



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO BAIXO TOCANTINS
FACULDADE DE ENGENHARIA INDUSTRIAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

SÉRGIO RODRIGUES PINHEIRO NETO

**ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE: ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO
CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO APLICADO EM UM PARQUE EÓLICO**

ABAETETUBA – PA

2021

SÉRGIO RODRIGUES PINHEIRO NETO

**ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE: ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO
CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO APLICADO EM UM PARQUE EÓLICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Industrial da Universidade Federal do Pará, Campus de Abaetetuba, como requisito final para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Kayt Nazaré do Vale Matos

ABAETETUBA – PA

2021

SÉRGIO RODRIGUES PINHEIRO NETO

**ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE: ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO
CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO APLICADO EM UM PARQUE EÓLICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Industrial da Universidade Federal do Pará, Campus de Abaetetuba, como requisito final para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Kayt Nazaré do Vale Matos

Abaetetuba, 15 de junho de 2021.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Kayt Nazaré do Vale Matos
UFPA
Orientadora

Prof. Me. Hallan Max Silva Souza
UFPA
Examinador

Prof. Me. Eliomar Azevedo do Carmo
UFPA
Examinador

Aos meus pais Sérgio e Juliana.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Sérgio e Juliana pelo incentivo e apoio incondicional que me permitiram continuar e chegar até aqui.

À minha orientadora, professora Kayt Nazaré do Vale Matos, por seus ensinamentos, oportunidade da presente pesquisa e contribuição na realização deste trabalho.

Ao professor Hallan Max Silva Souza por seu auxílio e conselhos em pesquisa acadêmica e por compor a banca examinadora.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização da minha graduação e para confecção deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta a contribuição do controle secundário de tensão (CST) aplicado a um parque eólico composto por aerogeradores de indução duplamente alimentados (DFIG) na estabilidade de tensão a longo prazo com o objetivo de mostrar a viabilidade de sistemas de segurança de tensão e suas aquisições no contexto da engenharia da sustentabilidade e produção ecoeficiente. Aerogeradores de velocidade variável são capazes de fornecer potência reativa graças aos conversores de potência, os quais estão sujeitos a limitações de tensão e corrente, e dependem das condições de operação do sistema de potência e do regime de vento. Com o aumento da potência elétrica gerada pelos parques eólicos surgem alguns desafios relacionados a estabilidade de tensão devido a variabilidade e incerteza do vento. Medidas de segurança e operação são necessárias para solucionar eventuais problemas relacionados ao controle de estabilidade de tensão, como o CST. O controle do fator de potência, o controle de tensão e controle de potência reativa são referentes a capacidade do parque eólico em fornecer potência reativa para a rede elétrica com a finalidade de melhorar a estabilidade de tensão do sistema de potência. Considerando um sistema de potência comumente usado em estudos de estabilidade de tensão com a inserção de um parque eólico, simulações foram realizadas em programas computacionais usados em estudos de análise de sistemas de potência desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Os resultados mostraram que o CST é eficaz quando aplicado em aerogeradores DFIG no aumento da margem de estabilidade de tensão a longo prazo, melhorando sua eficiência energética e aprimorando sua ecoeficiência .

Palavras-Chave: Controle secundário de tensão. Gerador de indução duplamente alimentado. Parque eólico. Estabilidade de tensão de longo-prazo. Ecoeficiência. Engenharia da sustentabilidade

ABSTRACT

This final paper presents the contribution of secondary voltage control (SVC) applied to a wind farm composed of doubly fed induction generator (DFIG) and its effect on long-term voltage stability in order to show the feasibility of voltage safety systems and their acquisitions in the context of sustainability engineering and eco-efficient production. Variable speed wind turbines are capable of providing reactive power thanks to the power converters, which are subject to voltage and current limitations, and depend on the operating conditions of the power system and the wind regime. With the increase of the electric power generated by wind farms, some challenges related to voltage stability arise due to the variability and uncertainty of the wind. Safety and operational measures are necessary to solve any problems related to the control of voltage stability, such as the SVC. Power factor control, voltage control and reactive power control refer to the capacity of the wind farm to provide reactive power to the power grid in order to improve the voltage stability of the power system. Considering a power system commonly used in voltage stability studies with the insertion of a wind farm, simulations were performed in computer software used in power system analysis studies developed by the Electric Energy Research Center (CEPEL). The results showed that SVC is effective when applied to DFIG in increasing the long-term voltage stability margin, improving your energy efficiency and improving your eco-efficiency.

Keywords: Secondary voltage control. Doubly fed induction generator. Wind farm. Long-term voltage stability. Eco-efficiency. Sustainability Engineering

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 - Distribuição dos Ventos	25
Figura 2 - Anemômetro Analógico de Torre.....	26
Figura 3 - Sensor de Direção	27
Figura 4 - Capacidade Global de Energia Eólica e Aumento Anual nos Últimos 10 anos.....	30
Figura 5 - Levantamento Eólico do Brasil	32
Figura 6 - Funcionamento de um Aerogerador	34
Figura 7 - Gerador de indução em gaiola conectado diretamente a rede elétrica.....	35
Figura 8 - Estrutura de um Aerogerador de Eixo Horizontal	37
Figura 9 - Configuração Básica do DFIG	39
Figura 10 - Esquema de Controle do DFIG	40
Figura 11 - Queda monotônica de tensão.....	43
Figura 12 - Classificação Geral de Estabilidade de Sistemas de Potência.....	44
Figura 13 - Níveis hierárquicos do Controle Coordenado de Tensão.....	47
Figura 14 - Diagrama unifilar do sistema teste.....	51
Figura 15 - Gráfico da Tensão na Barra 8.....	53
Figura 16 - Gráfico da Tensão na Barra 11.....	54
Figura 17 - Gráfico da Potência Reativa do DFIG.	54
Figura 18 - Gráfico do módulo da tensão da geração eólica.	55
Figura 19 - Gráfico da Tensão na Barra 9.....	56
Figura 20 - Gráfico da Tensão na Barra 10.....	56

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ANAREDE	Programa de Análise de Redes
ANATEM	Análise de Transitórios Eletromecânicos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CCT	Controle Coordenado de Tensão
CDU	Controles Definidos pelo Usuário
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRE	Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CPT	Controle Primário de Tensão
CST	Controle Secundário de Tensão
CTT	Controle Terciário de Tensão
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
FRC	Full Rated Converter
GSC	Grid Side Converter
GWEC	Global Wind Energy Council
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
RPM	Rotação Por Minuto
OEL	Over-Excitation Limiter
OLTC	On-Load Tap Changer
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
ONUDI	Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
RSC	Rotor Side Converter
SCIG	Squirell Cage Induction Generator
SIN	Sistema Interligado Nacional
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

SUMÁRIO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivo	14
1.3 Revisão Bibliográfica	14
1.4 Estrutura do Trabalho.....	16
Capítulo 2 - DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	18
2.1 Engenharia da Sustentabilidade.....	19
2.2 Produção mais Limpa e Ecoeficiência.....	20
2.3 Eficiência Energética	21
2.4 Conclusão	22
Capítulo 3 - ENERGIA EÓLICA.....	23
3.1 O Sol	23
3.2 A Origem do Vento	24
3.3 Medição do Vento	25
3.3.1 Anemômetro Analógico de Torre	26
3.3.2 Sensor de Direção	27
3.4 Tipos de Aplicações dos Sistemas Eólicos	27
3.4.1 Sistemas Isolados	27
3.4.2 Sistemas Híbridos	28
3.4.3 Sistemas Interligados a Rede	28
3.4.4 Sistemas offshore	29
3.5 Mercado de Energia Eólica.....	29
3.5.1 Brasil	31
3.6 Sistemas Eólicos	33
3.6.1 Sistemas Eólicos a Velocidade Constante	35

3.6.2 Sistemas Eólicos a Velocidade Variável	36
3.7 Componentes de um Sistema Eólico.....	37
3.8 Gerador de Indução Duplamente Alimentado.....	38
3.9 Conclusão	41
Capítulo 4 - Estabilidade de Tensão.....	42
4.1 Classificação de Estabilidade de Tensão	43
4.2 Instabilidade de Tensão	44
4.3 Qualidade de Energia	45
4.4 Segurança de Tensão	45
4.5 Controle de Tensão	46
4.5.1 Controle Hierárquico.....	46
4.6 Conclusão	47
Capítulo 5 - MÉTODO	49
5.1 Programa de Análise de Redes (ANAREDE).....	49
5.2 Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM)	49
5.3 Procedimentos de Rede.....	50
5.5 Sistema Elétrico Adotado	50
5.6 Dados de Simulação	52
5.7 Conclusão	52
Capítulo 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
6.1 Conclusão	57
Capítulo 7 - CONCLUSÃO	58
7.1 Considerações Finais.....	58
7.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

A constante busca pelo desenvolvimento sustentável, com uso de fontes de energia limpas e renováveis é uma tendência global pelo fato de proporcionar a diversificação das matrizes energéticas, redução dos impactos ambientais e infraestruturas energéticas urbanas mais independentes de fontes e redes remotas.

No âmbito da Engenharia de Produção, a questão da sustentabilidade vem ganhando espaço nos últimos anos. A matriz de conhecimentos e as áreas apresentadas pela Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO) propõem a criação de uma nova área de especialização denominada Engenharia da Sustentabilidade, a qual é definida pela ABEPRO como aquela que objetiva o planejamento da utilização eficiente dos recursos naturais nos sistemas produtivos diversos, da destinação e tratamento dos resíduos e efluentes destes sistemas, bem como da implantação de sistema de gestão ambiental e responsabilidade social. (ABEPRO, 2020).

A preocupação com os problemas ambientais em um contexto global vem mobilizando a comunidade e os governos mundiais no sentido de mudar o perfil de suas matrizes energéticas, com maior participação das energias renováveis. As tecnologias renováveis são ideais para o aproveitamento de recursos locais de matéria-prima e mão de obra, evitam perda na transmissão e aumentam a confiabilidade das autoridades e das concessionárias pelo bom funcionamento das malhas da rede elétrica (RODRIGUES, 2011).

A energia eólica ganhou bastante importância no cenário mundial, alcançando níveis de penetração elevados nos últimos anos. Por ser considerada uma fonte limpa e praticamente sem resíduos, a energia eólica merece destaque frente à exploração de fontes de energia não-renováveis, como o carvão mineral e o gás natural, os quais são responsáveis por grandes quantidades de gases causadores do efeito estufa, fenômeno responsável pelo aquecimento global e mudanças climáticas.

A produção de energia elétrica por meio de aerogeradores atingiu um estágio de maturidade que coloca a energia eólica como participante significativa da matriz energética em vários países inclusive o Brasil, como consequência, seus aspectos técnicos de predição e funcionamento, levaram muitos operadores de sistemas a reformularem seus códigos de rede, com respeito à geração eólica, prevendo elevados níveis de penetração das fontes eólicas.

No Brasil, essa constatação motivou a adequação dos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), especificamente o Submódulo 3.6, tendo em

vista a proposição de aperfeiçoamentos nos requisitos técnicos para conexão de centrais geradoras eólicas visando garantir que sua maciça injeção não deteriore as condições de segurança do sistema de potência. Uma das maiores preocupações da engenharia de sistemas de energia é a regulação da tensão, pois é sabido que problemas de instabilidade de tensão pode levar o sistema de potência ao colapso de tensão.

A estabilidade de tensão refere-se à habilidade de um sistema de potência em permanecer com tensões estacionárias em todas as barras do sistema após ser submetido a um distúrbio para uma dada condição de operação inicial (IEEE/CIGRE Task Force, 2004). No mundo todo, as centrais eólicas devem possuir recursos necessários que favoreçam a operação seja absorvendo ou injetando reativos dentro de uma faixa especificada, com o objetivo de ter uma participação efetiva no controle da tensão, aumentando a margem de estabilidade de tensão do sistema de potência.

O controle do fator de potência, o controle de tensão e controle de potência reativa são referentes a capacidade do parque eólico em fornecer potência reativa para a rede elétrica e melhorar a estabilidade de tensão (LONDERO, 2014). Dentre esses, o modo de controle de tensão apresenta melhor desempenho para melhorar a estabilidade de tensão e por esse motivo é uma das técnicas mais empregadas em sistemas de potência para mitigar problemas relacionados a estabilidade.

1.1 Justificativa

Atualmente, a tecnologia de aerogeradores a velocidade variável domina o mercado eólico de fabricantes, pois possuem a capacidade de extrair a máxima potência do vento. Dentre os aerogeradores utilizados nesses tipos de sistemas eólicos, o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) pode fornecer potência reativa para o sistema elétrico, dependendo da filosofia de controle adotada.

Dessa forma, o DFIG pode operar como compensador de potência reativa em condições de baixas velocidades de vento, favorecendo um aumento na margem de estabilidade de tensão do sistema elétrico. A necessidade de potência reativa decorre da natureza dos sistemas de corrente alternada devido ao defasamento angular entre tensão e corrente, sendo essencial em sistemas de transmissão sobrecarregados.

O Controle Secundário de Tensão (CST) consiste em regular a tensão do lado da transmissão, cujos principais objetivos são a manutenção do perfil de tensão do sistema, a

racionalização das reservas de reativos, contribuindo para uma operação mais segura e econômica do sistema. A principal filosofia do CST é a divisão do sistema em áreas teoricamente desacopladas do ponto de vista da tensão, onde cada área é regulada por um conjunto de máquinas e dispositivos de controle específicos, os quais têm por função manter a tensão de uma determinada barra, chamada de barra piloto, em um valor de referência.

O CST é uma técnica abrangente de controle hierárquico cujo objetivo é melhorar a margem de estabilidade de tensão do sistema de potência, e se utilizado em conjunto com o aerogerador DFIG pode contribuir para o alcance das exigências determinadas pelo código de rede, visando o aumento da margem de estabilidade de tensão, em momentos que o sistema de potência se encontra altamente carregado.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar a análise da contribuição do CST aplicado em um parque eólico composto por aerogeradores DFIG na estabilidade de tensão de longo-prazo através de simulações nos programas ANAREDE e ANATEM desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), programas computacionais usados em estudos de expansão e operação do sistema elétrico brasileiro, com o intuito de demonstrar sua contribuição na ecoeficiência do aerogerador.

1.3 Revisão Bibliográfica

Trevisan et al. (2008) aborda a importância das ações voltadas para a gestão socioambiental, sustentabilidade e responsabilidade social, realizando um estudo teórico demonstrando a possibilidade de desenvolver ações englobando companhias e sociedade, buscando alternativas viáveis de desenvolvimento e produção socioambientais.

Menkes (2004) avalia a efetividade da eficiência energética enquanto instrumento de política ambiental, destacando que o principal motivo para a implementação de eficiência energética nos países desenvolvidos é de ordem ambiental, constatando também que a política de eficiência energética exige a consolidação de parcerias do setor público com o setor privado e que a participação social é imprescindível para a melhoria da eficiência.

Schmidheiny (1992) aponta a preocupação ecológica como uma variável macro ambiental a mais a ser considerada no planejamento estratégico das empresas. Kats (1998) faz um estudo mensurando e verificando as reduções de emissões de gases causadores das mudanças climáticas.

