



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/13

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -10

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE PLANTAS PV-EÓLICAS ATRAVÉS DE MODELOS DINÂMICOS

Janaina B. Almada Unilab	Deleon P. Parente UFC	Vinicius G.T. Filho* UFC	Ruth P.S. Leão UFC	Raimundo F. Sampaio UFC
------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	------------------------------	-----------------------------------

RESUMO

Este trabalho apresenta a implementação de um modelo genérico que representa plantas solar fotovoltaicas e eólicas de conversor pleno em PSCAD™ e em MATLAB Simulink®. Modelo genérico refere-se a modelos dinâmicos não-proprietários que podem ser usados para representar plantas de geração variável, independente do fabricante, e permitem representar a dinâmica dos sistemas elétricos durante curtos-circuitos na rede elétrica, afundamentos de tensão, distúrbios de frequência e oscilações eletromecânicas. O sistema proposto é um modelo genérico de usina eólica e de planta PV com 100MW, conectado ao sistema elétrico de potência. Os modelos oferecem maior simplificação mantendo adequada representatividade das fontes de geração de potência variável, constituindo-se um avanço para avaliação da interação de fontes interligadas por conversores com os sistemas elétricos de potência.

PALAVRAS-CHAVE

Modelos Genéricos, Fontes de Energias Renováveis, Desempenho Dinâmico de Sistemas, Simulink®, PSCAD™.

1.0 - INTRODUÇÃO

A inserção no sistema elétrico de geração com uso de fontes renováveis intermitentes vem crescendo a cada ano. Desde 2012, com a Resolução Normativa Nº 482/2012-ANEEL, alterada pela Resolução Normativa Nº 687/2015-ANEEL, a Aneel regulamentou o acesso de geração distribuída de micro e médio porte aos sistemas de distribuição de energia elétrica, estando as fontes solar fotovoltaica e eólica dentre as fontes renováveis classificadas. O Brasil possui 96.965,77 kW de potência instalada em geração distribuída, dos quais cerca de 77% são referentes à GD solar PV e eólica [1]. Em termos de grandes projetos, o Brasil é o 9º país do mundo de maior potência eólio-elétrica instalada, tendo finalizado o ano de 2016 com 10.740 MW [2] e busca deslançar a geração solar fotovoltaica, estando com 23.761 kW de potência instalada [3]. O crescimento de geração variável conectada à rede elétrica de transmissão e distribuição traz a necessidade de modelos computacionais genéricos capazes de representar uma planta de geração variável real e com eficiência computacional.

Este trabalho apresenta a implementação em PSCAD™ v4.2.6 e em MATLAB Simulink® de modelos genéricos de plantas solar fotovoltaicas e eólicas de conversor pleno. O termo genérico refere-se a um modelo que é padrão, público e não-proprietário de qualquer fornecedor, que pode ser parametrizado para emular o comportamento dinâmico dos sistemas elétricos durante curtos-circuitos, afundamentos de tensão, distúrbios de frequência e oscilações eletromecânicas. Os modelos genéricos de plantas solar e eólica foram propostos e aprovados pelo Western Electricity Coordinating Council (WECC) [4] e IEC 61400-27 [5].

O artigo está organizado em cinco seções que discorrem na Seção 1 sobre a penetração das fontes renováveis de potência variável no Brasil; Seção 2 apresenta as considerações gerais dos modelos genéricos de fontes solar fotovoltaica e eólica; Seção 3 descreve as funcionalidades inerentes aos modelos genéricos; Seção 4 trata da implementação das fontes fotovoltaica e eólica nas plataformas de simulação MATLAB Simulink® e PSCAD™ com avaliação dos resultados, e finalmente as conclusões.

