

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente

Ana Maria Zornitta de Alencar

**ANÁLISE DO USO DO STATCOM PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS
DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO NO FUNCIONAMENTO DE USINAS
EÓLICAS. UM ESTUDO DE CASO**

Bagé
2015

ANA MARIA ZORNITTA DE ALENCAR

**ANÁLISE DO USO DO STATCOM PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS
DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO NO FUNCIONAMENTO DE USINAS
EÓLICAS. UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentada à Unipampa como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Martín Cruz Rodríguez Paz

Bagé
2015

ANA MARIA ZORNITTA DE ALENCAR

**ANÁLISE DO USO DO STATCOM PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS
DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO NO FUNCIONAMENTO DE USINAS
EÓLICAS. UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentada à Unipampa como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente.

Área de concentração: Qualidade da energia

Monografia defendida e aprovada em 14 de Dezembro de 2015
Banca Examinadora:

Prof. Dr. Martín Cruz Rodríguez Paz
Orientador
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA

Prof. Dr. Jocemar Biasi Parizzi
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Aos meus pais Edson, Lindacir e Joubert por todo apoio, incentivo e paciência para que eu pudesse concluir essa etapa da minha vida. Sem o suporte e carinho de vocês nada disso seria possível. Vocês são meu exemplo de caráter, perseverança e amor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Martín Cruz Rodríguez Paz pela sua atenção e dedicação no desenvolvimento deste trabalho. Obrigada pela confiança e por todo respeito que teve comigo durante o andamento desse semestre. Obrigada também por ser um professor que serve como exemplo para muitos outros, e por estimular e inspirar os seus alunos a tornarem-se melhores profissionais.

A todos os meus amigos, por todo o apoio e paciência nessas fases finais da graduação, e pela compreensão pela minha ausência. Especialmente, obrigada George por me alegrar e me descontraír com piadas ruins nos momentos de tensão; e Luiza pela paciência sem fim ao escutar sobre este trabalho desde as primeiras fases, por todo o carinho e amizade mesmo com a distância.

Ao Professor Rodrigo Leandro Decon, por ter sido o melhor professor da minha formação. Obrigada pelo incentivo, e por ter alimentado a minha curiosidade e minha paixão pela física. Nunca me esquecerei do senhor.

A todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram como o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O crescente interesse no investimento de energias limpas estimulou o Brasil a investir no crescimento da energia eólica. Porém, o aumento da inserção da energia eólica no sistema interligado nacional traz algumas complicações quanto à confiabilidade dessa fonte de energia. Esse trabalho mostra, através de simulações, as consequências que variações na tensão da rede podem trazer para o funcionamento de uma usina eólica. A simulação se deu em duas partes. Na primeira, são simulados três cenários que podem causar falhas no funcionamento da usina eólica: uma falta na rede, variações na velocidade do vento e uma carga resistiva de elevada potência. Foram encontradas variações suficientes para o desligamento da usina com os cenários da falta na rede e de elevada carga resistiva. A segunda parte das simulações avalia o uso de um dispositivo de compensação, o STATCOM, para a mitigação dos efeitos negativos à usina eólica, onde se mostrou parcialmente adequado.

Palavras-chave: Qualidade da energia, Qualidade de tensão, STATCOM, Energia Eólica.

ABSTRACT

The increasing on the interest for the renewable energy stimulated Brazil to invest on the development of the wind energy. However, the increased integration of wind power on the interconnected national system brings some complications due to the reliability of this source of power. This work shows, through simulations, the consequences that voltage variations on the grid can cause to the operation of a wind farm. The simulation was made in two parts. Firstly, three scenarios that may cause failures on the wind farm operation are simulated: a fault on the grid, variations on the wind speed and a resistive load of high power. The scenarios of fault on the grid and the resistive load showed variations strong enough to cause the shutdown of the wind farm on. Thus, the second part of the simulations evaluated the use of the compensation device, the STATCOM, to mitigate the negative effects caused to the wind farm, where it was partially effective.

Keywords: Power quality, Voltage quality, STATCOM, Wind energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Camada Limite	18
FIGURA 2 - Circuito equivalente de um gerador de indução de velocidade fixa em regime permanente com capacitores de correção de fator de potência. <i>R_s</i> : resistência do estator, <i>X_s</i> : reatância do estator, <i>R_r</i> : resistência do rotor, <i>X_r</i> : reatância do rotor, <i>X_m</i> : reatância de magnetização, <i>X_c</i> : reatância de correção de fator de potência.....	20
FIGURA 3 - Arranjo típico de um arranjo com um inversor <i>back-to-back</i> e um conversor para controle do fluxo de potência	22
FIGURA 4 - Fluxo de potência em um DFIG (a) Operação Sub-Síncrona (b) Operação Super-Síncrona.....	22
FIGURA 5 - Triângulo de potência de uma carga indutiva	24
FIGURA 6 - Diagramas fasoriais de um gerador para (a) um δ pequeno e (b) um δ maior	24
FIGURA 7 - Equivalente Thévenin de um gerador balanceado e em regime permanente	25
FIGURA 8 - Ilustração do critério de imunidade ou susceptibilidade do equipamento.....	27
FIGURA 9 - Curva CBEMA de tolerância de 2000.....	28
FIGURA 10 - Divisão dos módulos do PRODIST	29
FIGURA 11 - Exemplo do fenômeno de subtensão.....	33
FIGURA 12 - Classificação dos afundamentos de tensão relativos à duração e à variação em relação ao valor nominal.....	34
FIGURA 13 - Exemplo de uma sobretensão momentânea	35
FIGURA 14 - Exemplo de interrupção de tensão	35
FIGURA 15 - Esquema de controle usando um STATCOM com BESS	38
FIGURA 16: Diagrama de Blocos do STATCOM com BESS para controle de qualidade de energia	40
FIGURA 17 - Interface inicial do Simulink, mostrando a biblioteca dos blocos.....	41
FIGURA 18 - Curva de Potência da Turbina G114 Gamesa	43
FIGURA 19 - Mapa Eólico do Rio Grande do Sul, com foco na área da cidade de Santana do Livramento	44
FIGURA 20 - Modelo detalhado de Usina Eólica com DFIG	45
FIGURA 21 - Modelo detalhado de um gerador DFIG em uma Turbina Eólica.....	46
FIGURA 22 - Modelo detalhado de usina com variação da velocidade de vento.....	47
FIGURA 23 - Modelo detalhado de usina com variação da carga.....	48
FIGURA 24 - Modelo detalhado do sistema com a presença do STATCOM	49

FIGURA 25 - Estrutura do STATCOM usado para as simulações	49
FIGURA 26 - Resposta no sistema ideal das potências ativa e reativa entregues ao sistema..	52
FIGURA 27 - Resposta no sistema ideal das tensões e correntes nas barras do sistema	53
FIGURA 28 - Comparação entre a potência reativa teórica e simulada, entregue pelo gerador	54
FIGURA 29 - Resposta no sistema com a falta, das tensões e correntes das barras	56
FIGURA 30 - Resposta no sistema com falta das potências ativa e reativa entregues ao sistema	57
FIGURA 31 - Comparação entre a potência reativa teórica e simulada, entregue pelo gerador durante a falta	58
FIGURA 32 - Entrada de Vento nas turbinas eólicas.....	59
FIGURA 33 - Resposta no sistema com variação da velocidade do vento, das tensões e correntes das barras	60
FIGURA 34 - Resposta no sistema com variação da velocidade de vento das potências ativa e reativa entregues ao sistema	61
FIGURA 35 - Comparação entre a potência reativa teórica e simulada, entregue pelo gerador com variação da velocidade de vento	62
FIGURA 36 - Resposta no sistema com carga resistiva, das tensões e correntes das barras ...	64
FIGURA 37 - Resposta no sistema com carga resistiva das potências ativa e reativa entregues ao sistema	65
FIGURA 38 - Comparação entre a potência reativa teórica e simulada, entregue pelo gerador com variação da carga	66
FIGURA 39 - Tensões na barra B3 sem alteração na rede, com presença de um STATCOM	68
FIGURA 40 - Resposta no sistema na presença de um STATCOM das potências ativa e reativa entregues ao sistema	69
FIGURA 41 - Resposta do sistema na barra B3, na presença do STATCOM	70
FIGURA 42 - Resposta do sistema com o uso do STATCOM, das potências ativa e reativa entregues à rede	70
FIGURA 43 - Comportamento do STATCOM durante a falta na rede	71
FIGURA 44 - Tensões e correntes na barra B3 com o uso do STATCOM	72
FIGURA 45 - Resposta do sistema com o uso do STATCOM, das potências ativa e reativa entregues à rede	73
FIGURA 46 - Comportamento do STATCOM durante a falta na rede	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Distribuição das Usinas Eólicas do PROINFA pelas regiões do Brasil	16
TABELA 2 - Limite do número de afundamentos de tensão aceitáveis anual por categoria...	34
TABELA 3: Parâmetros do grupo turbina-gerador	43
TABELA 4: Comparação de resultados da Parte 1 das simulações	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos.....	13
1.2	Estrutura do Trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Visão geral da energia eólica.....	15
2.1.1	Pesquisa de vento	16
2.1.2	Equipamento elétrico.....	19
2.1.3	Fluxo de potência na rede.....	23
2.2	Revisão da qualidade de energia.....	25
2.2.1	Normatização da qualidade de energia no Brasil	28
2.3	Qualidade da energia em usinas eólicas	30
2.4	Classificação da qualidade da energia	32
2.4.1	Subtensão momentânea	32
2.4.2	Sobretensão momentânea	34
2.4.3	Interrupção.....	35
2.5	Soluções para qualidade da energia	36
3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	42
3.1	O <i>software</i> : Matlab/Simulink.....	40
3.2	Parâmetros usados na simulação.....	42
3.3	Simulação.....	44
3.3.1	Parte 1	45
3.3.1.1	Resposta obtida para uma falta na rede.....	46
3.3.1.2	Resposta obtida para variações de vento.....	46
3.3.1.3	Resposta obtida para variações de carga	47
3.3.2	Parte 2	48
3.3.2.1	Resposta obtida para uma falta na rede.....	50
4	RESULTADOS E ANÁLISE.....	51
4.1	Parte 1	51
4.1.1	Resposta devido à falta na rede	55
4.1.2	Resposta devido a variações de vento	59
4.1.3	Resposta devido às variações de carga.....	63

4.2	Parte 2	67
4.2.1	Resposta devido à falta na rede	69
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.1	Trabalhos Futuros	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

As consequências das mudanças climáticas aumentaram consideravelmente nos últimos anos e chamou a atenção dos governantes do Brasil e de países por todo o mundo. Desde o começo das discussões sobre o Protocolo de Kyoto, em 1997 no Japão, o assunto da utilização de fontes alternativas de energia como forma de redução das mudanças climáticas causadas pela poluição tem crescido consideravelmente (VINHAS e SILVA). Com o principal foco sendo a redução do dióxido de carbono (CO₂), o protocolo entrou em vigor em 2005 e propôs que os países membros diminuíssem, de 2005 a 2012, pelo menos 5,2% da emissão de gases de efeito estufa, em relação aos valores emitidos 1990. A partir da assinatura do tratado de Kyoto, o Brasil começou a investir mais no uso de energias alternativas e em 2002, foi instituído no país o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), sob a Lei nº 10.438. O maior objetivo do PROINFA é aumentar a produção de energia elétrica através de três fontes de energia renovável: biomassa, hidráulica através de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e eólica (PROINFA, 2004). Com a implantação dessas novas fontes, pretende-se diversificar a matriz energética brasileira, aumentando a segurança no abastecimento de energia elétrica e reduzindo a emissão de gases poluentes.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), o órgão responsável pelo PROINFA, as metas do programa são a instalação de 3,3 GW de capacidade, sendo 1,1 GW de fontes eólicas, 1,1 GW de biomassa e 1,1 GW de PCHs. Estima-se evitar a emissão de 2,5 toneladas de CO₂ por ano, além da criação de trabalho e renda e de investimentos em materiais e tecnologia (PROINFA, 2004). Ainda segundo o PROINFA (2004), o Brasil apresenta um potencial eólico de 143 GW, sendo que apenas aproximadamente 7,96 GW foram autorizados, e a produção atual é apenas uma pequena parcela desse valor, com 26,8 MW, sendo a maioria dessa produção do Nordeste do país. Um dos motivos de se implantar a energia eólica no Brasil, além do alto potencial eólico, é a complementariedade das fontes hídricas e eólicas. O MME estima que a produção média de 100 MW de energia eólica economiza uma vazão de 40 m³/s de água na cascata do Rio São Francisco. Assim, além de diversificar a matriz energética brasileira, a inserção de energia eólica no Sistema Interligado Nacional (SIN) possibilita a comutação entre as fontes de forma inteligente, gerando mais aonde se tem momentaneamente mais matéria prima para a produção energética.

É possível ver o grande aumento na quantidade de energia eólica a ser inserida no SIN. Porém, a alta inserção de energia eólica no sistema pode causar alguns problemas na qualidade da energia. Então, a preocupação sobre essa qualidade surge e torna-se essencial para os operadores do SIN, para que a energia chegue ao consumidor dentro dos padrões requeridos. Estudos no campo de qualidade de energia são importantes para consolidar a energia eólica como sendo uma fonte de energia confiável e eficiente, capaz de atender a demanda de energia dentro de todos os quesitos estipulados pela rede.

A qualidade da energia elétrica (QEE) é regimentada por uma série de normas que determinam padrões nos quais a energia elétrica no sistema deverá estar de acordo (CHATTOPADHYAY, MADHUCHHANDA e SAMARJIT , 2011). Essas normas definem valores de tensão, fator de potência, harmônicos, entre outros fatores que a energia elétrica deverá estar de acordo. O conceito de qualidade de energia é definido pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), no Dicionário de Normas para termos de elétrica e eletrônica do IEEE como sendo “O estudo ou descrição de distúrbios tanto na tensão quanto na corrente. Qualidade de Energia pode ser vista como uma combinação da qualidade da tensão e da corrente.” (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 1984). Muitos autores afirmam que manter a qualidade de energia é manter os valores e forma de onda da tensão dentro de padrões pré-estabelecidos pelo sistema de potência. Os estudos nessa área investigam formas de encontrar a fonte que diminui a qualidade de energia, reduzir a probabilidade de distúrbios e minimizar os efeitos dos distúrbios que ocasionalmente ocorrerem (CHATTOPADHYAY, MADHUCHHANDA e SAMARJIT , 2011). Uma qualidade de energia não adequada pode causar problemas como a redução da expectativa de vida dos equipamentos conectados na rede, assim como a eficiência, o que prejudica na operação dos dispositivos em geral (ZHU, HU, *et al.*, 2008). Dentre as diversas variações na qualidade da energia, esse trabalho irá focar na qualidade da tensão, que é uma das principais alterações causadas por distúrbios de baixa frequência.

As normas e índices da QEE também estabelecem os padrões nos quais uma usina deve ser desconectada do sistema, como por exemplo variações de tensão da rede, classificadas como distúrbios de baixa frequência (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000). É muito importante que as usinas não parem de funcionar caso haja alguma alteração na rede, para evitar maiores problemas na qualidade da energia e para que o sistema seja capaz de atender a demanda de energia necessitada pelos consumidores.

Caso os padrões da QEE não estejam de acordo com as normas, há uma série de dispositivos que podem ser conectados à rede para a diminuição da propagação dos baixos

índices de QEE. No caso das usinas eólicas, alguns autores como Arulampalam, Barnes, *et al.* (2006), Ise, Hayashi e Tsuji (2000) e Muljadi, Butterfield, *et al.*(2006) citam o uso de compensadores estáticos (*Static Compensator – STATCOM*) para a redução dos problemas com a qualidade da energia em usinas eólicas, que será estudado neste trabalho como uma forma de evitar o desligamento da usina eólica da rede.

1.1 Objetivos

Motivado pelo desafio de manter o funcionamento das usinas eólicas mesmo com as alterações na QEE da rede, esse trabalho possui os objetivos: revisar a qualidade de energia de forma geral, e a qualidade de energia em usinas eólicas, focando em distúrbios de baixa frequência; Fazer simulações e analisar dados oriundos delas, no que diz respeito ao funcionamento das usinas eólicas considerando a qualidade da energia com foco em variações da magnitude da tensão; Discutir os dados e propor soluções quando necessárias; E analisar os efeitos da alocação de um dispositivo de compensação diminuir os efeitos da baixa qualidade de energia no funcionamento das usinas eólicas. A complexidade dos estudos em qualidade de energia são desafiadoras, e esse trabalho pretende analisar a influência da deficiência da QEE no funcionamento de parques eólicos, focando nos distúrbios de baixa frequência que podem ocorrer nesse cenário. Esse trabalho contém simulações que ajudam a entender os múltiplos fatores que podem alterar a qualidade de energia na rede, a consequência de uma QEE ruim nos parques eólicos e uma possível solução teórica para diminuir os efeitos desses distúrbios e consequentemente elevar a qualidade de energia.

Entender os conceitos da qualidade da energia é essencial para o começo do desenvolvimento desse trabalho. Assim, o primeiro passo do para esse trabalho envolve os estudos dos conceitos e dos padrões da qualidade da energia. O principal órgão regulamentador da QEE no Brasil é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esse instituto desenvolveu padrões e índices para qualidade da energia que regulamentam a energia elétrica que deve ser disponibilizada para o sistema. Esses padrões serão usados para a simulação dos cenários, e eles apresentam regulamentações que descrevem terminologias, segurança, ambiente eletromagnético, limitações de distúrbios, técnicas de medição e testes, e instalação e métodos de mitigação (MORENO-MUÑOZ, 2007).

Com o término desse trabalho, é esperado contribuir para um melhor entendimento dos conceitos de qualidade da energia e da necessidade de se implantar dispositivos que diminuam os efeitos de variações na tensão, para garantir o funcionamento das usinas mesmo quando sistema é submetido a alterações nos índices de qualidade de energia.

1.2 Estrutura do Trabalho

A estrutura desse trabalho está dividida em quatro partes principais. A primeira parte conceitua qualidade da energia em usinas eólicas, e o funcionamento dos principais componentes de uma usina eólica. Em seguida há a simulação de três cenários para a avaliação do funcionamento da usina eólica, em função às variações da qualidade da energia. A terceira parte envolve a simulação de um cenário com a utilização de um dispositivo de compensação reativa para avaliar a diminuição dos efeitos causados no funcionamento da usina, e a última parte faz uma análise dos resultados obtidos e conclui o trabalho.

A revisão teórica aborda a energia eólica desde a sua matéria prima, o vento, até o equipamento elétrico utilizado para a conversão de eletricidade e como a rede se comporta ao entregar a potência gerada na usina eólica. Também foram abordados os conceitos e normas que envolvem a QEE de usinas eólicas no Brasil, assim como possíveis soluções para amenizar os índices indesejados da QEE.

Os Capítulos 3 e 4 mostram os procedimentos experimentais e análise de resultado das simulações de uma usina eólica conectada a uma rede de distribuição em duas partes. Primeiramente o sistema foi sujeito a distúrbios em três cenários distintos: uma falta na rede, variação da velocidade do vento e a presença de uma carga de potência resistiva. A segunda parte envolve a alocação de um dispositivo de compensação para mitigação dos efeitos negativos relacionados aos baixos índices da QEE.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção irá apresentar a revisão teórica feita para o melhor entendimento da energia eólica em geral, os conceitos de qualidade de energia para sistemas elétricos de energia e também as causas dos distúrbios na QEE. Também é importante conhecer as normas mais usadas para definir, quantificar e medir a os índices relativos à QEE. A qualidade de energia com foco nas usinas eólicas também é vista nessa seção, além de medidas que possam mitigar os efeitos dos distúrbios da QEE nas usinas eólicas, assim como uma revisão das máquinas elétricas usadas para geração de energia eólica e uma breve revisão teórica sobre sistemas elétricos de potência.

2.1 Visão geral da energia eólica

Essa seção irá apresentar alguns tópicos importantes para contextualizar a geração de energia elétrica em usinas eólicas. Será apresentada uma breve revisão teórica sobre a pesquisa de vento, utilizada como matéria prima para a produção de energia e sobre a tecnologia elétrica utilizada no interior das turbinas eólicas para a conversão da energia contida no vento para a energia elétrica.

O incentivo para a energia eólica no Brasil será através da construção de 54 novas usinas eólicas espalhadas principalmente pelo sul e nordeste do país. A Tabela 1 mostra a distribuição das 54 usinas pelas regiões do país (PROINFA, 2004).

Esse total de potência já foi contratada, apesar de nem todas as usinas terem iniciado a construção. Segundo a Eletrobras (2015), até o dia 31 de dezembro de 2011 o total de usinas eólicas instaladas pelo programa foi de 41 usinas, gerando um total de 963,99 MW de potência.

TABELA 1: Distribuição das Usinas Eólicas do PROINFA pelas regiões do Brasil

Região	Número de Usinas	Capacidade [MW]
Norte	0	0
Nordeste	36	805,58
Centro-Oeste	0	0
Sudeste	2	163,05
Sul	16	454,29
Total	54	1422,92

Fonte: PROINFA, 2004

2.1.1 Pesquisa de vento

Usar a energia contida nos ventos não é uma ideia nova. O primeiro aproveitamento da energia contida no vento é conhecida por pelo menos 3000 anos, com o uso dos moinhos de vento, com o propósito de moer grãos e bombear água. A ideia da produção de energia elétrica a partir do vento é datada do século XIX, quando Charles Brush acoplou um gerador de corrente contínua (DC) de 12 kW a um moinho de vento (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001). A partir disso, as turbinas eólicas passaram por grandes evoluções até chegar nas turbinas que são utilizadas nos dias de hoje.

O principal desenvolvimento das turbinas eólicas começou nos anos 70, quando o preço do óleo aumentou consideravelmente. Assim, os investimentos nas fontes renováveis de energia chamaram a atenção dos governos por todo o mundo. Outro fator que facilitou o desenvolvimento das fontes renováveis de energia foram as altas emissões de gases de efeito estufa, fazendo com que organizações como a Organização das Nações Unidas (ONU) estipulasse metas de redução de dióxido de carbônico em escala mundial. Essas metas estimularam o uso de energia eólica, como sendo umas das alternativas mais interessantes, e então o desenvolvimento eólico começou a tomar proporções maiores, e por isso a energia eólica é consideravelmente uma tecnologia recente.

As turbinas eólicas como nós conhecemos hoje em dia são máquinas complexas que extraem a energia cinética presente no vento e convertem em energia mecânica, no

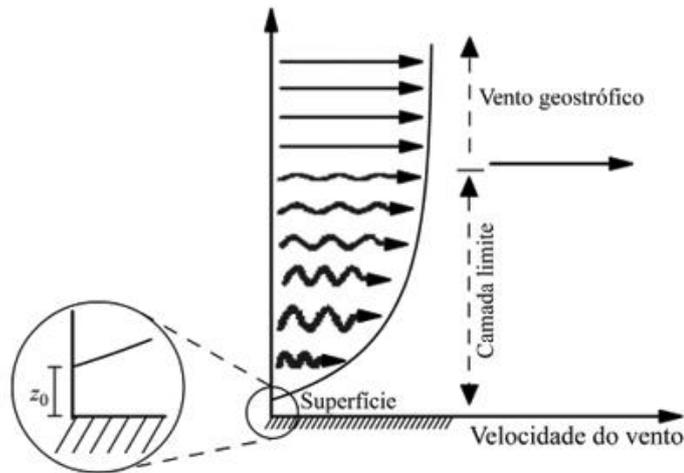
movimento de um eixo, o qual é acoplado a um gerador, que converte essa energia mecânica em eletricidade. A potência extraída do vento pode ser estimada através da Equação (1) (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001):

$$P = 1/2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (1)$$

Onde ρ é a densidade do ar (normalmente 1,25 Kg/m³), A é a secção transversal ao vento varrida pelo rotor, C_p é o coeficiente de potência e U é a velocidade do vento. Aqui é interessante ressaltar que na Equação (1) a velocidade do vento é uma variável cúbica, o que indica a importância da velocidade do vento na potência extraída pela turbina eólica. O coeficiente de potência apresentado em (1) representa a fração da potência contida no vento que pode ser convertida em eletricidade. O valor de C_p é restrito pelo limite de Beltz, que é 0,593. Esse limite se dá por efeitos aerodinâmicos, e é fisicamente impossível que uma turbina eólica extraia mais do que essa fração da energia contida no vento (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001).

A exigência do desempenho das turbinas eólicas é determinado por códigos de rede emitidos pelo operador do SIN. Isso é necessário principalmente por causa de uma das características mais relevantes do vento: a variabilidade. O vento varia em uma ampla gama de escalas, tanto em tempo quanto em espaço (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001). Essa variação não permite que a previsão do comportamento do vento seja feita para mais do que alguns dias. Na produção de energia eólica o vento não pode ser estocado para aproveitamento futuro, como é o caso de hidrelétricas, então os estudos de previsão de vento devem ser amplamente desenvolvidos para que a usina seja capaz de injetar na rede a potência qual a usina foi projetada.