Rodrigues (2011) explica de forma abrangente o funcionamento da energia eólica e seus sistemas, considerando aspectos técnicos, geográficos e econômicos para demonstrar as vantagens de implementação de tecnologias renováveis no âmbito global abordando tópicos específicos como tipos de aerogerados.

IEEE/CIGRE Task Force (2004) aborda a questão da definição de estabilidade e classificação em sistemas de energia de um ponto de vista fundamental, examinando as ramificações práticas. O relatório visa definir a estabilidade do sistema de energia com mais precisão, discutindo a confiabilidade e segurança do sistema de energia.

Londero (2014) demonstra os impactos causados na estabilidade de tensão de longo-prazo em sistemas elétricos de potência, por meio da integração de aerogeradores a velocidade constante e a velocidade variável considerando os modos de controle (fator de potência ou tensão terminal), regimes de velocidades dos ventos (altas e baixas) com o objetivo de analisar a contribuição de aerogeradores para a estabilidade de tensão de longo-prazo.

Kimura et al (2001) fala sobre a medição do vento e avalia um anemômetro de copos com leitura digital da velocidade instantânea, utilizando materiais de baixo custo e de fácil construção. Percy et al. (1989) aborda sobre os anemômetros com características de construção e operação diferentes abordando seus aspectos tecnológicos.

O GWEC (2021) fornece anualmente relatórios e perspectivas internacionais sobre a energia eólica com o objetivo de divulgar seus benefícios de implementação e desenvolvimento. Já no REN21(2021) são disponibilizados, através de relatórios anuais, análises de desenvolvimentos globais em tecnologia, políticas de mercados, previsões e outros detalhes em relação às fontes renováveis ao redor do mundo através de contribuições de vários países.

Em Kundur (1994) é possível obter o detalhamento do modelo matemático dinâmico do DFIG, bem como de outros dispositivos importantes na análise de estabilidade de tensão, como o transformador com comutador de tap (OLTC) e o limitador de sobre-excitação (OEL), cobrindo fenômenos transitórios e de longo prazo e apresentando solução comprovada para problemas de instabilidade.

Em Nunes et al. (2004) é feita a avaliação da estabilidade transitória com a participação da geração eólica para redes elétricas fracas, concluindo que o DFIG aumenta a margem de estabilidade transitória do sistema. N. Jenkins et al (2000) e P. Trichakis, et al (2008) tratam sobre problemas operacionais relacionados ao fenômeno de instabilidade.

Informação sobre questões históricas, técnicas, operacionais e econômicas da indústria eólica são encontradas em Pinto (2013). Distúrbios em redes de turbinas eólicas com geradores de velocidade variável modernos são estudados em Ullah et al. (2007). MORREN (2005) descreve uma solução para que os DFIGs permaneçam conectados à rede durante falhas na rede, através da limitação da alta corrente do rotor para proteger o conversor.

Matos (2019) investiga o uso do controle secundário de tensão em um parque eólico composto de geradores de indução duplamente alimentados e seu efeito na estabilidade de tensão de longo-prazo. Rangel et al. (2005) descreve a modelagem dos equipamentos usados no aproveitamento eólico nos programas de análise de redes (ANAREDE) e de análise de estabilidade eletromecânica (ANATEM) ambos do CEPEL.

Van Cutsem et al. (1998) contextualiza sobre desbalanço de potência reativa e instabilidade de tensão em sistemas de potência, apresentando uma descrição clara dos fenômenos de instabilidade e colapso da tensão, além de descrever métodos práticos que podem ser usados para avaliação de segurança de tensão com uma variedade de exemplos.

Taylor (1994) apresenta soluções testadas para os problemas de estabilidade comuns enfrentados por engenheiros em usinas de energia elétrica, apresentando diretrizes de planejamento e operação em fenômenos transitórios e de longo prazo.

Pavão (2006) analisa os problemas relacionados ao projeto e implementação de esquemas de controle secundário de tensão, abordando fluxo de potência, simulação não linear no domínio do tempo, problema de escolha de barras piloto e áreas de controle de tensão.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em sete capítulos, sendo que o Capítulo 1 aborda de maneira geral o tema de energia eólica e suas características, e em seguida é apresentado o objetivo do trabalho, a justificativa e a revisão bibliográfica.

No segundo capítulo são apontados conceitos fundamentais sobre desenvolvimento sustentável, engenharia da sustentabilidade, produção mais limpa, ecoeficiência e eficiência energética.

No Capítulo 3 são apresentados conceitos para o entendimento dos tipos de sistemas de energia eólica, mercado mundial, tecnologias e seus processos de captação. Também são apresentados os tipos de aerogeradores e os componentes de um sistema eólico.

No quarto capítulo são apresentados conceitos sobre a estabilidade de tensão, sua classificação, qualidade de energia, controle de tensão e sua hierarquia

No quinto capítulo é mostrado a metodologia utilizada na simulação, abordando valores e requisitos técnicos nacionais para coleta de resultados.

O Capítulo 6 apresenta os principais resultados obtidos a partir das simulações, bem como as principais análises e conclusões a respeito da contribuição do CST nos aerogeradores DFIG e seus efeitos na margem de estabilidade de tensão do sistema de potência.

A conclusão sobre o trabalho como um todo é apresentado no sétimo capítulo, no qual pode-se verificar a conclusão acerca da pesquisa realizada com base na análise dos resultados obtidos durante as simulações, e também são apresentadas sugestões de pesquisas futuras.

Capítulo 2 - DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), criada pela Organização das Nações Unidas (ONU) para discutir e propor meios de harmonizar dois objetivos: o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental, define sustentabilidade como:

Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, garantindo a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.

Nas últimas décadas, a preocupação com as questões ambientais e de sustentabilidade vem ganhando força. A exploração de recursos naturais vem sendo feita de forma indevida e se agravando com o tempo, tornando imprescindível a utilização de ferramentas e inovações, que gerenciem o uso sustentável dos recursos, diminuindo os impactos socioambientais.

Muitos impactos ambientais poderiam ser evitados se fossem adotadas estratégias adequadas para a redução ainda no projeto do produto. É possível novas tecnologias suprirem as necessidades da sociedade sem afetar as gerações futuras, para isso, é necessário que haja um planejamento direcionado para minimização dos impactos ambientais gerados pelos processos de produção e pelos produtos desenvolvidos.

O crescente número de leis e regulamentações, criadas nos últimos anos, faz com que as questões sustentáveis se tornem praticamente obrigatórias. De acordo com Trevisan et al. (2008) a responsabilidade socioambiental deixou de ser uma opção para as organizações, para ser uma questão de visão, estratégia, e muitas vezes, de sobrevivência. Assim, o planejamento socioambiental passa a se relacionar diretamente com o planejamento estratégico.

Na medida em que a conscientização sobre a importância de se manter a sustentabilidade do sistema evolui, medidas corretivas e preventivas são adotadas pelos governantes de diversos países. No entanto, embora muitas organizações tenham incluído a busca pela sustentabilidade em suas missões e visões, ainda são raras as empresas reconhecidas como exemplo a ser seguido nesse campo.

O aquecimento global vem mostrando dia-a-dia que o desenvolvimento de sistemas produtivos sustentáveis é fundamental para a sobrevivência da humanidade. No âmbito da produção energética mundial, o setor energético passa a ser muito visado tanto pelos efeitos

negativos ao meio ambiente e às populações, causado por projetos de grande porte, quanto pelo desperdício e pela ineficiência de sua produção e de uso, intrínseca ao setor.

A matriz energética de um país tem um papel significativo no desenvolvimento econômico e tecnológico, por ser a base de todo o setor produtivo. Além disso, está bastante relacionada à qualidade de vida da sociedade, principalmente após a Revolução Industrial. É válido também ressaltar que os crescimentos populacionais e econômicos implicam em maior consumo de energia. Este, por sua vez, implica em maior necessidade de geração de energia e investimento científico-tecnológico na matriz, podendo ser um limitador para o crescimento do país.

É consenso que os padrões atuais de produção e consumo de energia precisam ser trocados por outros que estimulem o uso mais eficiente de energia, fontes renováveis, recursos energéticos de baixo custo e de baixo impacto ambiental (MENKES, 2004).

De acordo com Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO), a Engenharia da Sustentabilidade é uma das áreas da engenharia de produção definida como uma área que contribui na elaboração de um modelo eficaz de planejamento estratégico com conceitos da sustentabilidade.

2.1 Engenharia da Sustentabilidade

Segundo a ABEPRO (2020) a Engenharia de Produção é formada por dez áreas, dentre elas está a Engenharia da Sustentabilidade, cujo objetivo é o planejamento da utilização eficiente dos recursos naturais nos sistemas produtivos diversos, a destinação e o tratamento dos resíduos e efluentes destes sistemas, bem como a implantação de sistema de gestão ambiental e responsabilidade social.

A sustentabilidade vai além de apenas uma preocupação com o meio ambiente. Segundo Campos (2010), para ser sustentável deve-se ser ambientalmente correto, economicamente viável, socialmente justo e culturalmente aceito. Ao englobar tais vertentes, as empresas compõem novos objetivos, visando evitar prejuízos ao cumprir as leis e normas, aumentando a qualidade dos processos e produtos ou serviços, diminuindo custos, com a redução do consumo de energia e insumos, diminuição de resíduos e com o reaproveitamento destes (SCHMIDHEINY, 1992). Passa a ser fundamental que a gestão ambiental seja parte integrante da gestão global da organização (PAIVA, 2013)

A Engenharia da Sustentabilidade vai ao encontro das necessidades que as indústrias e empresas necessitam, sendo formada por sete subáreas, que são:

1. Gestão Ambiental;
2. Sistemas de Gestão Ambiental e Certificação;
3. Gestão de Recursos Naturais e Energéticos;
4. Gestão de Efluentes e Resíduos Industriais;
5. Produção mais Limpa e Ecoeficiência;
6. Responsabilidade Social;
7. Desenvolvimento Sustentável.

Os estudos deste trabalho de conclusão de curso estão alinhados à subárea nomeada Produção mais Limpa e Ecoeficiência, com foco na eficiência energética de sistemas eólicos e seus procedimentos de rede.

2.2 Produção mais Limpa e Ecoeficiência

Com a escassez dos recursos naturais, as empresas tiveram que reformular a sua postura diante da poluição gerada por elas, sendo assim novas alternativas foram criadas para uma produção mais limpa que polua menos, sem afetar seu desenvolvimento.

Segundo a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (ONU-INDUSTRIAL) uma produção mais limpa é a aplicação contínua de uma estratégia econômica, ambiental e tecnológica integrada aos processos e produtos, a fim de aumentar a eficiência no uso de matérias-primas, água e energia, através da não geração, minimização ou reciclagem de resíduos gerados, com benefícios ambientais e econômicos para os processos produtivos.

O traço específico da ecoeficiência em relação à produção mais limpa é buscar cada vez mais o aproveitamento sustentável dos recursos e a redução da poluição, destacando a criação de valor agregado tanto para os negócios, como para a sociedade em geral, mantendo os padrões de competitividade (DIAS, 2007).

Produzir de forma ecoeficiente significa criar produtos e executar atividades com qualidade, no menor período de tempo e com os menores impactos ambientais como consequência. Dessa forma, a empresa ecoeficiente é aquela que utiliza menos insumos naturais, reduz o consumo de energia e minimiza impactos no meio ambiente sem perder o foco no negócio, buscando o crescimento e a rentabilidade permanentes.

Empresas que alcancem de forma contínua maiores níveis de eficiência, evitando a contaminação mediante a produtos mais limpos, a busca do uso mais eficiente e a recuperação dos recursos de uma boa gestão, se beneficiam de forma abrangente, agregando valor ao seu meio de produção.

Seja qual for o processo ou produto, da concepção ao destino final, seu fluxo de produção pode ser analisado do ponto de vista da ecoeficiência. Assim, as atividades produtivas poderão prever hoje novas alternativas para sua sustentabilidade ambiental e econômica, buscando permanentemente formas de sobrevivência em um mundo onde as pressões desses dois setores tendem a crescer de forma irreversível (WBCSD, 2000).

2.3 Eficiência Energética

Segundo US National Policy Development Group (2001), eficiência energética é a capacidade de utilizar menos energia para produzir a mesma quantidade de iluminação, aquecimento, transporte e outros serviços baseados na energia. Ela ajuda a preservar o meio ambiente e proporciona às gerações futuras a capacidade de satisfazer as suas próprias necessidades, haja vista que a mesma integra grande parte dos indicadores de sustentabilidade.

A eficiência energética veio se tornando cada vez mais um ponto recorrente nas discussões sobre a demanda de energia em nível global e possui hoje um papel preponderante nas políticas mundiais de energia e de meio ambiente, em especial naquelas relacionadas às mudanças climáticas. Para ser sustentável, o desenvolvimento deve implementar eficiência econômica, proteger e restaurar os sistemas ecológicos e melhorar a qualidade de vida das populações (KATS, 1998).

Em face da crescente relevância de temas relacionados com a sustentabilidade e com o intuito de diversificar a matriz energética do Brasil, novas fontes de energia vem sendo pesquisadas. Perdura-se, para as próximas décadas, o desafio brasileiro de atender a uma elevada procura energética, devido ao desenvolvimento socioeconômico de sua população, e, com isso, arcar com a maior demanda por alto grau de segurança e sustentabilidade energética.

No contexto de energias renováveis e produção energética industrial, a energia eólica vem se aprimorando tecnologicamente e ganhado bastante destaque em seu meio de produção. No Brasil, o potencial da energia eólica é mais intenso de junho a dezembro, coincidindo com

os meses de menor intensidade de chuvas. Isso coloca o vento como uma potencial fonte complementar de energia gerada por hidrelétricas, maior recurso de produção energética nacional.

2.4 Conclusão

Neste capítulo foram abordados aspectos relacionados desenvolvimento sustentável e engenharia da sustentabilidade, ressaltando a subárea chamada produção mais limpa e ecoeficiência juntamente com a contextualização de eficiência energética no âmbito nacional. Com base nos conceitos apresentados neste capítulo e na viabilidade da implementação da energia eólica na matriz energética brasileira, mais detalhes sobre a energia renovável e suas características são apresentados no capítulo 3.

Capítulo 3 - ENERGIA EÓLICA

Este capítulo aborda sobre alguns conceitos relevantes acerca da pesquisa, bem como sobre a origem do vento e sua medição. Investiga-se sobre o mercado mundial de energia eólica, tipos de sistemas eólicos e suas tecnologias, estudos consolidados de estabilidade tensão e de sua forma de controle.

3.1 O Sol

As mais diversas formas de energia são diretamente ou indiretamente originadas pela influência da luz solar em processos físicos, químicos e biológicos, com poucas exceções. O Sol desempenha um papel dominante para diferentes atividades naturais no Universo em geral e sobre a Terra, em particular, para a formação de combustíveis fósseis e das fontes de energia renováveis. Através de reações nucleares, que acontecem em seu interior, o Sol fornece energia para a existência de toda forma de vida no planeta Terra.

