

ANÁLISE COMPUTACIONAL DE FAZENDAS EÓLICAS MODERNAS

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo exemplificar e discutir as análises computacionais que podem ser realizadas com três dos modelos apresentados no capítulo anterior: o modelo fasorial, o modelo médio e o modelo detalhado de uma turbina eólica de velocidade variável baseada no DFIG.

Uma ferramenta comercial que vem sendo muito utilizada para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos com esses três tipos de modelos é o *Simulink*, que integra o ambiente Matlab. Dentro do *Simulink*, o *SimPower-Systems* é uma toolbox que inclui cada um dos três modelos em sua biblioteca como elementos individuais, ou na versão *demo*, com esses elementos aplicados em casos testes de demonstração. São utilizadas variações destes arquivos com casos testes de demonstração para mostrar e discutir a operação dinâmica de turbinas eólicas (ou aerogeradores) e parques eólicos.

O Matlab apresenta arquivos *demo* para uma fazenda eólica composta por 6 turbinas de 1,5 MW de potência nominal. Ao longo do capítulo, são apresentados os detalhes de cada arquivo *demo* e de quais aspectos podem ser analisados com cada um deles. Além disso, são discutidos o tempo computacional envolvido

nas simulações. São apresentados três arquivos demo fornecidos pela plataforma Matlab/Simulink. Os arquivos permitem estudar efeitos de transitórios como curto-circuitos e afundamentos de tensão no ponto de conexão da fazenda eólica com a rede elétrica. Os arquivos modelam fazendas eólicas baseadas em DFIG compostas por seis turbinas de 1,5 MW de capacidade instalada cada.

Este capítulo está estruturado da seguinte maneira: a seção 6.2 apresenta as simulações utilizando o modelo fasorial; a seção 6.3 apresenta as simulações utilizando o modelo médio e por fim, a seção 6.4 apresenta as simulações utilizando o modelo detalhado.

6.2 ANÁLISE COM MODELO FASORIAL

No arquivo *power_wind_dfig.slx* (MathWorks, 2019) encontrado no Examples, uma fazenda eólica de 9 MW é conectada a um sistema de distribuição de 25 kV, que se conecta ao sistema de subtransmissão de 120 kV por meio de uma linha de 30 km de comprimento.

Um consumidor industrial representado por um motor de 2 MVA alimentado em 2300 V e uma carga de 200 kW (puramente resistiva) está conectado na mesma rede de distribuição que a fazenda eólica. O modelo implementado neste arquivo é mostrado pela Figura 6.1. Além dos elementos descritos, pode-se verificar que o demo inclui transformadores, linhas representadas por seções pi, inclui uma caixa de medições (em verde) e outra de proteções (em azul). O bloco *powergui* no canto inferior esquerdo é necessário para se utilizar a *toolbox SimPowerSystems* e determina o tipo de simulação a ser utilizado.

Este arquivo pré-programado permite estudar de imediato os seguintes cenários:

- Cenário 1: resposta a uma mudança súbita da velocidade do vento;
- Cenário 2: resposta a um afundamento de tensão no sistema de 120 kV;
- Cenário 3: resposta a uma falta no ponto de conexão no modo de controle de tensão terminal dos conversores do lado do rotor (RSC);
- Cenário 4: resposta a uma falta no ponto de conexão operando com fator de potência unitário.

O bloco da turbina eólica de velocidade variável baseado em DFIG, quando aberto, mostra o menu da Figura 6.2. Neste bloco é possível ajustar valores como a potência nominal do gerador (em W) os ganhos do controle do ângulo das pás e seu valor máximo e a velocidade nominal da turbina (*wind speed at point C*). O ponto C faz alusão à curva de potência mostrada na Figura 6.3. Outro parâmetro que pode ser visto nesta figura é a velocidade mínima para a geração de energia pela turbina modelada (5 m/s).

Figura 6.1 Diagrama de simulação de uma fazenda eólica conectada à rede elétrica utilizando o modelo fasorial da turbina eólica no Simulink

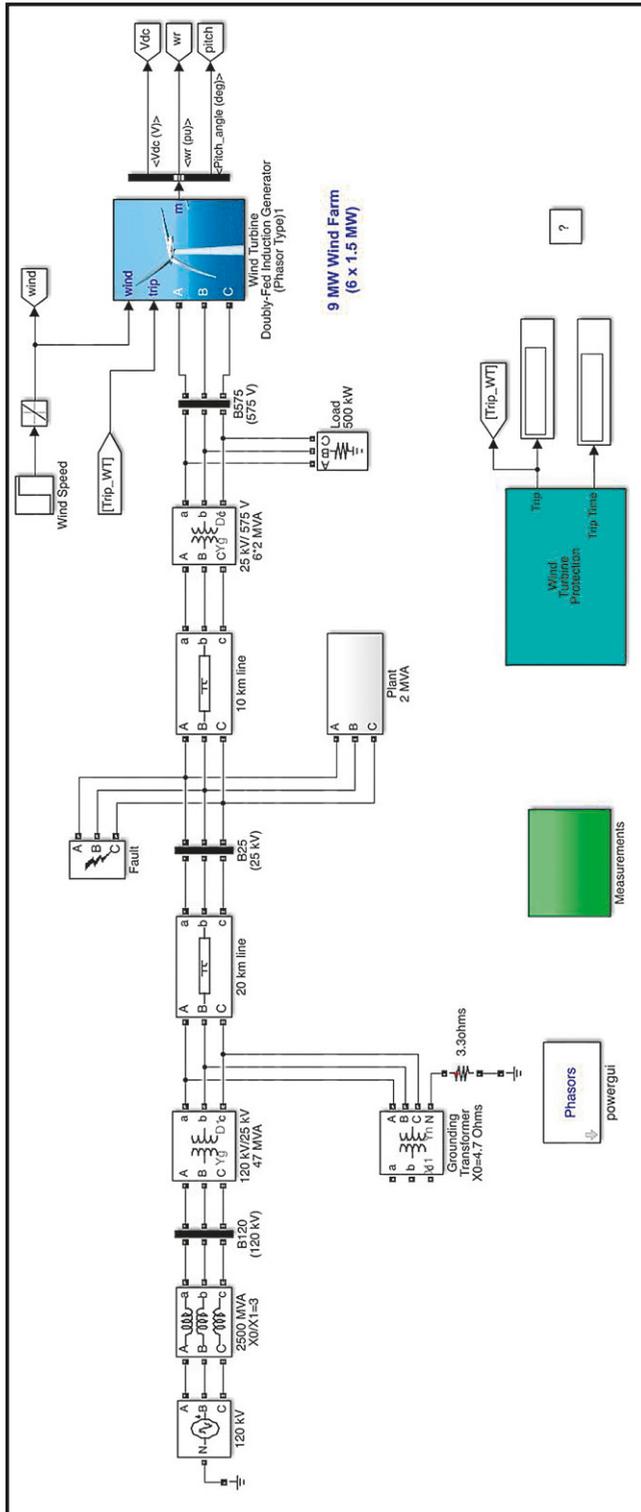
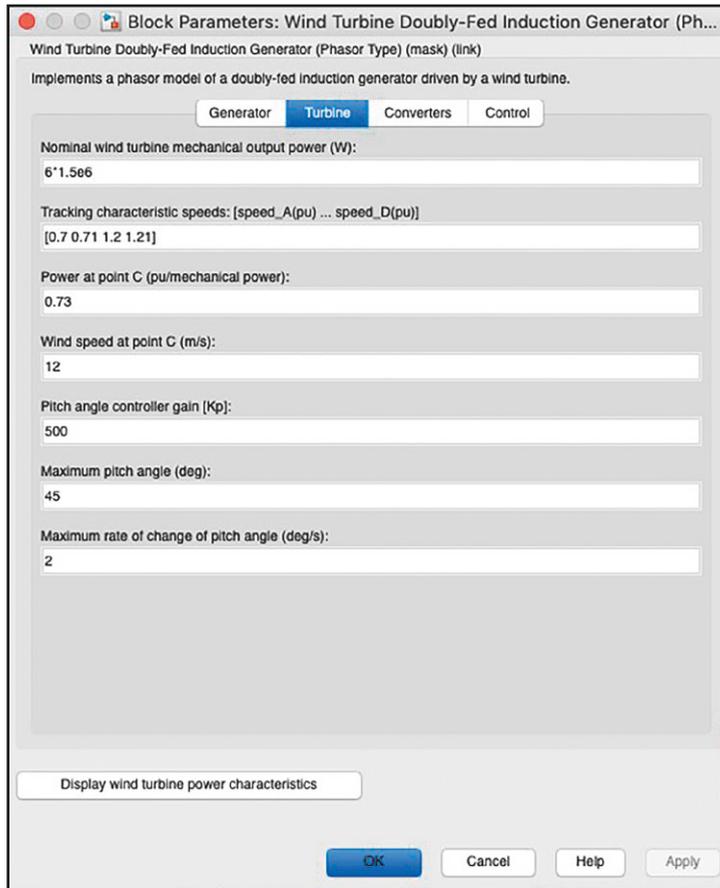


Figura 6.2 Menu de parâmetros da turbina eólica para simulação utilizando o modelo fasorial



É possível verificar os componentes que modelam a turbina eólica ao clicar com o botão direito e ir até o menu olhar sob a máscara (*look under mask*, em inglês). O interior do bloco que representa a turbina eólica é mostrado na Figura 6.4. A figura mostra que o bloco da turbina eólica é composto por cinco blocos intermediários com a função de realizar o controle (bloco *Control*), modelo dos conversores (bloco *Grid side converter currents and Converter power*), modelo do circuito CC (bloco *DC bus model*), o modelo do DIFG (representado pelo bloco *Asynchronous machine*) e o bloco de aquisição de dados (*Data Acquisition*) em verde.

