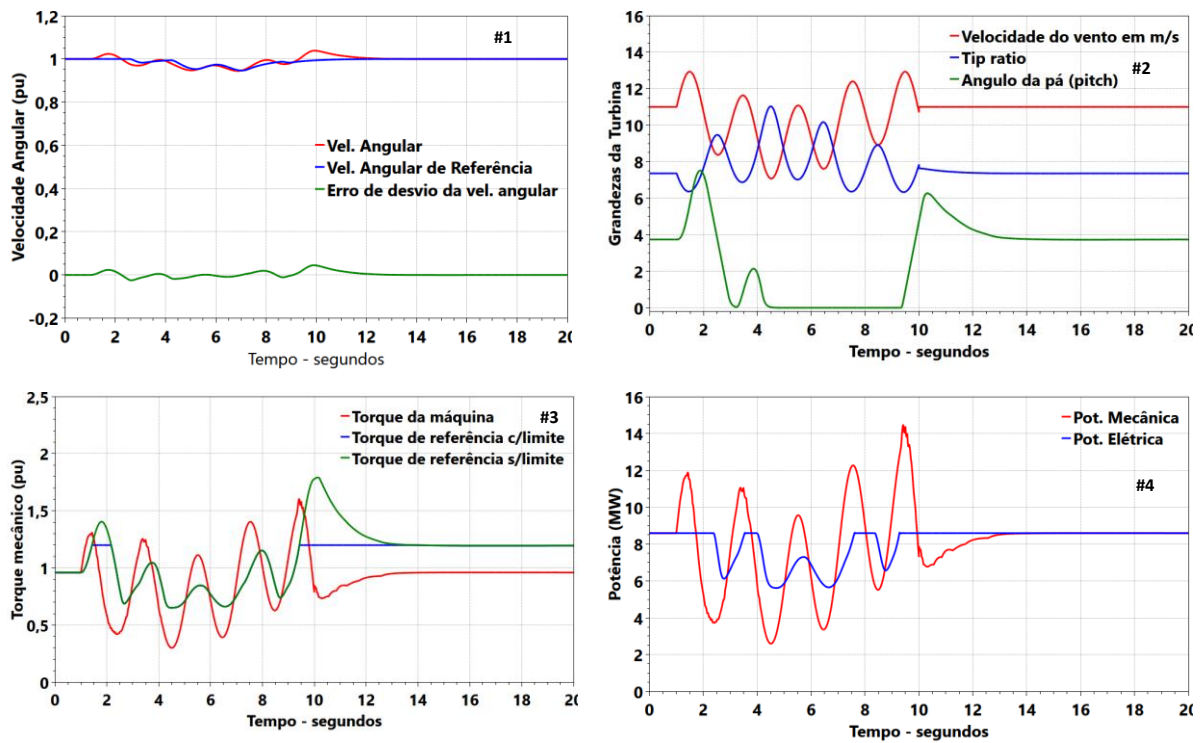


Fig. 32 - Comportamento dinâmico de grandezas controladoras (sinais de erro) e controladas em resposta as turbulências na velocidade do vento

Nota-se também que algumas grandezas controladas atingiram seus limites (#2 e #3) e caso as turbulências e se sustentassem por mais tempo, muito provavelmente o sistema não atingiria uma condição de equilíbrio pós-turbulência. Como no caso da rajada de vento, esse cenário não faz parte do escopo das simulações, mas fica como sugestão para investigações futuras.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O presente trabalho investigou o comportamento dinâmico de um modelo de Gerador Síncrono Eólico (GSE) e seu conjunto conversor-inversor em um sistema-teste de pequeno porte disponível na biblioteca de arquivo de dados do programa computacional Anatem – versão acadêmica 11.5.5. As investigações práticas se completam com os conceitos abordados nos Capítulos 2 e 3, principalmente com os diagramas de blocos, uma vez que foi por meio destes que se estabeleceu as grandezas controladoras, controladas, limites etc. Com base nesses conceitos e nas simulações computacionais realizadas, pode-se concluir que o conjunto conversor-inversor se destaca no controle de grandezas que impactam no desempenho e na condição de operação equilibrada tanto dos aerogeradores, quanto do sistema de potência. Esse conjunto possui blocos de controle que foram explorados nos eventos simulados, focando especialmente nas grandezas controladoras e controladas em resposta ao evento a fim de restabelecer desvios para valores de referência, e assim atingir uma condição de operação de equilíbrio. Desvios de valores da tensão terminal e da velocidade angular das máquinas foram tratadas por blocos específicos, especificamente. Os ajustes do conjunto mostrou estar adequadamente ajustados para as simulações e eventos considerados, e a sua importância para corrigir desvios em determinadas grandezas foi corroborada.

Apesar de as simulações terem sido efetuadas em um sistema-teste de pequeno porte, informações associadas podem ser úteis para investigações futuras e em sistemas reais e de grande-porte, principalmente para aqueles com pouca, ou nenhuma experiência nos temas abordados. Com base nisso, ficam como recomendações para futuros trabalhos:

1. Estudos e simulações computacionais com modelos mais detalhados e eventos mais severos, incorporando outros efeitos aerodinâmicos e mecânicos que podem impactar nas condições de equilíbrio dos aerogeradores e do sistema de potência.
2. Sistemas de maior porte com participação de geradores síncronos convencionais e respectivos controladores e reguladores, cargas especiais que influenciam a estabilidade de tensão, transformadores de tap variável etc.
3. Influência de aerogeradores e conversores-inversores no tempo e ângulo crítico de abertura.