O Sol é uma esfera de matéria gasosa extremamente quente, com um diâmetro de $1,392 \times 10^9$ m, e está localizado em média a $1,5 \times 10^{11}$ m da terra. O Sol gira sobre seu próprio eixo uma vez a cada quatro semanas. No entanto, ele não gira como um corpo sólido, o equador leva cerca de 27 dias, e as regiões polares levam por volta de 30 dias para cada rotação (DUFFIE, 1991).

É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita a alimentação dos rios e o seu represamento para a produção de eletricidade (hidroeletricidade) ou para o consumo. É responsável pelo surgimento dos ventos, que acontecem devido ao aquecimento diferenciado da atmosfera.

Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento da radiação solar. As reações químicas às quais a matéria orgânica foi submetida, a altas temperaturas e pressões, por longos períodos de tempo, também utilizaram o Sol como fonte de energia.

3.2 A Origem do Vento

O vento tem sua origem na associação entre a energia solar e a rotação planetária. Todos os planetas envoltos por gases em nosso sistema solar demonstram a existência de distintas formas de circulação atmosférica e apresentam ventos em suas superfícies. Trata-se de um mecanismo solar-planetário permanente, cuja duração é mensurável na escala de bilhões de anos, por esta razão, o vento é considerado fonte renovável de energia.

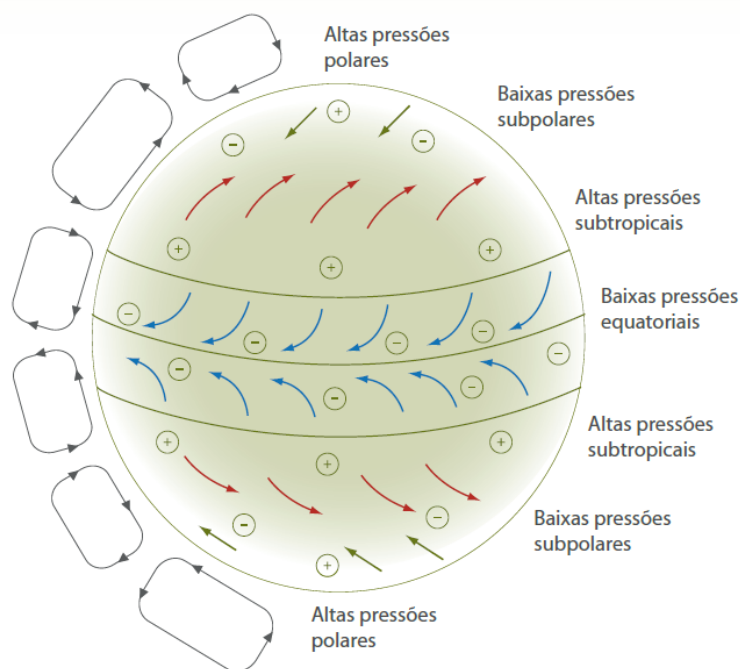
No planeta Terra a radiação solar induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Os ventos acontecem devido ao aquecimento diferenciado da atmosfera. A não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Conseqüentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos. Esse mecanismo é apresentado na Figura 1.

A diferença de temperatura entre a camada próxima da superfície da terra aquecida pelos raios solares e as camadas superiores da nossa atmosfera gera correntes convectivas. A energia da radiação solar, sendo responsável pelo movimento convectivo do ar, direciona as correntes da nossa atmosfera, que sobem no equador e descem nos polos, condensando vapores, precipitando energia sob a forma de chuva.

As correntes ascendentes do equador são mais intensas do que as das outras zonas da terra, por isso produzem ventos de 30 a 50 km horários, e a rotação da terra interfere na direção dos ventos, entre os polos e o equador, provocando uma resultante inclinada em relação à perpendicular pelo equador (RODRIGUES, 2011).

Figura 1 - Distribuição dos Ventos



Fonte: Cresesb (2011).

3.3 Medição do Vento

A medição da velocidade do vento é o ponto mais crítico para a avaliação do recurso de vento. Os instrumentos usados para medir velocidades de fluidos, sejam gasosos ou líquidos, são os anemômetros, cujas medidas são efetuadas a partir de algum efeito físico originado a partir do movimento do fluido, como a pressão, energia cinética ou propriedades termodinâmicas.

Os anemômetros de uso generalizado para medir velocidade de vento baseiam-se no princípio de transferência de quantidade de movimento, conhecidos como anemômetros mecânicos. Geralmente, estes instrumentos são confeccionados de materiais resistentes e por isso podem ser usados e colocados em locais abertos, porém a grande maioria, caracteriza-se pela elevada inércia inicial ou elevada zona morta, normalmente superior a $0,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, devido a sua própria constituição (KIMURA et al., 2001).

Conforme a velocidade do vento e os motivos para sua medição, deve-se utilizar anemômetros com características de construção e operação diferentes. O de uso generalizado é o anemômetro de copos, que totaliza o vento que passa em um determinado local num intervalo

de tempo considerado. Este instrumento fornece a velocidade do vento unidirecional, sendo a velocidade representada por uma equação linear (PEARCY et al., 1989).

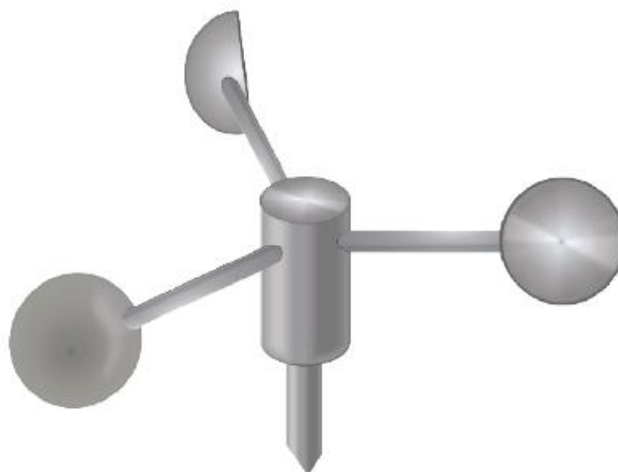
As medições de velocidade de vento são de suma importância ao se considerarem os aspectos econômicos de projetos de turbinas eólicas. Tão importante quanto a calibração, é a seleção dos equipamentos. Anemômetros de má qualidade causam altas incertezas nas medições da velocidade do vento, mesmo que sejam individualmente calibrados em um túnel de vento.

Um erro de 3% nas medições leva a erros de 10% na produção de energia. O período mínimo de medições da velocidade de vento é de um ano, tornando possível uma coleta de dados mais limpa e abrangente, diminuindo significativamente o risco financeiro de um parque eólico (RODRIGUES, 2011).

3.3.1 Anemômetro Analógico de Torre

O anemômetro analógico de torre mostrado na Figura 2, também classificado como anemômetro de copos, possui três ou quatro braços, cujas extremidades são formadas por duas metades ocas de esferas que o vento faz rodar. O movimento de rotação aciona uma vareta central, que está ligada a um registrador usado para marcar a velocidade do vento. Tão importante quanto a calibração, é a seleção dos anemômetros.

Figura 2 - Anemômetro Analógico de Torre



3.3.2 Sensor de Direção

O sensor de direção mostrado na Figura 3 é um instrumento utilizado para medir a direção do vento. A direção dos ventos é importante para o cálculo da energia gerada por determinada usina eólica, e também para a otimização da escolha dos locais e da direção que ficarão alinhados os aerogeradores.

Figura 3 - Sensor de Direção



Fonte: Rodrigues (2011)

3.4 Tipos de Aplicações dos Sistemas Eólicos

Um sistema eólico pode ser utilizado em quatro aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos, sistemas interligados à rede e sistemas offshore. Os sistemas obedecem a uma configuração básica e necessitam de uma unidade de controle de potência, em determinados casos, de uma unidade de armazenamento.

3.4.1 Sistemas Isolados

Os sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia, que pode ser feito por meio de baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos, ou na forma de energia gravitacional, com a finalidade de armazenar a água bombeada em

reservatórios para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação em que toda a água bombeada é diretamente consumida.

Os sistemas que armazenam energia em baterias necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria. O controlador de carga tem como principal objetivo evitar danos à bateria por sobrecarga ou descarga profunda.

Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessária a utilização de um inversor. Esse dispositivo geralmente incorpora um seguidor do ponto de máxima potência, necessário para otimização da potência produzida. Esse sistema é usado quando se deseja utilizar eletrodomésticos convencionais.

3.4.2 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são aqueles que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio a grande porte, destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso.

3.4.3 Sistemas Interligados a Rede

Os sistemas interligados à rede utilizam um grande número de aerogeradores e não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. O total de potência instalada no mundo de sistemas eólicos interligados à rede soma aproximadamente 60 GW só no ano de 2019 (REN21, 2020).

3.4.4 Sistemas offshore

Sistemas offshore obtêm aproveitando da força do vento que sopra em alto-mar, alcançando uma velocidade maior e mais constante, devido à inexistência de barreiras. As instalações offshore representam as novas fronteiras da utilização da energia eólica. Embora representem instalações de maior custo de transporte, instalação e manutenção, as instalações offshore têm crescido a cada ano, principalmente com o esgotamento de áreas de grande potencial eólico em terra (sistema onshore).

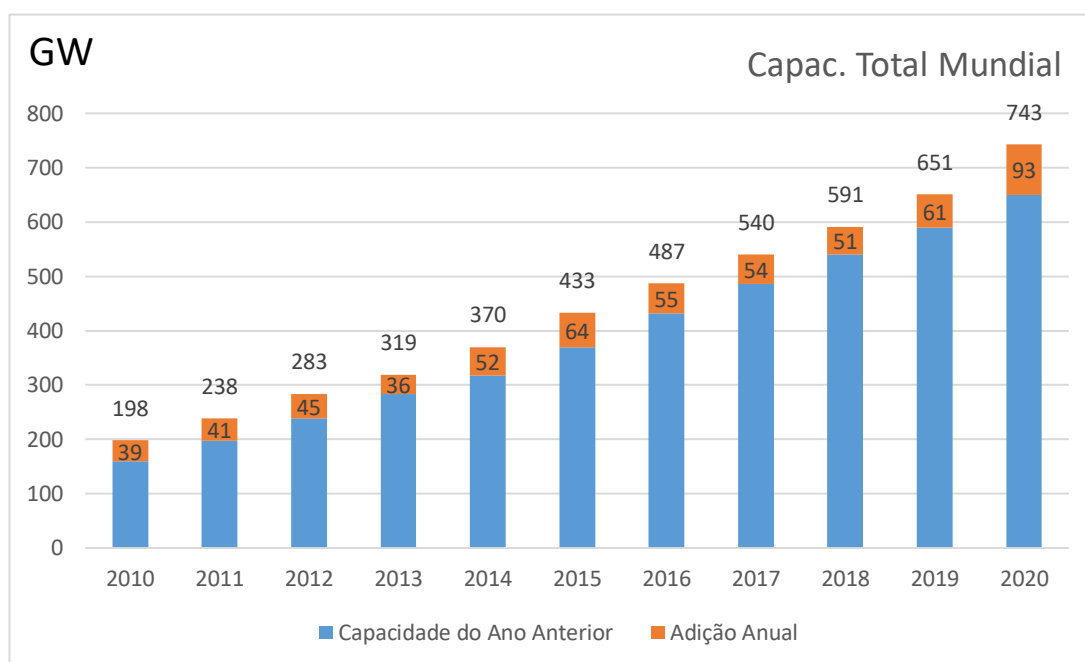
A indústria eólica tem investido no desenvolvimento tecnológico da adaptação das turbinas eólicas convencionais para uso no mar. Além do desenvolvimento tecnológico, os projetos offshore necessitam de estratégias especiais quanto ao tipo de transporte das máquinas, sua instalação e operação. Todo o projeto deve ser coordenado de forma a utilizar os períodos em que as condições marítimas propiciem um deslocamento e uma instalação com segurança.

3.5 Mercado de Energia Eólica

O mercado global de energia eólica se expandiu com cerca de 93 GW de nova capacidade adicionada em redes elétricas mundiais (incluindo mais de 86 GW onshore e mais de 6 GW offshore). 2020 foi o melhor ano da história para a indústria eólica global, mostrando no ano o crescimento de aproximadamente 53% em relação às instalações de 2019 e instalando mais de 93 GW de energia eólica em um ano desafiador, com interrupções para a cadeia de abastecimento global, marco importante devido a sequência de três anos de declínio após o último pico de novas instalações em 2015 (63,8 GW) (REN21, 2021). O gráfico de crescimento da capacidade total mundial pode ser observado na Figura 4.

A energia eólica offshore desempenha um papel cada vez mais importante no mercado global, tendo seu segundo melhor ano em 2020 em novas capacidades instaladas. Globalmente a energia eólica atingiu a marca aproximada de 743 GW (707,4 GW em terra e o restante no mar), cerca 86,9 GW de capacidade eólica onshore foram adicionados globalmente no ano de 2020, um crescimento de 14% em comparação com o ano anterior, representando 59% de crescimento anual.

Figura 4 - Capacidade Global de Energia Eólica e Aumento Anual nos Últimos 10 anos



Fonte: REN21 (2021)

Por vários meses de 2020, restrições relacionadas à pandemia interromperam as cadeias de abastecimento, grande parte da força de trabalho de energia eólica ficou indisponível, resultando em investimentos e leilões adiados ou cancelados, atrasos forçados ou cancelamentos para a construção do projeto em muitos países, especialmente no setor onshore.

O excelente aumento em 2020 foi impulsionado principalmente pelo crescimento explosivo em dois dos maiores mercados de energia eólica do mundo, a China e o Estados Unidos (EUA). Os cinco principais mercados do mundo em 2020 para novas instalações foram China, EUA, Brasil, Holanda e Alemanha, estes cinco mercados combinados constituíram 80,6% de instalações globais no ano passado, mais de 10% em relação ao ano de 2019. Em termos de instalações cumulativas, os cinco principais mercados foram respectivamente China, EUA, Alemanha, Índia e Espanha, que juntos foram responsáveis por 73% da energia eólica total do mundo em instalações. (GWEC, 2021).

A energia elétrica gerada a partir do vento vem apresentando um crescimento em larga escala, principalmente em alguns países que têm apostado nessa fonte primária como sendo uma alternativa importante para o aumento acelerado da demanda de energia elétrica. Alguns países se destacam como pioneiros no desenvolvimento de tecnologias empregadas em sistemas elétricos com inserção de parques eólicos, bem como na utilização desse tipo de geração distribuída, como China, Estados Unidos, Alemanha, Índia e Espanha (REN21, 2021).

A China lidera o mercado global de desenvolvimento de energia eólica, cuja participação no mercado global sofreu um aumento de 8,5% em relação ao ano de 2019. Os Estados Unidos impulsionaram suas instalações atingindo a marca de 18,4% na América do Norte, tomando o lugar da Europa com 15,9% como o segundo maior mercado regional em novas instalações. A América Latina permanece como quarto maior mercado regional com 5,0% em 2020, seguido pela África e o Oriente Médio com 0,9%.