Figura 6.3 Curva de potência de uma turbina eólica de velocidade variável baseada em DFIG com velocidade nominal de 12 m/s

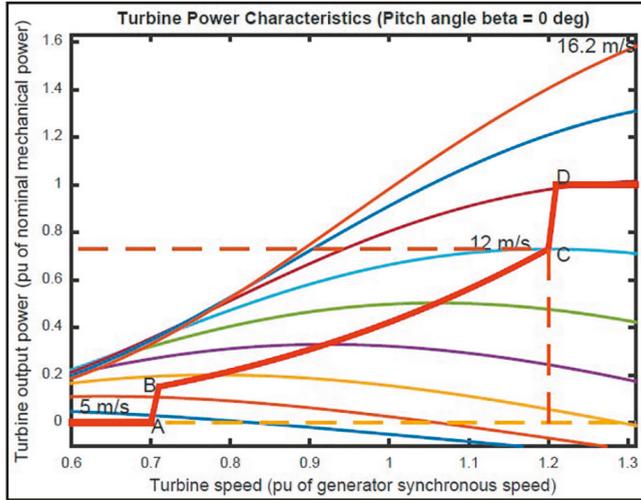
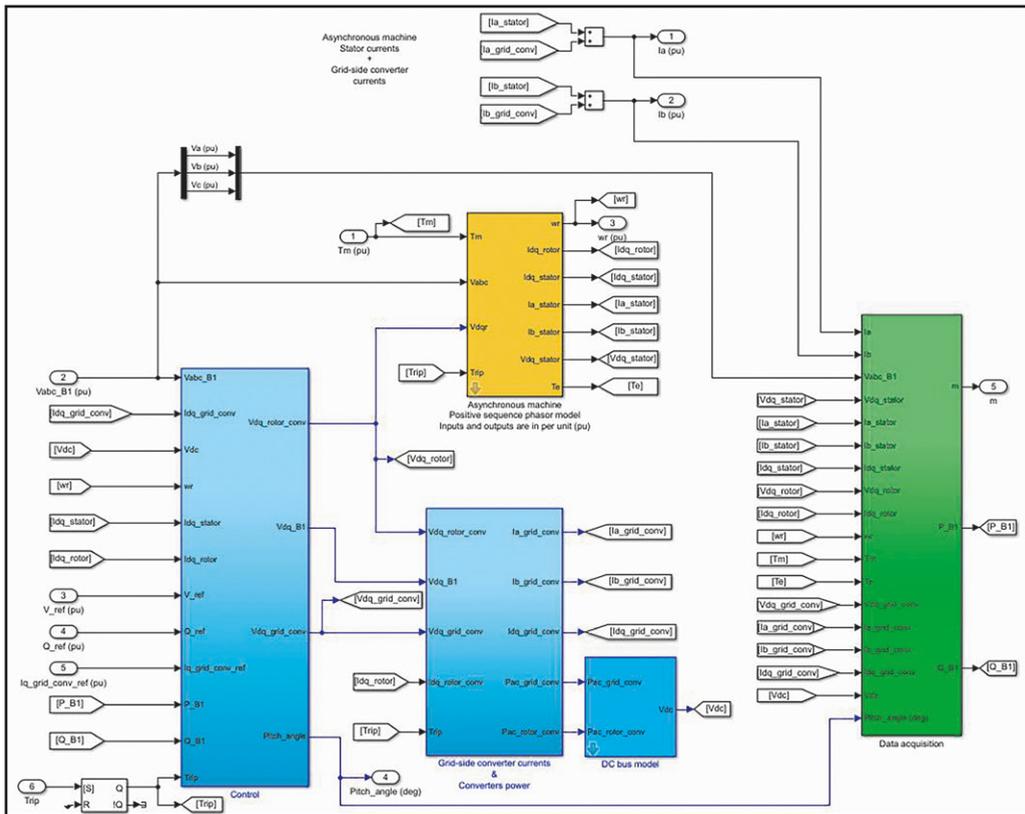


Figura 6.4 Detalhamento do modelo fasorial da turbina eólica no Simulink: controle, conversores e medições



6.2.1 Simulação do Cenário 1

No cenário 1, é estudado o efeito de uma súbita variação na velocidade do vento de 8 para 14 m/s a partir do quinto segundo. O perfil da variação na velocidade do vento é mostrado pela Figura 6.5. O aumento da velocidade do vento causa um aumento na saída de potência ativa da fazenda eólica, como mostrado na Figura 6.6. Pode-se notar que a turbina atinge a potência máxima aproximadamente após 15 segundos do início da perturbação na velocidade do vento.

Nota-se também que este aumento de potência possui uma variação mais brusca próxima do estabelecimento da potência máxima. Isso ocorre pois o sistema de controle da turbina modelada no arquivo demo possui uma limitação na variação da velocidade do rotor, o que faz com que a velocidade de rotação do rotor se comporte como na Figura 6.7. Ao se estabelecer na velocidade que está acima da velocidade do ponto C na Figura 6.3, o controle de ângulo das pás precisa atuar para limitar a potência do gerador no valor nominal, como pode ser visto na Figura 6.8. O desvio de ângulo, nesse caso, é bem pequeno, perto de 1 grau.

Por fim, a fazenda eólica implementada pode ser configurada no modo de controle de tensão terminal, ou no modo de injeção de potência reativa (dois modos exigidos pelo ONS nos procedimentos de rede). No cenário 1, a fazenda é configurada no modo de controle de tensão terminal em 1 pu. Assim, ocorre a injeção de potência reativa conforme mostrado na Figura 6.9 para este fim e, com isso, a tensão na barra 25 kV é mantida em 1 pu.

Figura 6.5 Variação da velocidade do vento para simulação do cenário 1

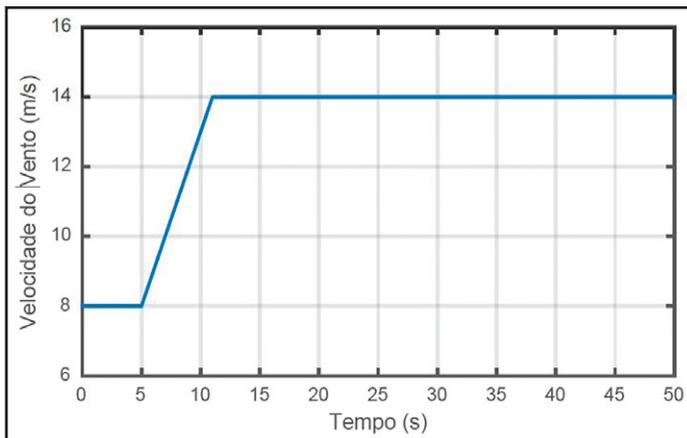


Figura 6.6 Potência ativa injetada pela turbina no cenário 1

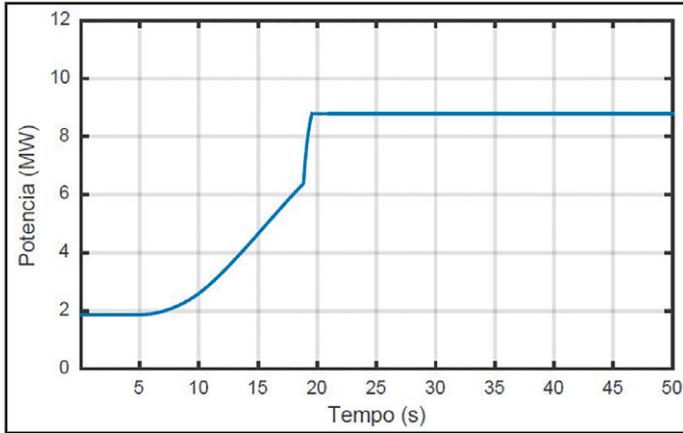


Figura 6.7 Rotação em valores por unidade do rotor da turbina eólica no cenário 1

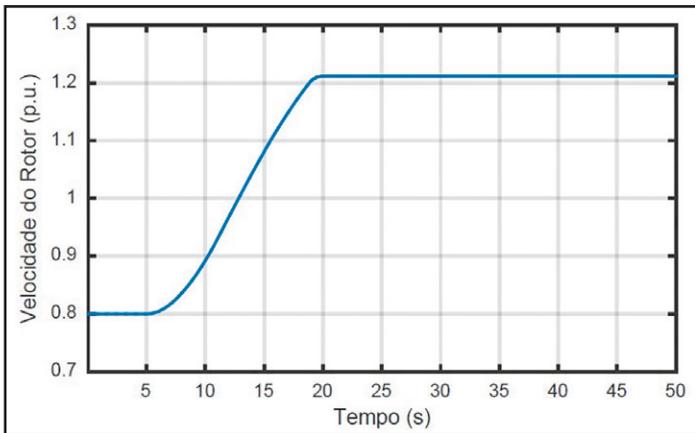


Figura 6.8 Ângulo das pás durante o cenário 1

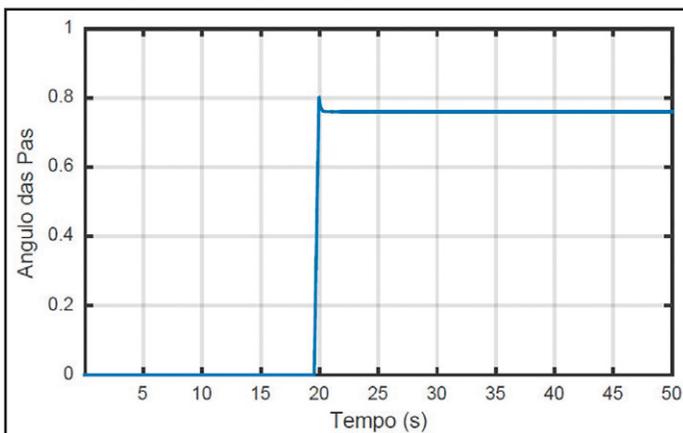
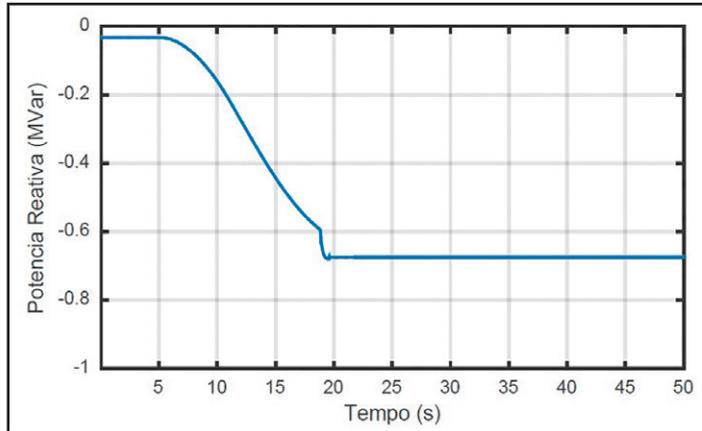


Figura 6.9 Potência reativa injetada pela turbina no cenário 1



6.2.2 Simulação do Cenário 2

No cenário 2, as consequências de um afundamento de tensão de 0,15 pu na barra B120 são estudadas, para uma ocorrência após 5 segundos do início da simulação. O reflexo na tensão da barra B575 (ponto de conexão da fazenda eólica) durante o afundamento de tensão é mostrado na Figura 6.10. Nota-se que o afundamento se propaga para o ponto de conexão, causando uma variação na tensão terminal. Esta variação causa uma perturbação na potência ativa e reativa, como mostrado respectivamente pela Figura 6.11 e pela Figura 6.12. Por fim, verifica-se que a velocidade do rotor permanece inalterada, como mostrado pela Figura 6.13. Vale frisar que durante toda a perturbação e após a recuperação do sistema, a fazenda eólica permaneceu conectada à rede elétrica, o que não ocorreu com a carga industrial. A queda de tensão nos terminais da carga industrial causou a sensibilização de seu relé de proteção e, por causa dos parâmetros ajustados, a carga industrial se desconectou da rede.