A variabilidade do vento é devida a vários fatores, e pode ser relacionada com a localização geográfica ou com a altura em relação ao solo. O conhecimento dessa variação com a altura é cada vez mais importante, pois as turbinas têm crescido em tamanho para que se aumente a produção de energia. A camada limite atmosférica, mostrada na Figura 1, é a camada mais baixa camadas mais baixas da troposfera da Terra. Nela ocorre um aumento na velocidade do vento em relação à distância do solo, uma vez que quanto maior a distância, menor a interferência que o solo apresenta na velocidade do vento.



Fonte: Martins, Guarnieri e Pereira, 2008, p. 1304-7
 FIGURA 1 - Camada Limite

As turbinas estão cada vez mais altas, porém as medidas históricas dos perfis de vento são feitos a uma altura menor do que a altura das turbinas. A Equação (2), que extrapola os valores da velocidade do vento da altura medida para a altura aonde a turbina será alocada, é muito usada no campo de recursos eólicos. Essa equação é conhecida como Lei logarítmica, e leva em consideração a rugosidade da superfície (z_0) do terreno, que altera o perfil da camada limite juntamente com a velocidade do vento, e os efeitos térmicos (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001), para calcular a velocidade do vento a uma altura pretendida ($U(z)$) em relação à velocidade do vento a uma altura de referência ($U(z_r)$).

$$U(z) = U(z_r) \cdot \left[\frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \right] \quad (2)$$

Apesar do vento não apresentar um comportamento fortemente previsível, a sua variação se encaixa em uma distribuição probabilística chamada Weibull, que permite estudos de estimação de para usinas eólicas. A Equação (3) mostra a distribuição de Weibull (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001).

$$F(U) = \exp\left(-\left(\frac{U}{C}\right)^k\right) \quad (3)$$

Essa distribuição é caracterizada por dois fatores: o parâmetro de forma, k , e o parâmetro de escala, C , ambos estimados de medidas de longo prazo da velocidade do vento

no local específico. Assim, é possível calcular a probabilidade da velocidade do vento exceder um valor U .

A avaliação do vento é trivial para o planejamento de uma usina eólica e para a escolha do aerogerador adequado para a região onde a usina será instalada, o que promove uma maior eficiência da usina, e conseqüentemente ajuda a reduzir efeitos negativos para a qualidade de energia da usina eólica.

2.1.2 Equipamento elétrico

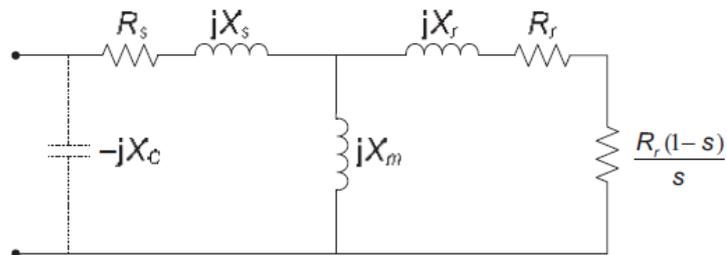
O equipamento elétrico é uma das partes mais essenciais da turbina eólica, pois é onde a energia mecânica será convertida em energia elétrica. O gerador que pode ser usado nas turbinas eólicas varia de acordo com a potência média, a velocidade média do vento, entre outras características. Os aspectos gerais dos geradores serão discutidos nessa seção.

Existe uma grande variedade de geradores disponíveis no mercado atualmente. Os geradores de indução e os geradores síncronos são os mais usados para os propósitos de geração de energia eólica. Os geradores síncronos são geralmente utilizados em grandes usinas conectadas na rede, e para atingir regime em velocidade variável são utilizados junto com dispositivos de eletrônica de potência. (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009). Apesar da utilização dos geradores síncronos, Manwell, McGowan e Rogers (2009) afirmam que os geradores de indução são os mais utilizados em usinas eólicas. Dentre outros pontos, na mesma obra é citado que os motivos do uso desses geradores envolve sua construção simples, relativamente barata e simplicidade de conectar e desconectar o gerador da rede.

Os geradores de indução de velocidade fixa são usados em turbinas eólicas que trabalham no modo de velocidade fixa. É muito similar aos motores de indução que são normalmente usados na indústria, porém a potência flui na máquina na direção inversa. As máquinas de indução são usualmente grandes em tamanho, mas para o uso em grandes turbinas isso não é um problema (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001). A frequência na rede e o número de polos do rotor darão a velocidade do gerador, segundo (4), onde n_s é a velocidade síncrona do rotor, f é a frequência da rede e n_p é o número de pólos do gerador. As velocidades mais comuns para uma frequência de 60 Hz são 1800 rpm (4 polos), 1200 rpm (6 polos) e 900 rpm (8 polos). Os geradores de turbinas eólicas normalmente entregam uma tensão inferior a 1000V, em função da segurança da rede, normalmente esses valores são 690

V na Europa e 575 V nos Estados Unidos (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001). O circuito equivalente de um gerador de indução de velocidade fixa em regime permanente é mostrado na Figura 2.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{n_p} \quad (4)$$



Fonte: Burton, 2011, p. 438

FIGURA 2 - Circuito equivalente de um gerador de indução de velocidade fixa em regime permanente com capacitores de correção de fator de potência. ***R_s***: resistência do estator, ***X_s***: reatância do estator, ***R_r***: resistência do rotor, ***X_r***: reatância do rotor, ***X_m***: reatância de magnetização, ***X_c***: reatância de correção de fator de potência

Uma característica dos geradores de indução é que a velocidade angular do estator (ω_s) e do rotor (ω_r) não são as mesmas. Essa diferença é chamada de escorregamento, e seu valor é calculado com (5).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (5)$$

O escorregamento é uma característica importante nos geradores de indução. Um alto valor de escorregamento é geralmente usado para reduzir as oscilações torcionais no rotor e nacele induzidas por variações periódicas do torque aerodinâmico do rotor (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001). Porém, quando o escorregamento for elevado causa aquecimento no rotor, e conseqüentemente aumenta as perdas. Para máquinas elétricas trabalhando como geradores, o escorregamento sempre assume um valor negativo.

Porém, para alcançar os parâmetros e a eficiência das turbinas exigidos hoje, o gerador precisa ser capaz de trabalhar com uma entrada de velocidade variável, para melhor se ajustar às variações de velocidade de vento. Esse modo de operação dos geradores é desejável para que quando as velocidades de vento estão abaixo da velocidade nominal, o gerador possa produzir o máximo de energia, mantendo a relação de velocidades constante, exigindo que a

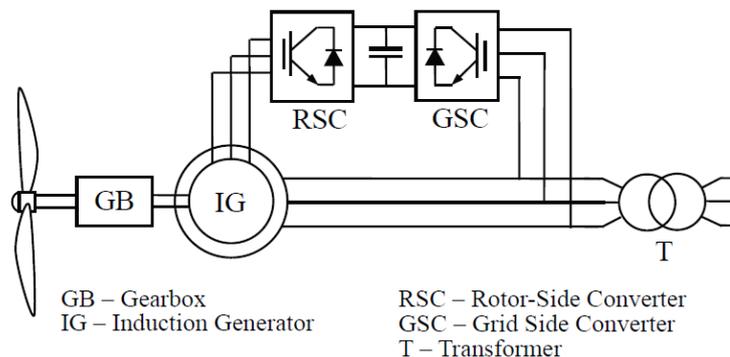
velocidade do rotor varie com a velocidade do vento. Também é importante a operação em velocidade variada para redução de fadiga no eixo, aumentando a vida útil das turbinas (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009). Assim, para que seja possível o uso de geradores de indução com uma entrada variável de energia, devem ser efetuadas algumas alterações nas configurações do gerador para que ele possa gerar energia elétrica com tensão e frequência constantes mesmo com variações na velocidade de entrada do gerador. Quando se acopla uma resistência externa no circuito do rotor, é possível variar o escorregamento, e conseqüentemente variar o fluxo de potência que passa pela máquina elétrica. Ao fazer isso, é possível usar o gerador de indução como uma máquina de velocidade variável. Normalmente, a resistência variável é controlada por um sistema de Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation - PWM*), e são acoplados capacitores para a correção do fator de potência (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001). O modo de velocidade variada pode também ser alcançado das seguintes maneiras:

- a) Uso de dois conversores *back-to-back*, onde todo o fluxo de potência da saída passe por eles. Isso é feito para que seja atingida uma maior gama de operação de velocidade variada;
- b) Somente uma parte do fluxo potência de saída é convertida no rotor bobinado, e assim uma gama restrita de velocidade é alcançada.

Em ambos os casos é necessário o uso de conversores de tensão, com o uso de semicondutores como o IGBT, usados para, a partir de um chaveamento controlado, produzir a partir de um sinal de qualquer frequência, fase e magnitude variados, um sinal de frequência, fase e magnitude constantes (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001). A evolução dos geradores de indução nos leva ao gerador mais usado atualmente nas turbinas eólicas: Gerador de Indução de Dupla Alimentação (*Doubly-Fed Induction Generator - DFIG*). Um DFIG pode ser definido como “uma máquina de indução com um rotor bobinado onde o rotor e o estator estão ambos conectados a fontes elétricas, por isso o termo ‘alimentação dupla’” (FLETCHER e YANG , 2010, p. 259). Isso permite que em uma máquina de dupla alimentação, a potência possa ser enviada ou retirada tanto do rotor quanto do estator. Para que essa máquina elétrica possa funcionar, ela exige uma fonte externa de potência reativa (pois opera com um fator de potência muito baixo) e uma fonte externa de frequência constante para controlar a velocidade de rotação da máquina. (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009).

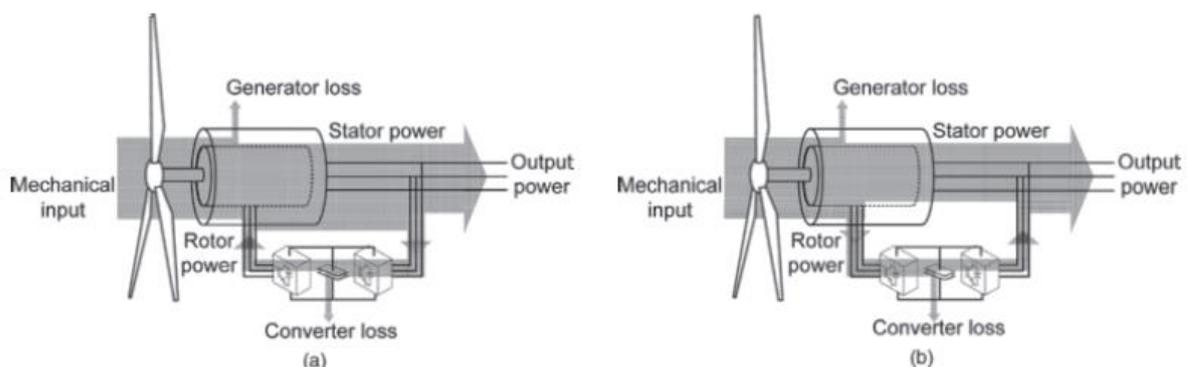
Os DFIGs foram usados em grandes protótipos de turbinas eólicas de 3 MW, ao mesmo tempo na Alemanha e nos Estados Unidos, por volta dos anos 80. Naquele tempo,

eram usados cicloconversores para alterar a frequência do rotor, e hoje em dia o arranjo mais comum para um DFIG é com o uso de dois conversores AC-DC-AC *back-to-back*, já que o uso de resistências variáveis com controladores PWM geram perdas no sistema (BURTON, JENKINS, *et al.*, 2001). De fato, as perdas não são a maior preocupação sobre esse método, mas sim o aquecimento que essas perdas causam (FLETCHER e YANG , 2010). Para que essas perdas não afetem termicamente o sistema, deveriam haver sistemas de resfriamento no nacele da turbina eólica, porém isso ocupa espaço e gera perdas mecânicas na torre, decorrentes do peso. A Figura 3 mostra um arranjo *back-to-back* típico de um DFIG, normalmente usado em turbinas eólicas. Esse arranjo permite que a turbina trabalhe com uma entrada variável, mas, mesmo nessa situação forneça uma tensão e frequência fixas dentro dos parâmetros requeridos pela rede. Um sistema DFIG apresenta controle de frequência, magnitude e fase da corrente aplicada ao rotor (FLETCHER e YANG , 2010). Essa configuração permite que o gerador possa operar em operações sub e super síncronas, alterando a direção do fluxo de potência, como mostrado na Figura 4.



Fonte: Fletcher & Yang, 2010, p. 263

FIGURA 3 - Arranjo típico de um arranjo com um inversor *back-to-back* e um conversor para controle do fluxo de potência



Fonte: Burton, 2011, p. 444

FIGURA 4 - Fluxo de potência em um DFIG (a) Operação Sub-Síncrona (b) Operação Super-Síncrona

As desvantagens do uso dos DFIGs incluem uma possível complicação na frequência da rede (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009) e a necessidade do uso de anéis coletores ou comutadores no rotor, o que irá exigir uma maior manutenção do gerador (COSTA, 2006). Porém, as suas vantagens são muitas, sendo que o uso do gerador DFIG em usinas eólicas

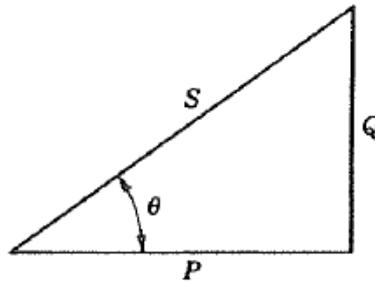
(i) Possibilita controlar a potência gerada em velocidade variável; (ii) Possibilita a turbina operar com a máxima eficiência; (iii) reduz os picos de torque na caixa de engrenagens e no eixo; (iv) as flutuações de potência podem ser absorvidas pela inércia das pás; (v) os conversores estáticos são de potência reduzida; (vi) reduz o custo do sistema; (vii) possibilita o controle independente da potência ativa e reativa; (viii) permite o ajuste do fator de potência de entrada; (ix) permite a operação com o rotor curto-circuitado em casos de contingências na rede elétrica. (COSTA, 2006. p. 33)

2.1.3 Fluxo de potência na rede

Conhecer os fluxos de potência de uma linha de transmissão é essencial para o bom entendimento dos fenômenos que acontecem na rede quando essa está sujeita a variações que alteram a qualidade da energia. O conceito de potência complexa é necessário para entender a maneira com a qual a energia é transmitida de um ponto ao outro da rede, e se essa transmissão é feita de maneira efetiva para que o consumidor possa utilizar a potência ativa requerida pelos equipamentos conectados à rede. Stevenson (1986) mostra que a potência complexa é descrita por (6), onde S é a potência complexa, P é a potência ativa e Q é a potência reativa.

$$S = P + jQ \quad (6)$$

A potência reativa será positiva quando a corrente estiver atrasada em relação à tensão, e consequentemente o sistema terá características de um circuito indutivo. Por outro lado, quando a potência reativa for positiva é pelo fato da corrente estar em avanço em relação à tensão, e o sistema terá características de um circuito capacitivo (STEVENSON, 1986). A Figura 5 ilustra o triângulo de potência de uma potência complexa indutiva, sendo θ o ângulo de fase, também conhecido como ângulo de fator de potência.

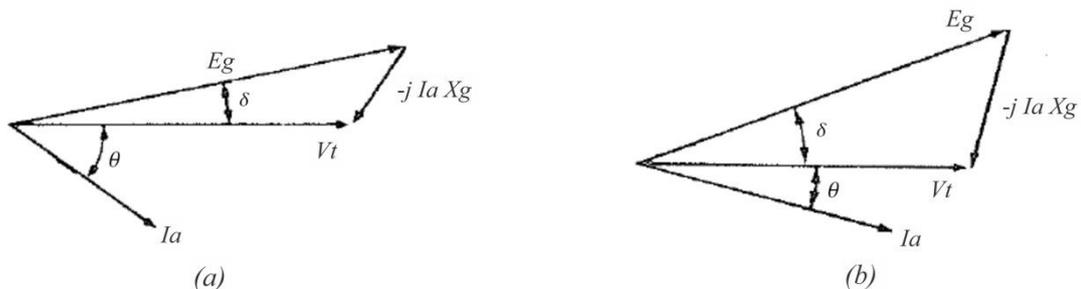


Fonte: Stevenson, 1986, p.19

FIGURA 5 - Triângulo de potência de uma carga indutiva

É importante levar em consideração o sentido do fluxo de potência. Toda vez que o sinal da potência ativa estiver positivo, significa que o equipamento está fornecendo potência ativa, e se o mesmo estiver negativo, significa que o equipamento está consumindo potência ativa. Para a potência reativa, deve-se tomar cuidado ao observar se a operação levada em consideração é motora ou geradora. Para ações motoras, quando sinal da potência reativa for positivo significa a absorção de potência reativa, e ao contrário, para um sinal negativo está acontecendo o fornecimento de potência reativa. Para ações geradoras ocorre o inverso. Como o fluxo de potência de um gerador é o inverso do fluxo de um motor, quando a potência reativa apresenta um sinal positivo, a mesma está fornecendo potência reativa, e quando o sinal for negativo, o gerador está absorvendo potência reativa (STEVENSON, 1986).

Stevenson (1986) mostra a importância do estudo de potências complexas no controle de potência de uma rede. A Figura 6 mostra o diagrama fasorial de um sistema com valores constantes de tensão na barra (V_t) e tensão de excitação do gerador (E_g), e variando apenas o ângulo θ entre V_t e E_g , chamado ângulo de carga.

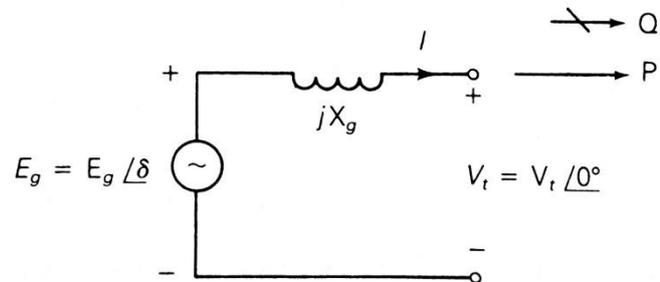


Fonte: Stevenson, 1986, p. 220

FIGURA 6 - Diagramas fasoriais de um gerador para (a) um δ pequeno e (b) um δ maior

A Figura 7 mostra o equivalente Thévenin de um gerador, operando de forma balanceada e em regime permanente. A Equação (7) mostra como a potência reativa é

transmitida no sistema, levando em consideração os valores em módulo de V_t e E_g assim como a reatância síncrona do gerador (GLOVER e SARMA, 2004), (STEVENSON, 1986), que pode ser calculada a partir do equivalente Thévenin da Figura 7.



Fonte: Glover e Sarma, 2004, p. 293

FIGURA 7 - Equivalente Thévenin de um gerador balanceado e em regime permanente

$$Q = \frac{|V_t|}{X_g} (|E_g| \cdot \cos(\delta) - |V_t|) \quad (7)$$

A partir da Equação (7), apresentada por Glover e Sarma (2004) e Stevenson (1986), é possível prever o comportamento do sistema de transmissão levando em consideração a potência reativa entregue ou absorvida pelo gerador durante a sua operação em um sistema. Para tanto é preciso ter acesso às informações de resistências e reatâncias do gerador.

2.2 Revisão da qualidade de energia

Pode-se definir qualidade de energia como um “Conjunto de limites elétricos que permitem um equipamento exercer sua função de forma pretendida, sem perda significativa de desempenho ou expectativa de vida” (SANKARAN, 2002). Nesse contexto, a definição de qualidade de energia pode ser mal-interpretada, pois os aspectos da energia podem apresentar diferentes efeitos em diferentes equipamentos, e avaliar se a energia possui uma qualidade adequada ou não pode ser tornar uma atividade complexa. Por essa razão, a IEEE e a IEC criaram índices e padrões que permitem mesurar a QEE. Segundo Moreno-Muñoz (2007), a energia elétrica é um produto, e como todo produto industrializado, ela deve se manter dentro de padrões de qualidade. A qualidade da energia como um produto é um pouco mais

complexa comparando-se com outros produtos, uma vez que a energia é consumida no mesmo instante que é produzida. No Brasil, a forma encontrada de se melhorar o interesse da qualidade de energia para que ela comece a ser tratada como um produto veio por meio da privatização das empresas geradoras de energia (COSTA, 2006).

A principal motivação para estudar a QEE é entregar uma energia padronizada para o consumidor, que permita o funcionamento normal dos equipamentos conectados na rede. A energia elétrica hoje em dia tem uma importância tão grande que é usada até mesmo como parâmetro para a determinação da qualidade de vida de uma população. Toda a demanda de energia deve ser suprida dentro dos padrões para funcionamento dos equipamentos, que apresentam um requerimento de qualidade diferente um dos outros, que será explicado na próxima seção.

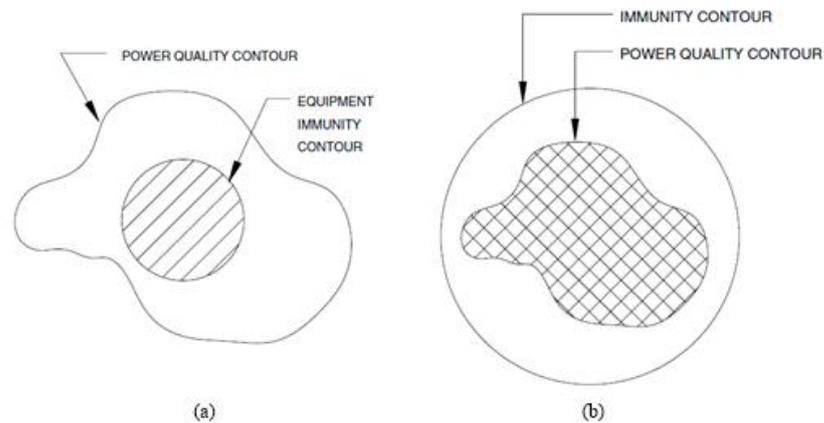
O sistema elétrico está ampliando e se tornando cada vez mais complexo, então as preocupações com a qualidade da energia estão crescendo nas mesmas proporções, e se tornando um novo desafio para o campo da elétrica (CHATTOPADHYAY, MADHUCHHANDA e SAMARJIT, 2011). Sistemas complexos dificultam o controle da qualidade da energia e o processo de identificação da fonte de problema, normalmente necessária para a proposta de soluções. Por conta da complexidade do sistema, medir e controlar a qualidade de energia dentro dos índices definidos nas normas não é uma tarefa simples. Além disso, a qualidade de energia tem sido cada dia mais importante desde a inserção da eletrônica no mercado. Os dispositivos eletrônicos estão amplamente difundidos no mercado acoplados às máquinas elétricas (como por exemplo, em controle e/ou controladores de velocidade), e dispositivos como computadores e celulares, são mais sensíveis a pequenas variações na energia (SANKARAN, 2002). Os dispositivos eletrônicos como os controladores permitem um desempenho muito melhor de máquinas elétricas, e isso cria uma necessidade de reduzir a variação da energia entregue ao consumidor, o que significa aumentar a qualidade de energia.

Zhu, Hu, *et al.* (2008) afirmam que o mercado competitivo da geração de energia é outro fator que aumenta a necessidade da produção de uma energia com qualidade. A competição faz com que haja uma comparação entre a qualidade dos serviços oferecidos por diferentes empresas de energia, o que pode vir a causar futuros problemas de mercado caso a empresa não ofereça o melhor serviço possível.

Para explicar os objetivos dos estudos de qualidade de energia, Sankaran (2002) propõe o traçado de dois contornos: o contorno de imunidade do equipamento e a camada de qualidade de energia. A imunidade de um equipamento é dada pela capacidade dele funcionar

no local em que está instalado. Um equipamento irá funcionar sem problemas quando o contorno de imunidade for maior do que a camada de qualidade de energia. Isso significa que as exigências em qualidade de energia de um equipamento devem ser todas satisfeitas pela qualidade da energia entregue pela rede, como é o caso da Figura 5 (b), onde mostra que o equipamento é imune à qualidade de energia. No caso da Figura 5 (a), o equipamento pode ou não funcionar, pois as exigências do equipamento são maiores do que a qualidade de energia entregue, o que caracteriza que o equipamento é suscetível à qualidade de energia. Nessa situação pode haver o não funcionamento, o mal funcionamento ou até mesmo a danificação do equipamento conectado à rede.

Assim, os objetivos da qualidade de energia são reduzir o contorno de qualidade de energia, o que significa manter a energia o mais próximo possível dos padrões de qualidade estipulados, ou aumentar a imunidade dos equipamentos à qualidade, que significa aumentar a tolerância dos equipamentos. Porém, isso se torna cada vez mais difícil, devido atualmente à alta inserção dos dispositivos eletrônicos conectados à rede. Então torna-se importante a criação de um balanço entre a qualidade da energia entregue e a imunidade dos equipamentos conectados à rede (SANKARAN, 2002).