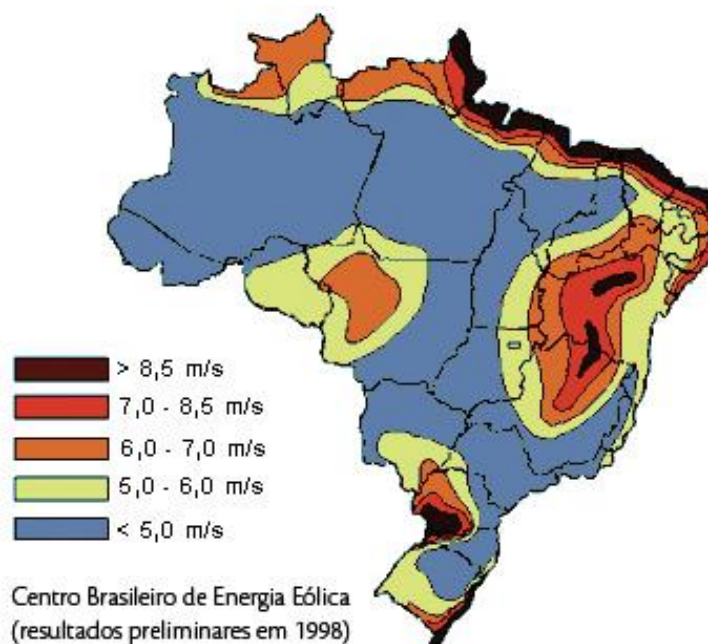
Um novo registro de instalação é esperado na América Latina em 2021, mas a região ainda tem uma imagem mista e complexa em termos governamentais de suporte, estabilidade econômica e capacidade da rede em nível nacional, e por esse motivo, o crescimento anual nesta região provavelmente recuará a partir de 2022. Brasil, Chile, México, Argentina e Colômbia devem ser os cinco principais contribuintes para o crescimento nos próximos cinco anos na região (GWEC, 2021).

3.5.1 Brasil

O potencial eólico brasileiro para aproveitamento tem sido objeto de estudos e inventários desde os anos de 1970 e seu histórico revela o lento, mas progressivo potencial energético natural de relevante magnitude existente no país. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) através do Decreto nº 5025 de 2004 incentiva a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólicas, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Interligado Nacional (SIN). O objetivo é diversificar a matriz energética brasileira contribuindo para a segurança e operacionalidade do sistema elétrico com a devida valorização das características e potencialidades das regiões do Brasil.

No Brasil, algumas medidas precisas de vento indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado, o levantamento eólico do Brasil é mostrado na Figura 5. A taxa de geração de energia de uma turbina de um megawatt é aproximadamente 27% da capacidade plena, na média de diversas usinas no mundo, por ano. No Brasil, há locais em que essa taxa chega a 45% ou 50%. Pode-se dizer que os melhores locais estão no Ceará e no Rio Grande do Norte, com duas vezes mais capacidade de geração que a Alemanha (RODRIGUES, 2011).

Figura 5 - Levantamento Eólico do Brasil



Fonte: Amarante (2001)

Uma grande atenção tem sido dirigida para o Estado do Ceará, pelo fato de ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico por meio de medidas de vento com modernos anemógrafos computadorizados. Entretanto, não foi apenas na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. Em Minas Gerais, uma central eólica está em funcionamento, desde 1994, em um local (afastado mais de 1000 km da costa) com excelentes condições de vento, como pode ser observado nas manchas coloridas da Figura 5, onde a cor mais avermelhada indica maior potencial eólico.

O Brasil tem um potencial real de geração de energia eólica, desconsiderando as áreas urbanas e de proteção ambiental. O mercado Brasileiro se expandiu nos últimos anos, no final de 2019 com quase 15,5 GW de capacidade em operação, permaneceu com mais da metade da capacidade operacional total na América Latina e Caribe. No ano de 2020 o Brasil adicionou 2,3 GW, três vezes o número de novas instalações no país comparado a 2019, totalizando 17,7 GW, classificando o país como o terceiro que mais contribuiu para novas instalações no ano. (REN21, 2021).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ao longo de 2021, novas unidades de geração foram liberadas para operação comercial em 12 estados das cinco regiões brasileiras. Três estados concentram 64,8% da capacidade instalada no país este ano: o Piauí, com 190,35 MW, o Rio Grande do Norte, com 221,06 MW, e a Bahia, com 241,55 MW. No

primeiro quadrimestre de 2021, houve um acréscimo de 44,26 MW de potência instalada no sistema isolado.

3.6 Sistemas Eólicos

A geração de energia elétrica a partir do vento ganhou bastante importância nos últimos anos, e isto se deve principalmente ao desenvolvimento de novas tecnologias, abundância do seu recurso natural, preservação ambiental, diversificação das fontes de energias na matriz energética, e preocupação dos agentes governamentais em relação a alterações climáticas.

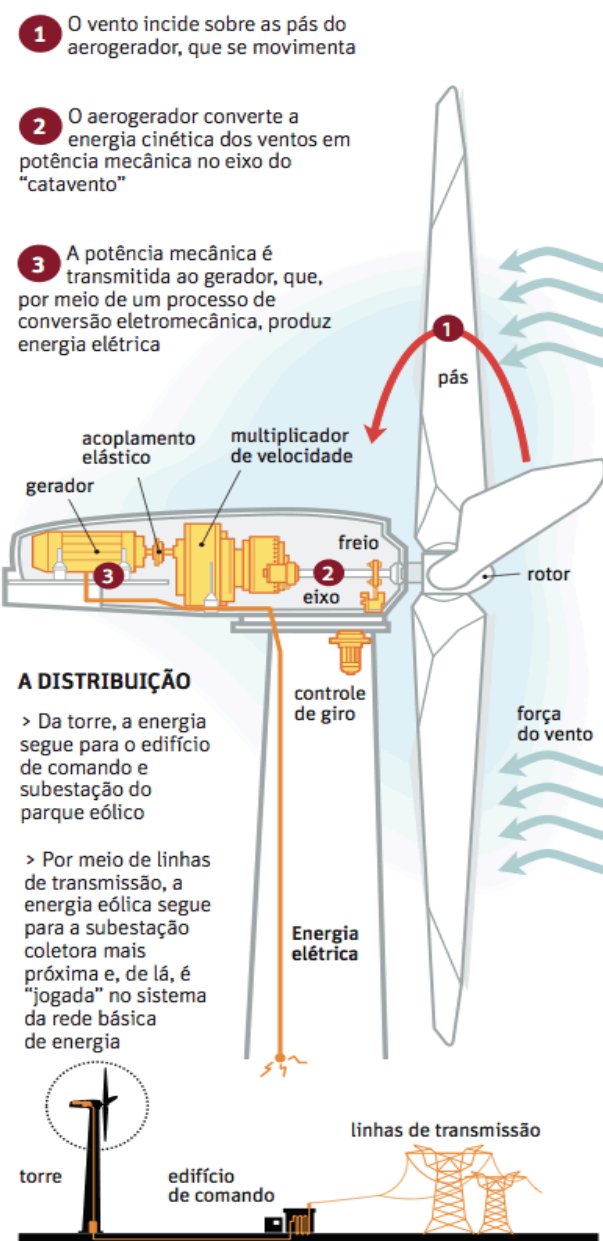
A cada ano muitos consumidores adquirem acesso à energia elétrica pelo mundo todo e o aumento da demanda de energia torna o sistema de potência cada vez mais solicitado, necessitando de reforços e construção de novas linhas de transmissão. A integração de parques eólicos às redes elétricas convencionais tem se tornado uma prática cada vez mais utilizada por grandes centros consumidores para atender sua demanda. O funcionamento de um aerogerador pode ser observado conforme a Figura 6.

A potência instalada dos parques eólicos tem aumentado muito, o que requer atualização de planejamento energético e dos procedimentos de rede. Uma das exigências é que os sistemas eólicos forneçam serviços de suporte à operação das redes elétricas convencionais, como controle de tensão terminal e proteção contra afundamentos de tensão.

Para o sistema de potência oferecer operação segura e aceitável, tornou-se imprescindível o fornecimento de serviços ancilares por parte dos grandes parques eólicos. Capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão (*fault ride-through*) e controle de tensão terminal são alguns dos serviços ancilares exigidos, pelos operadores de todo mundo, aos grandes parques eólicos conectados ao sistema de transmissão e subtransmissão (LONDERO, 2014).

Os primeiros aerogeradores de grande porte conectados aos sistemas de potência operavam a velocidade constante, os quais são desprovidos de controle de potências ativa e reativa. Esse tipo de aerogerador ganhou popularidade na indústria pela construção robusta e barata, porém devido às novas tendências dos códigos de rede, que exigem rápida recuperação da tensão terminal e fornecimento de potência reativa durante a ocorrência de faltas (em grande parte dos países europeus), fez com que os aerogeradores a velocidade constante perdessem mercado para os esquemas a velocidade variável.

Figura 6 - Funcionamento de um Aerogerador



Fonte: Rodrigues (2011)

O gerador de indução duplamente alimentado DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) e o gerador síncrono com imã permanente ou eletricamente excitado com conversor de capacidade nominal FRC (*Full Rated Converter*) representam essa transição de tecnologia, onde ambos são controlados por conversores de eletrônica de potência.

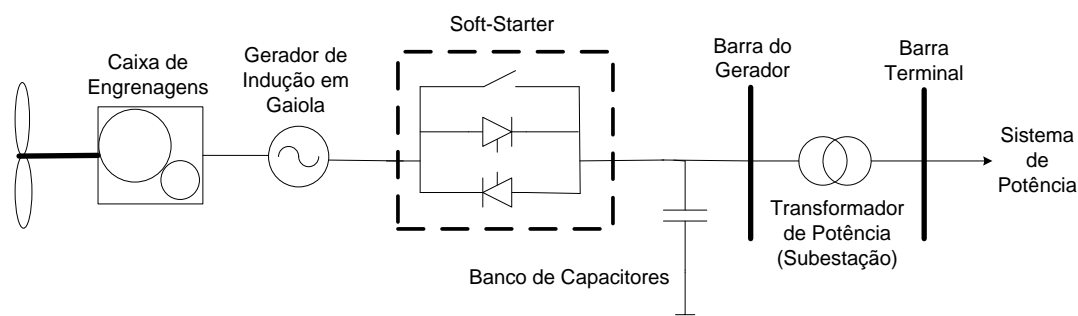
Graças aos conversores, os aerogeradores a velocidade variável são capazes de fornecer potência reativa e alcançar as metas exigidas pelo código de rede. Atualmente, a tecnologia de aerogeradores a velocidade variável domina o mercado eólico de fabricantes.

3.6.1 Sistemas Eólicos a Velocidade Constante

Cronologicamente, os sistemas eólicos a velocidade constante foram os primeiros sistemas de grande porte instalados pelo mundo, dominando o mercado eólico nos anos 80 com a chamada concepção dinamarquesa. Eram compostos tipicamente por geradores de indução do tipo gaiola de esquilo SCIG (*Squirrel Cage Induction Generator*), os quais são desprovidos de controle de potências ativa e reativa.

Nos sistemas eólicos a velocidade constante, a frequência do gerador é fixada pela frequência da rede elétrica. O rotor não pode girar a uma velocidade maior do que a velocidade síncrona, embora haja uma pequena variação de 1 a 2% devido ao escorregamento do gerador, relativo à potência gerada. A Figura 7 apresenta o esquema de ligação do gerador de indução em gaiola com a rede elétrica.

Figura 7 - Gerador de indução em gaiola conectado diretamente a rede elétrica



Fonte: Nunes (2003)

Mudanças na velocidade do vento não afetam a velocidade do rotor, mas causam flutuações no torque eletromagnético, podendo comprometer a qualidade da energia gerada, especialmente para redes elétricas fracas (NUNES, 2003). À medida que aumenta a capacidade do parque eólico, aumenta também o nível de curto-circuito no ponto de conexão com a rede elétrica de tal forma que o parque eólico não pareça mais desprezível frente ao sistema de potência.

3.6.2 Sistemas Eólicos a Velocidade Variável

Nos sistemas eólicos a velocidade variável, a frequência da rede é desacoplada da frequência do rotor a partir da utilização de conversores estáticos de eletrônica de potência. Tais conversores possibilitam a operação em velocidade variável do rotor da turbina eólica. Em função deste desacoplamento, surge a designação de aerogeradores a velocidade variável. Os principais aerogeradores dessa categoria são: o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) e o gerador síncrono com conversor de capacidade nominal (FRC).

Com o aumento da demanda, os grandes parques eólicos são exigidos a fornecer potência reativa para o sistema de potência quer seja em situações de contingências, como também para aliviar o congestionamento do sistema de transmissão nos momentos de ponta de carga, oferecendo flexibilidade operacional ao sistema de potência. Em todos os casos, o fornecimento de potência reativa visa o aumento da margem de estabilidade de tensão, em momentos que o sistema de potência encontra-se altamente carregado.

A capacidade de variar a velocidade do rotor aumenta a flexibilidade de operação da turbina fazendo com que a velocidade específica de ponta de pá seja constante, normalmente projetada para alcançar a máxima eficiência da turbina. Para velocidades excessivas, a turbina é descarregada gradualmente pelo controle do ângulo de passo, fazendo com que a estrutura não seja submetida a cargas mecânicas elevadas.

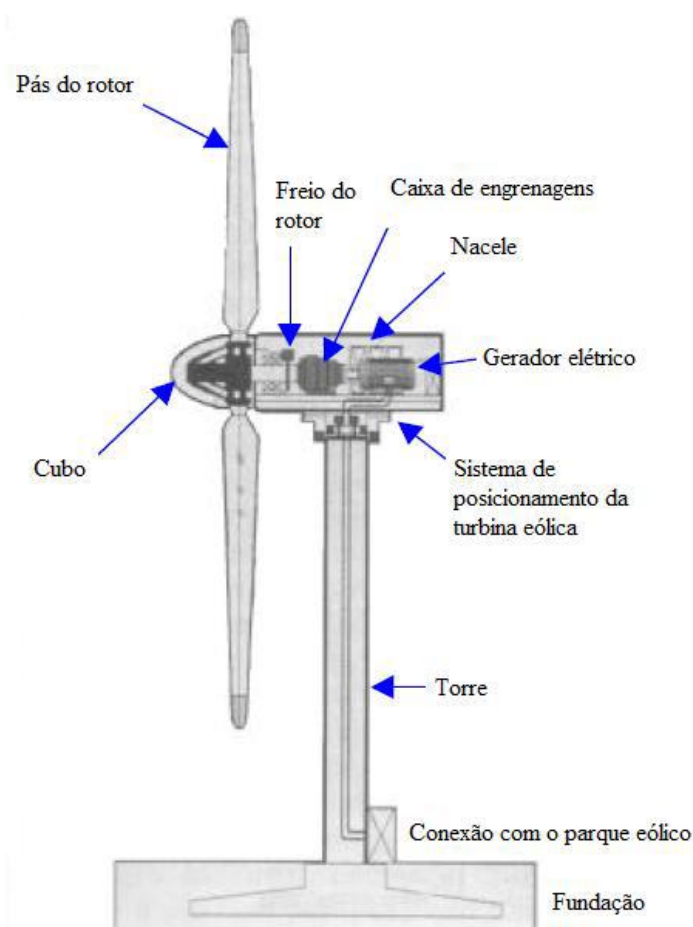
Segundo Jenkins et al. (2000) embora os esquemas a velocidade variável possam representar uma excelente possibilidade de melhorar o comportamento dinâmico do sistema de potência, ainda existem grandes desafios a serem superados pela integração desta tecnologia as redes elétricas, no que diz respeito aos diversos problemas operacionais que podem ocorrer, especialmente sob um nível de penetração elevado. Dentre os problemas, pode-se destacar o fenômeno de instabilidade de tensão, considerado há algum tempo uma preocupação constante na operação dos sistemas de potência modernos (TRICHAKIS et al., 2008).