Figura 6.10 Reflexo na barra B575 do afundimento de tensão na barra B120 no cenário 2

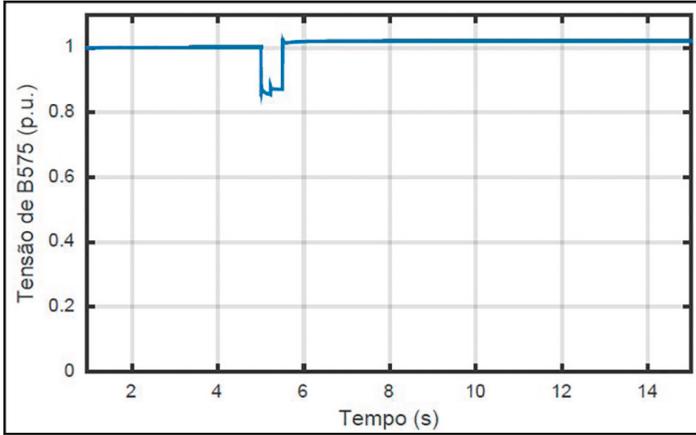


Figura 6.11 Potência ativa injetada pela turbina no cenário 2

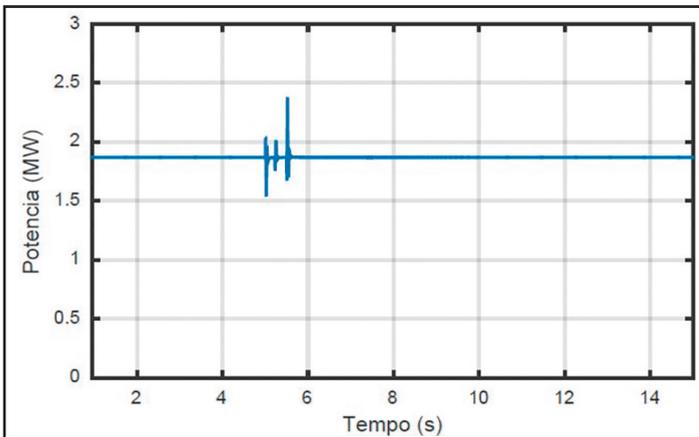


Figura 6.12 Potência reativa injetada pela turbina no cenário 2

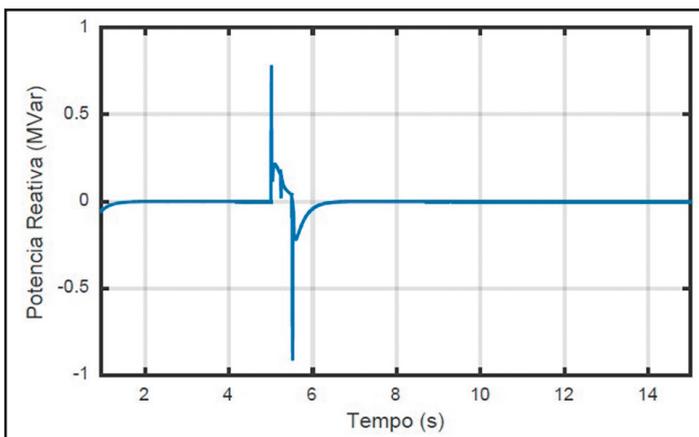
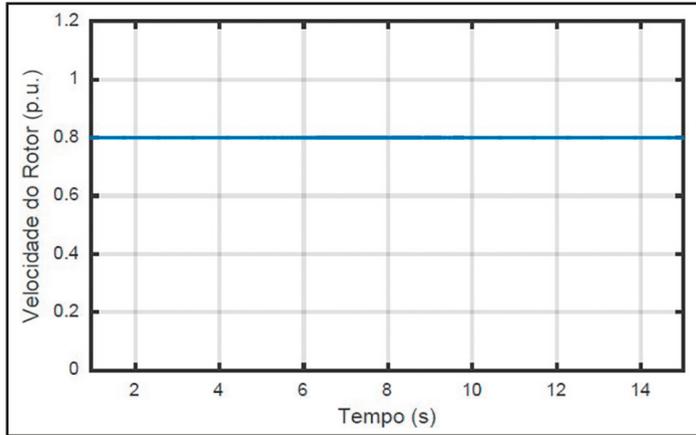
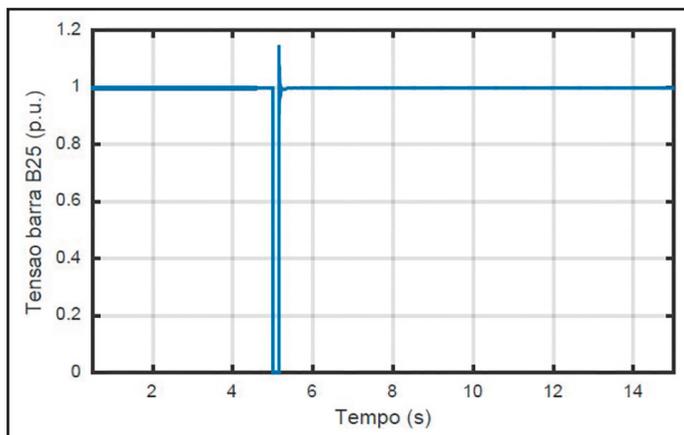


Figura 6.13 Rotação em valores por unidade do rotor da turbina eólica no cenário 2



6.2.3 Simulação do Cenário 3

No cenário 3 são estudadas as consequências de uma falta com nove ciclos de duração (150 ms) entre a fase A e a terra no ponto de conexão (barra B25) da fazenda eólica com a rede elétrica, quando a fazenda opera no modo de controle tensão terminal. A falta ocorre após decorridos 5 segundos do início da simulação e sua consequência na tensão da barra B25 é mostrada na Figura 6.14.

Figura 6.14 Tensão do ponto de conexão da fazenda eólica com a rede elétrica durante falta no instante $t=5s$ no cenário 3

Também há efeitos no terminal de conexão da fazenda eólica, durante a falta, localizado a 10 km de distância. Esses efeitos são mostrados na Figura 6.15. Para

facilitar a análise, um *zoom* foi dado na escala de tempo entre os instantes 4,9 s e 5,4 s, possibilitando a verificação do comportamento da tensão que é mostrado pela Figura 6.16. Por meio da análise dessa figura, verifica-se que a tensão no ponto de conexão da fazenda eólica não ficou abaixo de 0,75 pu (ajuste do relé de proteção), assim, a fazenda eólica permaneceu conectada à rede elétrica durante a falta.

Figura 6.15 Tensão do terminal de saída da fazenda eólica no cenário 3

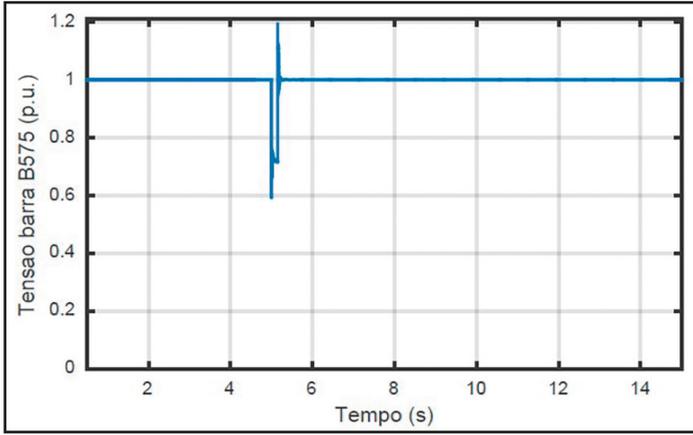
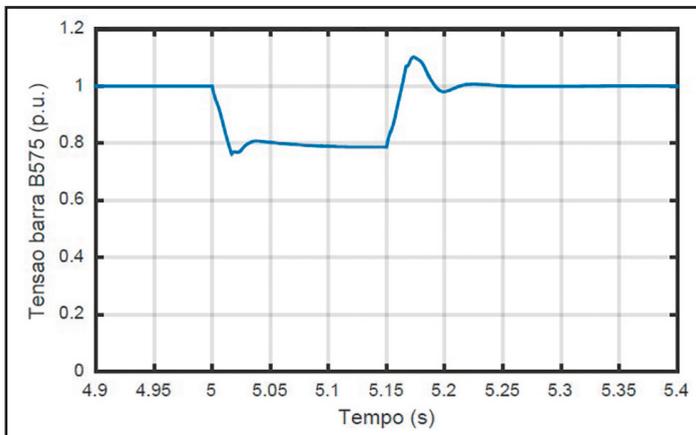


Figura 6.16 Zoom no intervalo de 4,9 a 5,4 segundos da tensão do terminal de saída da fazenda eólica no cenário 3



O controle de tensão terminal foi realizado graças à injeção de potência reativa no sistema mostrada na Figura 6.17. Nota-se que o controle responde instantaneamente à falta, ajudando o terminal de conexão a se recuperar do afundamento causado pela falta. Conforme explicado no capítulo 6, durante os

afundamentos de tensão os modelos para as malhas de controle de corrente do RSC passam a não representar bem o modelo físico durante o transitório (dado pelas equações (56) e (57)) e isso causa os efeitos na potência ativa de saída mostrados na Figura 6.18. Ou seja, no caso real da resposta do parque eólico a uma falta monofásica na rede, esses picos de injeção de potência ativa não aconteceriam. Além disso, vale notar que as implementações práticas do controle do RSC possuem limitações de velocidade e da taxa de variação de velocidade, o que impediriam que a potência atingisse valores negativos (operação como motor).