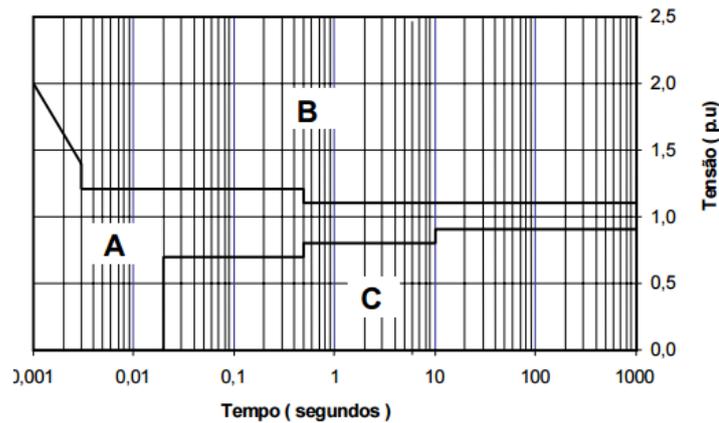


Fonte: Shankaran, 2002, p. 25

FIGURA 8 - Ilustração do critério de imunidade ou susceptibilidade do equipamento

Uma das formas de utilização desse contorno de imunidade é a Curva Associação dos Fabricantes de Equipamentos de Computação (CBEMA). Essa curva, ilustrada na Figura 9, mostra a linha de tolerância para os equipamentos (LEBORGNE, 2003).

A curva define no plano tensão vs tempo duas áreas: uma área superior onde se encontram os eventos que não devem sensibilizar os equipamentos e, uma área inferior onde se encontram os eventos que podem afetar o funcionamento normal dos equipamentos sendo que os mesmos devem desligar-se de forma controlada (LEBORGNE, 2003, p.13)



Fonte: Leborgne (2003, p.13)

FIGURA 9 - Curva CBEMA de tolerância de 2000

A qualidade de energia pode ser dividida entre dois grupos: a qualidade da tensão, que implica todas as características técnicas da energia e como ela se afasta dos parâmetros; e a continuidade de suplemento, que implica as possíveis interrupções durante um período (MORENO-MUÑOZ, 2007). Esse trabalho irá focar na qualidade de tensão, que é uma das principais variações causadas pelos distúrbios de baixa frequência, como será visto mais a frente.

2.2.1 Normatização da qualidade de energia no Brasil

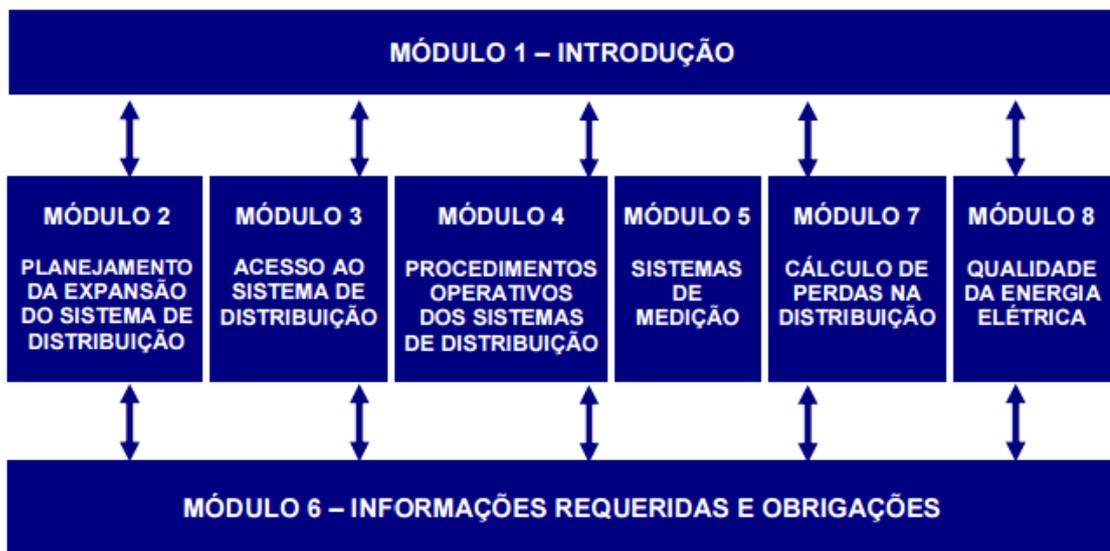
No Brasil, a ANEEL estipulou em 2008 os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que são documentos compostos de normas e procedimentos para a padronização do funcionamento e desempenho do sistema elétrico nacional. O PRODIST apresenta objetivos que incluem

- a) garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;
- b) propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- c) disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica;
- d) estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais;
- e) assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL;
- f) disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede. (ANEEL, 2008a, p. 3)

A Figura 10 mostra a divisão do PRODIST, composta por uma variedade de Módulos, cada um com seus objetivos específicos e definição de procedimentos para atividades

específicas dentro do setor elétrico brasileiro. O documento é dividido em seis módulos técnicos e dois módulos integradores. A norma válida para a qualidade de energia é o Módulo 8 do PRODIST, que rege as normas sobre a qualidade da energia elétrica.

O módulo 8 do PRODIST tem os objetivos específicos de estabelecer procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, definir e caracterizar fenômenos, parâmetros e valores da qualidade do produto e serviços prestados (ANEEL, 2008b). Esse módulo é dividido em quatro partes principais: Introdução, Qualidade do Produto, Qualidade do Serviço e Disposições Transitórias. Será apresentada uma breve descrição da Seção 8.1 do Módulo 8, que trata da definição de qualidade do produto, estabelecimento de parâmetros e referências da tensão em regime permanente, uma vez os objetivos desse trabalho focam na qualidade da tensão.



Fonte: ANEEL, 2008a, p. 6

FIGURA 10 - Divisão dos módulos do PRODIST

Levando a tensão em consideração, o Módulo 8 trata de normas para verificar a conformidade da tensão elétrica, que se refere à comparação da tensão apropriadamente medida com os valores de referência considerados adequados, precários e críticos, que são baseados na disparidade do valor medido com o valor de referência. A norma também estabelece que a medição deva ter no mínimo 16 medições por ciclo, com um conversor analógico/digital de 12 bits e precisão de até 1% da leitura. Os valores considerados adequados correspondem a 0,9 pu do valor nominal de tensão na rede de distribuição, dependendo do tipo de variação de tensão que é encontrado. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) também apresentou um documento intitulado Procedimentos de Rede, que

complementa as informações do PRODIST. Segundo o ONS (2004), para evitar o desligamento com a rede, uma usina deve operar com a tensão em valores entre 0,9 e 1,1 pu do valor nominal, sem a atuação de relés temporizados. Após a queda de tensão, a tensão deverá voltar aos valores nominais em até 5 segundos, sendo permitida a operação entre 0,85 e 0,9 pu durante esses 5 segundos.

2.3 Qualidade da energia em usinas eólicas

Os problemas com qualidade de energia em usinas eólicas podem ser decorrentes de diversas causas, mas os aspectos mais importantes que tem influência nisso são a tecnologia de energia eólica, condições da rede, topologia do parque eólico e características do fluxo de vento no local (WU, CHANG e WANG, 2013). O propósito da avaliação da qualidade de energia do presente trabalho é garantir que a rede de distribuição apresente tensões adequadas nas barras do sistema, principalmente no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) da usina, onde uma tensão abaixo dos patamares estabelecidos nos procedimentos de rede do ONS implicaria no desligamento da usina.

A injeção de energia eólica em um sistema de potência também pode afetar a magnitude da tensão. Devido a flutuações de vento e à natureza indutiva dos geradores mais usados para a produção de energia eólica, o elevado uso de energia eólica desenvolve alguns problemas comumente observados em usinas eólicas como flutuações de tensão, *flicker* e harmônicos (WU, CHANG e WANG, 2013).

A transformação da energia presente no vento em eletricidade não é simples devido, principalmente, às contínuas variações na velocidade do vento. Porém a tensão de saída de uma usina eólica não é afetada apenas pelas variações na velocidade do vento, mas também pelas variações de carga que ocorrem frequentemente durante o passar do tempo (MULJADI, BUTTERFIELD, *et al.*, 2006). Para extrair a maior quantidade de energia possível do vento, um grande número das novas turbinas estão sendo equipadas com um controle chamado rastreamento do ponto de potência máxima (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT), que usa variações dos ângulos das pás e torque da turbina para mudar a velocidade do rotor e produzir a potência nominal. Essa técnica é extremamente útil para elevar a eficiência das turbinas eólicas, mas o seu uso pode produzir mais variações de tensão no sistema (ABRANTES, 2012).

As variações na velocidade do vento, como previamente citado, podem causar flutuações na tensão. Porém, outro problema causado por essas variações pode ser o *flicker*, que é um distúrbio muito comum que causa variações na tensão suficientes para causar variações na frequência perceptíveis ao olho humano, normalmente entre 10-35 Hz (ABRANTES, 2012), (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000), (CHATTOPADHYAY, MADHUCHHANDA e SAMARJIT, 2011), (MORENO-MUÑOZ, 2007).

O uso de geradores de indução também podem causar modificações na tensão de saída, principalmente considerando a frequência (ABRANTES, 2012). Os problemas relatados com harmônicos na saída de turbinas eólicas podem ser relacionados com o uso de geradores de indução, uma vez que eles necessitam utilização de potência reativa para a excitação do gerador. No caso de ocorrer uma falta na rede, o gerador talvez se auto excite, causando mudanças da tensão e frequência da tensão entregue. É comum o uso de bancos de capacitores para produzir a potência reativa necessária para a excitação da máquina. Quando acionados, esses capacitores podem causar transientes de tensão na rede (MULJADI, BUTTERFIELD, *et al.*, 2006).

Outro problema relacionado à qualidade de energia em usinas eólicas é a distorção na forma de onda, que é a mudança na forma de onda causada pela presença de harmônicos no sistema. Esses distúrbios podem causar redução no tempo de vida dos equipamentos conectados à rede, mal funcionamento de equipamentos sensíveis, perdas de potência, aquecimento no núcleo de transformadores, entre outros (ABRANTES, 2012).

Estudos mostram a necessidade de um banco de capacitores para compensação de potência reativa em usinas eólicas, para reduzir os efeitos de uma má qualidade, principalmente considerando variações de tensão. Outra possível solução para esse problema seria a introdução de dispositivos de estocagem de energia, como baterias. Alguns autores citam o uso de STATCOM nos PACs, para obter as medições das tensões do sistema (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000).

A avaliação da qualidade de energia em usinas eólicas deve ser feita pela comparação da medição feita nas usinas e os dados contidos nas normas usadas para os padrões de qualidade, já citados anteriormente. Para as usinas eólicas, a norma brasileira é o PRODIST Módulo 8 e os procedimentos de rede do ONS, que mostram definições, padrões e procedimentos para análise de potência ativa e reativa, tensão, corrente, coeficiente de *flicker*, harmônicos entre outros.

2.4 Classificação da qualidade da energia

Baseado na norma IEC 61000-2-5, Arrigala, Watson e Chen (2000) classificam o fenômeno de qualidade de energia em três categorias:

- a) Fenômeno de baixa frequência: consiste em distúrbios com valores menores que 9kHz;
- b) Fenômeno de alta frequência: consiste em distúrbios com valores maiores que 9kHz;
- c) Fenômeno de descarga eletrostática (EDS).

Pode-se definir distúrbio como sendo uma variação temporária na forma de onda e amplitude da tensão em estado estacionário, sendo um evento de curto tempo (MINDYKOWSKI, 2003). Como esse trabalho pretende focar em distúrbios de baixa frequência, as próximas seções irão introduzir e aprofundar o assunto. Os casos mais comuns de distúrbios de baixa frequência envolvem harmônicos e intra-harmônicos, flutuações de tensão, quedas de tensão e interrupções, desequilíbrio de tensão, variações de frequência da tensão, indução de tensões de baixa frequência, corrente contínua em redes de corrente alternada, e campos elétricos e magnéticos (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000).

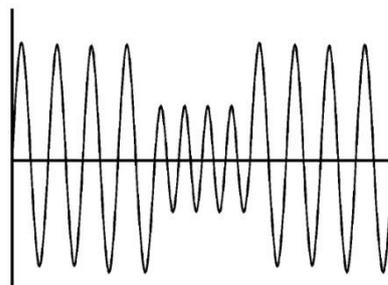
Distúrbios de baixa frequência são observados como sendo mudanças transitórias no sinal senoidal com uma duração de meio ciclo até menos de um minuto (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000). Existem três alterações principais no fornecimento de tensão causado por distúrbios de baixa frequência que serão analisados nesse trabalho: sub tensão momentânea, sobre tensão momentânea e interrupção. Esses três distúrbios serão estudados mais profundamente nas próximas seções, com o objetivo de se ter um conhecimento no assunto e entender as causas e efeitos dos mesmos, e a sua importância no estudo da qualidade de energia.

2.4.1 Subtensão momentânea

Subtensões momentâneas, ou afundamentos de tensão, são quedas incomuns na tensão, com duração de meio ciclo a alguns segundos (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000), (SANKARAN, 2002). Essas reduções são normalmente entre 10% e 90% do valor

nominal. A Figura 11 mostra um caso comum do fenômeno de afundamento de tensão, ilustrando a sua definição.

As causas de afundamento são normalmente relacionadas com a presença de cargas que consomem altas correntes, como por exemplo, no acionamento de grandes motores elétricos ou de fornos com aquecimento à resistência (SANKARAN, 2002). Essa alta corrente causa quedas na tensão, como uma tentativa de manter o equilíbrio do sistema ao entregar uma potência constante. Outras causas de subtensão envolvem correntes de falta e troca de modo de operação.

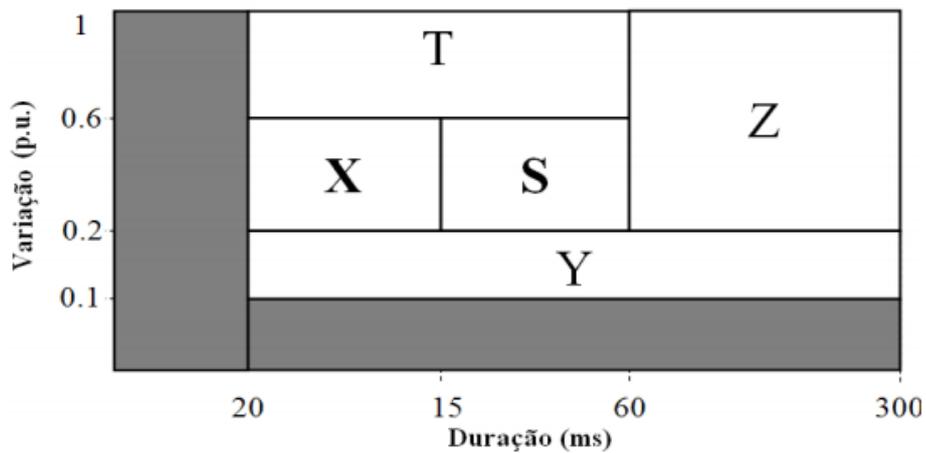


Fonte: Mindykowski, 2003, p. 553

FIGURA 11 - Exemplo do fenômeno de subtensão

Dependendo da porcentagem da queda de tensão (ou o quanto a tensão diminuiu em relação ao padrão) e da duração da falta, alguns equipamentos talvez sejam afetados pelo distúrbio. Arrigala, Watson e Chen (2000) afirmam que até a data de sua publicação, cerca de 40% das quedas de tensão excederam a tolerância estipulada nos padrões de qualidade de energia exigidos por fabricantes de computadores, os prejudicando de alguma forma. Os possíveis efeitos de subtensões momentâneas são extinção das lâmpadas de descarga; operação incorreta dos dispositivos de controle; variação de velocidade ou a paragem dos motores; acionamento de contactores; falha de sistemas de computadores; ou falha de comunicação em inversores comutados de linha. (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000).

É possível classificar os afundamentos de tensão que podem ocorrer na rede de acordo com a Figura 12 (RAMOS, 2009). A Tabela 2 mostra o número aceitável de afundamentos de tensão por ano, de acordo com a sua classificação.



Fonte: Ramos, 2009, p.69

FIGURA 12 - Classificação dos afundamentos de tensão relativos à duração e à variação em relação ao valor nominal

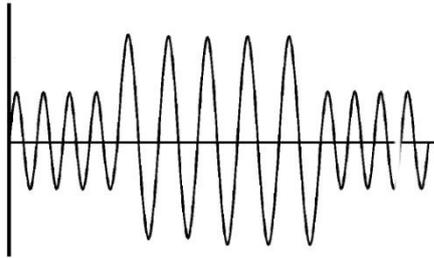
TABELA 2: Limite do número de afundamentos de tensão aceitáveis anual por categoria

Número de afundamentos de tensão por ano					
Faixa de tensão [kV]	Categoria dos afundamentos de tensão				
	Z	T	S	X	Y
6,6 < 44 (rural)	49	54	69	215	314
6,6 < 44 (urbano)	20	30	30	100	150
44 < 132 (urbano)	16	25	25	80	120
220 < 765 (urbano)	5	6	11	45	88

Fonte: Ramos, 2009, p.69

2.4.2 Sobretensão momentânea

A Figura 13 mostra a variação de tensão que descreve uma sobretensão momentânea. Como é possível ver, esse fenômeno trata-se de breves aumentos na tensão que talvez apareçam após um curto circuito ou após rejeição de carga (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000). Incrementando à isso, Chattopadhyay, Madhuchhanda e Samarjit (2011) descrevem a causa mais comum de sobretensão como sendo o desligamento de uma carga muito grande, o que gera a energização do banco de capacitores causando uma sobre tensão momentânea.



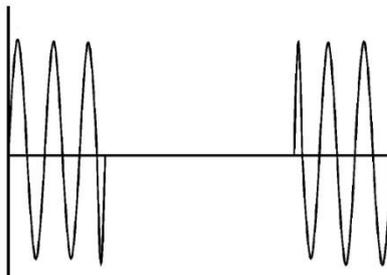
Fonte: Mindykowski, 2003, p. 553

FIGURA 13 - Exemplo de uma sobretensão momentânea

Essa sobre tensão momentânea pode causar algum estrago na rede e no equipamento conectado à ela, causando mal funcionamento de equipamentos de baixa tensão, acionamentos de motores, a interruptibilidade do fornecimento de tensão e mal funcionamento de medição e controle de equipamentos (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000).

2.4.3 Interrupção

Interrupções, como o próprio nome sugere, são breves momentos onde a tensão se apresenta com menos de 10% do seu valor nominal (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000). A Figura 14 mostra um exemplo de interrupção de tensão.



Fonte: Mindykowski, 2003, p. 553

FIGURA 14 - Exemplo de interrupção de tensão

Essas interrupções podem ocorrer por uma série de eventos, mas os mais comuns são falha em equipamentos, mal funcionamento do controle da rede, fusíveis queimados e abertura de disjuntores (CHATTOPADHYAY, MADHUCHHANDA e SAMARJIT , 2011). As consequências das interrupções podem envolver um alto custo, principalmente para as indústrias que dependem do fornecimento de energia, como por exemplo indústrias de vidro

ou centros de computadores. Normalmente a proteção para esses distúrbios envolve fontes de energia ininterruptas (ARRIGALA, WATSON e CHEN, 2000).

2.5 Soluções para qualidade da energia

Os problemas com a qualidade de energia que serão estudados neste trabalho são comuns nas redes de distribuição quando se é trabalhado com inserção de energia eólica, por ser uma fonte de energia não armazenável e não linear, além de ser uma fonte relativamente nova de energia elétrica, com carência de desenvolvimento tecnológico. Porém, como a energia é um produto que será consumido, ela deve seguir padrões de qualidade estabelecidos pela rede de distribuição (COSTA, 2006).

As possíveis fontes da instabilidade do sistema são (KUNDUR, 1994):

- a) carga na linha elevada;
- b) fontes de tensão muito longe dos centros de carga;
- c) fontes de tensão com o valor muito baixo; e
- d) compensação de potência reativa insuficiente.

De uma forma geral, pode-se dizer que a instabilidade da tensão de um sistema de potência é causada pela incapacidade do sistema de suprir a potência reativa. Kundur (1994) ainda complementa que a estabilidade da tensão do sistema depende da transferência tanto de potência ativa quanto potência reativa, e a relação entre elas.

Alguns autores citam dispositivos de compensação como sendo uma forma simples e eficiente de correção da qualidade de energia (KUNDUR, 1994) (CHATTOPADHYAY, MADHUCHHANDA e SAMARJIT, 2011) (SANKARAN, 2002) (PADIYAR, 2007). As formas mais comuns de controle da tensão e ângulo de fase de redes de distribuição incluem o uso de capacitores em paralelo, e de sistemas de transmissão flexíveis de corrente alternada (*Flexible AC Transmission Systems - FACTS*). Esses dispositivos fazem uso de eletrônica de potência para controlar redes de transmissão e aumentar a potência transferida por ela, proporcionando o controle de um ou mais parâmetros do sistema (PADIYAR, 2007).

Padiyar (2007) classifica os FACTS em dois grupos principais: os do tipo de impedância variável e os do tipo de fontes conversoras de tensão (*Voltage Source Converter - VSC*). O estudo será focado nos VSC pelo fato de alguns autores como Abrantes (2012), Arulampalam, Barnes, *et al.* (2006), Ise, Hayashi e Tsuji (2000) e Kulkarni e Mucha (2014)

concordarem que uma das possíveis soluções para problemas em qualidade de energia de usinas eólicas pode ser o uso de um STATCOM, junto com um sistema híbrido de baterias (BESS).

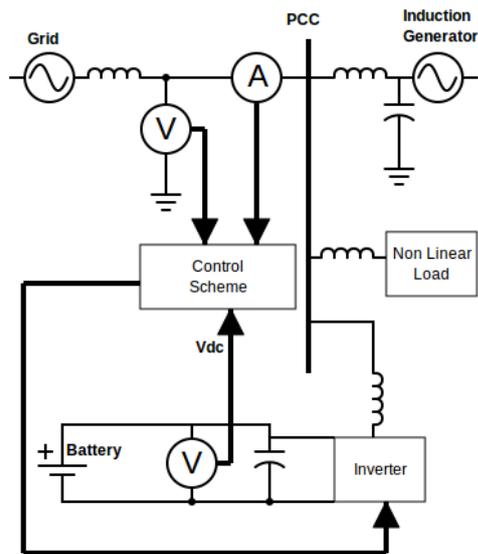
O STATCOM é um dispositivo que se encaixa na classificação de VSC dos FACTS. As vantagens mais conhecidas do uso de VSC estão no fato de serem dispositivos mais compactos, tecnicamente superiores, e de poderem fornecer potência ativa quando conectada a fontes de energia. A maior desvantagem do uso desses equipamentos é o uso de dispositivos de chaveamento como GTO, IGBT, IGTC, conhecidos por apresentarem grandes perdas no seu funcionamento (PADIYAR, 2007).

O STATCOM é um dispositivo que gera e consome potência reativa em regime permanente, que pode ser usado para regular a tensão na barra que está acoplado (PADIYAR, 2007), (KULKARNI e MUCHA , 2014). É um dispositivo de potência reativa conectado em paralelo com a linha, que irá calcular através de um controlador a quantidade correta de potência reativa a ser injetada ou consumida a fim de se deixar a tensão da linha dentro dos padrões requeridos pelo sistema. É descrito como um dos dispositivos mais rápidos para resolver problemas relacionados à qualidade de energia e estabilidade de sistemas de potência quando há presença de parques eólicos. Apesar de antigamente os STATCOMs terem sido utilizados para corrigir problemas de distorção e potência reativa, as novas tecnologias que acoplam esses STATCOMs a BESS permitem o dispositivo a aumentar a gama de problemas que podem ser solucionados com sua instalação, sendo um dispositivo de solução geral para uma usina eólica (ARULAMPALAM, BARNES, *et al.*, 2006).

A Figura 15 mostra um esquema de um STATCOM com BESS. O sistema é composto basicamente de três componentes (KULKARNI e MUCHA , 2014):

- a) Um VSC para potência AC, representada pela fonte de tensão;
- b) Um acoplamento de reatores ou um transformador de *set-up*; e
- c) Um controlador.

O princípio de operação de um STATCOM envolve o funcionamento de uma fonte de tensão conectada em paralelo com o sistema no PAC, onde existe o interesse para melhoramento da QEE. A tensão e corrente da linha alimentam o controlador, que analisa o sinal e dá um *feedback* configurando o sinal de correção que deve ser gerado ou absorvido pelo STATCOM.



Fonte: Abrantes, 2012, p.3

FIGURA 15 - Esquema de controle usando um STATCOM com BESS

Quando utilizando o STATCOM, ele será colocado em paralelo no PAC, e isso possibilita o trabalho em diferentes funções, como (KULKARNI e MUCHA , 2014):

- a) Regulação de tensão;
- b) Correção do fator de potência de uma carga em particular; ou
- c) Correção do fator de potência e balanço de carga e/ou compensação harmônica de uma carga em particular.