3.7 Componentes de um Sistema Eólico

As turbinas eólicas, também denominadas de aerogeradores, são responsáveis em captar a energia cinética dos ventos, e em seguida é transformada em energia elétrica através de um gerador. Embora o princípio básico de funcionamento seja simples, uma turbina eólica é um sistema complexo em que é necessário o conhecimento de vários campos.

Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia, de forma a propiciar um maior rendimento final. Costumam ser classificados pela posição do eixo do seu rotor, que pode ser vertical ou horizontal. A grande maioria dos sistemas eólicos atuais é de eixo horizontal com a turbina eólica posicionada a montante do escoamento do vento conforme a Figura 8. Para estudos de estabilidade, os seguintes componentes devem ser considerados:

Figura 8 - Estrutura de um Aerogerador de Eixo Horizontal



Fonte: Pinto (2013)

- Turbina eólica: responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação;
- Multiplicador de velocidade (Caixa de engrenagens): responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo da turbina (baixa rotação) para o eixo do gerador (alta rotação). Geradores síncronos multipolos não utilizam este componente, e neste caso o eixo da turbina é acoplado diretamente ao eixo do gerador, como é o caso do FRC. São conhecidos como sistemas de acoplamento direto (Direct Drive);
- Gerador elétrico: os geradores mais usados para aplicações em sistemas eólicos são as máquinas de indução com rotor em gaiola (para velocidade constante), máquina de indução com rotor bobinado, máquina síncrona eletricamente excitada e máquina síncrona a imã permanente (todas usadas para velocidade variável);
- Sistema de controle: destina-se ao controle e monitoramento do aerogerador para maximização da potência extraída dos ventos e proteção de toda a estrutura.

Comumente a configuração descrita na Figura 8 é a mais usada pelos fabricantes de aerogeradores no mundo (PINTO, 2013). O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

O projeto e a otimização das pás de uma turbina eólica exigem profundo conhecimento da aerodinâmica; a torre exige conhecimento de engenharia mecânica, e os sistemas de controle e proteção exigem conhecimento de engenharia elétrica e de sistemas de controle.

Segundo Rodrigues (2011) a velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 RPM, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (*tip speed*). Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham a rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1200 a 1800 RPM), tornando necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos.

3.8 Gerador de Indução Duplamente Alimentado

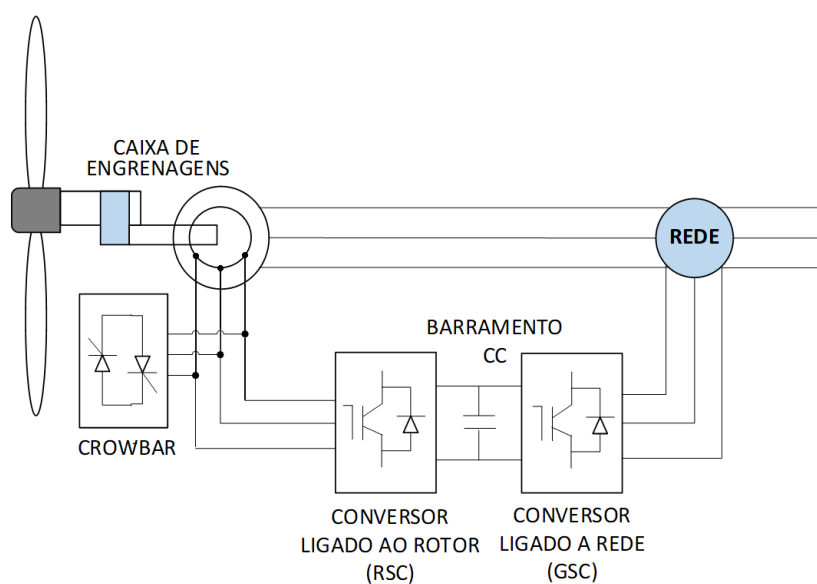
O gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) é uma das tecnologias de aerogeradores mais utilizadas em grandes parques eólicos pelo mundo todo. Possui um rotor bobinado, que através do conversor ligado ao rotor (RSC) pode controlar as potências ativa e

reativa que circulam pelo estator da máquina. Além do RSC, esse tipo de aerogerador também possui outro conversor ligado ao estator da máquina, que juntos proporcionam a operação em velocidade variável desacoplando a frequência do gerador da frequência da rede elétrica.

Inicialmente, o DFIG era controlado com fator de potência constante, normalmente unitário, para fornecer maior quantidade de potência ativa para os consumidores, pois a venda de energia era exclusivamente sobre a potência ativa. Com o crescimento da penetração de aerogeradores nos sistemas de potência por todo o mundo, o DFIG passou a ser responsável por fornecer também potência reativa, obrigatoriamente, em condições de falta (ULLAH et al., 2007).

Neste tipo de tecnologia é usado um conversor na configuração CA-CC-CA entre o rotor e a rede elétrica, que é constituído por chaves IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) que possibilitam a troca bidirecional da potência ativa entre o rotor e a rede elétrica, como mostra a Figura 9. Assim, quando a velocidade angular do aerogerador está acima da velocidade síncrona, chamada de operação sobre-síncrona, tanto o rotor quanto o estator fornecem potência ativa à rede. Enquanto que durante a operação sub-síncrona, o rotor consome potência ativa, sendo que o estator sempre fornece potência ativa. Isso se deve aos conversores estáticos que permitem o fluxo de potência ativa entrando ou saindo do rotor.

Figura 9 - Configuração Básica do DFIG

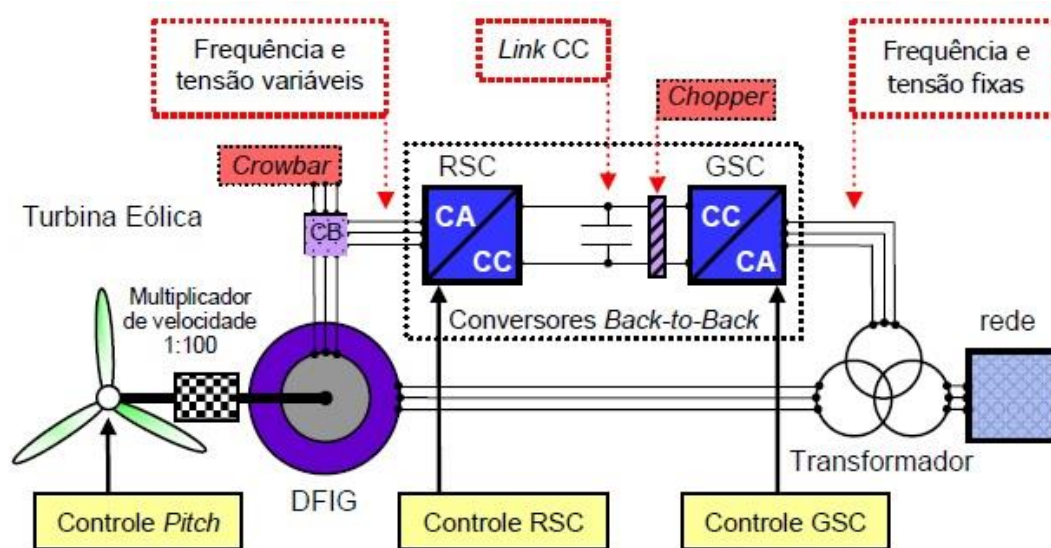


Fonte: Matos (2019)

Como esse tipo de aerogerador está interligado diretamente à rede elétrica por meio do estator, quando o sistema elétrico é acometido por faltas, o DFIG opera com limitação, já que essas faltas podem provocar afundamentos de tensão nos terminais do ponto de conexão das turbinas eólicas. Esses afundamentos de tensão provocam um aumento da corrente nas bobinas do estator da máquina, que por sua vez podem fluir para o circuito do rotor e dos conversores estáticos devido ao acoplamento magnético existente entre os circuitos do estator e do rotor, podendo causar vários prejuízos materiais e operacionais (MORREN, 2005).

O controle de potência ativa e reativa do DFIG é realizado particularmente pelos seus conversores estáticos, os quais possuem papel importante em estudos de estabilidade de tensão de longo-prazo. A Figura 10 mostra o esquema do controle geral do aerogerador DFIG, bem como o link CC e a proteção do tipo crow-bar. O RSC tem como função injetar correntes no rotor da máquina controlando-a de modo a seguir uma estratégia definida. Já o GSC possui o objetivo de controlar a tensão contínua do link CC.

Figura 10 - Esquema de Controle do DFIG



Fonte: Rangel (2005)

O DFIG pode fornecer potência reativa pelo estator e pelo conversor GSC. Porém, frequentemente o GSC opera com fator de potência unitário, não fornecendo potência reativa para o sistema de potência, controlando somente a tensão do link CC. Caso esse conversor opere com fator de potência diferente do unitário, a capacidade de potência reativa será aumentada oferecendo maior suporte para o controle de tensão (ENGELHARDT, 2011).

A principal contribuição dos conversores do DFIG é proporcionar operação em velocidade variável, desacoplando a frequência do sistema da rotação do gerador. O objetivo do conversor ligado ao rotor é controlar a potência ativa do estator e a tensão terminal/fator de potência da máquina. Já o principal objetivo do controle do GSC é manter a tensão do link CC constante, independentemente da direção e magnitude do fluxo de potência que o atravessa. Opcionalmente, o conversor pode fornecer potência reativa para controlar a tensão terminal caso esta fique abaixo de um desejado limiar. É mostrado que o suporte de potência reativa pelo conversor pode evitar a instabilidade e melhorar o perfil de tensão nas barras, especialmente quando o controle atua precocemente.

3.9 Conclusão

Este capítulo abordou os principais aspectos sobre sistemas eólicos como a origem do recurso natural, tecnologias de captação, dados sobre o mercado global de aerogeradores e tipos de sistemas eólicos, dando destaque para o gerador de indução duplamente alimentado e seu funcionamento, pois o entendimento de suas características são necessários para a compreensão dos resultados alcançados neste trabalho através de simulações no domínio do tempo.

Entendendo a contextualização dos sistemas eólicos no desenvolvimento sustentável ao redor do mundo, bem como o funcionamento dos diferentes tipos de aerogeradores e as suas necessidades para obter uma melhor eficiência energética, torna-se necessário explorar o conceito da estabilidade de tensão e suas características em relação aos parques eólicos inseridos em sistemas de potência convencionais.

Capítulo 4 - Estabilidade de Tensão

O problema da estabilidade de tensão nos dias atuais surgiu como consequência das características dos modernos sistemas de potência, que devido à falta de investimentos no sistema de transmissão por restrições econômicas e ambientais, tendem a operar bastante carregados.

O conceito de estabilidade de tensão está relacionado a sistemas de potência interconectados, ou seja, refere-se à estabilidade do sistema global, tendo a tensão elétrica como a variável de interesse. Portanto, pode-se citar abaixo segundo o IEEE/CIGRE Task Force (2004):

A estabilidade de tensão refere-se à habilidade de um sistema de potência em permanecer com tensões estacionárias em todas as barras do sistema após ser submetido a um distúrbio para uma dada condição de operação inicial.

Segundo Londero (2014) a estabilidade é uma condição de equilíbrio entre forças que se opõem em um sistema, de tal forma que estas forças se cancelam instantaneamente quando a estabilidade é alcançada, para a estabilidade de tensão as forças em oposição são a potência fornecida e a potência demandada do sistema de potência, ou seja, quando a potência demandada é igual à potência fornecida, a tensão permanece constante.

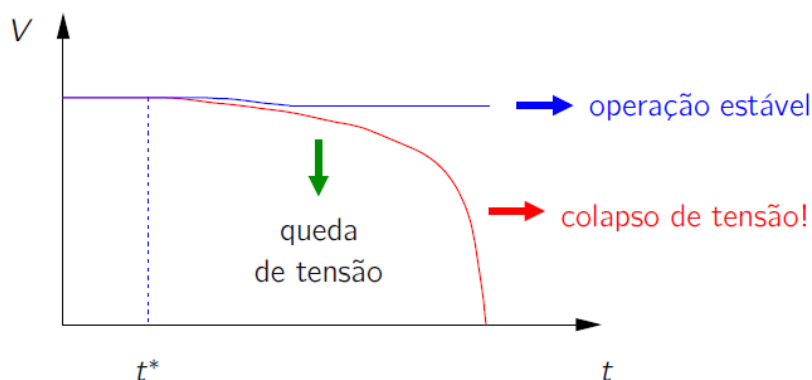
Caso a demanda seja maior do que a potência fornecida à tensão tende a cair podendo levar o sistema de potência a instabilidade, caso nenhuma ação seja tomada. A instabilidade de tensão é manifestada pelo declínio progressivo da tensão em algumas barras após uma perturbação. A instabilidade não representa necessariamente o blecaute do sistema de potência, mas pode conduzi-lo a essa situação.

O colapso de tensão é um termo muito usado na literatura e refere-se à sequência de eventos que levam ao blecaute ou tensões muito baixas em uma parte significativa do sistema de potência (IEEE/CIGRE Task Force, 2004). Este fenômeno pode ser local, envolvendo um conjunto de barras ou uma área de controle, neste caso sendo chamado de colapso parcial, ou abrangendo a totalidade/maioria das barras do sistema de potência, denominando-se colapso global.

Sistemas elétricos de potência são essencialmente sistemas dinâmicos, ou seja, os problemas de instabilidade de tensão têm características dinâmicas e métodos e modelos apropriados devem, em princípio, ser usados. A representação gráfica de um colapso de tensão

em pode ser observada na Figura 11, onde a linha azul representa uma operação estável e a linha vermelha em decaimento representa uma operação que entrou em colapso.

Figura 11 - Queda monotônica de tensão.