Figura 6.17 Injeção de potência reativa para o controle da tensão terminal no cenário 3

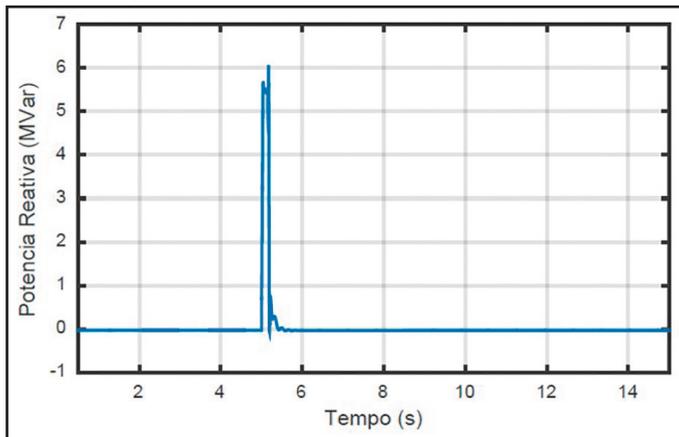
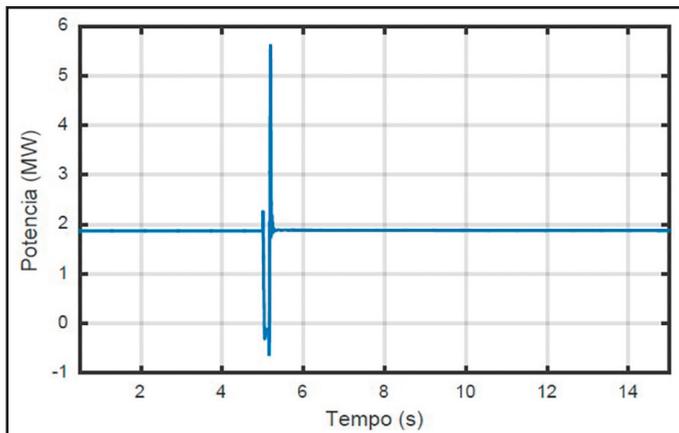


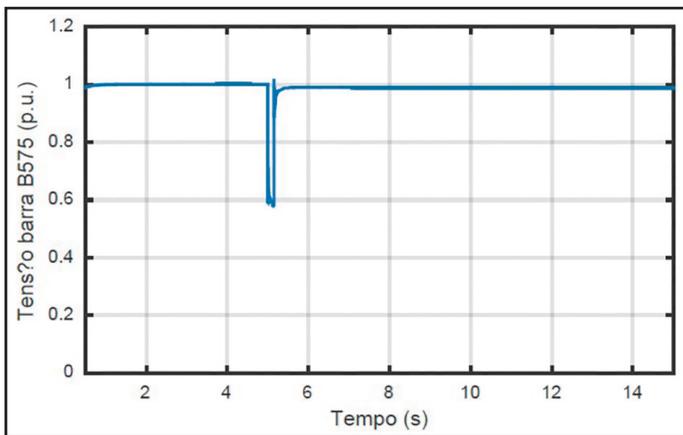
Figura 6.18 Comportamento da potência ativa durante a falta no controle de tensão terminal no cenário 3



6.2.4 Simulação do Cenário 4

No cenário 4, são estudadas as consequências de uma falta entre a fase A e a terra por nove ciclos (150 ms) no ponto de conexão da fazenda eólica com a rede elétrica (barra B25) quando a fazenda opera no modo de controle de fator de potência constante (unitário neste caso). Vale ressaltar que este é um dos modos de controle exigido pelo ONS conforme discutido no capítulo 4. A falta é a mesma discutida na subseção anterior e ocorre aos 5 segundos após o início da simulação, conforme mostrado pela Figura 6.14. A repercussão da atuação desse modo de controle na tensão no ponto de conexão da fazenda eólica, barra B575, é mostrada na Figura 6.19.

Figura 6.19 Efeito na tensão de uma falta fase-terra no ponto de conexão da fazenda eólica para o cenário 4



Como a tensão atinge o valor de 0,58 pu para a fase A e os dispositivos de proteção das turbinas eólicas estão ajustados para atuarem em caso de tensões abaixo de 0,75 pu, a fazenda é desconectada da rede elétrica para evitar que danos sejam causados aos seus equipamentos. As consequências da desconexão da rede elétrica são mostradas na Figura 6.20, na Figura 6.21, na Figura 6.22 e na Figura 6.23.

Na Figura 6.20 a potência ativa de saída da fazenda eólica é mostrada. No momento em que a fazenda desconecta, o seu valor vai a zero. A falta também causa uma perturbação na potência reativa injetada, como mostrada pela Figura 6.21, indo para zero após a desconexão. Como a potência ativa produzida pelas turbinas deixa de ser escoada para a rede de distribuição, as turbinas começam a acelerar devido ao acúmulo de energia. Esta aceleração é mostrada na Figura 6.22.

Depois de 40 segundos do início da simulação, a velocidade de rotação do rotor das turbinas atinge a velocidade nominal (1,21 pu). O controle de ângulo das pás precisa atuar para limitar a velocidade do rotor e protegê-las. A ação do controle de ângulo das pás é mostrada na Figura 6.23.

Figura 6.20 Potência ativa de saída da turbina eólica no cenário 4

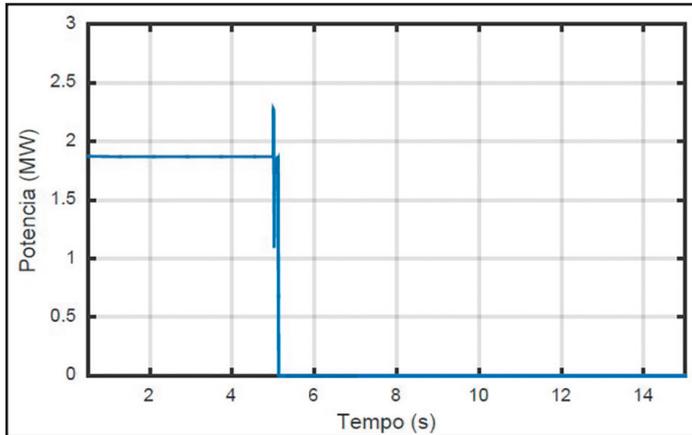


Figura 6.21 Potência reativa de saída da turbina eólica no cenário 4

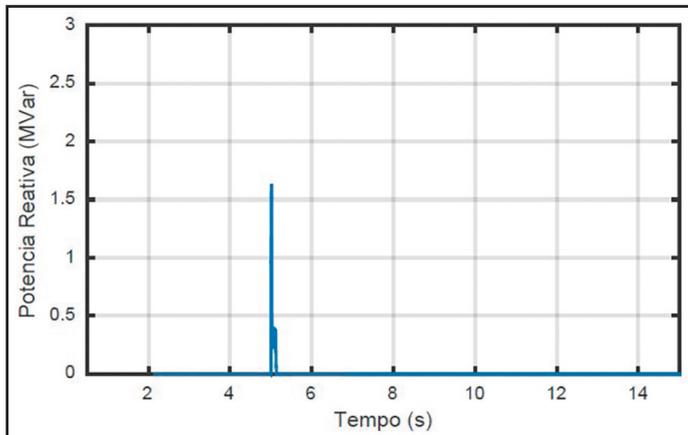


Figura 6.22 Velocidade de rotação do rotor no cenário 4

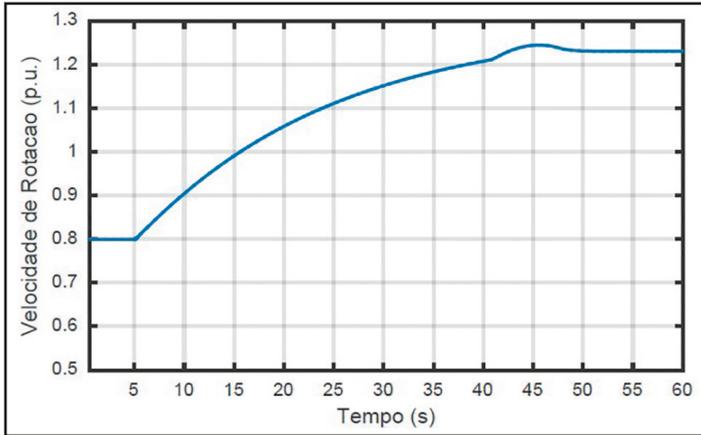
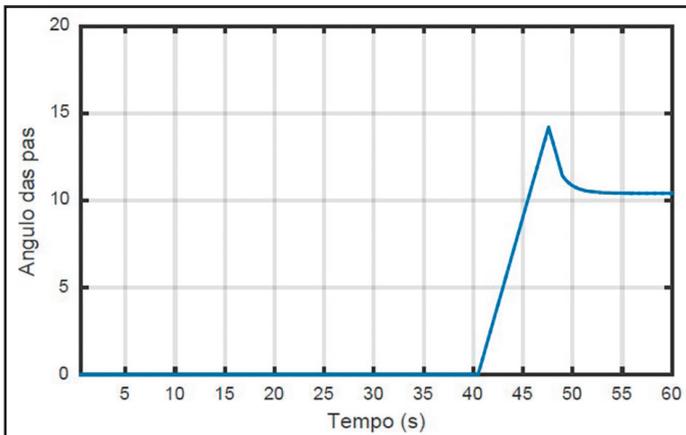


Figura 6.23 Atuação do controle de ângulo das pás no cenário 4



Após a desconexão, caso a rede volte às condições normais, as turbinas do parque poderiam voltar a se conectarem. Porém, para esse tipo de simulação, incluindo reconexão, o modelo de controle de sincronização deverá ser implementado.

O modelo fasorial é muito versátil para a realização de simulações longas com sistemas maiores. Deve-se ter conhecimento suficiente para avaliar as limitações e facilidades da ferramenta comercial em uso, para que as análises não sejam comprometidas. Outra limitação do modelo fasorial do Matlab é a versão da biblioteca *Powerlib* que não inclui o modelo de sequência negativa nas equações do rotor. Neste caso, esse modelo não seria adequado para avaliar faltas

desbalanceadas. O modelo fasorial do *demo* é distinto do modelo da *Powerlib* e inclui o modelo de sequência negativa do rotor.

Utilizando o modelo fasorial apresentado, poderiam ser feitos diferentes estudos. Alguns deles são:

- Sensibilidade do ajuste dos relés de proteção;
- Estabilidade transitória;
- Estudos do perfil de tensão para entradas e saídas de cargas;
- Estudos do perfil de tensão para diferentes tipos de controle.

6.3 ANÁLISES COM MODELO MÉDIO

O arquivo *demo* utilizando o modelo médio incluído no Matlab (MathWorks, 2019) simula uma fazenda eólica de 9 MW, conectada a uma rede elétrica de 120 kV através de um trecho de linha de 30 km a 25 kV. A tecnologia para os geradores desta fazenda eólica é baseada em DFIG. Nesta simulação, um afundamento de tensão de 0,5 pu ocorre na rede de 120 kV e seus efeitos na fazenda eólica podem ser estudados considerando a velocidade do vento constante em 15 m/s. O arquivo de simulação pode ser acessado pelo comando *power_wind_DFIG_avg*.