Existem duas maneiras de se melhorar a qualidade da energia, e isso envolve condicionamento de carga, que assegura que o equipamento seja menos sensível à distúrbios na potência, ou condicionamento de linha, onde o sistema suprime os distúrbios de potência ocorridos (KULKARNI e MUCHA , 2014). Esse é o princípio citado por Sankaran (2002) sobre os critérios de imunidade ou susceptibilidade. O uso do STATCOM lida com o condicionamento de linha, onde a queda na QEE é suprida pelo dispositivo. Nesse caso, o uso de um bom controlador é essencial, uma vez que é o responsável por medir o sinal e calcular o sinal apropriado para ser injetado ou absorvido para a correção da potência. Após a medição e os cálculos o STATCOM injeta ou absorve corrente na barra para manter as ondas tanto de corrente quanto de tensão dentro dos padrões requeridos, e proporcionar um suporte de potência reativa para a rede (PADIYAR, 2007).

Quando acoplado o BESS ao sistema, as vantagens para o melhoramento da qualidade de energia incluem a correção de subtensões momentâneas, e suporte de potência em caso de faltas (ABRANTES, 2012), (ARULAMPALAM, BARNES, *et al.*, 2006). O BESS melhora a qualidade de energia do sistema através do aumento da margem de estabilidade, absorvendo e

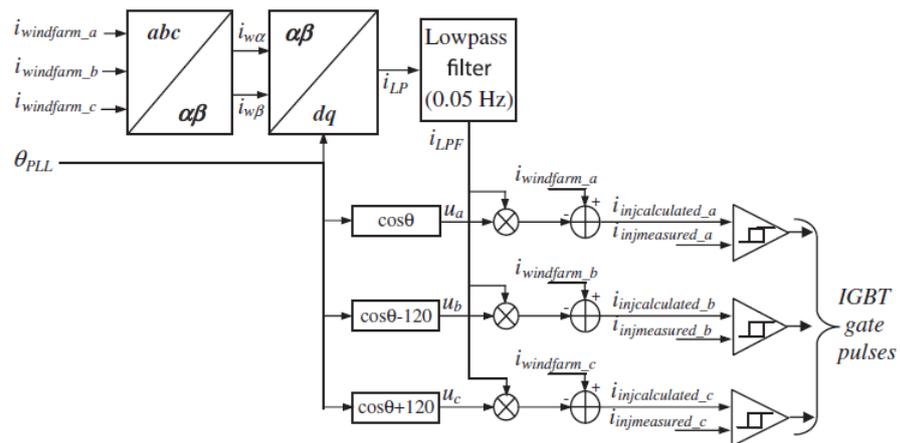
emitindo potência ativa. Além disso, o uso de baterias pode diminuir as perdas (ARULAMPALAM, BARNES, *et al.*, 2006). A adição de um dispositivo de armazenamento como o BESS é citado por Ise, Hayashi e Tsuji, (2000), que discutiram que apesar de ser um ótimo dispositivo de melhoramento de qualidade de energia, o STATCOM sozinho não é capaz de compensar grandes subtensões. No mesmo artigo, é feita uma comparação com o uso de um dispositivo de restauração dinâmica de tensão (DVR) e é concluído que para aquele sistema o uso de um STATCOM com BESS apresentava mais vantagens para o sistema.

As vantagens do uso desse sistema incluem a compensação capacitiva e indutiva muito rápida e o controle independente da corrente de saída, desconsiderando a tensão do sistema. Esse sistema também pode melhorar a performance do sistema em termos de (KULKARNI e MUCHA, 2014):

- a) Controle dinâmico de tensão;
- b) Amortecimento de oscilação;
- c) Estabilidade transitória;
- d) Efeitos de *flicker*;
- e) Controle de potência reativa e, como já citado, de potência ativa quando acoplado com um BESS.

Em adição ao uso do sistema STATCOM com o BESS, Arulampalam, Barnes, *et al.* (2006) sugerem o uso de um banco de capacitores para melhorar a qualidade de energia em usinas eólicas. Isso corrige o fator de potência através do aumento do suporte de potência reativa, e diminuindo as perdas do sistema. No mesmo trabalho apresentam-se resultados de simulações usando o STATCOM com BESS controlado por corrente, com reduções no tempo de resposta do sistema. A Figura 16 mostra o esquema usado em diagrama de blocos. O resultado mostraram que o STATCOM com BESS injeta potência ativa e completa a potência reativa absorvida pelas turbinas eólicas e pelo banco de capacitores.

Como citado anteriormente, há muitas vantagens do uso do sistema do STATCOM com BESS para melhorar a qualidade de energia em usinas eólicas, sugerida por muitos autores. Os experimentos feitos nesse campo mostram que apesar de ser uma nova tecnologia, o seu uso está presente em várias respostas positivas e melhoramentos da potência entregue para o consumidor final. O suporte teórico demonstrado nessa seção apresenta uma boa solução para os problemas gerados nas simulações desse trabalho, e valida o uso do sistema de STATCOM com BESS como um bom melhorador da qualidade de energia de sistemas eólicos.



Fonte: Arulampalam, Barnes, *et al.*, 2006, p.705

FIGURA 16: Diagrama de Blocos do STATCOM com BESS para controle de qualidade de energia

2.6 O software: Matlab/Simulink

A simulação deste trabalho foi feita usando o *software* Matlab e sua ferramenta SimPowerSystems do Simulink. Esse *software* é uma ferramenta que vem ganhando espaço nas simulações de sistemas elétricos de potência, por ser um programa preciso e com uma grande gama de opções para simulação, apresentando sua linguagem de alto nível em um ambiente interativo. Usando o Matlab é possível simular desde pequenas máquinas até grandes e complexos sistemas. A escolha pelo Matlab e Simulink baseou-se na sua confiabilidade, precisão e facilidade de programação comparada com outros *softwares* disponíveis.

O Simulink é um produto adicionado ao pacote Matlab que permite o usuário desenvolver, simular e analisar sistemas dinâmicos usando uma interface gráfica amigável e interativa de diagrama de blocos. Sua biblioteca apresenta uma grande variedade de blocos pré-construídos que podem ser combinados para produzir o sistema necessário para a simulação. A Figura 17 mostra a interface inicial do Simulink, onde a biblioteca com os blocos mais usados é mostrada. O programa suporta sistemas lineares e não-lineares, modelados em tempo contínuo, discreto, ou um híbrido dos dois. Essa ferramenta permite o usuário trocar os parâmetros e obter a resposta do sistema, o que possibilita a análise de vários cenários para a mesma simulação estudada.

A base das simulações nesse programa é construída montando os blocos contidos nessa biblioteca da Figura 17, conectando os mesmos e alterando seus parâmetros para os parâmetros desejados. É uma ferramenta simples e muito útil, e o passo a passo da simulação usada nesse trabalho será detalhada nas próximas seções.

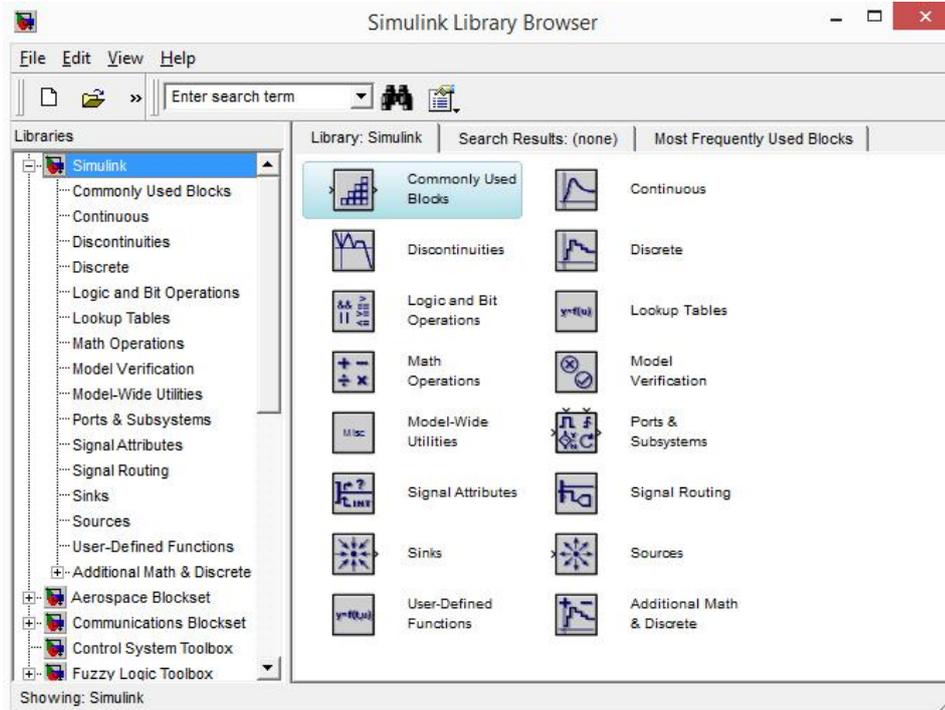


FIGURA 17 - Interface inicial do Simulink, mostrando a biblioteca dos blocos.

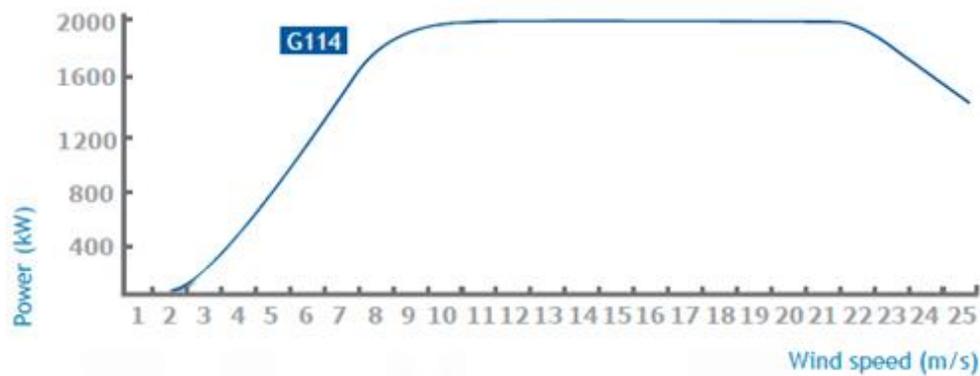
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As simulações realizadas no presente trabalho foram executadas em duas etapas. Primeiramente foram simulados cenários que envolvem variações na rede, para a verificação das consequências da qualidade da energia nas usinas eólicas. A segunda etapa envolve a simulação dos cenários nos quais houve consequências negativas, porém com o uso do STATCOM como dispositivo de compensação. As próximas seções apresentam o desenvolvimento detalhado dos procedimentos experimentais, detalhando o software e os métodos e parâmetros utilizados nas simulações.

3.1 Parâmetros usados na simulação

Para começar a simulação, é necessária a definição dos parâmetros da usina eólica a ser simulada. A usina eólica simulada deve conter algumas características que permitam a mais precisa representação de uma usina real. Primeiro, os aspectos da pesquisa de vento como média da velocidade de vento, densidade do ar e turbulência devem ser consideradas, levando em conta a localização geográfica da usina. A turbina eólica e o gerador também devem ser levados em consideração, e as características de potência ativa e reativa da usina eólica (MULJADI, BUTTERFIELD, *et al.*, 2006).

O gerador DFIG foi escolhido como a máquina elétrica dessa turbina, por ser o mais usado em turbinas eólicas hoje em dia, por ser capaz de funcionar com uma entrada variada de velocidade do vento, aumentando a energia capturada do vento. Como o objetivo dos estudos é analisar a os efeitos da qualidade da energia em usinas eólicas focando em distúrbios de baixa frequência, foi decidido simular usando as características da usina eólica de Coxilha Seca, que faz parte do complexo eólico Cerro Chato, situada no Rio Grande do Sul, na cidade de Santana do Livramento. Essa usina contém 4 turbinas de 2 MW, totalizando 8 MW de potência (ELETROBRÁS - ELETROSUL, 2014). A Tabela 3 contém as informações principais sobre o grupo turbina-gerador, com os valores usados para a simulação, retirados do *datasheet* da turbina G114 da Gamesa (GAMESA, 2012), usada na Usina de Coxilha Seca. A Figura 18 mostra a curva de potência da turbina apresentada.



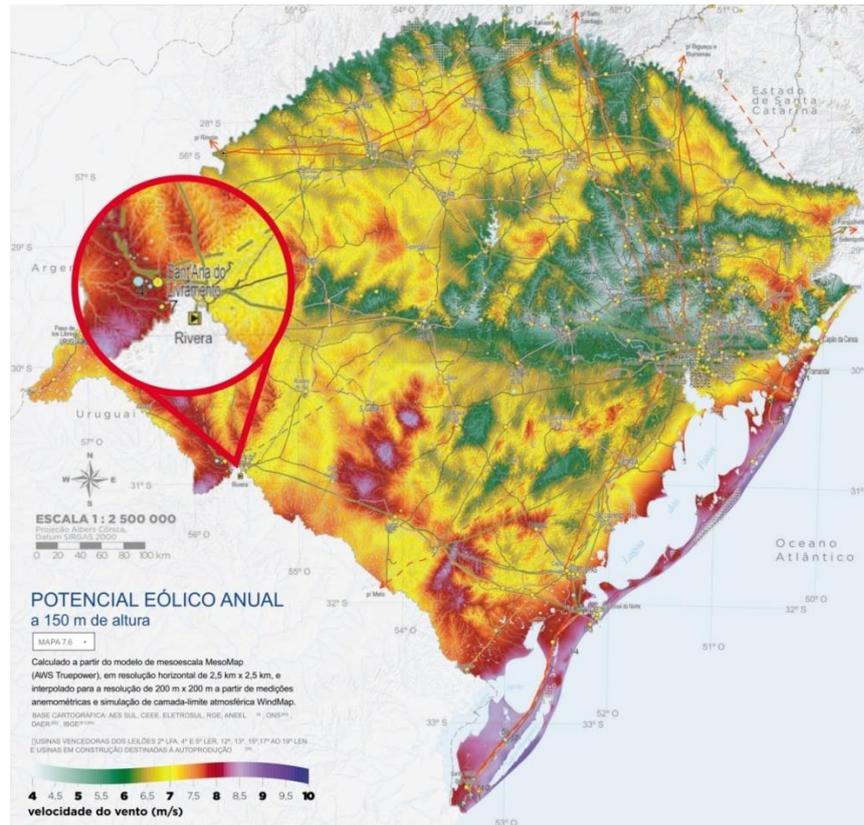
Fonte: Gamesa, 2012, p.2
 FIGURA 18 - Curva de Potência da Turbina G114 Gamesa

TABELA 3: Parâmetros do grupo turbina-gerador

Potência Nominal	2 MW
Classificação do Vento	IIIA
Diâmetro do Rotor	114 m
Área de Secção Transversal	10307 m ²
Densidade de Potência	195,34 W/m ²
Controle	Pitch e velocidade variável
Caixa de Câmbio	3 estágios
Frequência	50/60 Hz
Altura da turbina	140 m

Fonte: Gamesa, 2012, p.2

Os aspectos da entrada de vento foram coletadas do Atlas Eólico: Rio Grande do Sul (CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS, ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS S.A, 2014). A Figura 19 mostra os valores médios anuais das velocidades de vento na altura de 150 metros. Essa altura foi escolhida por ser muito próxima da altura da turbina, que é mostrada na Tabela 3 como sendo 140 metros.



Fonte: Camargo Schubert Engenheiros Associados, Eletrosul Centrais Elétricas S.A, 2014, p. 77
 FIGURA 19 - Mapa Eólico do Rio Grande do Sul, com foco na área da cidade de Santana do Livramento

É possível reparar que a média anual para a cidade de Santana do Livramento, em destaque na Figura 19, está entre os valores de 7,5 a 8,0 m/s. Para fins de arredondamento usaremos o valor de 8 m/s para uma altura de 150 m. O Mapa Eólico do Rio Grande do Sul (2014) mostra o perfil de rugosidade da superfície para a região, sendo aproximadamente 0,6 m. A partir desse valor, é possível, usando (2), extrapolar o valor da velocidade do vento para a altura de 140 m, que é a altura de instalação da turbina. Para tanto, o cálculo obteve poucas variações, apresentando um valor de 7,9 m/s. Por fins de arredondamento, foi decidido o uso do valor de 8 m/s para a altura de colocação da turbina.

3.2 Simulação

Nessa seção estão descritos os procedimentos efetuados para a simulação de diferentes cenários de uma rede contendo uma usina eólica, linhas de transmissão, transformadores de potência e cargas variadas. A primeira parte para análise de uma rede sem dispositivos de

compensação, e a segunda parte com a presença de um dispositivo de compensação. Em todas as simulações, o tempo utilizado para as mesmas é suficiente para avaliar os cenários, porém, para um tempo maior de simulação com uma ampliação na área de interesse, os resultados seriam mais bem avaliados. Tal simulação não foi feita por motivos da duração do tempo de simulação ser muito elevada, e não suportados pelos computadores disponíveis.

3.2.1 Parte 1

Pelo fato da construção de um modelo de turbina eólica demandar um tempo muito longo, optou-se pela utilização do modelo de turbina eólica pré-estabelecido pelo SimPowerSystems/Simulink. Para obter melhores resultados, e representar de maneira mais exata uma usina eólica conectada à rede, realizou-se uma pesquisa na biblioteca do SimPowerSystems, e o modelo mostrado na Figura 20 foi escolhido para essa simulação por representar uma usina eólica com linhas de transmissão de uma maneira detalhada. O modelo foi modificado com os parâmetros apresentados na Tabela 3, para representar a usina eólica selecionada.

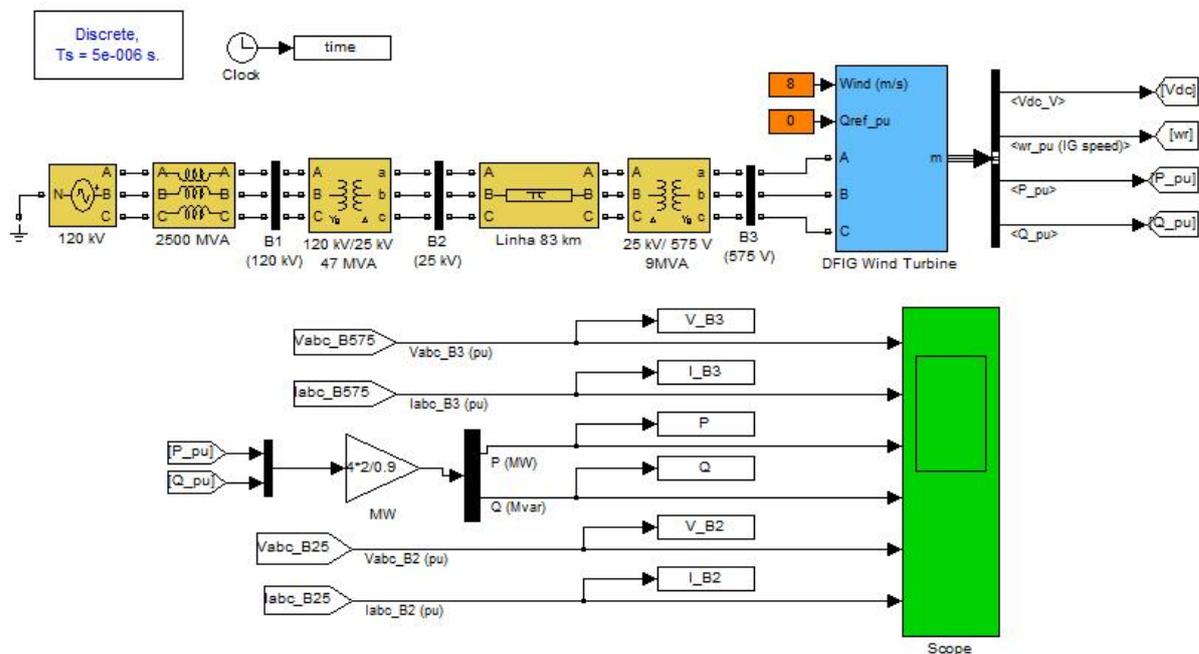


FIGURA 20 - Modelo detalhado de Usina Eólica com DFIG

A Figura 21 representa uma usina eólica com posta por 4 geradores DFIG, de 2 MW cada, e um conversor PWM AC/DC/AC, chaveado com IGBTs. A Figura 21 mostra os detalhes do gerador DFIG, que é constituído não somente pelo gerador, mas também pelo sistema de controle da turbina, *drivetrain*, a turbina propriamente dita, o conversor de potência e um filtro.

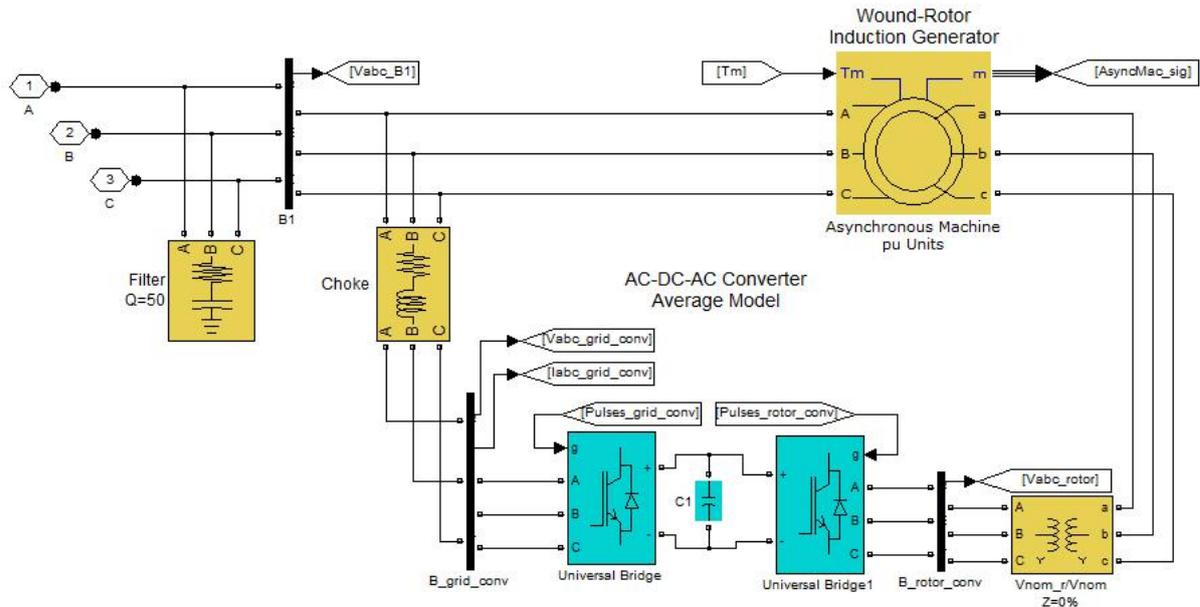


FIGURA 21 - Modelo detalhado de um gerador DFIG em uma Turbina Eólica

3.2.1.1 Resposta obtida para uma falta na rede

Para a primeira parte da simulação, uma falta remota foi programada para acontecer no tempo $t=0,23s$. Isso foi ajustado no bloco de 120kV, programando uma falta com uma queda de tensão de 0,5 pu durante 6 ciclos, o que a uma frequência de 60 Hz corresponde a um tempo de 0,1s (do tempo $t=0,23s$ até o tempo $t=0,33s$). Assim, o comportamento dinâmico pode ser analisado quando acontece uma falta na rede.

3.2.1.2 Resposta obtida para variações de vento

Nessa seção, o objetivo é a análise da variação do vento e como isso afeta o funcionamento da usina eólica. Então, a falta foi desconsiderada e uma variação na velocidade de entrada nas turbinas foi feita. Diferente do cenário anterior, o vento não será constante. A Figura 22 mostra o diagrama usado na simulação.

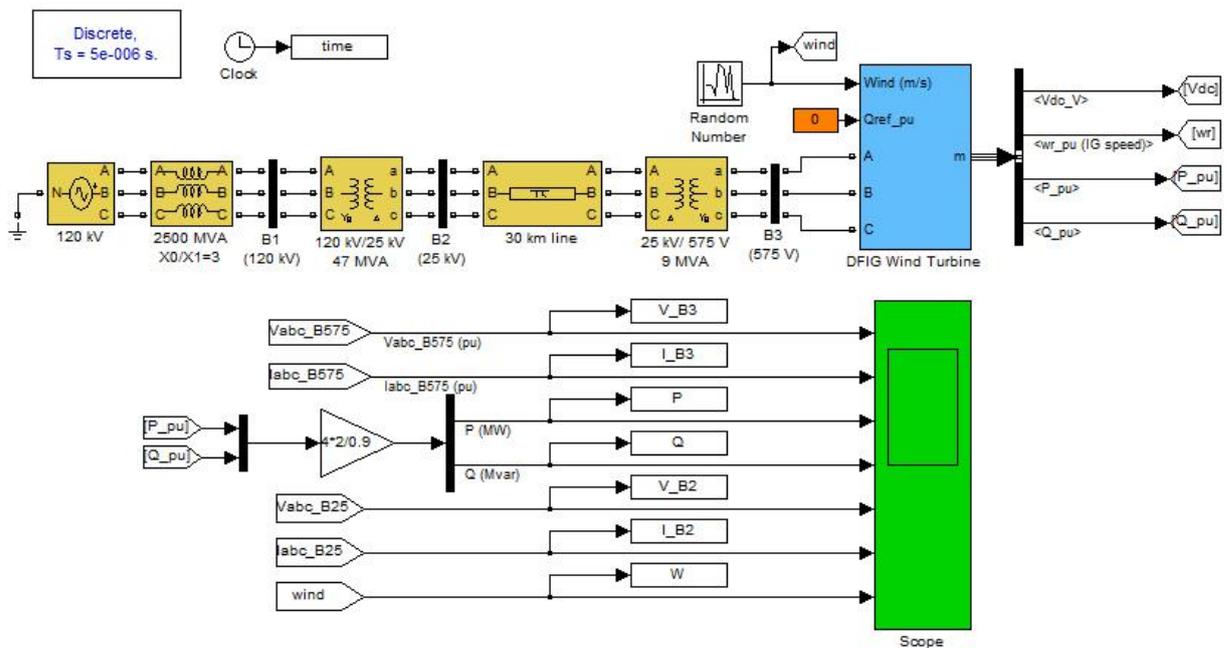


FIGURA 22 - Modelo detalhado de usina com variação da velocidade de vento

A simulação foi feita e a tensão, corrente e potências desenvolvidas pela usina serão analisadas e discutidas nas próximas seções desse trabalho.