2.0 - CONSIDERAÇÕES GERAIS PARA SIMULAÇÕES DINÂMICAS DE SISTEMAS COM GERAÇÃO EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA

Os modelos genéricos propostos pela WECC/IEC visam avaliar o desempenho dinâmico dos sistemas de potência com geração eólio-elétrica e solar fotovoltaica, em particular a dinâmica de restauração sob distúrbios no lado rede. Dada a característica de grande porte dos sistemas de potência, os modelos são projetados para simulações da resposta de sequência positiva da frequência fundamental durante eventos de curta duração, como curto circuito, perda de geração/linha/carga, chaveamento de capacitores, etc. Distúrbios assimétricos são considerados somente o que diz respeito ao impacto da componente de sequência positiva da falta, portanto a resposta dinâmica obtida é apenas orientativa. Nesse contexto, os modelos genéricos não possibilitam uma representação das funções de chaveamento dos controladores aplicados aos equipamentos de geração [4], [5], [6].

2.1 Sistema Teste

Para simular a resposta dinâmica de plantas fotovoltaicas e eólicas durante curto circuito, um sistema teste simples foi modelado no MATLAB Simulink® e PSCAD™, como mostrado na Figura 1. O sistema teste inclui uma fonte eólica/fotovoltaica equivalente de 100 MW, transformador e rede coletora equivalentes, transformador da subestação da planta de geração e uma linha de transmissão que conecta a planta à subestação da concessionária [7].

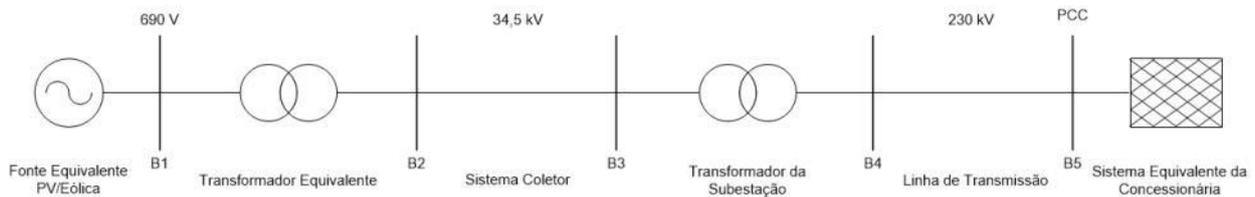


Figura 1 – Diagrama do sistema teste simulado

2.2 Controle de Tensão, Potência Ativa e Potência Reativa

A irradiância média sobre uma planta fotovoltaica assim como a velocidade média dos ventos em uma planta eólica podem mudar consideravelmente no tempo e no espaço. Para período de simulação típica (entre 10 a 30 s), os modelos propostos consideram constantes a irradiância e a velocidade do vento. Embora as plantas renováveis possuam limitada capacidade de controle de potência ativa, os modelos genéricos permitem certo controle de potência ativa, que incluem limites de velocidade de rampa, resposta de frequência e prioridade de potência ativa/reactiva durante afundamentos de tensão. Plantas eólicas modernas são capazes de reduzir a geração de potência ativa na ocorrência de sobre frequência no sistema de potência. Nesses casos, os controladores da planta permitem que os aerogeradores operem momentaneamente abaixo de seu nível ótimo.

Diversos modos de controle de potência reativa podem ser implementados. Plantas eólicas e grandes usinas fotovoltaicas controlam a tensão no ponto de conexão, enquanto que as plantas menores são tipicamente operadas no modo de controle do fator de potência. Durante uma falta, a resposta de potência reativa é a contribuição combinada da resposta rápida dos inversores, da resposta lenta do supervisor do controlador da planta e da contribuição de dispositivos reativos suplementares existentes no parque [5], [6], [7].

2.3 Suportabilidade a Falhas

Os modelos propostos não pretendem avaliar a capacidade de suportabilidade da planta de geração a falhas. Em plantas fotovoltaicas essa capacidade é definida pelo fabricante do inversor, enquanto que as plantas eólicas dispõem de conversores de potência que permitem essa condição. Contudo, o foco do modelo, conforme já destacado, é o estudo das características de recuperação dinâmica do sistema de potência, sendo o modelo capaz de responder a eventos que ocorrem em escala de tempo dinâmica e que a resposta da máquina a esses eventos é realista [5], [6], [7].