O diagrama da simulação descrito pode ser visto na Figura 6.24. Nesta figura podem ser vistos da esquerda para a direita a rede de 120 kV, a linha a 25 kV que interconecta a fazenda eólica à rede de alta tensão e a fazenda eólica em azul. O bloco azul representa seis turbinas eólicas de 1,5 MW cada, em modo de controle de torque e potência reativa (do lado do RSC) e controle de tensão do circuito CC (do lado do GSC). Detalhes do modelo das turbinas eólicas podem ser vistos ao clicar com o botão direito e em seguida na opção “olhar sob a máscara” (*look under mask*), como mostrados na Figura 6.25.

Na Figura 6.25, podem ser vistos o bloco de controle, a simulação da transmissão de velocidades (*Drive Train*), o bloco que representa o gerador baseado em DFIG, filtros, transformadores e os conversores *AC-DC-AC Converter*. Estes conversores modelados pelo modelo médio são representados por fontes de tensão, e ao olhar sob a máscara do bloco que o representa observamos a Figura 6.26. O Diagrama apresentado por esta máscara calcula as tensões que devem ser impostas nas fontes de tensão mostradas na Figura 6.25.

A simulação do modelo médio também possui um bloco *powergui*. Como pode ser visto, esse bloco está na simulação discreta, diferentemente da simulação fasorial. Aqui, o passo de simulação está em $50 \mu s$. Quando se utiliza de simulação em tempo discreto, começam a surgir complicações por conta do aumento do tempo computacional envolvido. O passo de simulação determina de quanto em quanto tempo devem ser realizados os cálculos e as transferências de informação entre os blocos, portanto, quanto menor for este passo, maior será a carga computacional envolvida e maior o tempo para realizar a simulação.

Figura 6.24 Diagrama de simulação de uma fazenda eólica conectada à rede elétrica utilizando o modelo médio de uma turbina eólica no Simulink

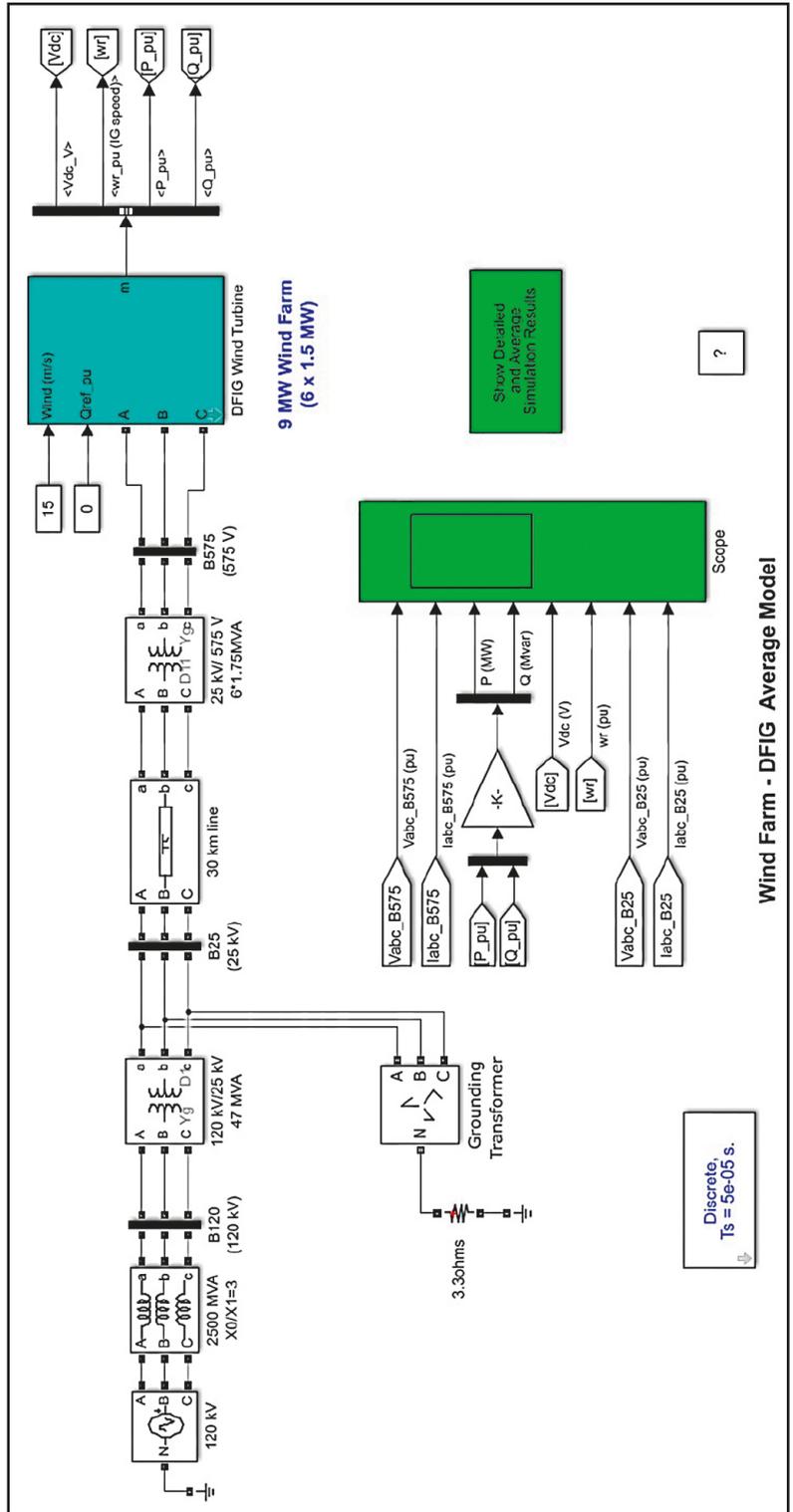


Figura 6.25 Modelo da fazenda eólica utilizando o modelo médio de conversores de potência

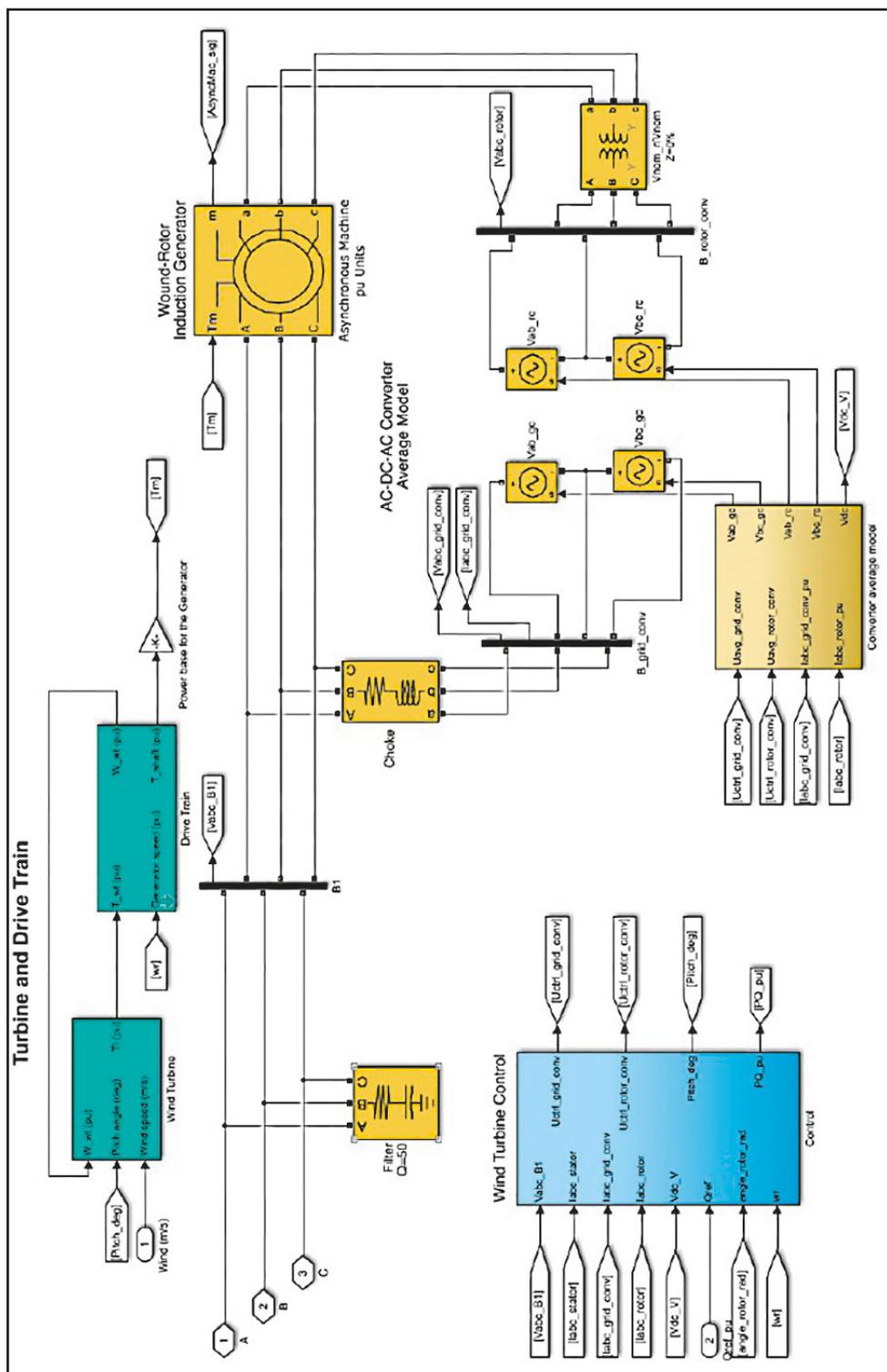
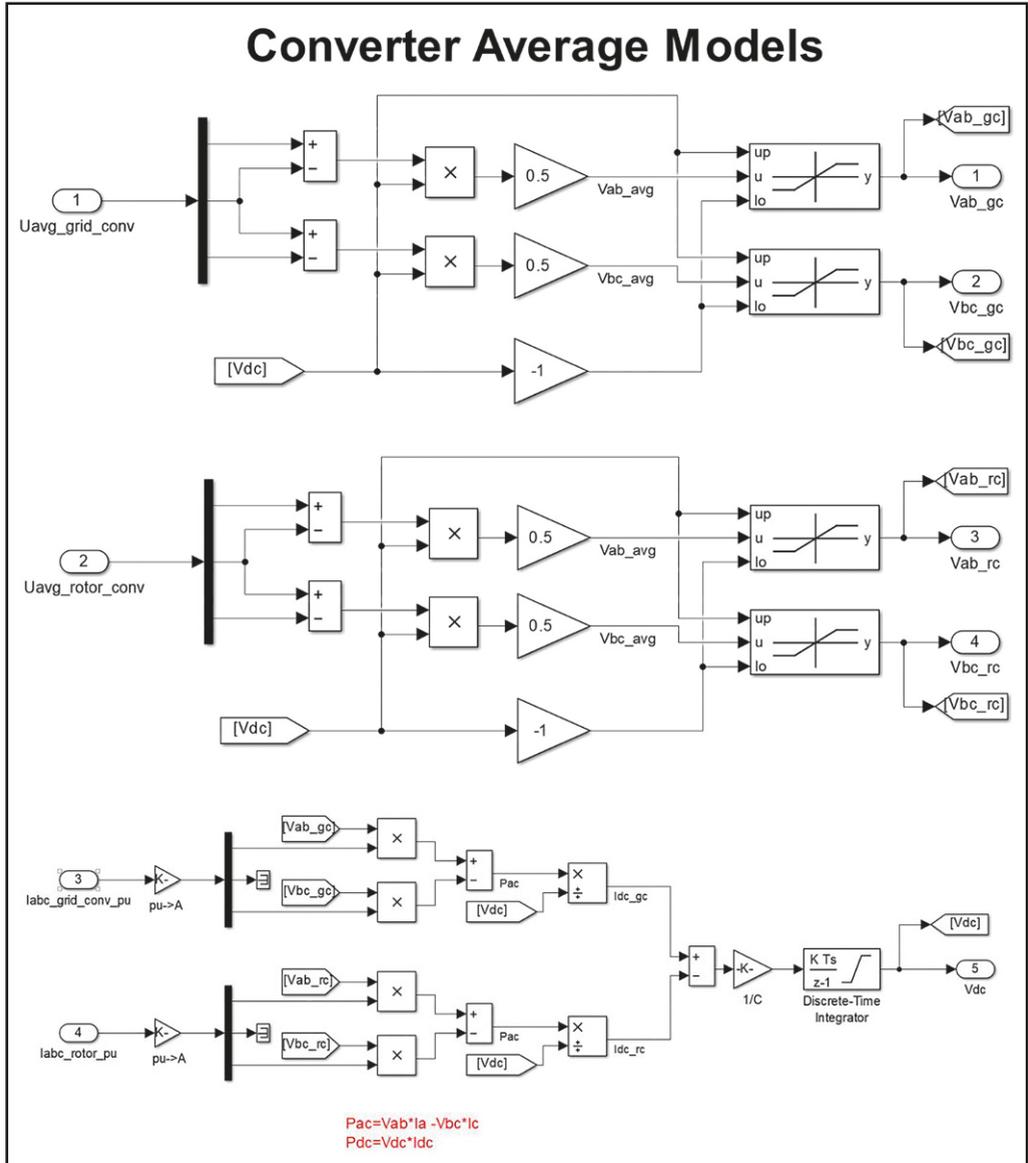
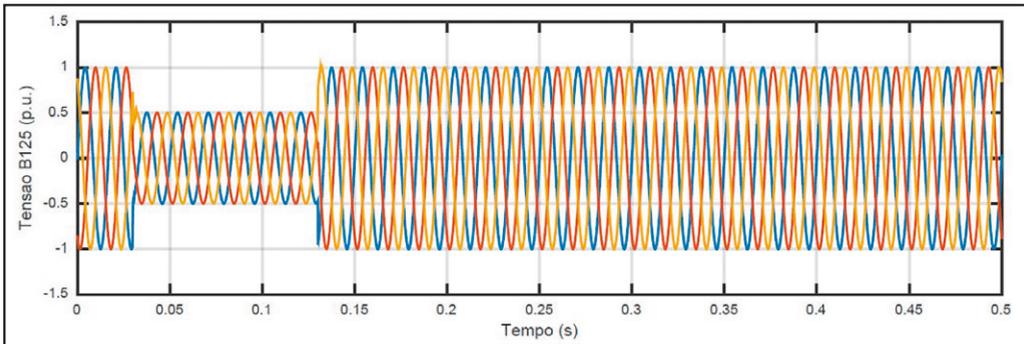