3.2.1.3 Resposta obtida para variações de carga

A terceira simulação envolve a variação da carga no sistema. Com o objetivo de criar uma alta resistência, o bloco de 250 MVA foi substituído por um bloco RLC de 2500 Ω , como mostrado na Figura 23. Essa situação coloca uma sobrecarga no sistema, ou seja, uma carga não suportada pela rede.

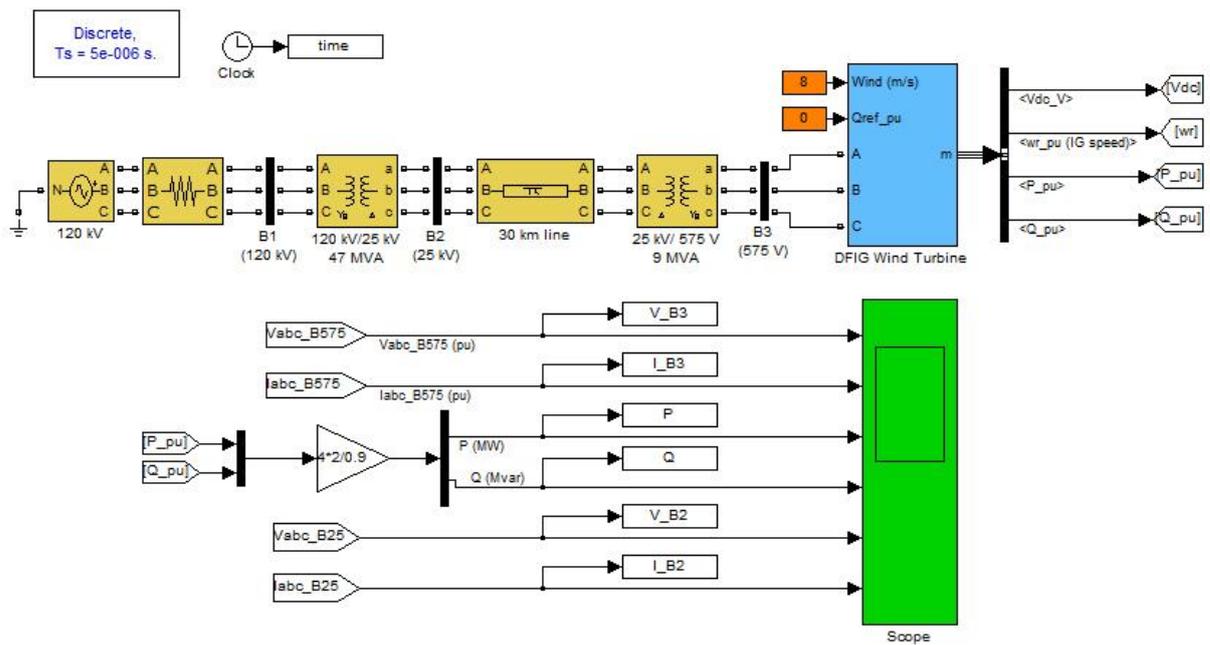


FIGURA 23 - Modelo detalhado de usina com variação da carga

3.2.2 Parte 2

Como a falta na rede apresentou uma variação muito grande na tensão da barra, atingindo valores que provocariam o desligamento da usina. Como uma proposta de solução, na segunda etapa de simulações foi acrescentado ao sistema um modelo de STATCOM, conectado à barra B2 da simulação. A Figura 24 mostra o esquema utilizado para a segunda etapa de simulações deste trabalho. A Figura 25 mostra a estrutura do STATCOM de 48 pulsos usada neste trabalho.

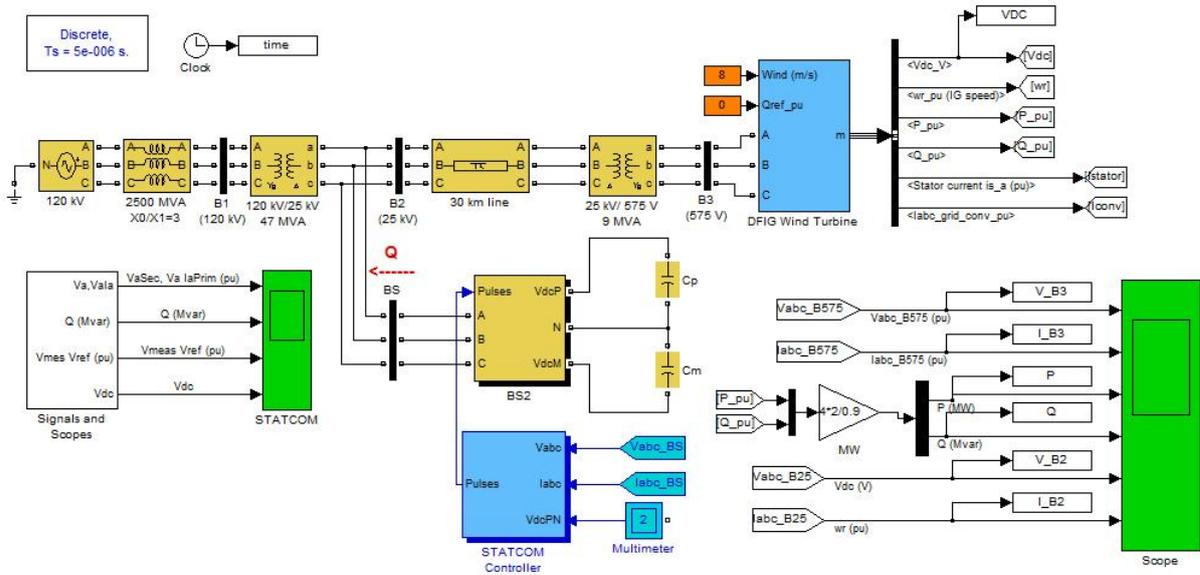


FIGURA 24 - Modelo detalhado do sistema com a presença do STATCOM

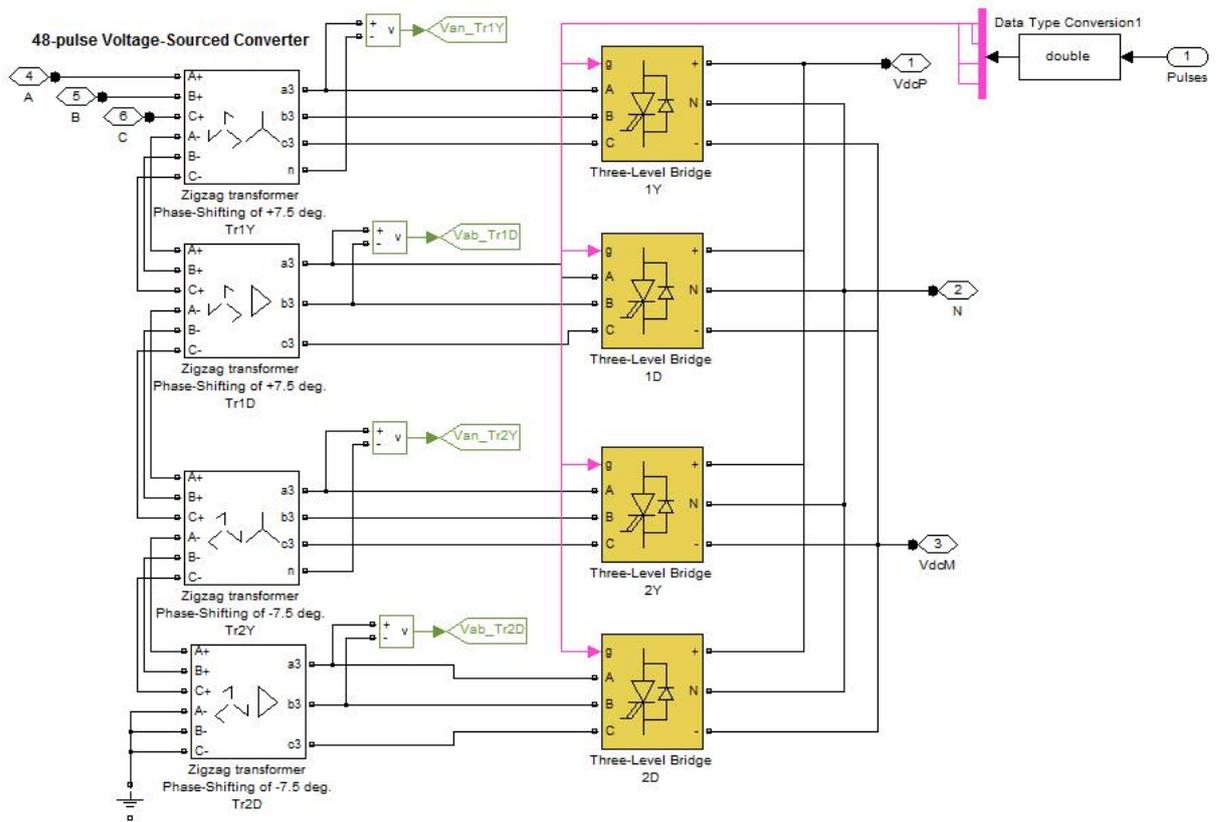


FIGURA 25 - Estrutura do STATCOM usado para as simulações

3.2.2.1 Resposta obtida para uma falta na rede

Aqui, o cenário do item 3.3.1.1 é repetido, porém com a colocação de um STATCOM, conforme mostrou a Figura 26. Os efeitos da colocação do STATCOM serão analisados com valores de falta de 0,5 e 0,25 pu.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Apresentar-se-ão nesta seção irá apresentar os resultados obtidos das simulações feitos nesse trabalho. As próximas seções irão apresentar as respostas do sistema para os três cenários da primeira parte e dos dois cenários da segunda parte, e a análise das ondas geradas pelas perturbações a que cada cenário foi submetido, sempre considerando a análise da qualidade de energia e a sua influência no funcionamento da usina eólica.

4.1 Parte 1

As turbinas eólicas recebem uma entrada de vento com um valor constante de 8 m/s, e é programada para não gerar nenhuma potência reativa (0 Mvar). A usina eólica é diretamente conectada ao um sistema de distribuição trifásico de 25 kV, que fornece potência a uma rede de 120 kV a uma frequência de 60 Hz. A rede está disposta em um modelo pi nominal (STEVENSON, 1986), com 83 km de extensão, e foi modelada com a presença de transformadores de potência. A medição das tensões e correntes é feita no PAC para, dessa forma, analisar as consequências que os afundamentos de tensão no sistema têm sobre as usinas eólicas.

Para obter um sinal de comparação, a primeira simulação foi realizada sem nenhuma variação no vento, nenhuma falta ou sobre carga. Para isso, a falta programada na rede no bloco de fonte programável deve ser desativada, mudando a variação de tensão para “nenhuma”. Com isso consegue-se obter sinais ideais de tensão, corrente e potência gerados numa condição de funcionamento ideal, isto é, sem nenhum distúrbio, pela usina eólica. Deve-se notar que os primeiros instantes da simulação são referentes à entrada do sistema em regime permanente, então os dados não são considerados, analisando-se apenas os valores para regime permanente. Após a primeira simulação em condições ideais de funcionamento, realizaram-se alguns distúrbios no sistema, analisar separadamente as respostas da potência de saída, e o quanto esses distúrbios afetam o funcionamento da usina eólica.

Primeiramente, Figura 26 mostra as respostas das potências ativa e reativa que a usina eólica entrega à rede para a simulação do funcionamento ideal do sistema. A Figura 27 ilustra a resposta do sistema para as tensões e correntes nas barras, sem o efeito de nenhuma

perturbação. Os gráficos mostram os valores após atingir o regime permanente, por ser a parte interessante à análise desse trabalho.

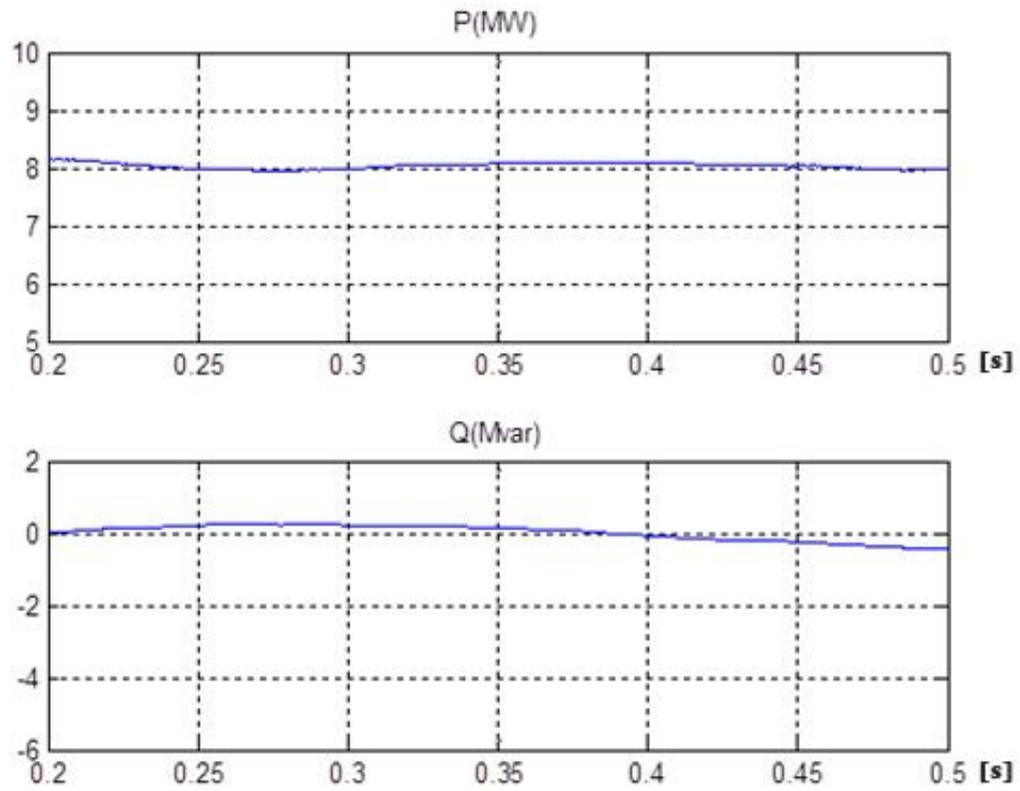


FIGURA 26 - Resposta no sistema ideal das potências ativa e reativa entregues ao sistema

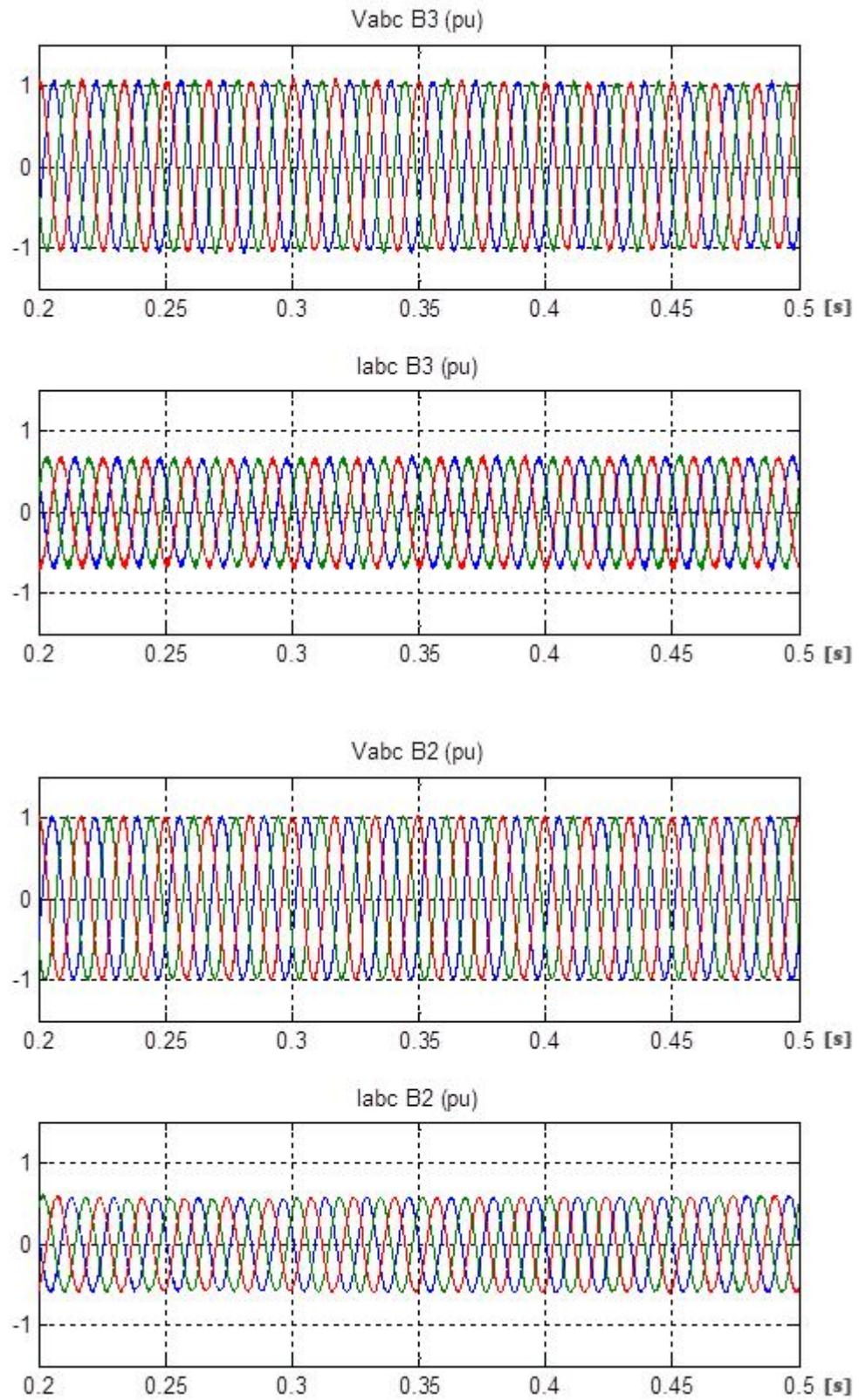


FIGURA 27 - Resposta no sistema ideal das tensões e correntes nas barras do sistema

É possível analisar que as tensões mostradas na Figura 27 não apresentam valores de pico com desvios do valor de 1 pu, nem as correntes, que se apresentam na faixa de 0,5 pu nas barras do sistema. Na Figura 26 é possível ver que a potência ativa também tem um valor aproximado de 8 MW, conforme o valor nominal da usina, composta por 4 turbinas de 2 MW cada. A potência reativa apresenta um valor aproximadamente igual a zero, conforme foi configurada. Essa variação de potência reativa pode ser explicada pela natureza indutiva dos geradores utilizados para essa simulação, conforme já comentado na revisão teórica, o que reforça a ideia da necessidade da utilização de um banco de capacitores conectados à usina eólica. Essa é uma situação ideal, e foi simulada pra ser usada como comparação para os próximos resultados, quando inseridos os distúrbios.

Utilizando (7) é possível fazer uma comparação entre potência reativa teórica entregue pelo gerador para o sistema e a potência entregue pelo gerador durante a simulação. A Figura 28 mostra as curvas adquiridas na simulação e na teoria, para comparação.

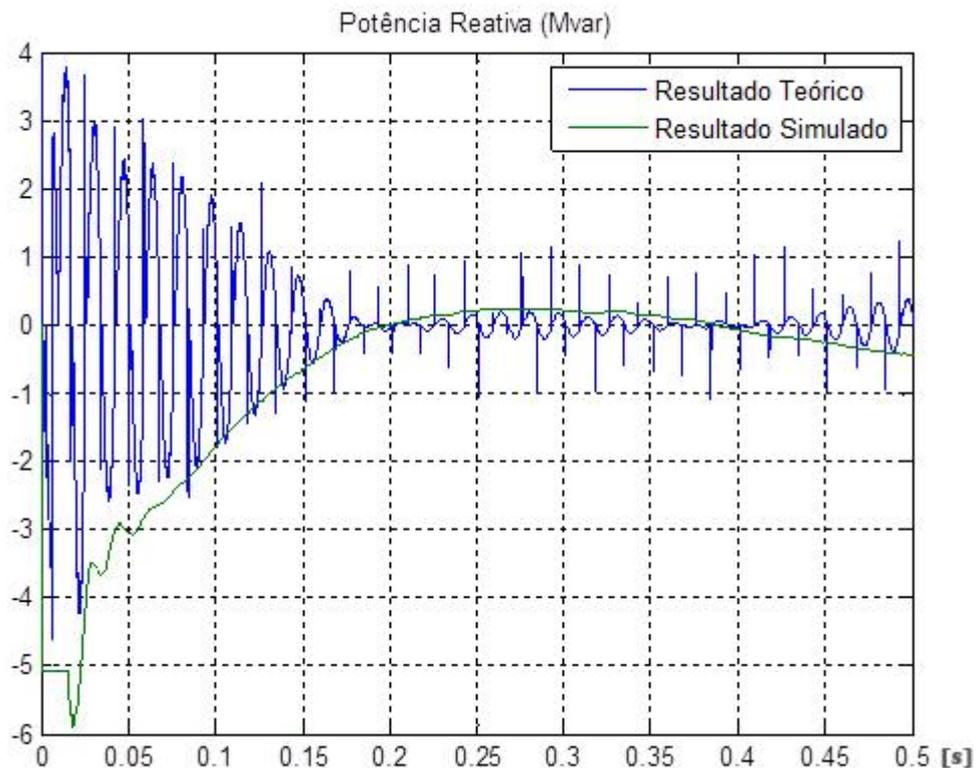


FIGURA 28 - Comparação entre a potência reativa teórica e simulada, entregue pelo gerador

A Figura 28 mostra o comportamento da potência reativa durante os instantes que o sistema está passando pelo regime transiente até atingir o regime permanente, analisado anteriormente. Como é possível analisar na Figura 28, o comportamento das curvas teórica e

prática se assemelham muito, validando a simulação de acordo com a teoria. As pequenas diferenças em magnitude presentes na comparação são resultado de parâmetros considerados na simulação que não são considerados em (7), uma vez que (7) é uma equação simplificada, porém que se aproxima muito dos resultados práticos. A diferença do desenho das curvas se deve ao fato da curva teórica utilizar valores médios ou eficazes, enquanto a curva simulada foi traçada utilizando valores instantâneos.

4.1.1 Resposta devido à falta na rede

Após a entrada do sistema em regime permanente, a falta ocorre e pode-se analisar a resposta do sistema devido à queda de tensão causada pela falta. Uma vez que a entrada da velocidade de vento é constante, esse cenário avalia a resposta do sistema unicamente a uma variação, que é a queda de tensão causada por uma falta no sistema.

Para esse cenário não foram feitas maiores alterações no modelo, com o objetivo de analisar exclusivamente as respostas de uma turbina eólica DFIG devido às quedas de tensão na rede causadas por faltas nas linhas de transmissão.

As Figuras 29 e 30 mostram a resposta do sistema devido à falta na rede. Essa falta gera uma queda de tensão de 0,5 pu durante 0,1 segundos, como já descrito anteriormente. Novamente, os primeiros instantes, no qual o sistema ainda não havia atingido o regime permanente não constam nos gráficos apresentados, por não serem cruciais para a análise requerida nesse trabalho.