3.0 - MODELOS GENÉRICOS

Os modelos genéricos analisados neste trabalho são de plantas fotovoltaicas e plantas eólicas com conversor pleno, modeladas por 4 principais módulos funcionais, representados na Figura 2: REGC, REEC, REPC e WTGT. A distinção da geração eólica em relação à fotovoltaica está na presença do bloco WTGT [7].

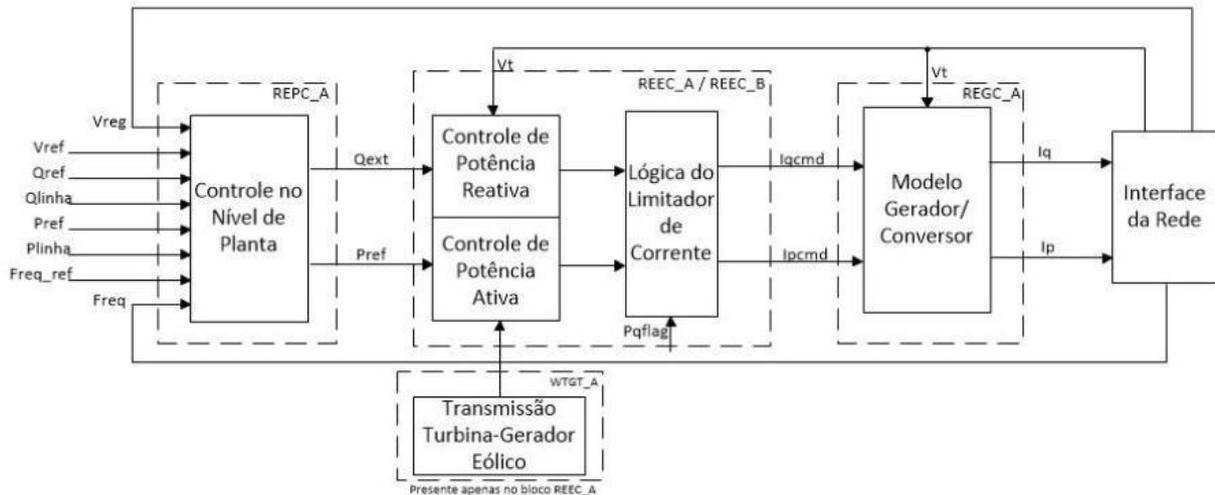


Figura 2 - Diagrama de blocos com os módulos dos modelos genéricos da WECC

a. REGC_A (*Renewable Energy Generator/Converter* = Gerador/Conversor do Sistema de Geração a Energia Renovável): Representa a interface do gerador com a rede elétrica. É modelado por um regulador de corrente, cuja função é processar as componentes de corrente ativa I_p e reativa I_q a ser injetada na rede externa pelo inversor de corrente a partir das correntes do bloco REEC_A/REEC_B e da realimentação da tensão terminal V_t . A injeção de corrente inclui os seguintes recursos: gerenciamento da corrente reativa durante eventos de elevação de tensão na barra do gerador (inversor), gerenciamento da corrente ativa durante sub tensão para emular de forma simples e aproximada a resposta do controle do PLL do inversor, e lógica de potência durante eventos de sub tensão que permite uma resposta controlada da corrente ativa durante e imediatamente após afundamento de tensão como ilustrado na Figura 3. O bloco de gerenciamento de corrente reativa limita a corrente reativa injetada na rede para controlar a tensão terminal da máquina segundo os limites do conversor. O bloco de gerenciamento de corrente ativa reduz de modo linear a corrente ativa sob condição de afundamento de tensão.