Figura 6.26 Modelo dos conversores utilizando o modelo médio para simulação de fazenda eólica



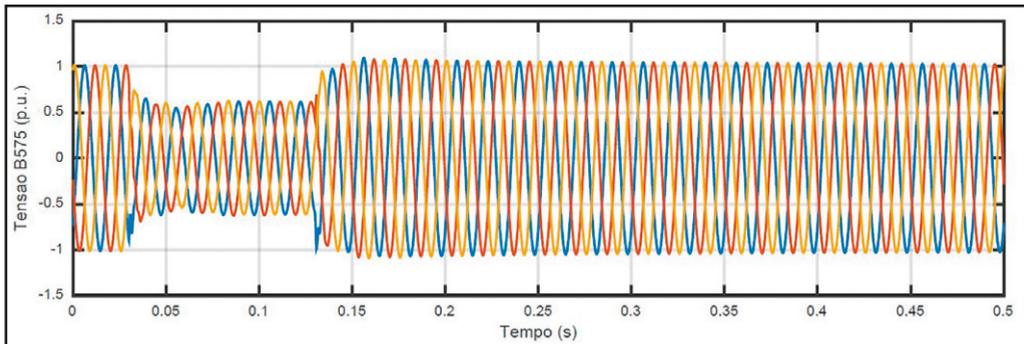
Conforme mencionado, o objetivo deste arquivo demo fornecido pelo Matlab é o estudo do efeito de um afundamento balanceado de 0,5 pu na tensão da rede de 120 kV. Este afundamento ocorre por seis ciclos (100 ms) e é mostrado na Figura 6.27.

Figura 6.27 Afundamento de 0,5 pu de tensão no barramento de 120 kV com duração de seis ciclos (100 ms)



O afundamento tem uma repercussão no ponto de conexão da fazenda eólica. O afundamento de tensão causado é levemente menos severo, como pode ser visto na Figura 6.28. Após o final da perturbação, a tensão na saída da fazenda eólica se recupera rapidamente em dois ciclos.

Figura 6.28 Efeito do afundamento de 0,5 pu de tensão no barramento de 125 kV com duração de seis ciclos (100 ms) na tensão de saída da fazenda eólica



O comportamento da potência ativa na saída da fazenda eólica é mostrado pela Figura 6.29. O efeito na potência é justificado pelo comportamento da rotação do rotor mostrada pela Figura 6.30. Conforme discutido no capítulo 6, durante afundamentos de tensão o modelo do RSC sofre o impacto de alguns termos que são desprezados para o seu funcionamento considerado em condições de regime permanente.

Assim, o controle da rotação do rotor bem como da potência reativa mostrada na Figura 6.31 sofrem impactos e apresentam oscilações. Tais oscilações poderiam ser reduzidas com um ajuste mais preciso dos parâmetros dos controladores.

Por fim, é mostrado o desempenho do controle de tensão do circuito CC. A tensão do circuito CC controlada pelo GSC é mostrada na Figura 6.32. Nota-se uma excursão de cerca de 50 V entre o menor e o maior valores registrados pela oscilação da tensão CC. Essa variação ocorre principalmente por conta do comportamento da potência ativa de saída e por conta do princípio do controle da tensão CC baseado em balanço de potência. Aqui, é necessário se ter atenção à proteção do circuito CC de sobretensões durante eventos de afundamento de tensão. Os engenheiros responsáveis pelo projeto devem prever estas sobretensões e elaborar formas de proteger os equipamentos como as chaves e os capacitores.

Figura 6.29 Potência ativa na saída da fazenda eólica na simulação do afundamento de tensão de 0,5 pu no barramento de 120 kV

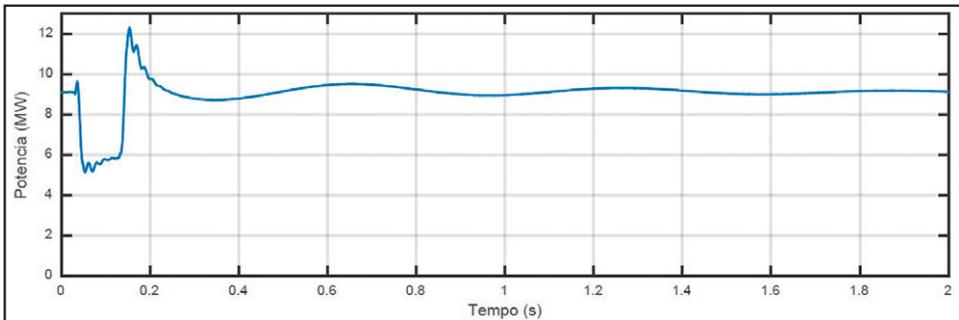


Figura 6.30 Velocidade do rotor na simulação do afundamento de tensão de 0,5 pu no barramento de 120 kV

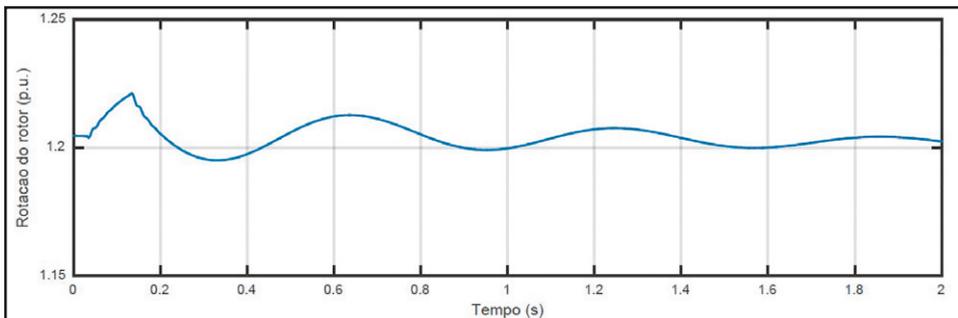


Figura 6.31 Potência reativa na saída da fazenda eólica na simulação do afundamento de tensão de 0,5 pu no barramento de 120 kV