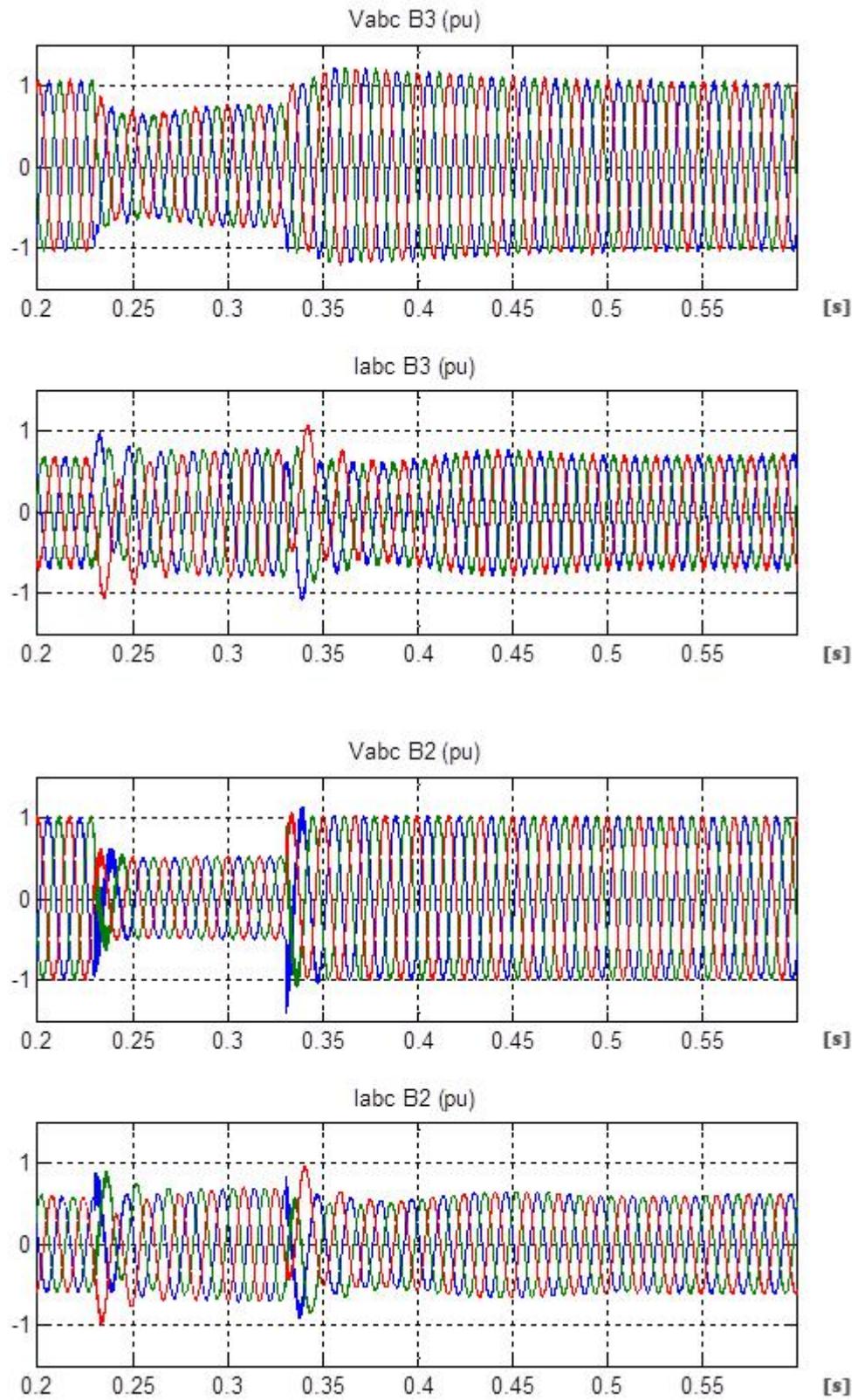


FIGURA 29 - Resposta no sistema com a falta, das tensões e correntes das barras

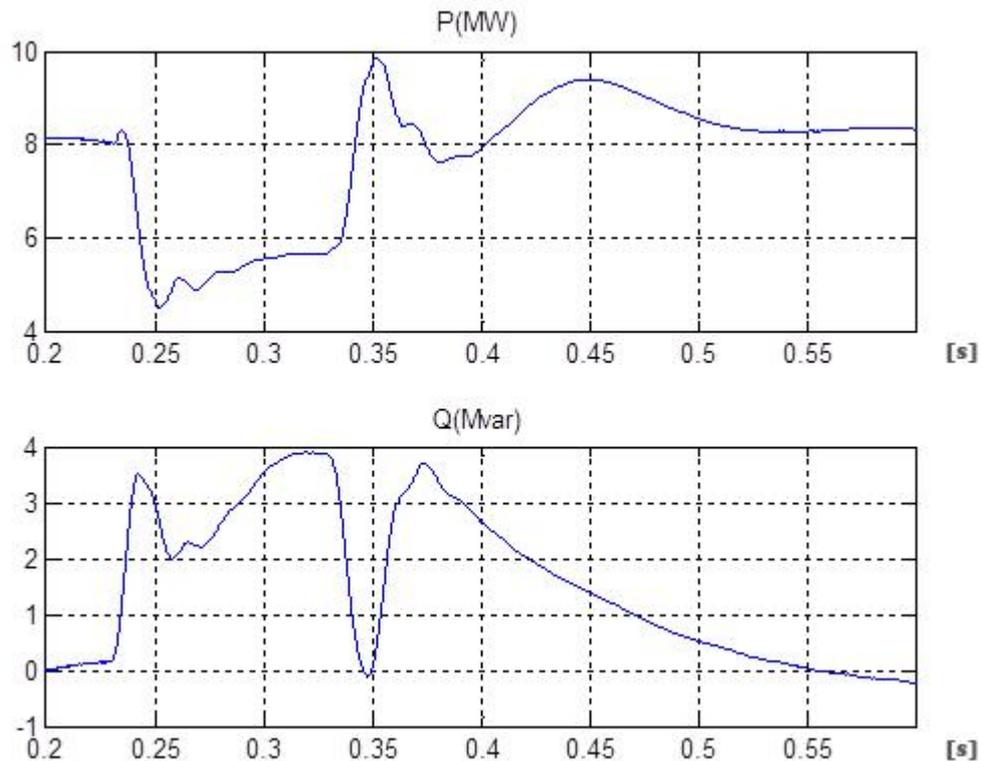


FIGURA 30 - Resposta no sistema com falta das potências ativa e reativa entregues ao sistema

Pode ser notado na Figura 29 que a potência ativa que estava constante a 8 MW antes da falta apresentou uma queda, chegando a valores menores que 5 MW, e permanece baixa e tentando retornar aos valores nominais até que a falta seja extinta, depois de 6 ciclos. Enquanto isso, o valor da potência reativa, que até o momento era nula, apresentou um valor de pico de aproximadamente 4 Mvar. Isso ocorre para manter a estabilidade do sistema, porém isso gera uma queda no fator de potência do sistema, podendo prejudicar os equipamentos conectados à rede.

Como pode ser visto na Figura 30, o sistema estava trabalhando dentro de um padrão de qualidade antes da falta acontecer. Nos próximos instantes, a tensão caiu aproximadamente 0,5 pu e para manter o sistema em equilíbrio a corrente apresenta elevações em seus valores de regime permanente. Depois que a falta ocorre, nota-se que, principalmente na barra B3, onde a usina está conectada na rede, o sistema demora alguns instantes para voltar para os valores de 1 pu, após passar por uma breve sobretensão, resultado do aumento da corrente durante o período da falta.

Após a falta ser eliminada, o sistema precisa retornar aos valores nominais de tensão e corrente, e para isso, o valor da potência ativa gerada aumenta, atingindo um valor de pico de quase 10 MW, e ao mesmo tempo, a usina começa a absorver potência reativa da rede,

abaixando os valores de potência reativa. Assim, a corrente e a tensão retomam seus valores nominais, e a qualidade de energia retorna aos valores requeridos pelo sistema.

Nesse processo, o nível de tensão se mantém fora dos padrões por alguns instantes, o que mostra a necessidade de um sistema que compense essa queda no nível de tensão na rede. Também é importante manter a atenção na sensibilidade das usinas eólicas devido às variações causadas pelas faltas. A duração e a magnitude das faltas podem causar o desligamento da usina eólica da rede, segundo as normas do ONS. Espera-se, na Parte 2 deste relatório, amenizar os problemas com a magnitude, porém é importante realçar que a duração das faltas depende do desempenho dos sistemas de proteção do sistema de potência.

A Figura 31 faz a análise comparativa entre a potência reativa entregue pelos geradores na teoria e na simulação. É possível analisar a partir de (7) que a queda na magnitude da tensão na rede provoca alterações no ângulo de carga do gerador, aumentando a potência reativa entregue pelo mesmo, como uma tentativa de manter o equilíbrio do sistema. Após o término da falta o sistema leva alguns ciclos para restaurar os parâmetros nominais.

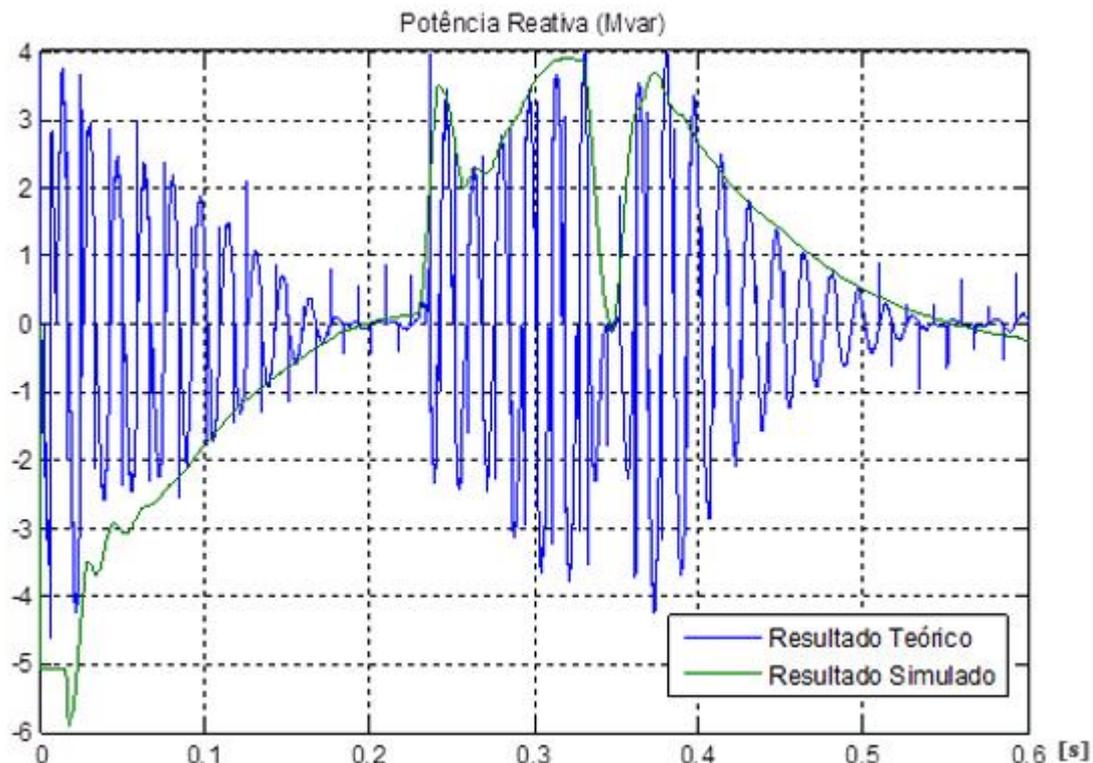


FIGURA 31 - Comparação entre a potência reativa teórica e simulada, entregue pelo gerador durante a falta

4.1.2 Resposta devido a variações de vento

A variação na velocidade de vento foi feita colocando um bloco de número aleatório na saída do vento programado para fazer uma variação de 2 a 25 m/s, com uma média 8 m/s, que são os valores mostrados na Figura 15 como sendo as velocidades limite de funcionamento da turbina, e da Figura 16 como sendo a média anual de velocidade do vento para a região de implantação da usina. A velocidade do vento foi medida para que seja possível a visualização da variação da velocidade do vento causada pelo bloco de número aleatório

Nessa parte do experimento, foi considerada uma variação de vento, alterando a sua velocidade entre 2m/s e 25 m/s com um bloco de número aleatório, porém com média de 8 m/s, que é a média de vento da região, conforme demonstrado nas seções anteriores. Os resultados para essa variação são os mostrados nas Figuras 33 e 34. A Figura 32 mostra a variação do vento obtida com o uso do bloco de número aleatório.

Como anteriormente citado na revisão de literatura desse trabalho, uma das preocupações sobre a energia eólica é a variação da velocidade do vento. Nesse contexto, o bloco de número aleatório na entrada de vento na turbina irá mostrar a resposta da turbina eólica quando presente uma variação de vento.

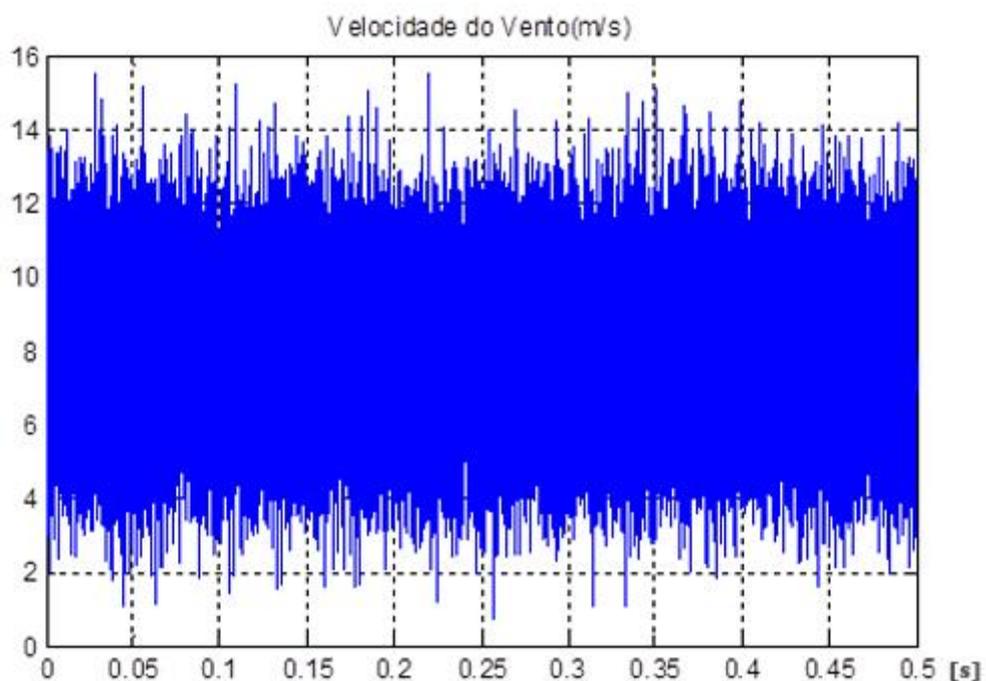


FIGURA 32 - Entrada de Vento nas turbinas eólicas

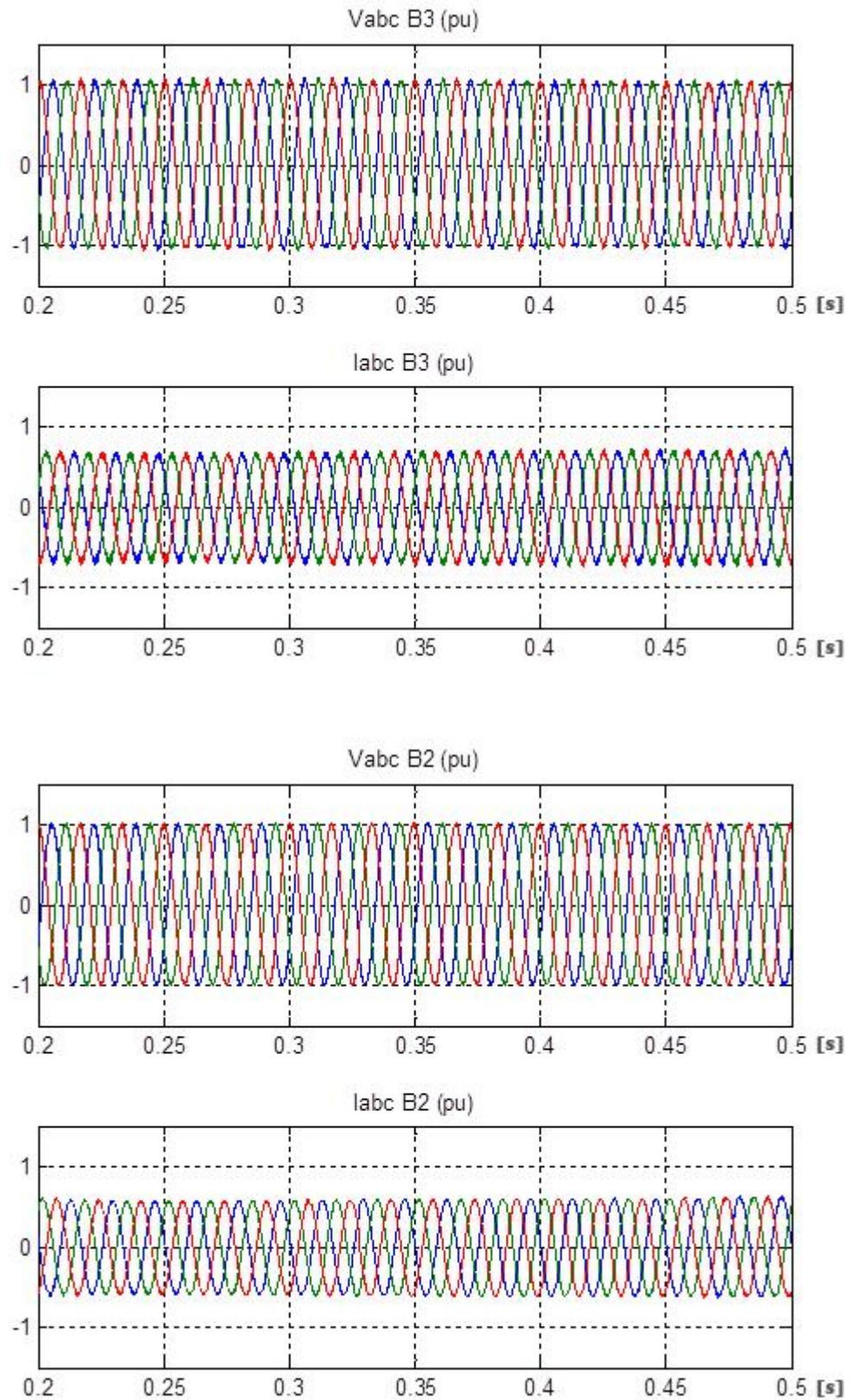


FIGURA 33 - Resposta no sistema com variação da velocidade do vento, das tensões e correntes das barras

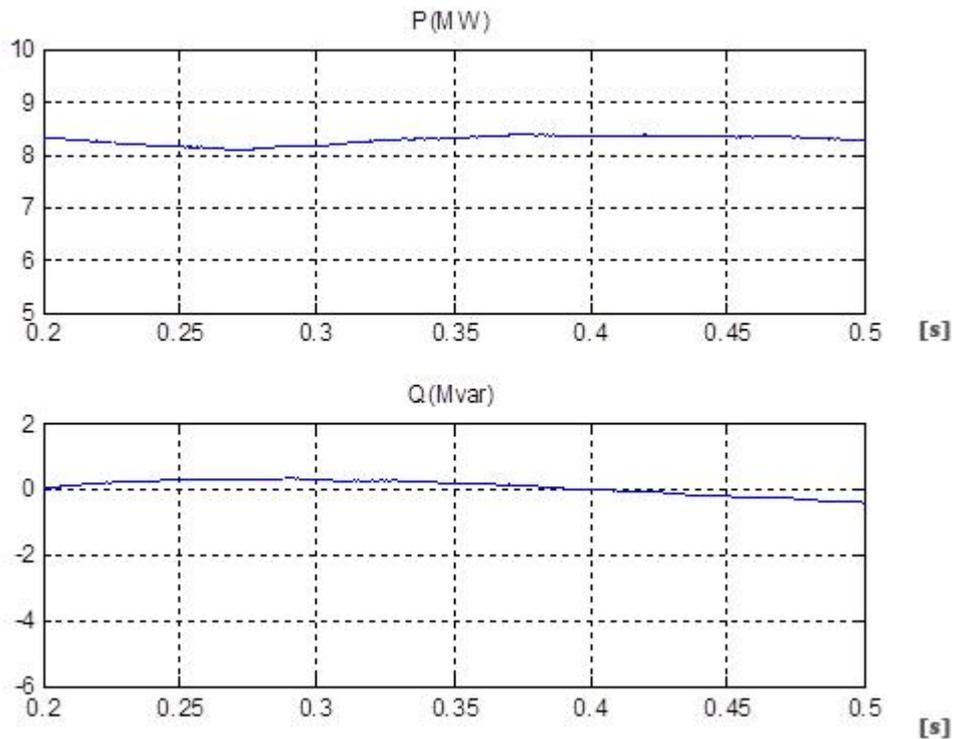


FIGURA 34 - Resposta no sistema com variação da velocidade de vento das potências ativa e reativa entregues ao sistema

Analisando os gráficos da Figura 34 é possível perceber que as variações presentes na tensão e corrente desenvolvidas pela usina eólica não apresentam grandes variações na forma e magnitude, sendo mantidas em valores muito próximos de 1 pu. Os valores da potência ativa apresentam algumas variações devido às alterações da velocidade do vento, mas esses valores estão contidos em uma janela de variação aceitável, estando dentro dos padrões de variação. O mesmo pode ser observado na potência reativa.

Os valores constantes nas magnitudes das tensões, inclusive quando a velocidade do vento varia, podem ser explicados pela grande evolução nas técnicas de controle das turbinas eólicas desenvolvidas nos últimos anos. O uso dos mecanismos de controle do ângulo das pás além de aumentar a eficiência da produção energética das turbinas eólicas, também tem um efeito positivo quando considerando a tensão do sistema, uma vez que o efeito da mudança de ângulo das pás de acordo com a velocidade do vento permite que o sistema tenha uma rotação constante no rotor do gerador, e conseqüentemente uma saída de tensão constante. O sistema de controle atua na modificação do ângulo das pás da turbina, que por efeitos aerodinâmicos rotará de forma mais uniforme e constante.

As pequenas variações presentes estão dentro dos padrões da qualidade de energia, não sendo prejudiciais para o equipamento conectado à rede. A evolução na tecnologia usada na energia eólica possibilita dizer que foi alcançado um nível em que as variações na velocidade do vento não são prejudiciais à qualidade de energia nas usinas eólicas, desde que essas estejam equipadas com um sistema de controle confiável. Assim, julgando apenas a variação do vento dentro dos valores de funcionamento da turbina, a usina eólica com geradores DFIG e controle do ângulo das pás não terá seu funcionamento prejudicado.

A Figura 35 mostra a comparação teórica e simulada do comportamento da potência reativa entregue pelo gerador à rede. É possível notar que as curvas se assemelham muito às da Figura 28, onde não há perturbações na rede. Novamente, os primeiros momentos onde há variação da potência reativa correspondem aos momentos necessários para o sistema entrar em regime permanente. As diferenças de magnitude entre a teoria e simulação são normais, uma vez que a Equação (7) é uma simplificação do comportamento da potência reativa, não levando em consideração alguns parâmetros contidos na simulação.

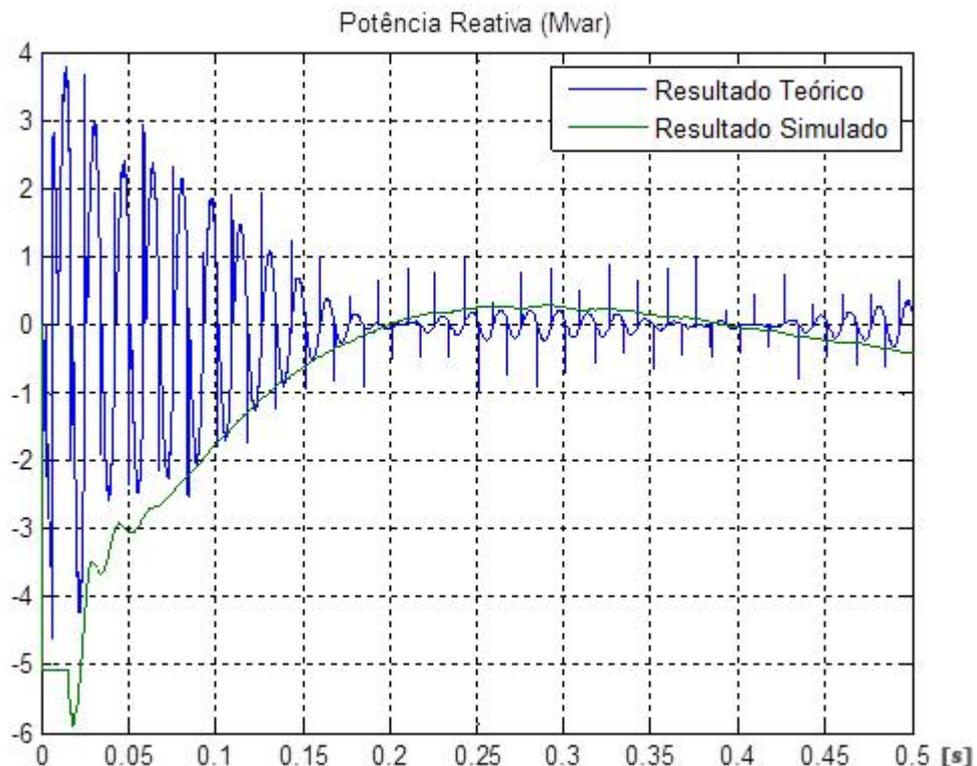


FIGURA 35 - Comparação entre a potência reativa teórica e simulada, entregue pelo gerador com variação da velocidade de vento

4.1.3 Resposta devido às variações de carga

Como mostrado previamente na revisão teórica, uma das possíveis causas de distúrbios na qualidade da energia pode estar ligada às cargas conectadas na rede. A sobrecarga foi feita colocando-se uma alta resistência, simulando as condições da presença de fornos elétricos ou ativação de grandes motores elétricos, como comentado anteriormente. Como já citado anteriormente, a presença desse tipo de carga pode provocar alterações nos índices de qualidade da energia, e por essa razão esse cenário será avaliado. Uma das maiores preocupações dos autores é relacionada às cargas altamente resistivas, pelo fato de consumir uma alta corrente da rede. Nessa parte da simulação, uma carga de alta potência puramente resistiva foi colocada no sistema, como descrito nos procedimentos experimentais. Essa carga representa uma sobrecarga no sistema, ou seja, uma carga a qual o sistema não suporta.