BIBLIOGRAFIA

ACKERMANN, Thomas (Ed.). **Wind power in power systems**. Hoboken: Wiley, 2012.

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. Tradução de Bazán Tecnologia e Lingüística. Revisão técnica de João Antonio Martino. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

BOLDEA, Ion. **Electrical machines: steady state, transient, and design with MATLAB**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Anarede: análise de redes**. Manual do Usuário. Versão 11.07. Rio de Janeiro: CEPEL, 2023.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Anatem: análise de transitórios eletromecânicos**. Manual do Usuário. Versão 12.5. Rio de Janeiro: CEPEL, 2024.

CHENG, Ming; ZHU, Ying. The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: a review. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 88, p. 332-347, dez. 2014.

CLIMATEMPO. Notícias, c2021. Você sabe o que é uma rajada de vento? em: <CLIMATEMPO - Rajade de Vento> Acesso em: 05 de ago. de 2025.

DATTA, Subir et al. Grid Connected PMSG Based Wind Energy Conversion System Using Back-to-Back Converter. *In: Intelligent Techniques and Applications in Science and Technology*. [S.l.]: Springer, 2020. p. 433-442.

DESALEGN, Belachew; GEBEYEHU, Desta; TAMRAT, Bimrew. Wind energy conversion technologies and engineering approaches to enhancing wind power generation: a review. **Heliyon**, [S.L.], v. 8, n. 11, p. 1-27, nov. 2022.

GENERAL ELECTRIC. **Haliade-X Offshore Wind Turbine**. Disponível em: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>. Acesso em: 20 fev. 2025.

HANSEN, A. D.; MICHALKE, G. Fault ride-through capability of wind turbines with synchronous generators. **Wind Energy**, v. 24, p. 123-145, 2021.

HART, Daniel W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. Tradução de Romeu Abdo. Revisão técnica de Antonio Pertence Júnior. Porto Alegre: AMGH, 2012.

HASSANZADEH, Fattah et al. **Back-to-back Converter Control of Grid-connected Wind Turbine to Mitigate Voltage Drop Caused by Faults**. 2017. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1707.04082>. Acesso em: 14 maio 2025.

HOJABRI, Hossein; MOKHTARI, Hossein; CHANG, Liuchen. Reactive Power Control of Permanent-Magnet Synchronous Wind Generator With Matrix Converter. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 28, n. 2, p. 575-584, abr. 2013.

HOSSAIN, E. et al. Modelling and simulation of permanent magnet synchronous generator wind turbine: a step to microgrid technology. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 7, n. 1, p. 443–450, 2017.

KAHLA, Sami et al. Maximum power extraction framework using robust fractional-order feedback linearization control and GM-CPSO for PMSG-based WECS. **Wind Engineering**, [S.L.], v. 45, n. 4, p. 1040-1054, 24 ago. 2020.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 1994.

LETCHER, Trevor M. (Ed.). **Wind energy engineering: a handbook for onshore and offshore wind turbines**. London: Academic Press, 2017.

LIANG, Jinping et al. A state-of-the-art review on wind power converter fault diagnosis. **Energy Reports**, [S.L.], v. 8, p. 5341-5369, nov. 2022.

MASCARENHAS, E. S. F. **Modelação dinâmica de rede com integração de centrais eólicas**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2018.

NIQUINI, F. M. M.; et al. **Modelagem do elo de corrente contínua no domínio da frequência em sistemas assíncronos desequilibrados**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO, 2009, Salvador. Anais [...]. Salvador: SBA, 2009

OLIVEIRA, João Paulo Jorge de. **Geradores síncronos a ímãs permanentes aplicados a aerogeradores: modelagem, obtenção de parâmetros e validação laboratorial**. 2018. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Tabela Relação de Usinas**. 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/tabela-relacao-usinas.aspx>. Acesso em: 22 ago. 2024.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica**. [Reimp.]. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. 4. ed. Tradução de Leonardo Abramowicz. Revisão técnica de Carlos Marcelo de Oliveira Stein. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

SAUER, P.; PAI, M. A. **Power systems dynamics and stability**. 1. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2018.

SIEMENS GAMESA. **SG 14-222 DD**. Disponível em: <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd>. Acesso em: 20 fev. 2025.

SOUSA, Marcia. **Brasil é segundo país do mundo em crescimento de energia eólica**. 2024. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/planeta/energia/brasil-e-segundo-pais-do-mundo-em-crescimento-de-energia-eolica/>. Acesso em: 19 ago. 2024.

TONG, W. Fundamentals of wind energy. *In: WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*. [S.l.], v. 44, cap. 1, p. 1-27, 2010.

ULUTAŞ, Alper; DURU, Tarık. Variable-Speed Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine Modeling and Simulation. **Kocaeli Journal Of Science And Engineering**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 21-27, 31 maio 2019.

VESTAS. **V236-15.0 MW**. Disponível em: <https://www.vestas.com/en/products/offshore/v236-15-mw>. Acesso em: 20 fev. 2025.

WAGNER, H.-J. Introduction to wind energy systems. **Epj Web Of Conferences**, [S.L.], v. 148, p. 00011, 2017.

YARAMASU, V.; WU, B. Basics of wind energy conversion systems (WECS). *In: YARAMASU, V.; WU, B. (Ed.). Model predictive control of wind energy conversion systems*. Hoboken: Wiley, 2017. Cap. 1.

ZHU, S. et al. Structure and Operating Performance of a Double Electrical Excitation Synchronous Generator With Embedded Brushless Synchronous Exciter Utilizing DC-Field Excitation. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 37, n. 1, p. 50–64, mar. 2022.