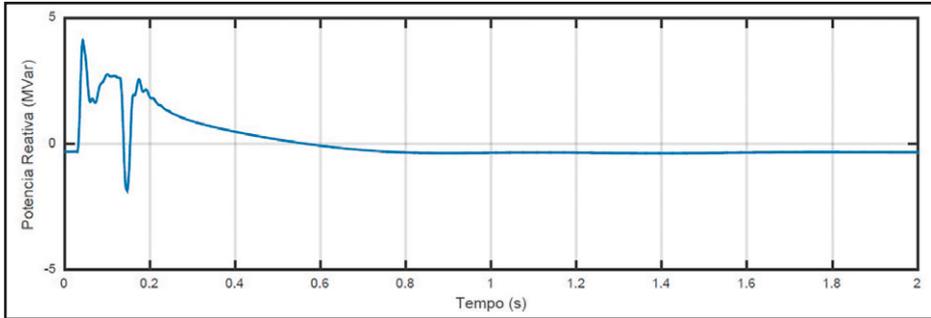
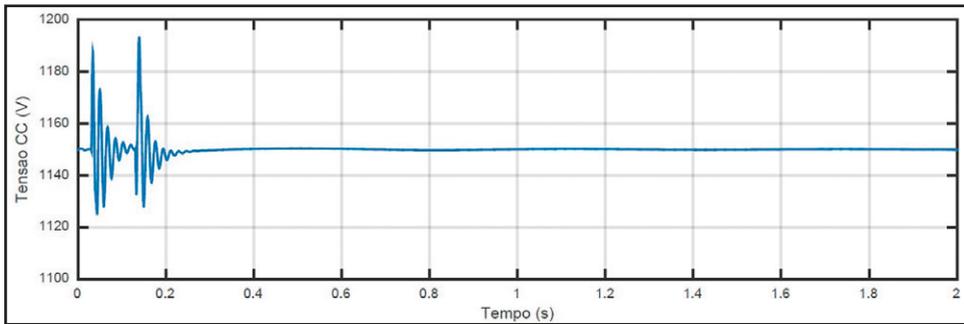


Figura 6.32 Tensão no elo de corrente contínua dos conversores na simulação do afundamento de tensão de 0,5 pu no barramento de 120 kV



Utilizando o modelo médio apresentado, poderiam ser feitos estudos que considerem a variação da frequência da rede para entrada e saída de cargas (ou outras contingências). Porém, o uso de uma rede equivalente que considere barramento infinito, ou seja, tensão e frequência constantes, não é adequado. O modelo da rede deveria ser substituído por modelo de um gerador síncrono equivalente da rede modelada. A análise de geração de harmônicos do parque eólico, devido ao uso de conversores baseados em eletrônica de potência ainda não pode ser feito. Os conversores ainda são modelados como ideias e não incluem a informação da utilização de técnicas de chaveamento.

6.4 ANÁLISES COM MODELO DETALHADO

O cenário fornecido como demo pelo Matlab (MathWorks, 2019) para a simulação do modelo detalhado do conversor é similar ao apresentado na seção

anterior: uma fazenda eólica de 9 MW equipada com seis geradores eólicos baseados em DFIG de 1,5 MW cada, conectada em uma rede elétrica de 120 kV por meio de uma linha de 30 km a 25 kV. A fazenda eólica está sob um regime de vento de velocidade constante de 15 m/s e ocorre um afundamento de tensão de 0,5 pu no barramento de 120 kV, conforme aquele mostrado na Figura 6.27. A simulação visa mostrar o que ocorre com a tensão na saída da fazenda eólica, com as potências ativa e reativa, com a velocidade de rotação da turbina e com a tensão do elo CC. Este modelo pode ser acessado através do comando `power_wind_dfig_det` no *prompt* de comando.

O diagrama de blocos da simulação é mostrado na Figura 6.33. São duas as principais diferenças entre o diagrama estudado nessa seção e o apresentado na seção anterior. A primeira pode ser vista no bloco *powergui*. A simulação do tipo discreta tem como passo $5 \mu s$, ou seja, um passo dez vezes menor que a simulação da seção anterior. Isso resultou em um tempo praticamente dez vezes maior (4 segundos para o modelo médio e 36 segundos para o modelo detalhado para simular um segundo dos sistemas mostrados). A segunda diferença está na implementação dos conversores.

Ao olhar sob a máscara do bloco que modela a fazenda eólica, observamos a Figura 6.34. Aqui, os conversores RSC e GSC são implementados considerando as chaves, característica de um modelo detalhado de conversores baseados em eletrônica de potência. O controle funciona de forma semelhante ao controle exibido na seção anterior. Detalhes do controle podem ser vistos na Figura 6.35 ao se olhar sob a máscara do bloco de controle.

Figura 6.34 Modelo da fazenda eólica utilizando o modelo detalhado de conversores de potência

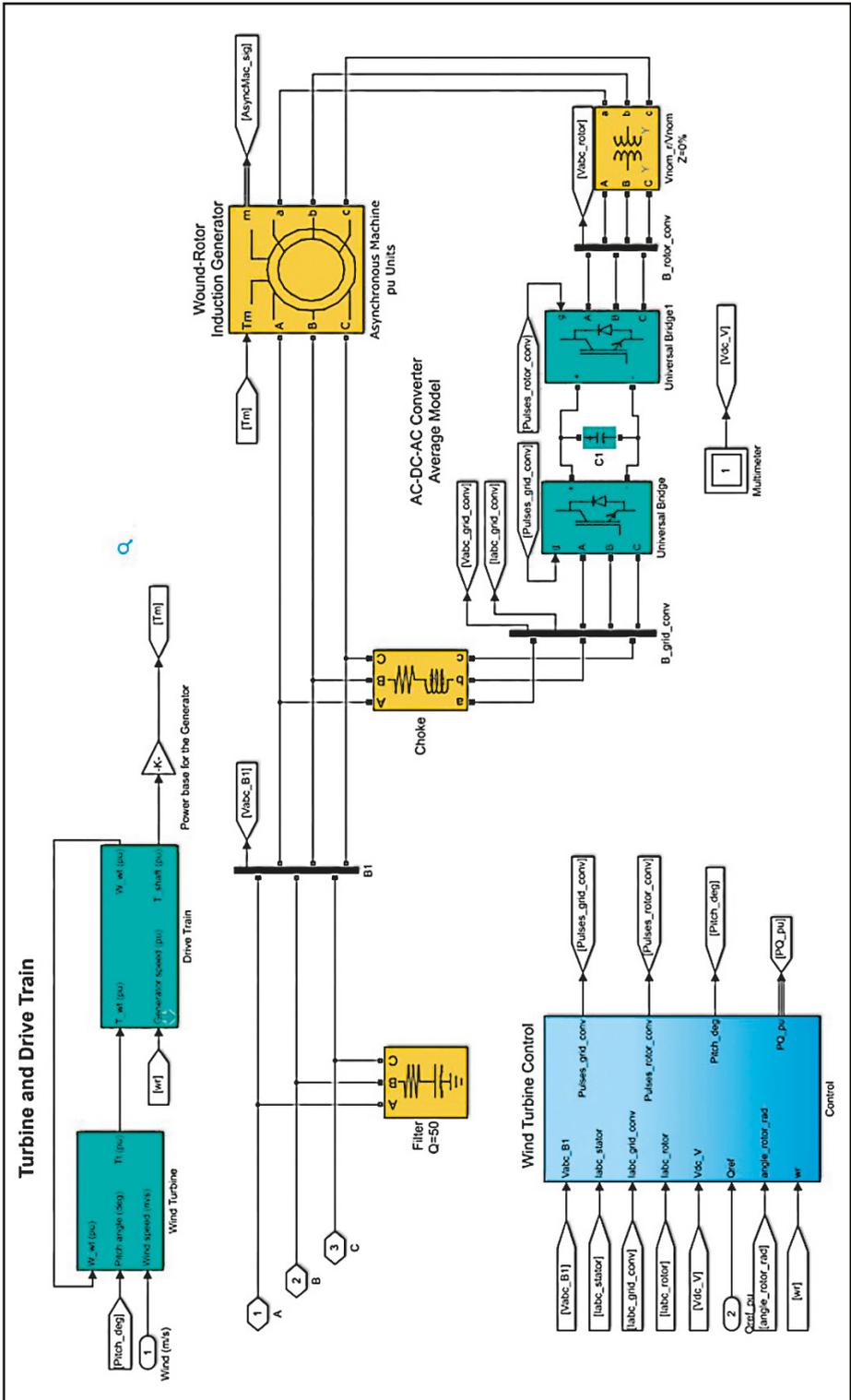
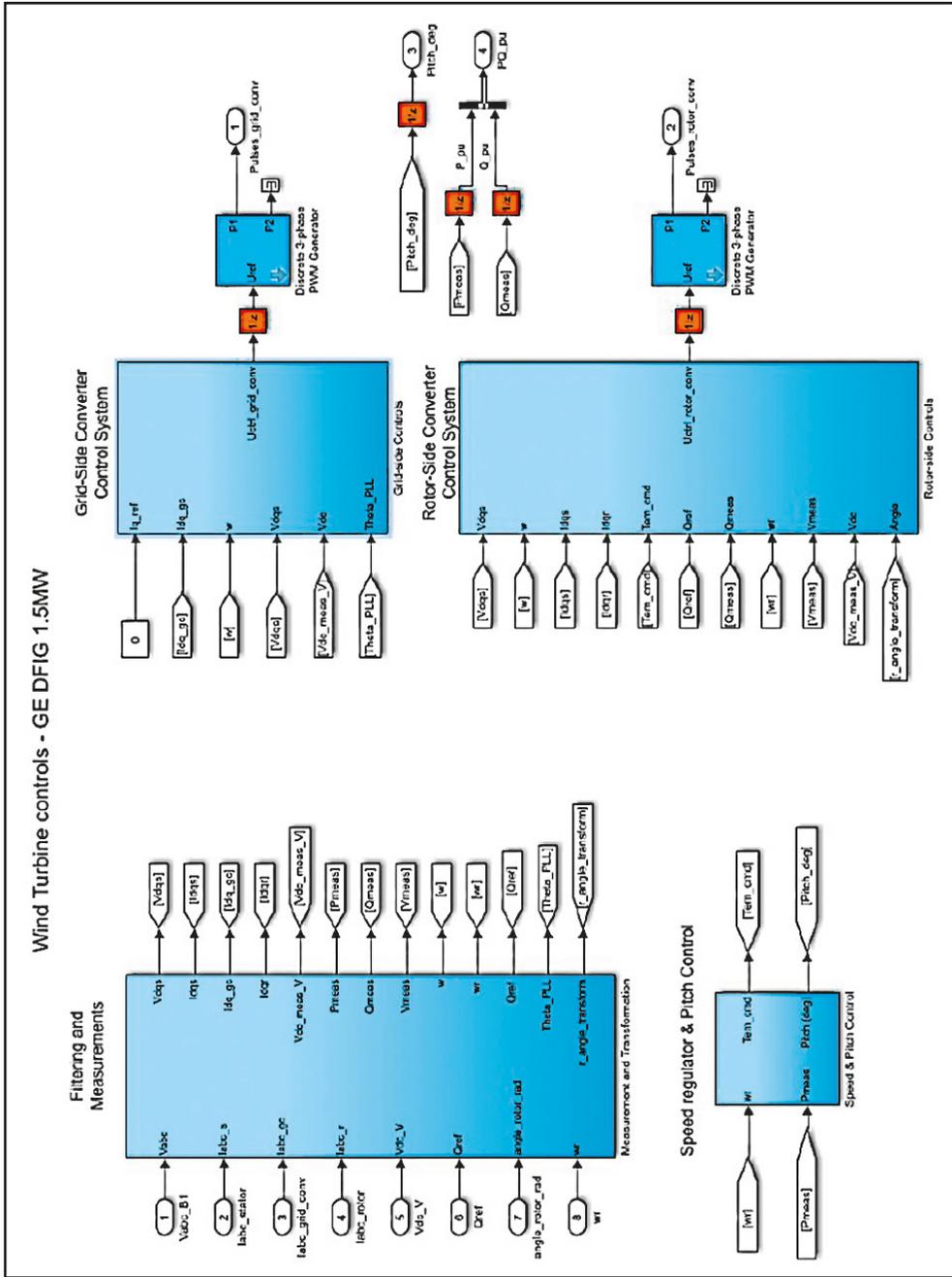
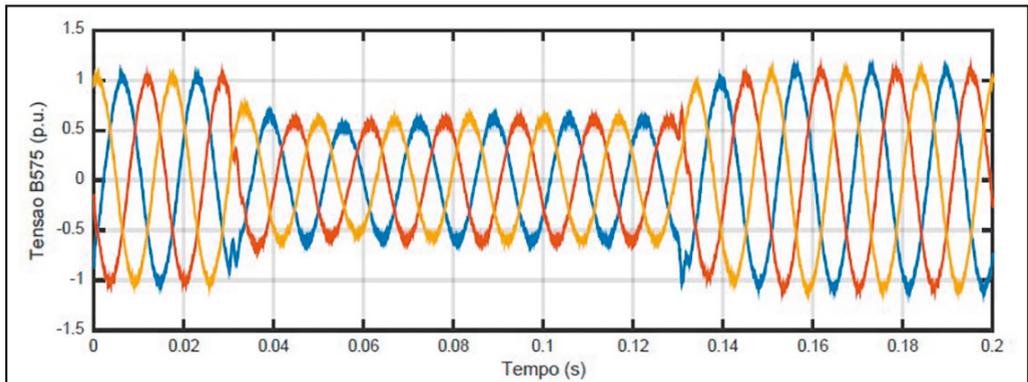