Como nas outras simulações, os primeiros valores contidos nos gráficos devem ser desconsiderados, uma vez que são relativos ao tempo necessário para a máquina sair do regime transitório, devido à máquina ter sido acionada, até atingir o regime permanente. A simulação teve o tempo de simulação aumentado para $t=0,5$ segundos para que o sistema tenha tempo de sair do regime transitório com a nova carga, e atingir o regime permanente para ser melhor analisado. Novamente, os resultados obtidos apresentar-se-ão na próxima seção.

As Figuras 36 e 37 mostram a resposta do sistema devido a presença dessa carga.

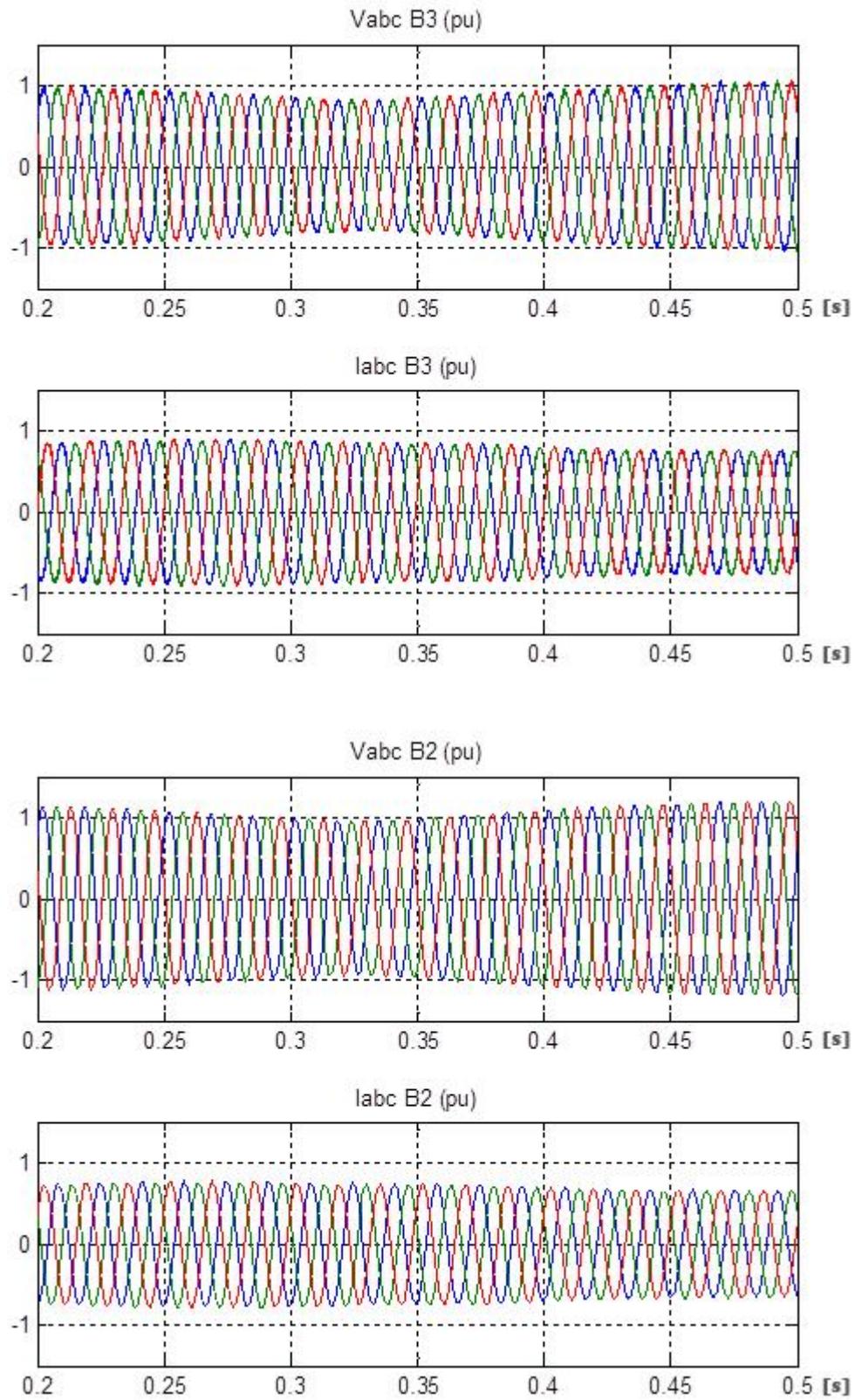


FIGURA 36 - Resposta no sistema com carga resistiva, das tensões e correntes das barras

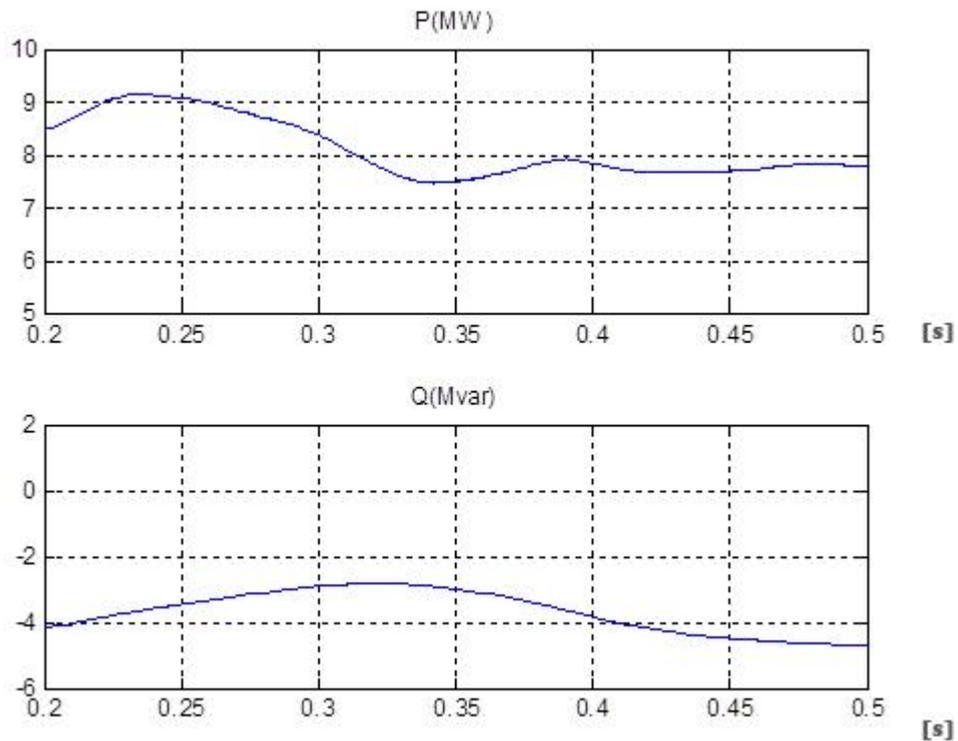


FIGURA 37 - Resposta no sistema com carga resistiva das potências ativa e reativa entregues ao sistema

Como explicado anteriormente, os primeiros instantes correspondem ao tempo necessário para que a máquina atinja o regime permanente, e serão desconsiderados na análise da qualidade de energia. Nesse momento, potência ativa e reativa são consumidas para energizar o gerador e o sistema começar a funcionar. Quando o sistema finalmente atinge o regime permanente, em aproximadamente 0,2 segundos, é possível observar que a presença da carga resistiva produz uma corrente relativamente maior que nos outros casos já apresentados, e portanto uma diminuição da tensão de regime permanente, no entanto ainda dentro dos padrões de qualidade. Porém, essa corrente induz à uma queda na tensão que pode ser observada estar entre 0,3 e 0,45 s na barra B3 do sistema, que é onde a usina eólica está conectada à rede. Porém, na barra B2, mais próxima da carga resistiva, a tensão apresenta valores acima dos padrões mínimos estabelecidos. Apesar das tensões não apresentarem grandes variações, percebe-se que para manter os valores das tensões em valores próximos aos nominais ocorreu uma forte variação no fator de potência, uma vez que a potência reativa atingiu valores de trabalho na faixa de -4 Mvar, reduzindo o fator de potência.

Novamente, as variações na qualidade de energia reforçam a necessidade do sistema ter um mecanismo que ajude a garantir uma energia de qualidade aos consumidores. A

sensibilidade da usina eólica é mostrada nas simulações, e acentua a necessidade dos estudos de uma solução para esses problemas na qualidade de energia do sistema simulado.

A Figura 38 mostra a comparação teórica e simulada da potência reativa na barra B3 do sistema. Como nos outros cenários, é possível reparar que há uma diferença na magnitude, causada pela diferença de parâmetros e considerações entre a Equação (7) que simplifica o comportamento da potência reativa e a simulação, que é mais complexa.

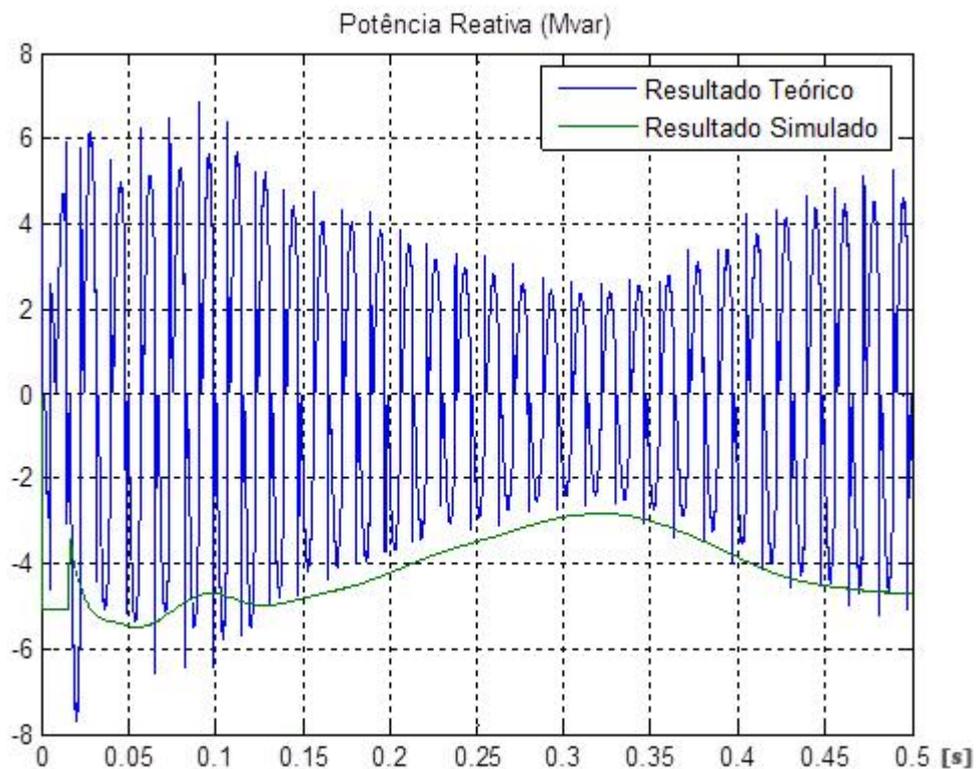


FIGURA 38 - Comparação entre a potência reativa teórica e simulada, entregue pelo gerador com variação da carga

É importante ressaltar que as simulações não estão equipadas com os dispositivos de proteção requeridos pela ONS, que causariam a desconexão do parque eólico do sistema. Então, em uma situação real, nos casos mostrados no primeiro e terceiro cenário deveria haver, por seguimento das normas, a desconexão dessas usinas da rede, o que não acontece nas simulações.

4.2 Parte 2

Esse cenário pretende avaliar o funcionamento de um STATCOM como dispositivo de controle da tensão na barra do sistema, para evitar que as os afundamentos de tensão na barra do PAC provocados pelas faltas afetem o funcionamento de uma usina eólica. O STATCOM utilizado é um modelo pronto da biblioteca do Simulink, que foi adaptado para o uso deste trabalho por meio de modificações dos parâmetros do modelo. Ao término da Parte 1 das simulações, é possível avaliar, conforme a Tabela 4, que o cenário que apresentou maior variação na tensão da barra de conexão da usina eólica foi o cenário com faltas na rede. Assim, foi decidido que a segunda parte das simulações iria avaliar a colocação de um STATCOM nesse cenário, por ter se apresentado o cenário mais crítico entre os cenários descritos.

TABELA 4: Comparação de resultados da Parte 1 das simulações

Cenário	V_Parque (pu)	P mínima (MW)	Q máxima (Mvar)
Sem alteração	1	8	0
Falta de 0,5 pu	0,62	4,5	4
Variação da velocidade de vento	1	8	0
Variação de carga	0,81	7,5	-4,5

O primeiro passo após a colocação do STATCOM foi simular o sistema com o uso do dispositivo, porém sem nenhum distúrbio no sistema, para se estabelecer o tempo necessário para a entrada do sistema em regime permanente, que é um pouco mais elevada pela presença dos capacitores do STATCOM. As próximas etapas foram a reanálise dos cenários da Parte 1 que se mostraram inadequados para o funcionamento da usina, porém agora com o uso do STATCOM.

Os parâmetros do STATCOM foram ajustados para a conexão correta com a rede. Assim, foram ajustadas as potências e tensões do STATCOM para serem de acordo com a rede de conexão, de 20 MVA e de 25kV. No controlador, o modo de operação foi colocado para controle de tensão, com o valor de referência de 1 pu.

A fim de estabelecer o tempo necessário para o sistema entrar em regime permanente, a primeira simulação foi feita com a situação ideal, sem perturbações na rede. O tempo de regime transiente é maior pela presença dos altos capacitores do STATCOM, usados para o controle de injeção de corrente para o controle de potência ativa e reativa. A Figura 39 mostra as tensões e correntes na barra B3 do sistema, onde a usina eólica está conectada, e a Figura 39 mostra as potências ativa e reativa entregues pelos geradores. Analisando as figuras é possível afirmar que o regime permanente desse sistema inicia aproximadamente no tempo $t=6$ segundos. Então foi decidido que as faltas ocorrerão no tempo $t=0,7$ segundos, com duração de 0,1 segundos, o equivalente a 6 ciclos, assim com na simulação explicada na seção 3.3.1.1.

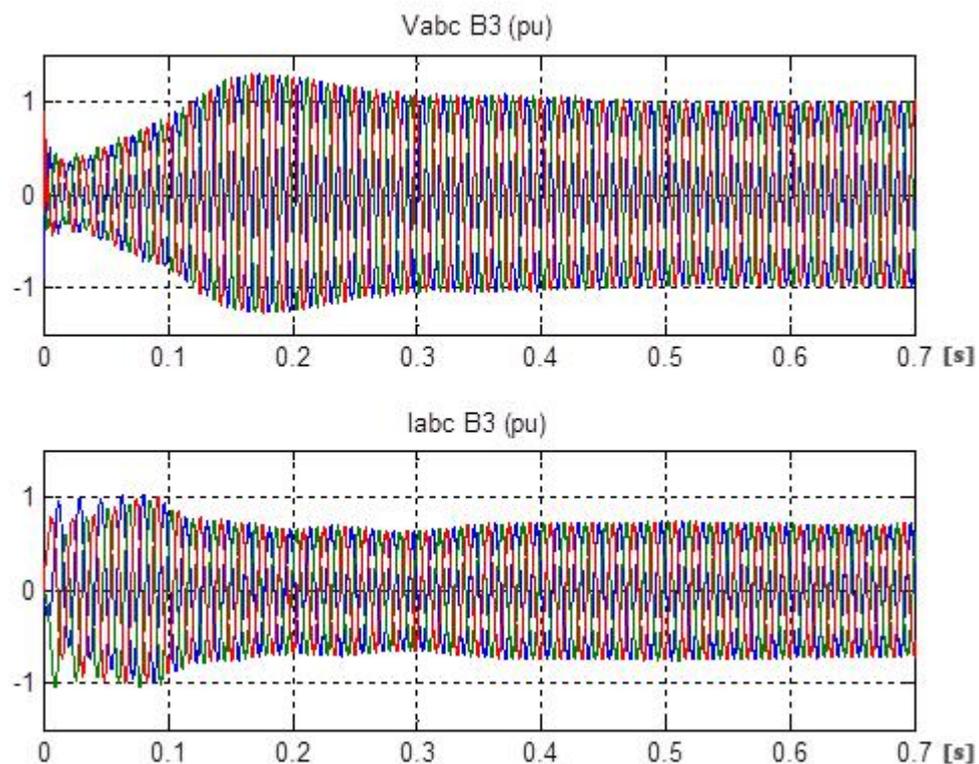


FIGURA 39 - Tensões na barra B3 sem alteração na rede, com presença de um STATCOM

Após analisar a seção 4.1 foi possível ver que o cenário que possui maiores consequências negativas para o funcionamento da usina eólica é a resposta à falta na rede. Assim, esta seção apresentará uma análise das simulações para esse cenários na presença do STATCOM.

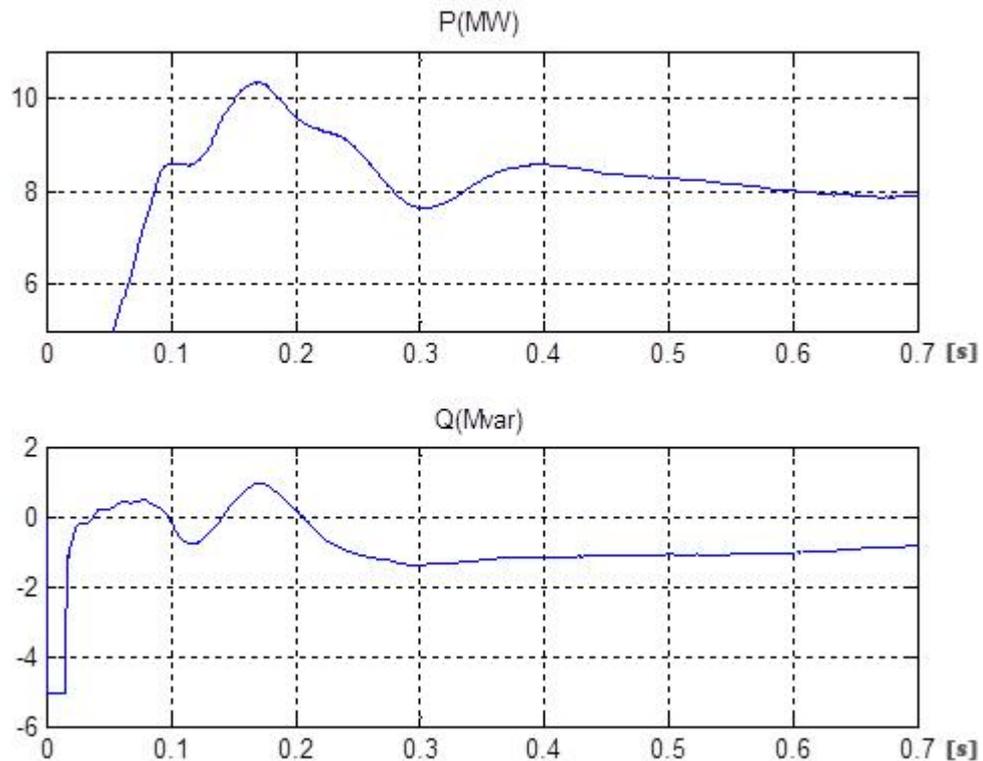


FIGURA 40 - Resposta no sistema na presença de um STATCOM das potências ativa e reativa entregues ao sistema

4.2.1 Resposta devido à falta na rede

Após analisar o tempo que o sistema necessita para a entrada em regime permanente, foi estipulado que a falta deverá ocorrer depois que o sistema já atingiu o regime permanente em $t=0,7$ segundos. Da mesma forma que no item 3.3.1.1, a falta terá uma duração de 0,1 segundos do período de $t=0,7$ a $t=0,8$ segundos, completando 6 ciclos de duração. Os demais parâmetros permanecem os mesmos, e serão analisados a tensão da barra na qual a usina está conectada e o comportamento da potência reativa no STATCOM, para entender o funcionamento do dispositivo e a possível diminuição no afundamento da tensão na barra B3, que a usina eólica está conectada.

A Figura 41 mostra as tensões e correntes na barra B3 do sistema no momento que ocorre a falta na rede, na presença do STATCOM. É possível notar que para uma queda de tensão de 0,5 pu, o dispositivo não é suficiente para evitar o desligamento da usina, uma vez que este eleva o nível de tensão na barra para aproximadamente 0,8 pu, e a usina deverá ser

desligada da rede para valores abaixo de 0,9 pu conforme mencionado anteriormente neste trabalho.

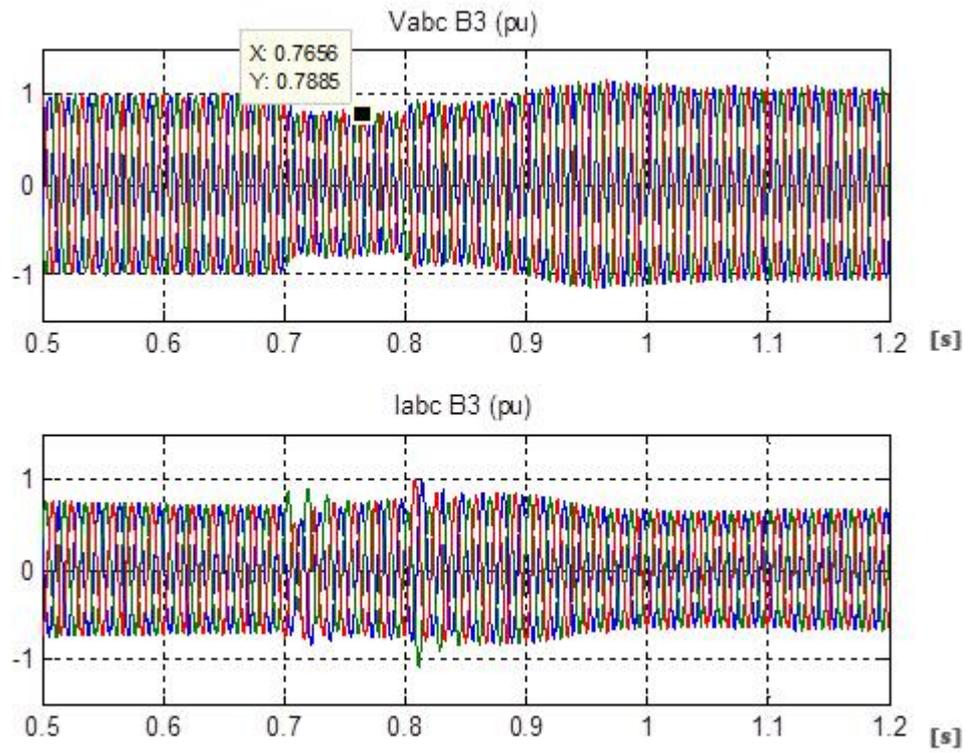


FIGURA 41 - Resposta do sistema na barra B3, na presença do STATCOM

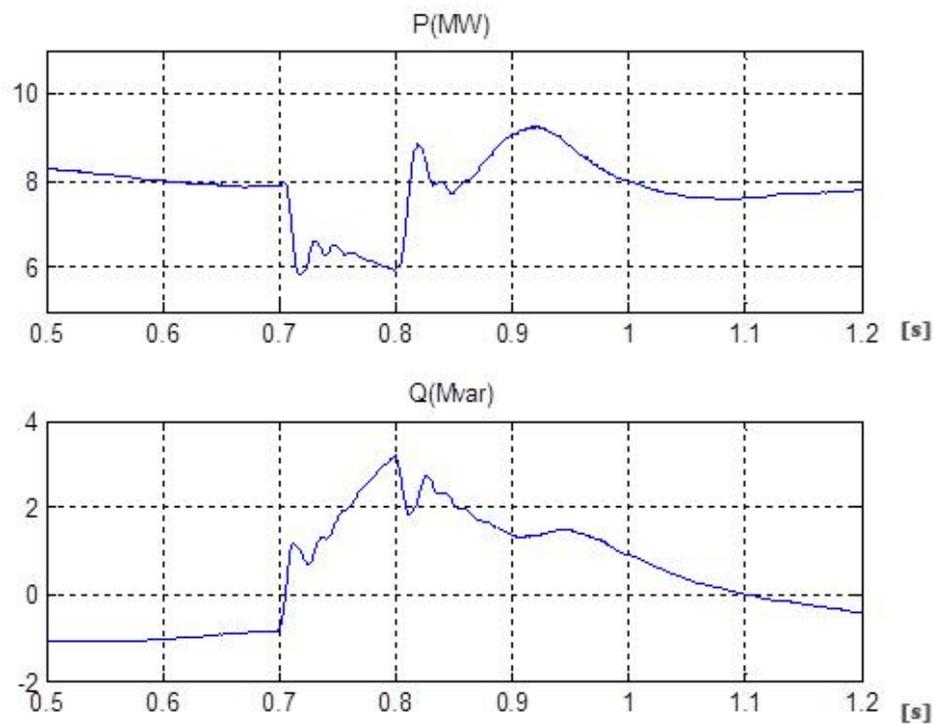


FIGURA 42 - Resposta do sistema com o uso do STATCOM, das potências ativa e reativa entregues à rede

A Figura 42 mostra o comportamento das potências ativa e reativa durante a falta. É possível analisar que mesmo que o dispositivo não seja suficiente para evitar o desligamento da usina para uma queda de tensão tão grande, ele diminui a quantidade de potência reativa injetada na rede em aproximadamente 1 Mvar. Enquanto na Figura 29 da seção 4.1.1 o pico de potência reativa é aproximadamente 4 Mvar, na Figura 42 é possível ver um pico de aproximadamente 3 Mvar. A potência ativa também apresenta uma melhora, tendo um valor mínimo de aproximadamente 4 MW na Figura 29, e de aproximadamente 6 MW após o uso do STATCOM.