Fonte: Largo (2015)

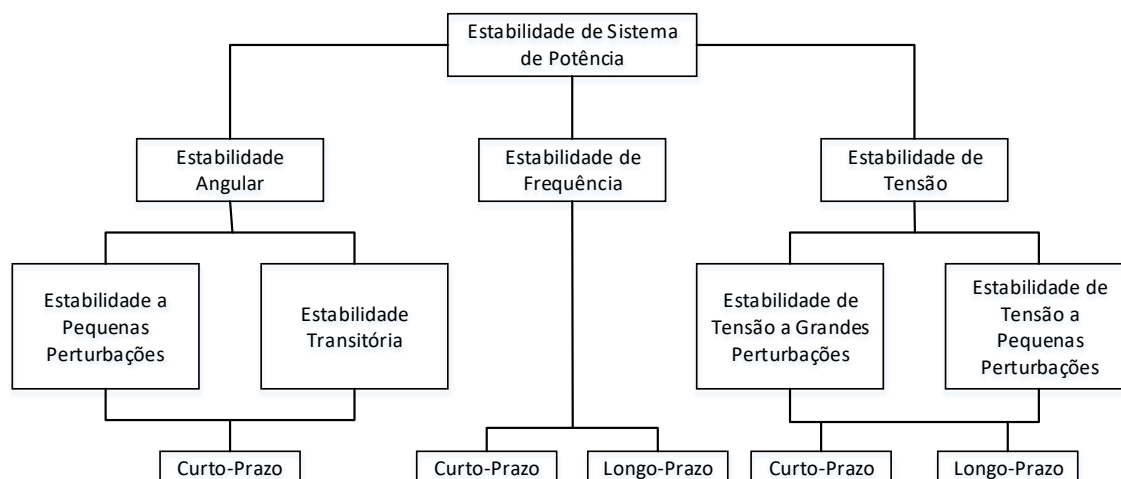
4.1 Classificação de Estabilidade de Tensão

Do ponto de vista do operador do sistema é importante reconhecer a forma de instabilidade para que seja possível tomar medidas preventivas ou corretivas para solucionar o problema de instabilidade.

Para que os problemas de estabilidade de sistemas de potência, associados à causas e efeitos, bem como propostas de solução possam ser analisadas de forma mais precisa é importante que a estabilidade de sistemas de potência seja classificada em diferentes categorias, tomando como base a natureza física do problema, o tipo de perturbação, os equipamentos e processos, e o método mais apropriado para o cálculo e previsão da estabilidade (KUNDUR, 1994).

A Figura 12 mostra a classificação geral de estabilidade de sistemas de potência (IEEE/CIGRE Task Force, 2004). Porém, os estudos deste trabalho estão direcionados a estabilidade tensão, que por sua vez é subdividida em duas categorias nomeadas de estabilidade a grandes perturbações e estabilidade a pequenas perturbações.

Figura 12 - Classificação Geral de Estabilidade de Sistemas de Potência



IEEE/CIGRE Task Force (2004)

A estabilidade de tensão a grandes perturbações (*Large-Disturbance Voltage Stability*) está relacionado à habilidade do sistema de potência em manter as tensões estáveis após a ocorrência de grandes perturbações, como curto-circuitos, perda de geração, ou contingências de circuito. Essa habilidade depende das características do sistema e da carga, das interações entre os controles contínuos e discretos, e dos dispositivos de proteção.

Através de simulações no domínio do tempo por um período de tempo que seja suficiente capaz de capturar a atuação dos dispositivos como motores de indução, transformador com comutador de tap OLTC e o limitador de sobre-excitação OEL, é possível a determinação da estabilidade de tensão a grandes perturbações, o que pode levar de segundos a minutos na escala de tempo.

Já a estabilidade de tensão a pequenas perturbações (*Small-Disturbance Voltage Stability*) está relacionada à habilidade do sistema de potência em manter as tensões estáveis após a ocorrência de pequenas perturbações como a mudança gradual na carga do sistema. Esse tipo de estabilidade é influenciado pelas características da carga e pelas interações entre os controles contínuos e discretos.

4.2 Instabilidade de Tensão

Segundo Van Cutsem et al. (1998) a instabilidade de tensão pode ocorrer pelo aumento gradual da carga ou operação em contingência. Em ambos os casos, quando o sistema de

potência opera estressado com altos níveis de carregamentos, próximo do limite de máxima transferência de potência, uma sequência de eventos pode levar o sistema de potência ao colapso de tensão.

A instabilidade de tensão se caracteriza pelo declínio progressivo das tensões em parte ou em todo o sistema, em períodos de tempo que variam desde segundos até intervalos prolongados da ordem de dezenas de minutos. O problema ocorre devido ao desbalanço entre a potência reativa demandada e a potência reativa fornecida, porém a característica da carga, os equipamentos associados ao controle da tensão, o controle automático da geração e o sistema de proteção, podem influenciar significativamente na estabilidade de tensão.

4.3 Qualidade de Energia

A qualidade da energia no contexto da geração eólica descreve o desempenho elétrico do sistema de geração de eletricidade do aerogerador, em que quaisquer perturbações sobre a rede elétrica devem ser mantidas dentro de limites técnicos estabelecidos conforme o nível de exigência imposto pelo gerente de operações da rede.

Para a maior parte das aplicações de unidades eólicas, a rede pode ser considerada como um componente capaz de absorver toda a potência gerada por essas unidades, com tensão e frequência constantes.

Como consequência da crescente inserção da geração eólica na matriz de energia elétrica brasileira, são previstos elevados níveis de penetração regional das fontes eólicas. Essa constatação motivou a adequação dos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), especificamente o Submódulo 3.6, tendo em vista a proposição de aperfeiçoamentos nos requisitos técnicos para conexão de centrais geradoras eólicas visando garantir que sua maciça injeção não deteriore as condições de segurança do sistema de potência.

4.4 Segurança de Tensão

A Segurança de um Sistema de Potência refere-se ao grau de risco de sobrevivência de iminentes distúrbios (contingências) sem interrupção do serviço ao consumidor. Depende da condição de operação do sistema bem como a probabilidade do conjunto de contingências. O conceito de segurança está relacionado ao critério N-1, no qual o sistema de potência deve ser

capaz de operar sem interrupções de serviço ao consumidor, para ocorrência de uma contingência (ONS, 2020).

A segurança de tensão (*Security Voltage*) refere-se à operação estável e satisfatória de um sistema de potência seguido de uma contingência ou aumento de carga (TAYLOR, 1994). Implica em uma considerável margem de estabilidade de tensão do ponto de operação até o ponto de instabilidade de tensão (ponto de máxima transferência de potência) seguido de contingências.

4.5 Controle de Tensão

O controle de tensão é uma prioridade na operação e planejamento de sistemas elétricos. Dentre as medidas adotadas está o controle coordenado de tensão, o qual vem se desenvolvendo bastante nas pesquisas relacionadas a estabilidade de tensão de sistemas elétricos.

No Brasil, o CEPEL, a COPPE/UFRJ e o ONS vêm desenvolvendo trabalho conjunto nessa área, visando sua aplicação em áreas críticas do sistema brasileiro, sob o ponto de vista de controle e estabilidade de tensão. Sabe-se que o controle de tensão está intimamente ligado a transferência de potência reativa, então a regulação de tensão no nível de transmissão pode ser mais eficaz se existir uma automação entre os sistemas que controlam a repartição de potência reativa do sistema.

4.5.1 Controle Hierárquico

O controle hierárquico de tensão constitui uma estratégia de controle descentralizada baseada no desacoplamento natural dos estados do sistema (PAVÃO, 2006). Os principais esquemas de controle hierárquico de tensão em operação estão na França e na Itália. Ambos possuem características semelhantes e são baseados na divisão do sistema em zonas teoricamente independentes, aspecto conhecido como Controle Coordenado de Tensão (CCT).

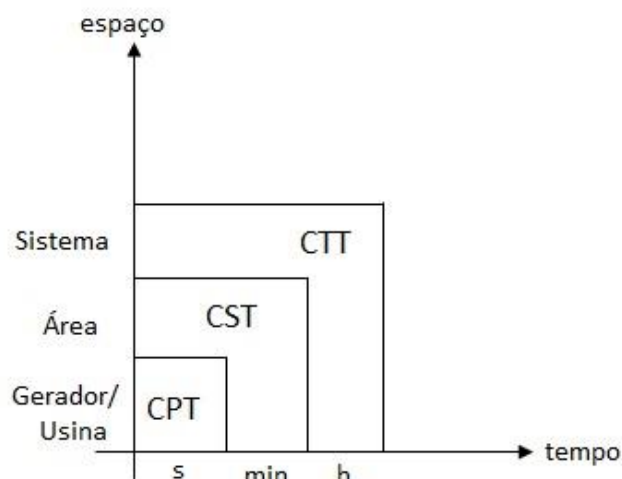
O CCT tem o objetivo de dividir o sistema elétrico em áreas, e regular a tensão de uma barra de cada área escolhida através de métodos específicos e gerenciar a injeção de potência reativa entre os geradores que compõem o sistema, aumentando a margem de estabilidade de tensão. O CCT é dividido hierarquicamente em Controle Primário de Tensão (CPT), Controle

Secundário de Tensão (CST) e Controle Terciário de Tensão (CTT) como mostrados na Figura 13.

O CPT atua localmente no gerador ou usina numa faixa de tempo de segundos. O CST consiste no ajuste coordenado da tensão em determinadas barras do sistema, denominadas de barras piloto. Este controle pode ser feito através de ajuste individual nos reguladores de tensão dos geradores, compensadores estáticos, compensadores síncronos e ajuste de taps em transformadores. Estes equipamentos controlam a tensão da barra piloto através de fatores de participação.

O CTT é o nível de coordenação mais lento, no qual a reserva disponível de geração de potência reativa é otimizada para manter um perfil de tensão adequado. A hierarquia do controle coordenado de tensão apresenta uma certa independência entre os três níveis, devido às diferentes escalas de tempo de atuação de cada um, e às regiões em que atuam. Isso garante a ausência de riscos de oscilação e instabilidade por ações de controle conflitantes. Os níveis hierárquicos do controle coordenado de tensão podem ser visualizados na Figura 13.

Figura 13 - Níveis hierárquicos do Controle Coordenado de Tensão



Fonte: Almeida (2004)

4.6 Conclusão

Neste capítulo foram abordados os principais aspectos sobre a estabilidade de tensão e sua classificação, segurança de tensão e qualidade de energia. Também foram apresentados detalhes sobre o controle de tensão e seu sistema hierárquico de atuação. A estabilidade de

tensão é uma das características essenciais determinadas pelos procedimentos de rede, enquanto que o controle de tensão é o recurso mais utilizado no mundo todo para contribuir nessa estabilidade determinada.

Com base nas informações dos tópicos abordados neste capítulo e sua conexão com os capítulos anteriores, torna-se possível abordar a metodologia utilizado neste trabalho de conclusão de curso e subsequentemente dar detalhes sobre as simulações referente ao tema. O próximo capítulo trata da metodologia aplicada nas simulações realizadas para este trabalho de conclusão de curso.

Capítulo 5 - MÉTODO

O objetivo principal deste trabalho é analisar a contribuição do controle secundário de tensão aplicado a um parque eólico composto por aerogeradores DFIG para melhorar a margem de estabilidade de tensão de longo prazo do sistema de potência.

O estudo foi realizado utilizando os softwares ANAREDE (Programa de Análise de Redes) e o ANATEM (Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos), ferramentas desenvolvidas pelo CEPEL (Centro de Pesquisas em Energia Elétrica) e amplamente utilizadas pelo setor elétrico para realização de estudos de expansão e operação do sistema elétrico brasileiro.

5.1 Programa de Análise de Redes (ANAREDE)

O programa computacional ANAREDE (Análise de Redes Elétricas) é o mais utilizado no Brasil para análise de Sistemas Elétricos de Potência em regime permanente. Reúne programas de fluxo de potência, equivalente de redes, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão e de fluxo, e análise de segurança de tensão.

Sua interface gráfica, aliada aos programas FormCepel (que combina dados de entrada e resultados que podem ser filtrados para seleção de trechos de interesse) e EditCepel (editor de texto customizado), torna seu uso simples e rápido. A versão integrada ao SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia) é utilizada para operação em tempo real (CEPEL, 2020).

5.2 Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM)

O programa computacional ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos) é o mais utilizado no Brasil para análise de sistemas elétricos de potência em regime dinâmico. Destina-se à análise de grandes perturbações nos sistemas de potência, compreendendo os períodos de estabilidade transitória e dinâmica. Possui grande flexibilidade e precisão de modelagem, com destaque para os Controles Definidos pelo Usuário (CDUs), que permitem modelar as características dinâmicas dos seus principais controladores, comunica-se com o programa ANAREDE e com os programas auxiliares PlotCepel (ferramenta que permite a

visualização de resultados em forma de gráficos) e CDUEdit (ferramenta para criação de novos CDUs via interface gráfica). O aplicativo Anat0, que encontra-se incorporado ao Programa ANAREDE, auxilia na simulação de sistemas de grande porte no ANATEM.

A interface gráfica do ANATEM possibilita a preparação e execução automática de casos de análise de contingência, integra uma ferramenta de pós-processamento para inspeção dos resultados obtidos na análise de contingências automáticas e permite a execução de casos em paralelo se houver a disponibilidade de múltiplos núcleos/processadores no microcomputador (CEPEL, 2020).

5.3 Procedimentos de Rede

Os Procedimentos de Rede são as regras propostas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica integrantes do Sistema Interligado Nacional - SIN, de acordo com a atribuição dada pela Lei nº 9.648, de 17 de maio de 1998.

O ONS desenvolve uma série de estudos e ações exercidas sobre o sistema e seus agentes proprietários para gerenciar as diferentes fontes de energia e a rede de transmissão, de forma a garantir a segurança do suprimento contínuo em todo o país.

O Submódulo 3.6 define os requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações sob responsabilidade da transmissora e os que se aplicam aos casos de conexão de centrais de geração às instalações sob responsabilidade da distribuidora em nível de tensão superior a 69 kV .

5.5 Sistema Elétrico Adotado

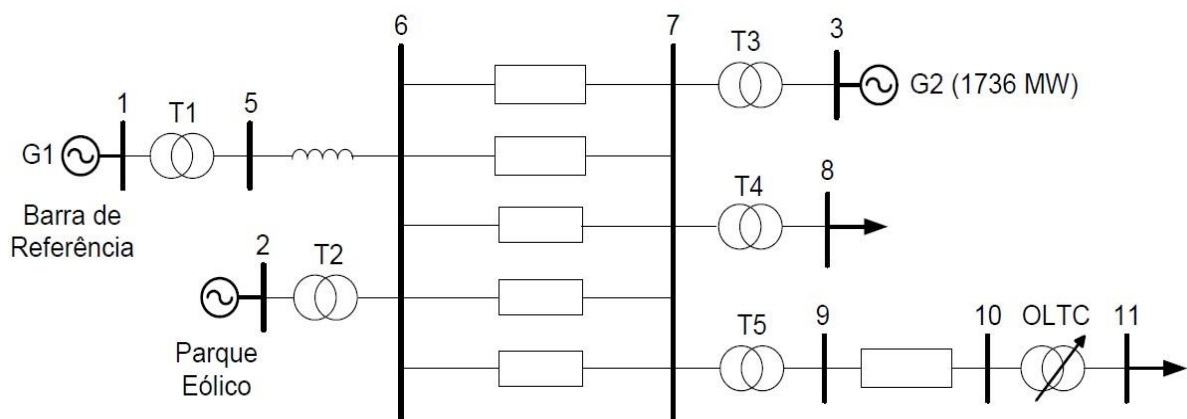
Equipamentos como transformador com comutador de tap sob carga OLTC (*On-Load Tap Changer*), o limitador de sobre-excitação OEL (*Over-Excitation Limiter*) dos geradores síncronos, cargas estáticas e dinâmicas (motor de indução) são levados em consideração nas análises, pois afetam significativamente a estabilidade de tensão de longo-prazo.