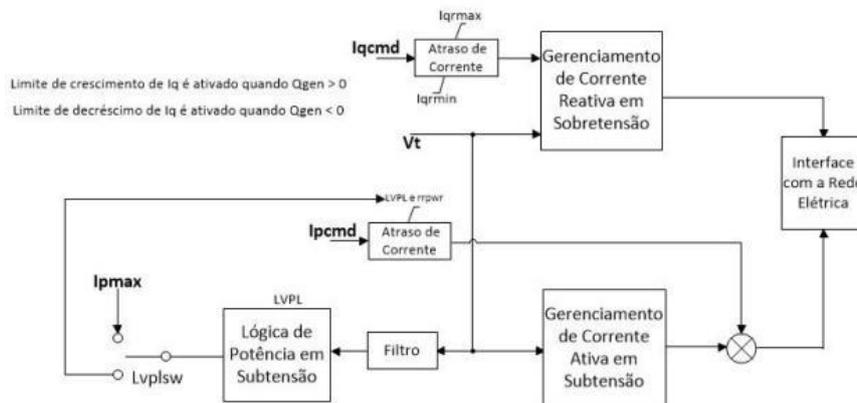


Figura 3 - Diagrama de blocos do módulo REGC_A

b. REEC_A e REEC_B (*Renewable Energy Electrical Control* = Controle Elétrico do Sistema de Geração a Energia Renovável): Representa o controle elétrico do conversor do lado do aerogerador (REEC_A) e do inversor da planta fotovoltaica (REEC_B), respectivamente. Atua sobre a potência de referência ativa P_{ref} e reativa Q_{ref} do módulo REPC_A, tendo como entrada a realimentação da tensão terminal V_t e a potência ativa e reativa de saída gerada. Fornece comandos de corrente ativa I_{pcmd} e reativa I_{qcmd} para o módulo REGC_A. O módulo fornece opções de controle de potência reativa incluindo fator de potência constante ($PfFlag$), regulação de tensão ($Vflag$) e potência reativa de referência ($Qflag$). Dois controladores PI representam o controle de potência reativa e de tensão local. Esses controles podem ser *by-passed* segundo a posição definida para $Vflag = 0$ e $Qflag = 0$. Quando um afundamento de tensão é detectado, o estado dos controladores de potência ativa e reativa são congelados, e a injeção de corrente reativa I_{qinj} é definida de acordo com a operação da chave SW.

No bloco de limite de corrente é possível priorizar potência ativa ou potência reativa através da chave PQflag.