Figura 6.35 Medições e bloco de controle para o modelo detalhado dos conversores



O efeito do afundamento de tensão no barramento de 120 kV na saída da fazenda eólica é mostrado pela Figura 6.36. Nesta figura, fica evidente a diferença entre a Figura 6.28 e a Figura 6.36. A forma de onda com pequenas oscilações (chamadas de *ripple*) presentes na Figura 6.36 são características intrínsecas às respostas de dispositivos baseados em eletrônica de potência por conta dos chaveamentos.

Figura 6.36 Efeito do afundamento de 0,5 pu de tensão no barramento de 125 kV com duração de seis ciclos na tensão de saída da fazenda eólica



Já as consequências do afundamento na potência ativa na saída da usina na rotação das turbinas podem ser vistas na Figura 6.37 e na Figura 6.38, respectivamente. Com a queda da tensão, a potência no ponto de conexão da fazenda eólica também cai, mas a corrente consegue se manter praticamente constante por conta da proteção das turbinas que atua para limitar as correntes que se excedem por conta dos termos não inclusos no modelo para operação normal. Como a máquina acelera quando o afundamento termina há um aumento súbito da potência que causa uma leve oscilação na potência ativa injetada pela fazenda eólica.

Figura 6.37 Efeito do afundamento de 0,5 pu de tensão no barramento de 125 kV com duração de seis ciclos na tensão de saída da fazenda eólica

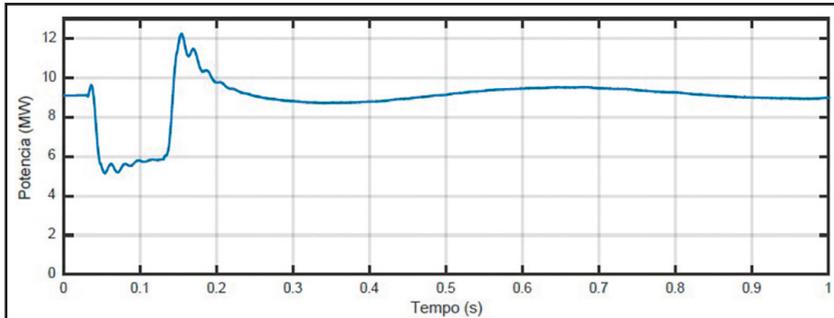
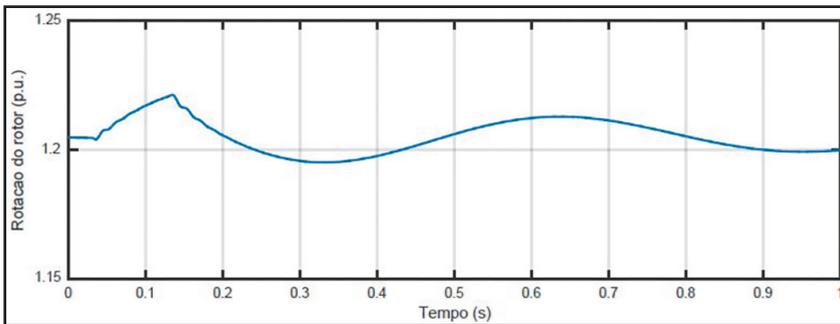


Figura 6.38 Efeito do afundamento de 0,5 pu de tensão no barramento de 125 kV com duração de seis ciclos na tensão de saída da fazenda eólica



A potência reativa em resposta à oscilação de tensão é mostrada na Figura 6.39. Quando a tensão cai, há um aumento na injeção da potência reativa que auxilia na recuperação da tensão terminal. Por fim, quando o afundamento termina há uma queda brusca da potência reativa, que volta a aumentar e decai lentamente para níveis pré-transitório.

Por fim, a Figura 6.40 sobrepõe a resposta da tensão do elo CC ao afundamento de tensão na barra de 120 kV das simulações utilizando o modelo médio e o modelo detalhado. A figura mostra a capacidade do GSC de manter a tensão do circuito CC sob controle no valor de referência. A principal diferença entre as curvas é a presença das oscilações características aos modelos chaveados detalhados de dispositivos baseados em eletrônica de potência.

Figura 6.39 Efeito do afundamento de 0,5 pu de tensão no barramento de 125 kV com duração de seis ciclos na tensão de saída da fazenda eólica

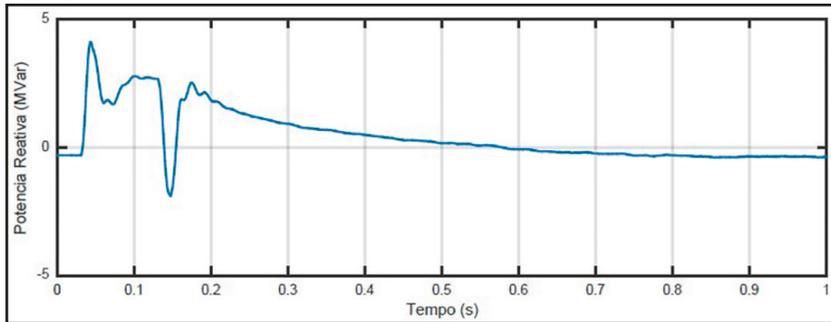
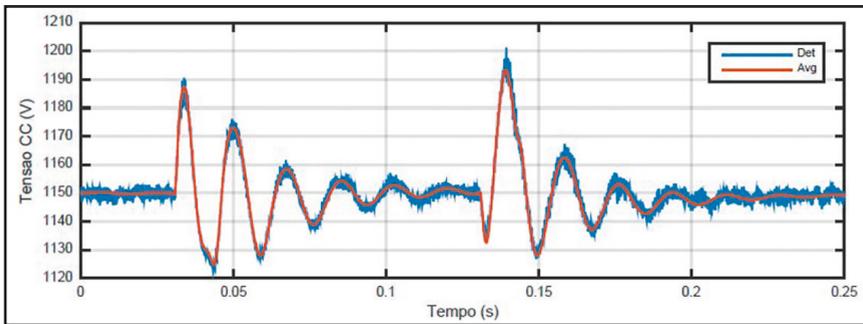


Figura 6.40 Efeito do afundamento de 0,5 pu de tensão no barramento de 125 kV com duração de seis ciclos na tensão de saída da fazenda eólica



6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos apresentados permitem verificar as principais características de cada tipo de simulação envolvendo os modelos descritos. As simulações fasoriais permitem simular longos intervalos de tempo com pequenos tempos computacionais, porém, pressupõem que a frequência não varia durante a simulação, o que exclui o seu uso para fenômenos nos quais a frequência é um fator importante.

As simulações utilizando modelos médio ou detalhado para o conversor já permitem o estudo de uma gama maior de problemas. Porém, seu uso aumenta o custo computacional da simulação pois envolve pequenos passos de simulação. Dentre eles, o modelo detalhado permite o estudo de fenômenos como a injeção de harmônicas por parte dos conversores de potência ou diferentes técnicas de

chaveamento. No entanto, as simulações utilizando os modelos médio e detalhado possuem respostas similares, com a exceção da presença do *ripple*, inerente à presença das chaves.

É importante ressaltar que o Matlab não está limitado às execuções dos estudos apresentados por este capítulo. A partir da necessidade do estudo a ser realizado, os arquivos demo podem ser editados (ou até mesmo novos arquivos podem ser criados) para que a necessidade do estudo seja atendida. Por exemplo, nos arquivos demo apresentados para as simulações dos modelos médio e detalhado, um barramento infinito é utilizado para modelar a rede elétrica. Com isso, não é possível avaliar o impacto da fazenda eólica na frequência da rede elétrica. Surge disso a necessidade da alteração do arquivo para condições de estudo estabelecidas pelo engenheiro de projeto ou pelo operador do sistema para a conduzir as simulações apropriadas.