O OLTC é indispensável para grandes consumidores industriais e redes de distribuição, pois aumenta a capacidade de máxima transferência de potência através do controle da posição do tap.

O OEL é uma proteção contra sobre-aquecimento do enrolamento de campo devido a elevadas solicitações de potência reativa. Quando este equipamento atua, a excitação é reduzida drasticamente, normalmente levando o sistema de potência ao colapso de tensão. O motor de indução é uma das principais máquinas utilizadas na indústria em diversos segmentos, contudo o alto consumo de potência reativa combinada com as ações do OLTC e do OEL pode levar o sistema de potência ao colapso de tensão.

O sistema de potência adotado nas simulações desta pesquisa é apresentado na Figura 14 por meio do seu diagrama unifilar. Este sistema de potência é muito usado na literatura em estudos de estabilidade de tensão devido suas características de carga, além da atuação do limitador de sobrecorrente (OEL) e do comutador de tape sob carga (OLTC).

Figura 14 - Diagrama unifilar do sistema teste.



Kundur (1994)

G1 é o gerador síncrono ligado a barra de número 1, que é a barra de referência do sistema de potência, podendo ser considerado um sistema de grande porte. O gerador síncrono G2 possui o dispositivo de proteção OEL e encontra-se na barra 3 do sistema de potência. Já na barra 2 foi inserido o parque eólico, que é modelado como uma máquina DFIG equivalente, composto por 1324 máquinas de 850 kW cada. O transformador OLTC está conectado no trecho entre as barras 10 e 11. Os modelos do OEL e do OLTC são os mesmos utilizados em Kundur (1994). Todos os outros transformadores (T1, T2, T3, T4, T5) possuem tap fixo. As cargas das barras 8 e 11 possuem parte estática e dinâmica, sendo esta última representada por motores de indução.

5.6 Dados de Simulação

O CST implementado nas simulações apresenta apenas a malha de controle de tensão, com o objetivo de manter a tensão na barra piloto em 1 p.u., bem como de melhorar o perfil de tensão nas barras vizinhas. A barra 8 foi escolhida como a barra piloto para as simulações por ser uma barra de carga, que por sua vez sofre aumento progressivo nas simulações forçando o sistema de potência a entrar em colapso. Diante disso, o comportamento da tensão na barra 8 sugere um comportamento similar nas outras barras do sistema de potência. O parque eólico é composto por um gerador equivalente de 1.324 turbinas de 850 kW com níveis de geração de 425 MW para regime de velocidade de vento baixo.

As simulações foram executadas para os regimes e baixa velocidade do vento com incrementos de 0,05% da carga inicial a cada segundo até 200 segundos, totalizando um aumento de carga de 10%, encerrando a simulação em 300 segundos.

5.7 Conclusão

Este capítulo abordou os métodos utilizados nas simulações de longo prazo para analisar a contribuição do CST aplicado a um parque eólico composto por aerogeradores DFIG para melhorar a margem de estabilidade de tensão de longo prazo do sistema de potência. Dando detalhes sobre os *softwares* usados, o sistema adotado e os dados utilizados na simulação.

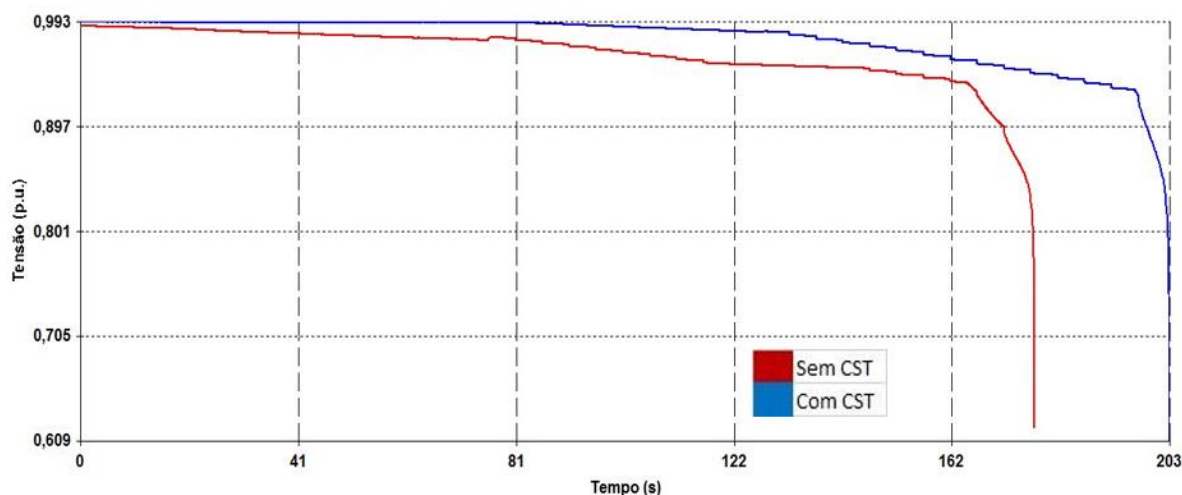
Determinados os dados a serem utilizados no simulador e feitas as simulações em *softwares* com base neles, foi possível fazer a análise dos resultados através dos gráficos plotados em determinadas barras do sistema de potência, comparando a performance de um sistema sem CST e com CST nas mesmas. Os resultados e discussões encontram-se no capítulo seis

Capítulo 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos da contribuição do CST aplicado a um parque eólico composto por aerogeradores DFIG à estabilidade de tensão de longo prazo através de simulações no domínio do tempo sob regimes de velocidades do vento baixa, envolvendo a atuação dos equipamentos OEL, OLTC, e também considerando os modelos estáticos e dinâmicos (motores de indução) das cargas.

As Figuras 15 e 16 apresentam o comportamento da tensão na barra 8 e barra 11, respectivamente, com e sem o controle secundário de tensão em condições de baixas velocidades de vento. No gráfico da tensão da barra 8 (barra piloto) da Figura 15 percebe-se que ocorre colapso de tensão devido ao aumento progressivo da carga, o que já é esperado. Entretanto, quando da presença do CST esse colapso é postergado em torno de 25 segundos quando comparado com o sistema sem o controle secundário de tensão. Essa característica pode ser observada em todos os resultados das barras analisadas subsequentemente.

Figura 15 - Gráfico da Tensão na Barra 8.

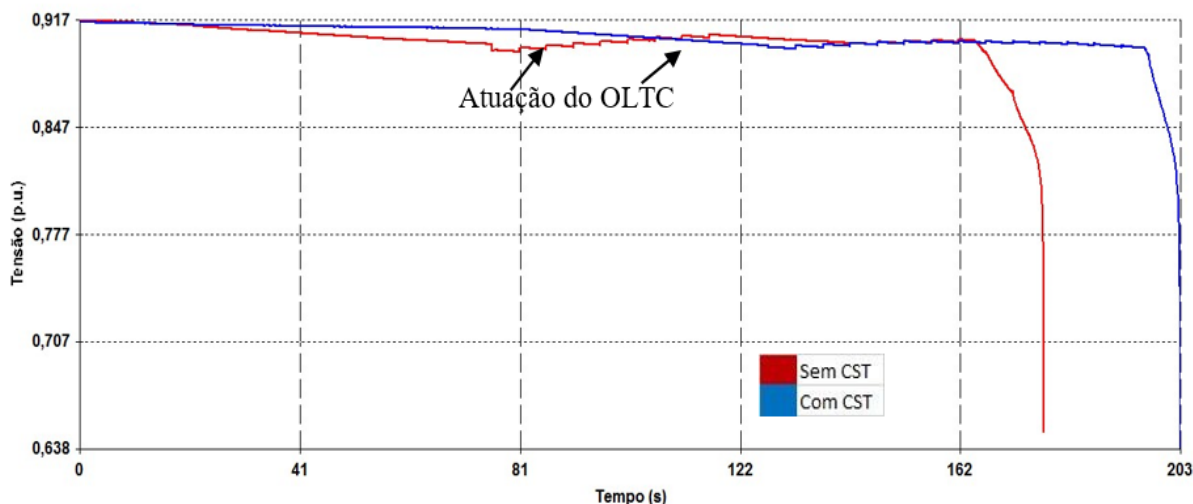


Fonte: Autor (2021)

Este cenário influencia diretamente para uma instabilidade de tensão, e posteriormente para o colapso de tensão, já que com a diminuição dos níveis de tensão devido ao aumento da carga, ocorre a atuação do OLTC para tentar regular a tensão na barra 11, e conseqüentemente consome potência reativa do sistema, juntamente com os motores de indução na barra 8 que também consomem grande quantidade de reativos, ocorrendo uma queda brusca e progressiva do nível de tensão das barras do sistema.

A seguir, tem-se o gráfico da tensão na barra 11 na Figura 16, que também é uma barra de carga, e onde está conectado o dispositivo OLTC. Nota-se que este dispositivo atua, aumentando o tape para tentar regular a tensão terminal da barra. Entretanto, como esse dispositivo atua consumindo potência reativa da rede elétrica, isso faz com que a instabilidade de tensão no sistema se agrave.

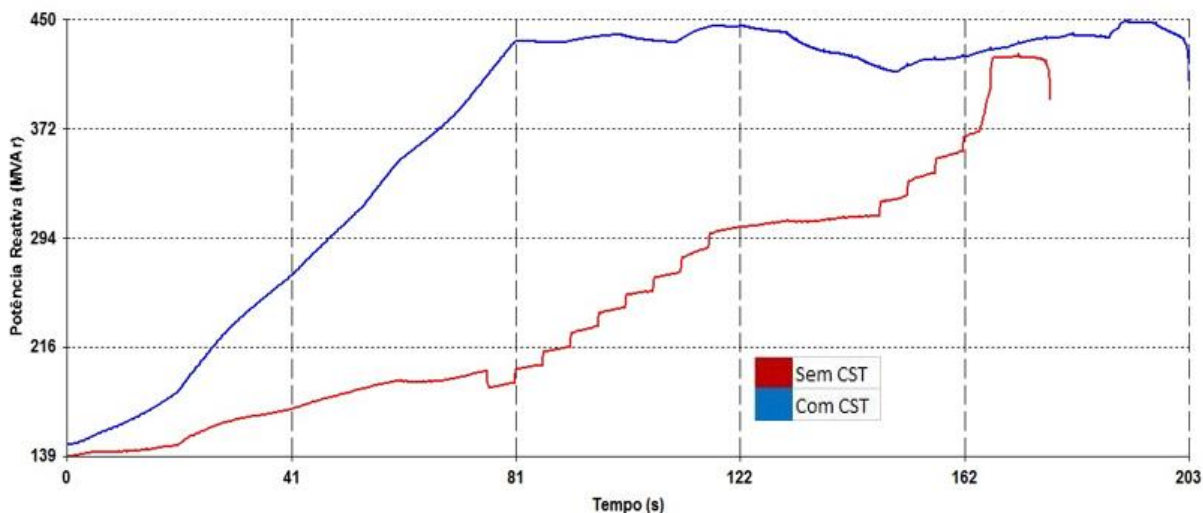
Figura 16 - Gráfico da Tensão na Barra 11.



Fonte: Autor (2021)

Para baixas velocidades de vento, onde a potência ativa das máquinas é maior, há maior influência na potência reativa fornecida pelos aerogeradores, o que pode ser verificado pelos gráficos da Figura 17.

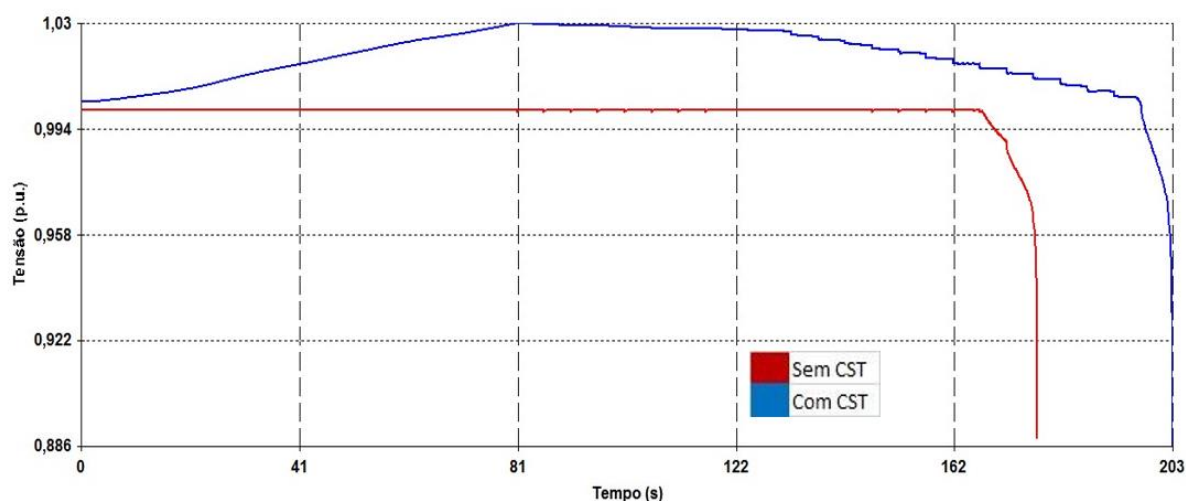
Figura 17 - Gráfico da Potência Reativa do DFIG.



Fonte: Autor (2021)

Pelo gráfico da Figura 17, percebe-se que à medida que a demanda do sistema aumenta, há também o aumento de injeção de potência reativa na rede por parte do parque eólico. Para condições de baixa velocidade de vento com o CST, nota-se que em 81s a potência reativa atinge seu limite, neste caso, é possível notar que inicialmente, o DFIG tem margem disponível para injetar potência reativa na rede elétrica, enquanto o sistema sem o CST segue em uma margem exponencial e atinge seu limite depois de 162s, mais do que o dobro do sistema com o CST. Para analisar o comportamento do módulo da tensão da geração eólica, tem-se o gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Gráfico do módulo da tensão da geração eólica.