O comportamento do STATCOM durante a ocorrência da falta pode ser visto na Figura 43. Observa-se que o STATCOM não está injetando ou consumindo corrente enquanto o sistema funciona em regime permanente na ausência de perturbações, portanto a potência reativa entregue ao sistema é zero. Assim que ocorre a falta, entre o tempo $t=0,7$ s e $t=0,8$ s, o STATCOM começa a entregar potência reativa para suprir o afundamento de tensão, através do consumo de corrente da barra na qual o STATCOM está conectado. Após o término da falta, o STATCOM, que tem como objetivo controlar a tensão da barra consome potência reativa, a fim de reestabelecer o equilíbrio do sistema.

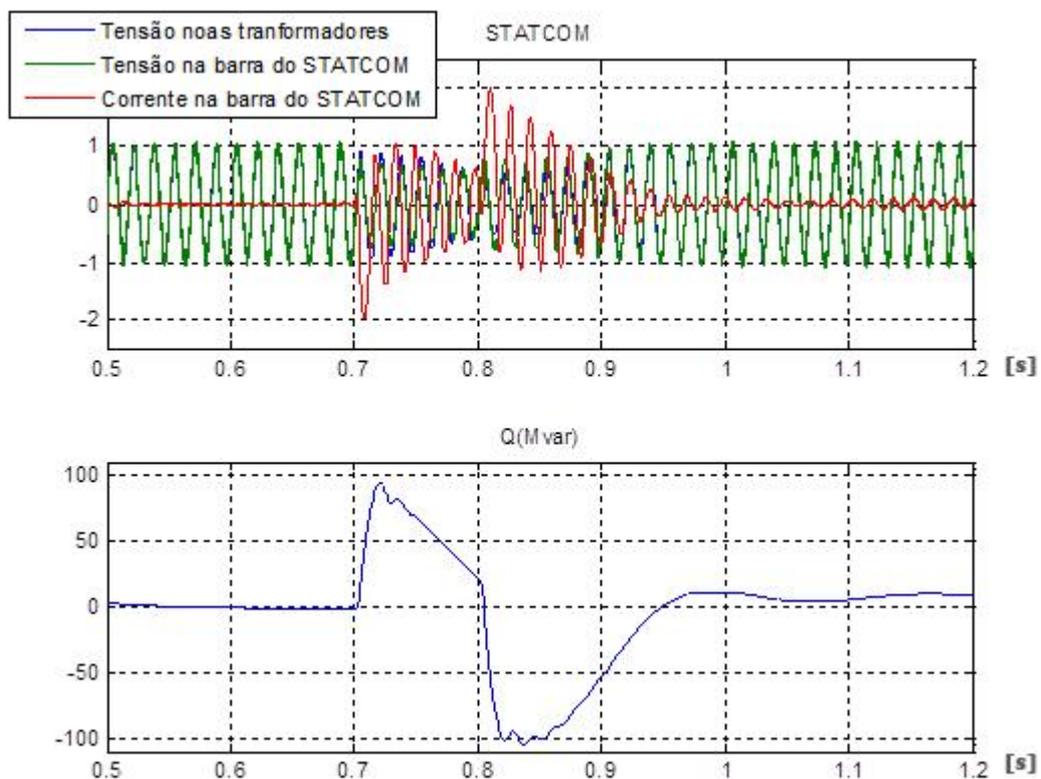


FIGURA 43 - Comportamento do STATCOM durante a falta na rede

Conforme apresentado na teoria, Ise, Hayashi e Tsuji (2000) discursam que apesar de ser um ótimo dispositivo de melhoramento de qualidade de energia, o STATCOM sozinho não é capaz de compensar grandes subtensões. Como o STATCOM apresentou um aumento da tensão na barra, porém não suficiente para o não desligamento da usina eólica, foi decidido testar o mesmo cenário, porém com um afundamento de tensão menor, de 0,25 pu. Então no tempo $t=0,7$ s o valor da tensão cai de 1 pu para 0,75 pu, e se reinstitui para 1 pu no tempo $t=0,8$. Esse cenário procura esclarecer se o uso do STATCOM previne o desligamento da usina eólica para valores de afundamento de tensão não muito elevados. As Figuras 44 e 45 mostram os resultados de tensão na barra B3 e os comportamentos das potências ativa e reativa obtidos com esse cenário.

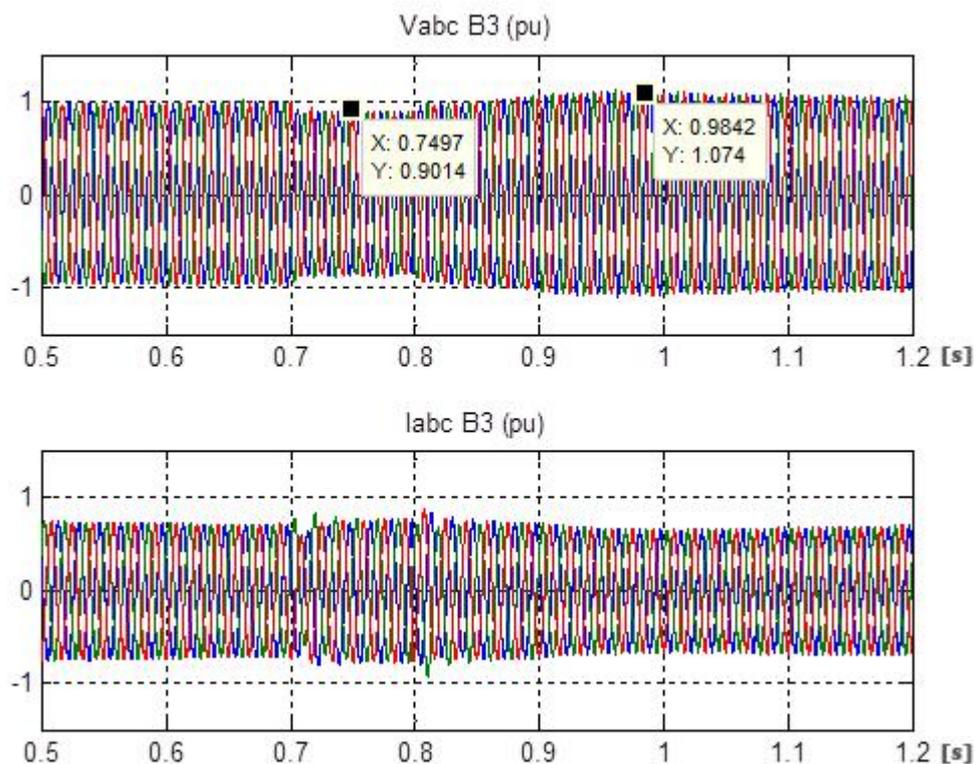


FIGURA 44 - Tensões e correntes na barra B3 com o uso do STATCOM

Analisando a Figura 44, é possível notar que o STATCOM foi capaz de corrigir a tensão da barra B3 o suficiente para evitar que uma falta de 25% da tensão nominal desligasse a usina eólica do sistema. Após a falta terminar, a tensão apresenta um sobre valor antes de voltar para os seus valores nominais, como consequência da tentativa de manter o sistema em equilíbrio. Porém mesmo com essa elevação na tensão, a usina ainda não é desconectada, uma vez que a norma do ONS estipula que o desligamento ocorre para valores menores que 0,9 pu e maiores que 1,1 pu. Nesse cenário o uso do STATCOM foi suficiente para anular as

consequências do afundamento de tensão ocorrido como consequência de uma falta no sistema.

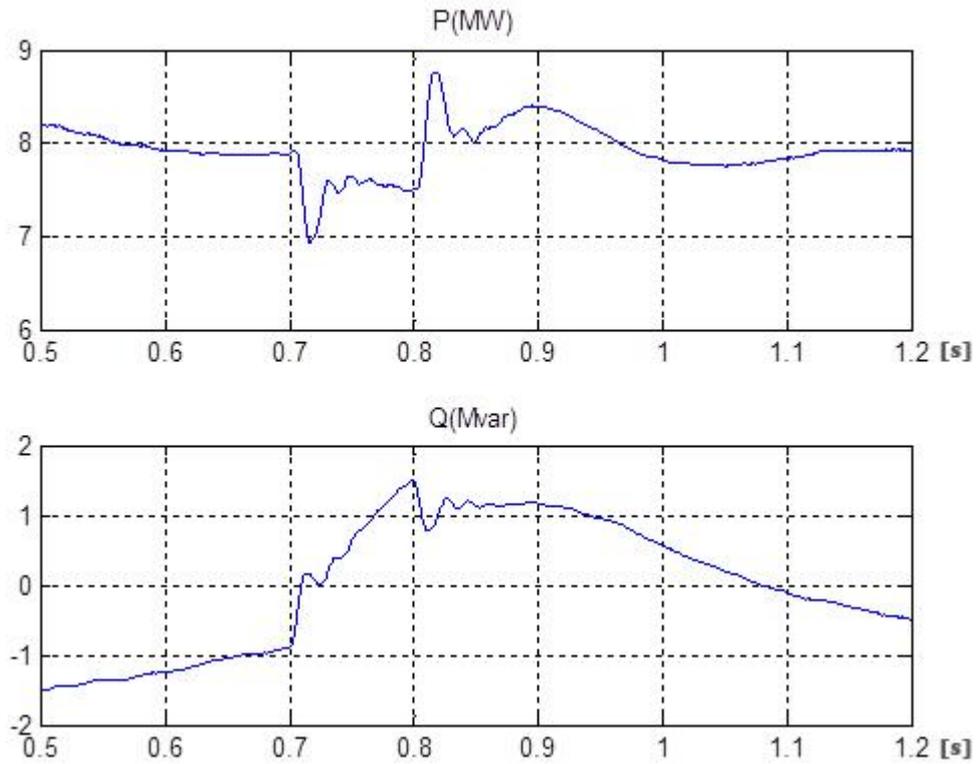


FIGURA 45 - Resposta do sistema com o uso do STATCOM, das potências ativa e reativa entregues à rede

A Figura 45 mostra o comportamento das potências ativa e reativa durante a falta. É possível analisar que o comportamento não se difere muito do cenário anterior com a falta de 0,5 pu, porém as magnitudes apresentam valores diferenciados, com um valor mínimo de potência ativa de aproximadamente 7 MW, e um pico de potência reativa de aproximadamente 1,5 Mvar.

A Figura 46 mostra o comportamento do STATCOM durante a falta. É possível reparar que no momento inicial da falta o STATCOM emite para o sistema um pico de aproximadamente 50 Mvar para suprir o afundamento de tensão ocorrido. Esse valor após o término da falta é absorvido, a fim de manter o equilíbrio do sistema em uma tensão de 1 pu. O STATCOM faz isso ao absorver corrente da barra BS, na qual o STATCOM está conectado, e após o término da falta, há a injeção de corrente, até que o sistema retorne aos valores nominais.

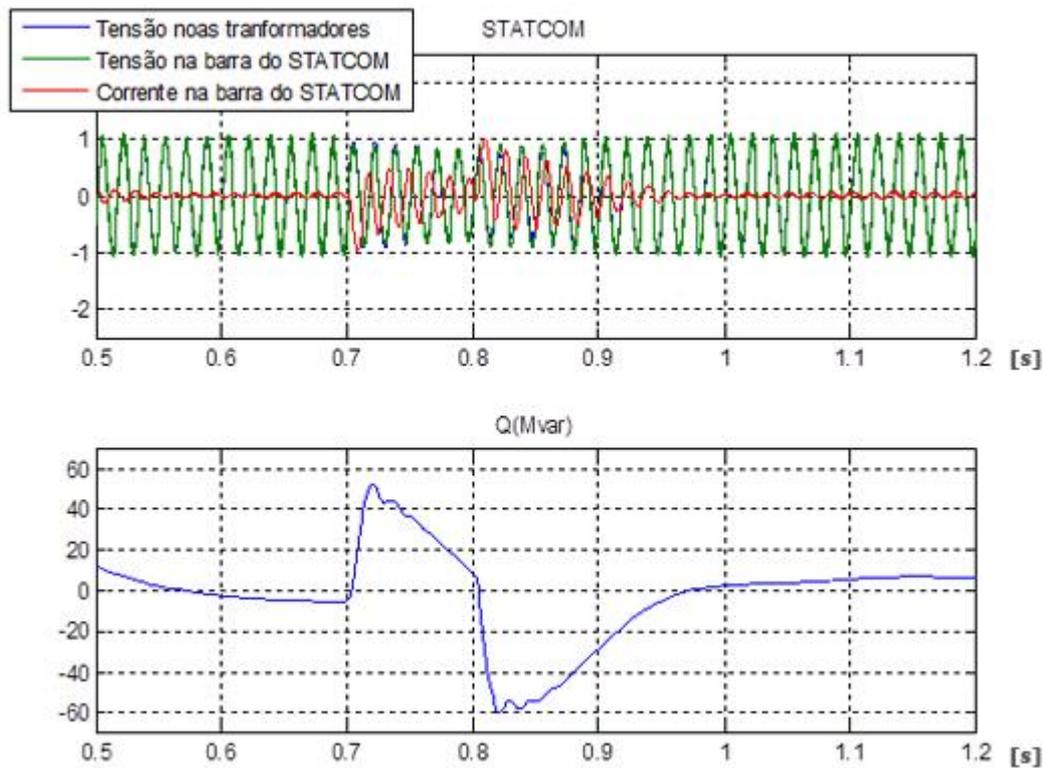


FIGURA 46 - Comportamento do STATCOM durante a falta na rede

Nesse capítulo foram vistos os resultados das simulações, mostrando que os cenários apresentados para uma falta de 0,5 pu na rede e uma sobrecarga no sistema poderiam causar alterações que forçariam o desligamento da usina eólica da rede, segundo as normas da ONS. Dentro desses dois cenários, o mais crítico foi o cenário da falta, e por esse motivo foi escolhido para a alocação do STATCOM. O dispositivo não se mostrou efetivo para variações bruscas nas tensões, como a de 0,5 pu, porém, para um novo cenário de uma falta de 0,25 pu o uso do STATCOM se mostrou eficiente ao evitar o desligamento da usina da rede, segundo as normas da ONS.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A necessidade de investimento em fontes limpas e renováveis de energia inspirou o Brasil a investir mais na energia eólica, através do PROINFA. Assim, o aumento da inserção de energia eólica no SIN, juntamente com o aumento, tanto da complexidade do sistema quanto da quantidade de dispositivos que exigem uma fonte de tensão mais linear, fizeram com que as preocupações com a QEE da rede passassem a ser mais presentes. Uma das consequências de uma QEE fora dos padrões, principalmente no que diz respeito aos afundamentos de tensão, é o desligamento das usinas da rede. Isso implica uma interrupção no fornecimento de potência e pode provocar uma série de danos físicos e econômicos para os consumidores. Este trabalho constituiu um estudo de caso sobre as consequências de afundamentos de tensão no fornecimento de potência de uma usina eólica.

Primeiramente apresentou-se uma revisão teórica sobre QEE e seus problemas mais comuns em usinas eólicas, o que deixa clara a necessidade dos estudos da QEE para aumentar a confiabilidade das usinas eólicas.

A Parte 1 das simulações mostrou que problemas de falta na rede e variações na carga geraram uma queda de tensão que se propagou até a usina eólica, suficientemente grande para que a usina fosse desconectada da rede. Também foi possível notar que apesar da usina ter sido desconectada da rede, existiu uma variação da magnitude da tensão na barra de conexão da usina em relação à barra mais afastada do sistema. A variação do vento não causou tal afundamento de tensão, em função do desenvolvimento do controle de ângulo das pás das turbinas. Esse controle já está suficientemente desenvolvido para que não haja desconexão da usina, um dos motivos do uso de geradores de velocidade variável ser amplamente difundido nas usinas eólicas. Mostrou-se, então, que apesar do grande desenvolvimento da energia eólica nos últimos anos, ela ainda está sujeita a problemas da QEE da rede.

A segunda parte das simulações envolveu a colocação de um STATCOM no cenário da falta na rede, para mitigar as consequências do afundamento de tensão na usina eólica. Mostrou-se que o STATCOM não apresenta resultados satisfatórios no intuito de suprir sozinho grandes quedas de tensão na barra na qual a usina eólica está conectada. Portanto, a presença do STATCOM não conseguiu suprir a queda de tensão que foi propagada até a barra de conexão da usina e, pelas normas da ONS, a mesma deveria ser desconectada. Porém, o mesmo equipamento foi efetivo para a mitigação dos efeitos com um afundamento de tensão menor, na barra de conexão da usina.

Finalmente, com base nos estudos apresentados neste trabalho, é possível fazer as seguintes considerações finais:

- As usinas eólicas apresentaram-se sensíveis à variação de tensão na rede, mostrando a necessidade de um dispositivo de controle e compensação que supra os afundamentos de tensão da rede e impeça a interrupção do funcionamento da usina;
- O STATCOM não se mostrou eficaz para suprir faltas que gerem grandes afundamentos de tensão na barra de conexão da usina. O dispositivo consegue elevar a tensão na barra no qual está conectado, porém não em magnitude suficiente para evitar o desligamento da usina eólica;
- As simulações mostraram que o uso do STATCOM, para afundamentos de tensão menores na barra de conexão da usina, foram eficientes para evitar a desconexão da usina eólica da rede. O dispositivo foi capaz de elevar a tensão na barra na qual estava colocado para os padrões requeridos pelo ONS, e mitigar os efeitos de desligamento da usina.

5.1 Trabalhos Futuros

Neste trabalho apresentou-se um estudo de caso sobre as consequências dos afundamentos de tensão no funcionamento dos parques eólicos, porém, para melhoramento deste trabalho sugerem-se os seguintes pontos para futuros estudos:

- Simulação e análise de cenários conjuntos, avaliando o efeito de mais de uma fonte de variação da tensão nominal do sistema;
- Análise de outros dispositivos FACTS para a mitigação dos efeitos de afundamento de tensão. Neste trabalho foi avaliado apenas o comportamento do STATCOM, por ser um dos dispositivos mais citados na literatura. Porém, é importante o estudo de mais dispositivos para avaliação dos resultados de mitigação dos problemas com afundamentos de tensão;
- Avaliação do efeito da distância entre a ocorrência da falta e a usina eólica. Como foi citado neste trabalho, houve uma variação da tensão na barra mais próxima da falta e na barra na qual o parque eólico está conectado. O estudo do efeito do comprimento

da rede pode ser interessante, para demonstrar até qual distância o uso do STATCOM assegura o não desligamento da usina eólica;

- Estudo do efeito de outros índices da qualidade de energia no funcionamento das usinas eólicas. Este trabalho avaliou exclusivamente os efeitos da qualidade da tensão, porém os estudos dos outros índices de QEE podem ser interessantes para concretizar a energia eólica na matriz energética brasileira.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, A. **Overview of power quality aspects in wind generation**. North American Power Symposium (NAPS). Champaign, IL: IEEE. 9-11 Setembro 2012. p. 1-6.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição - Módulo 1**, 2008a. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>. Acesso em: 10 Outubro 2015.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição - Módulo 8**, 2008b. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>. Acesso em: 10 Outubro 2015.

ARRIGALA, J.; WATSON, N. R.; CHEN, S. **Power System Quality**. 1. ed. Chichester - England: Willey, 2000.

ARULAMPALAM, A. et al. Power quality and stability improvement of a wind farm using STATCOM supported with hybrid battery energy storage. **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-**, v. 153, n. 6, p. 701-710, Novembro 2006.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. 1. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001.

CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS, ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Atlas Eólico: Rio Grande do Sul**. SDPI :AGDI. Porto Alegre. 2014.

CHATTOPADHYAY, ; MADHUCHHANDA , M.; SAMARJIT , S. **Electric Power Quality**. Dordrecht: Springer, 2011.

COSTA, J. P. D. **Contribuição ao Estudo da Máquina Assíncrona Trifásica Duplamente Alimentada Aplicada a Aerogeradores de Velocidade Variável**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2006.

DUNGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. Londres: McGraw-Hill, 2002.

ELETROBRÁS - ELETROSUL. Complexo Eólico Cerro Chato terá mais 48 MW, 2014. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/sala-de-imprensa/noticias/complexo-eolico-cerro-chato-tera-mais-48-mw>>. Acesso em: 22 Outubro 2015.

ELETROBRAS. Dados de geração e consumo das CGEE participantes do PROINFA - 2015. **Eletrobras**, 2015. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/Proinfa/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm#Dados>> de geração e consumo das CGEE participantes do PROINFA - 2015>. Acesso em: 15 Dezembro 2015.

FLETCHER, ; YANG ,. Introduction to the Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Applications, Paths to Sustainable Energy. In: NG, A. **Paths to Sustainable Energy**. [S.l.]: InTech, 2010. Cap. 14, p. 259-278.

GAMESA. **GAMESA G114-2.0 MW Datasheet**. Sarriguren. 2012.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S. **Sistemas de Potencia: Análisis y Diseño**. 3. ed. México: Thomson, 2004.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms**. New York: [s.n.], 1984.

ISE, T.; HAYASHI, ; TSUJI ,. **Definitions of power quality levels and the simplest approach for unbundled power quality services**. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings. Orlando - FL: IEEE. 01-04 Outubro 2000. p. 385-390.

KULKARNI, S. S.; MUCHA , N.. A Matlab/Simulink Model for the control scheme utilized to improve power quality of Wind Generation System connected to grid. **International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)**, v. 1, n. 6, p. 418-423, Julho 2014.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. Toronto: Mc-Grall Hill, 1994.

LEBORGNE, R. C. **Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais frente à Afundamentos de Tensão**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2003.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained**. 2. ed. Noida: Wiley, 2009.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O Aproveitamento da Energia Eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 1304.1-1304.13, 2008.

MINDYKOWSKI, J. **Fundamentals of Electrical Power Quality Assessment**. XVII IMEKO World Congress - Metrology in the 3rd Millennium. Dubrovnik: [s.n.]. 2003. p. 552-557.

MORENO-MUÑOZ, A. **Power quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment**. London: Springer, 2007.

MULJADI, E. et al. Power Quality Aspects in a Wind Power Plant. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, Montreal, 18-22 Junho 2006.

PADIYAR, K. R. **FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution**. Nova Deli: New Age International Publishers, 2007.

PROINFA. **Ministério de Minas e Energia**, 2004. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>. Acesso em: 18 Outubro 2015.

RAMOS, A. C. L. **Avaliação dos Impactos de Impedância de Falta e da Geração Distribuída em Estudos de Afundamento de Tensão**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2009.

RÜNCOS, F. Gerador Eólico. **WEG Máquinas**, 2000. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-gerador-eolico-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 15 Outubro 2015.

SANKARAN, C. **Power Quality**. Boca Raton: CRC Press, 2002.

STEVENSON, W. D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

VINHAS, L. A.; SILVA, S. C. A. D. Protocolo de Kyoto. **Protocolo de Kyoto**. Disponível em: <<http://protocolo-de-kyoto.info/>>. Acesso em: 20 Novembro 2015.

WU, Y.-K.; CHANG, W.; WANG,. **Power quality measurements and analysis for Zhong-Tun Wind Farm in Penghu**. International Automatic Control Conference (CACCS). Taiwan: [s.n.]. 2-4 Dezembro 2013. p. 433-438.

ZHU, C. et al. **Design and realization of regional power quality monitoring system**. The 3th international conference on deregulation and restructuring and power technologies. Nanjing: [s.n.]. 2008. p. 2023-2027.