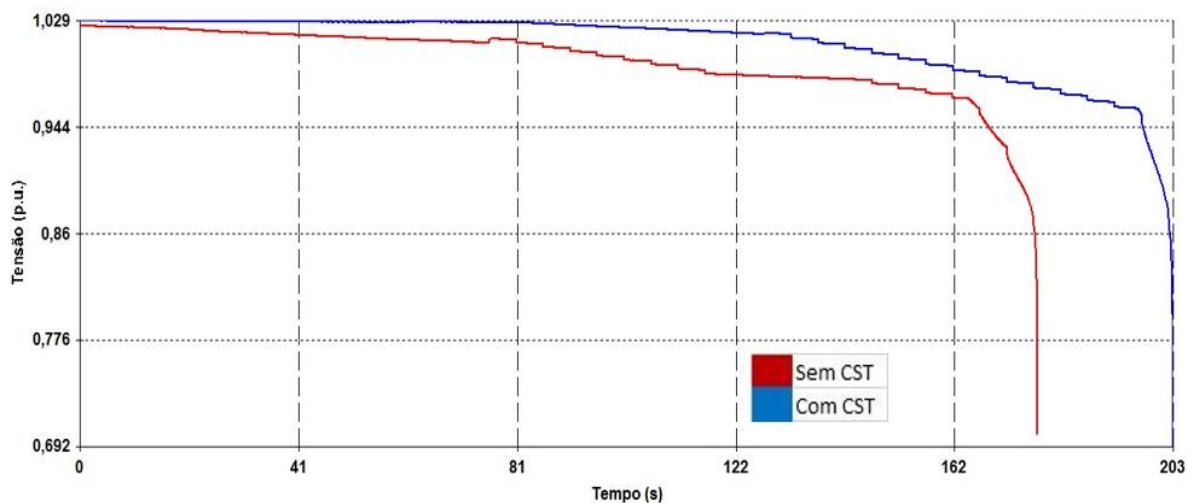


Fonte: Autor (2021)

Pela Figura 18 percebe-se que a tensão da barra 2 permanece praticamente constante sem o CST, e por volta dos 168 s, sofre um colapso de tensão devido ao aumento de carga. Já com a atuação do CST, a tensão da barra 2 inicialmente apresenta um aumento mesmo com o aumento de carga, devido a injeção de potência reativa para a rede através do GSC do DFIG. Entretanto, a partir do instante de 81 s, esta tensão começa a sofrer uma redução gradativa, até ocorrer o seu colapso próximo dos 203 s, postergando o colapso de tensão do sistema de potência em mais ou menos 25 segundos.

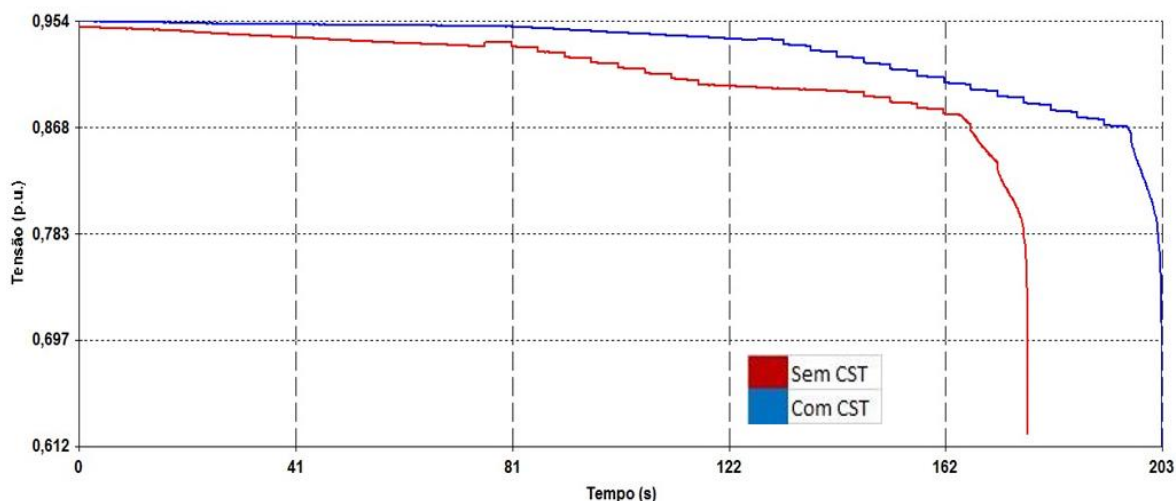
Para mostrar o comportamento da tensão nas barras vizinhas, são apresentados os gráficos das Figura 19 e 20, que correspondem, respectivamente, às tensões das barras 9 e 10 do sistema de potência.

Figura 19 - Gráfico da Tensão na Barra 9.



Fonte: Autor (2021)

Figura 20 - Gráfico da Tensão na Barra 10.



Fonte: Autor (2021)

Verifica-se pelos gráficos das Figuras 19 e 20 que as tensões das barras 9 e 10, respectivamente, apresentam melhor perfil quando o CST está em operação, o que contribui para melhorar o perfil de tensão nas barras. Outro ponto importante, é que o colapso de tensão com o CST ocorre alguns segundos após o colapso ocorrido sem o CST, aproximadamente 25s, o que possibilita uma tomada de decisão pelos operadores de sistemas de potência para estabilizar o sistema.

6.1 Conclusão

Os resultados das simulações mostraram graficamente os benefícios que podem ser obtidos com o CST aplicado ao DFIG no intuito de atender a demanda de potência reativa e se atingir a estabilidade de tensão. Fica evidente a postergação do colapso de tensão entre um sistema sem o CST e com o CST, assim como a capacidade do DFIG de atender a demanda de potência reativa da rede com maior eficiência juntamente com a integração do CST.

Nota-se a eficiência energética que a aplicação do controle de tensão pode proporcionar ao sistema de potência, agregando valor ao sistema eólico de produção energética, que por sua vez produz energia limpa de forma ecoeficiente, contribuindo para um desenvolvimento sustentável sem desconsiderar padrões de competitividade de mercado.

Capítulo 7 - CONCLUSÃO

7.1 Considerações Finais

Através do desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, pode-se concluir que a Engenharia da Sustentabilidade é uma das áreas da engenharia de produção que contribui na elaboração de um modelo eficaz de planejamento estratégico com conceitos da sustentabilidade. No âmbito da produção energética mundial, o setor passa a ser muito visado pelos efeitos negativos ao meio ambiente e às populações, causado por projetos ineficientemente produtivos, ecologicamente não viáveis e pela produção de uso intrínseco ao setor.

Seja qual for o processo ou produto, da concepção ao destino final, seu fluxo de produção pode ser analisado do ponto de vista da Ecoeficiência. Nesse contexto, a eficiência energética é a capacidade de utilizar menos energia para produzir a mesma quantidade de outros serviços baseados na energia ou otimizar a produção de energia elétrica para fornecer sua demanda requerida.

Os sistemas eólicos estão cada vez mais sendo usados na geração de energia elétrica, tendo uma participação importante no mercado brasileiro. Os sistemas eólicos de velocidade variável possuem a capacidade de extrair a máxima potência da velocidade do vento sendo, portanto, os mais utilizados e ecoeficientes.

Dentre os aerogeradores utilizados em sistemas eólicos de velocidade variável, o DFIG merece destaque por se tratar de uma tecnologia amplamente utilizada nos principais mercados de captação eólica, tornando-se referência no mercado global, e por ser capaz de fornecer potência reativa à rede elétrica através dos seus conversores estáticos.

Nos últimos anos, a legislação brasileira tem promovido o estabelecimento de normas e orientações acerca da utilização de fontes alternativas para geração de energia elétrica de forma segura, incentivando a disseminação dessa fonte alternativa de energia. Essas iniciativas têm como meta a universalização dos serviços de energia, tendo em vista o direito à qualidade de vida, bem como a integração social.

A estabilidade de tensão, fortemente relacionada a transferência de potência reativa, é um dos maiores problemas de sistemas de potência a ser enfrentada devido às suas danosas

consequências, como o colapso de tensão. Uma das técnicas mais recentes utilizadas para mitigar a instabilidade de tensão é a aplicação do Controle Secundário de Tensão (CST) em sistemas de potência. Diante disso, o DFIG pode contribuir para melhorar a margem de estabilidade de tensão do sistema de potência injetando potência reativa na rede elétrica.

Este trabalho analisa a contribuição do Controle Secundário de Tensão aplicado em um parque eólico baseado em aerogeradores DFIG na estabilidade de tensão de longo prazo. Assim, foram realizadas simulações no domínio do tempo nos programas ANAREDE e ANATEM desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), afim de verificar a eficácia do emprego do controle secundário de tensão (CST) em aerogeradores DFIG para mitigar problemas de instabilidade de tensão, como o colapso de tensão.

Com os resultados, notou-se que o emprego do CST na malha de controle do aerogerador se mostrou eficiente já que o mesmo possui uma malha de controle de tensão/potência reativa que favoreceu o aumento da margem de estabilidade de tensão.

Pelos resultados alcançados, pode-se concluir que o DFIG aumenta a margem de estabilidade de tensão, quando o sistema de potência é submetido a um lento aumento de carga, já que este aerogerador possui a capacidade de injetar potência reativa na rede elétrica. Portanto, o CST aplicado em aerogeradores DFIG apresenta eficácia na regulação da tensão da barra piloto do sistema de potência, promovendo aumento da margem de estabilidade de tensão, e consequentemente contribuindo para a engenharia de sustentabilidade

7.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Com o intuito de aprimorar os dados obtidos a partir da simulação, propõe-se a coleta de dados estatísticos e novas simulações acerca da aplicação do CST em outros tipos de geradores de velocidades variável. Como sugestão para futuros trabalhos destacam-se:

- Um estudo de análise da contribuição do controle secundário de tensão em aerogeradores de velocidade variável do tipo gerador síncrono com conversor de capacidade nominal.
- Estudo de outras fontes renováveis e suas tecnologias para assim verificar a possibilidade de utilização destas fontes de energia de forma conjunta através de um sistema híbrido ecoeficiente.

- Realizar estudos de aplicação regional com ciência de dados no intuito de verificar o desempenho de um sistema simulado através de dados regionais fornecidos por aprendizado de máquina
- Estudos de aplicação de aprendizado de máquina nas etapas de demanda de potência reativa feita por conversores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, L. P. **Análise de Desempenho do Controle Automático de Geração e do Controle Secundário de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.
- AMARANTE, O. A. et al. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, 2001.
- CAMPOS, F. R. G. **Ciência, tecnologia e sociedade** – Florianópolis: Publicações do IF-SC, 2010.
- CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, **ANAREDE: Programa de Análise de Redes, Manual do Usuário**, V10.00.01, Nov. 2013.
- CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, **ANATEM: Análise de Transitórios Eletromecânicos, Manual do Usuário**, V10.04.06, Março, 2012.
- CMMAD COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1988.
- CRESESB, Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2011 Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/novoatlas.cepel.br> >. Acesso em: 10 abr. 2020.
- CUTSEM, T. V.; VOURNAS, C. D. **Voltage Stability of Electric Power Systems**, Kluwer Academic Press, 1998.
- DIAS, Reinaldo. **Gestão ambiental, 1ª edição**, Editora Atlas S.A 2007.
- DUFFIE, J.; BECKMAN, W. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Willey&Sons, 1991.
- ENGELHARDT, S.; ERLICH, I.; FELTES, C.; KRETSCHMANN, J.; SHEWAREGA, F. **Reactive Power Capability of Wind Turbines Based on Doubly Fed Induction Generators**, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.25, no.1, March 2011, pp. 364-372.
- GWEC, Global Wind Energy Council. **Global Wind Report 2021**. Bélgica, 2021
- IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. **Definition and Classification of Power System Stability**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 2, May 2004, pp. 1387-1401.
- JENKINS, N.; ALLAN, R.; CROSSLEY, P.; KIRSCHEN, D.; STRABAC, G.; **Embedded Generation**, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2000.
- KATS. G. **Measuring and verifying climate change emissions reductions**. Anais do 1998 ACEEE Summer study on energy efficiency in buildings, 1998.

KIMURA, S.; ABE, K.; TSUBOI, K.; TAMMELIN, B.; SUZUKI, K. **Aerodynamic characteristics of an iced cup-shaped body**. Cold Regions Science and Technology, v.33, n.1, p.45-58, 2001.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. McGraw-Hill, USA, 1994.

Largo, J. **Uma Proposta Para a Determinação da Margem de Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015

LONDERO, R. R. **Avaliação do Impacto da Integração de Aerogeradores na Estabilidade de Tensão de Longo-Prazo em Sistemas Elétricos de Potência**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

MATOS, K. N. V. **Contribuição do Controle Secundário de Tensão Aplicado em um Parque Eólico Composto de Aerogeradores DFIG à Estabilidade de Tensão de Longo-Prazo**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

MENKES, M. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade**, Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável), Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MORREN, J.; HAAN, S. W. H. **Ridethrough of Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generator during a Voltage Dip**, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.20, no.2, June 2005, pp.435-441.

NUNES, M. V. A. **Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas**. Tese de Doutorado. Florianópolis, SC. 2003.

ONS, Procedimentos de rede, **Submódulo 3.6, Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica, 2009**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

PAIVA, N. S. **Análise do processo de aplicação da Produção Mais Limpa (P+L) em um restaurante universitário**, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

PAVÃO, R. K. **Avaliação de Uma Estratégia de Controle Secundário de Tensão Utilizando Seleção de Barras Piloto e Áreas de Controle Através de Lógica Fuzzy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2006.

PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. **Plant physiological ecology; field methods and instrumentation**. New York: Chapman and Hall, 1989. 442p.

PINTO, M. **Fundamentos de Energia Eólica**, LTC, 2013.

RANGEL, R. D. et al. **Modelagem de Geração Eólica em Programas de Fluxo de Potência e de Análise de Estabilidade Eletromecânica**. XVIII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba-PR, Brasil, 2005.

RANGEL, R. D.; GOMES JÚNIOR. S.; FERRAZ, J. C. R. **Modelagem de Aerogeradores Baseados em Máquinas Síncronas de Velocidade Variável em Programas de Análise de Estabilidade Eletromecânica**, X SEPOPE, 2006, Florianópolis-SC, Brasil.

REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2020 Global Status Report**. França, 2020

RODRIGUES, Paulo Roberto. **Energia Eólica em Energias Renováveis**. Santa Catarina: Unisul, 2011. 11 p. 20p

SCHMIDHEINY, S. **Mudando o rumo: Uma perspectiva empresarial global sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 1992.

TAYLOR, C.W **Power System Voltage Stability**, McGraw-Hill, 1994.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz **Energética Brasileira: uma prospectiva**. Novos Estudos, CEBRAP, n.79, pp.47-69, 2007.

TREVISAN, M; BLOCK, A; MADRUGA, L; Venturini. M. **Uma ação de responsabilidade socioambiental no rodeio internacional**. ENEGEP, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 2008.

TRICHAKIS, P.; TAYLOR, P.C.; LYONS, P.F.; HAIR, R.; **Predicting the Technical Impacts of High Levels of Small-Scale Embedded Generators on Low-Voltage Networks**, IET Renewable Power Generation, vol. 2, no. 4, April 2008, pp. 249–262.

ULLAH, N. R.; THIRINGER, T.; KARLSSON, D. **Voltage and Transient Stability Support by Wind Farms Complying With the E.ON Netz Grid Code**, IEEE Transactions on Power Systems, vol.22, no.4, 2007, pp.1647-1656.

US Report of the National Policy Development Group. **Using energy wisely. Increasing Energy Conservation and Efficiency**, Reliable affordable and environmentally sound energy for the American Future, Washington, 2001.