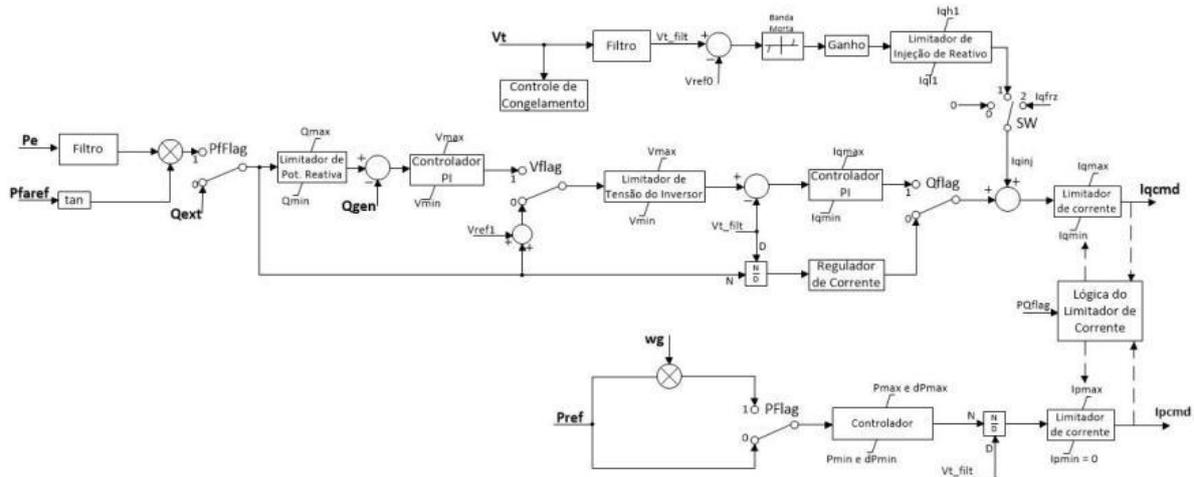


Figura 4 - Diagrama de blocos do módulo REEC

c. REPC_A (Renewable Energy Plant Controller \equiv Controlador de Planta de Geração a Energia Renovável): Este módulo é opcional, usado quando se deseja controle de potência ativa e/ou potência reativa em nível de planta. Este módulo representa o sistema controlador da planta de geração cuja função é definir a potência de referência para o bloco REEC_A/REEC_B. É responsável por processar a tensão (V_{reg} , V_{ref}) e potência reativa de entrada (Q_{ref} , Q_{linha}) emulando o controle volt/var. O bloco também processa a frequência ($Freq_{ref}$, F_{reg}) e potência ativa para emular o controle de potência ativa. Este módulo fornece comando de potência ativa e reativa para o bloco REEC_A/REEC_B. A Figura 5 mostra os blocos dos recursos: regulação de tensão em barra designada pelo usuário (diagrama superior), e controle de potência ativa para fornecer resposta de regulação primária de frequência (diagrama inferior).

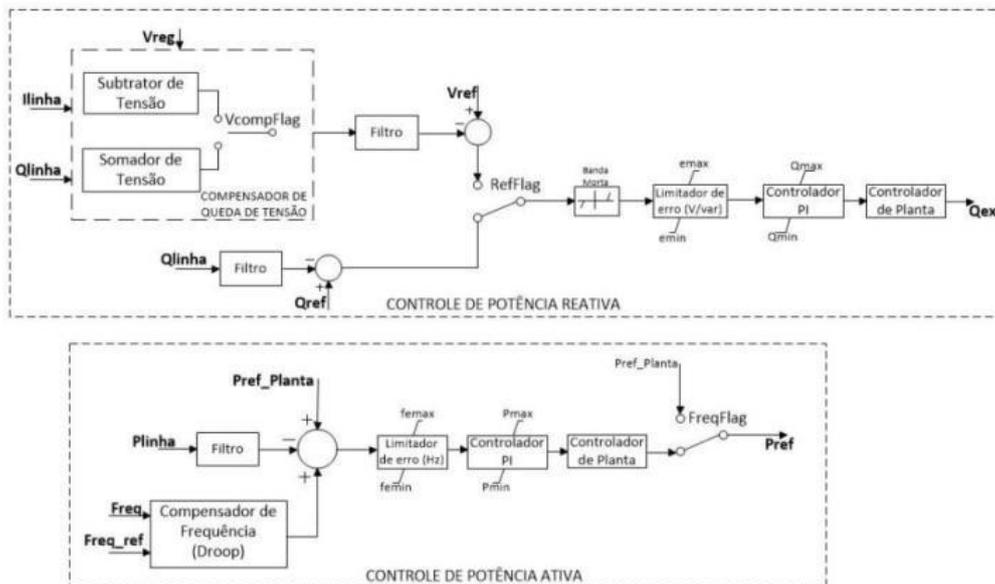


Figura 5 - Diagrama de blocos do Módulo REPC

d. WTGT_A (Wind Turbine Generator Transmission \equiv Eixo de Transmissão do Aerogerador): Representa o trem de acionamento da turbina eólica que compreende eixo de transmissão, caixa de engrenagem, frenagem aerodinâmica e mecânica. A entrada é a potência ativa gerada e a saída é a velocidade angular.

4.0 - IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS EM SIMULINK E PSCAD

Os modelos de geração eólica e fotovoltaica ambos foram implementados segundo as especificidades apresentadas no ambiente MATLAB Simulink® e PSCAD™. As plantas renováveis foram simuladas separadamente, contudo todo o sistema de conexão e o ambiente de simulação permaneceu inalterado. Dessa

forma, foi desenvolvido um modelo genérico de planta eólica com 100MW, conectado à rede elétrica da concessionária em 230kV por meio de um transformador unitário 690V/34,5kV equivalente, uma rede coletora com 5 km de extensão, um transformador de força 34,5kV/230kV de 112,5MVA e uma linha de transmissão de 10km. Como as plantas fotovoltaicas e eólicas são diferentes das usinas convencionais, visto que são conectadas à rede por um conversor de potência, essas fontes de geração foram modeladas como fontes de corrente controladas. Por questão de espaço são apresentados nas Figuras 6 e 7 os sistemas teste com geração eólica no ambiente MATLAB Simulink® e a geração solar fotovoltaica no PSCAD™, respectivamente.

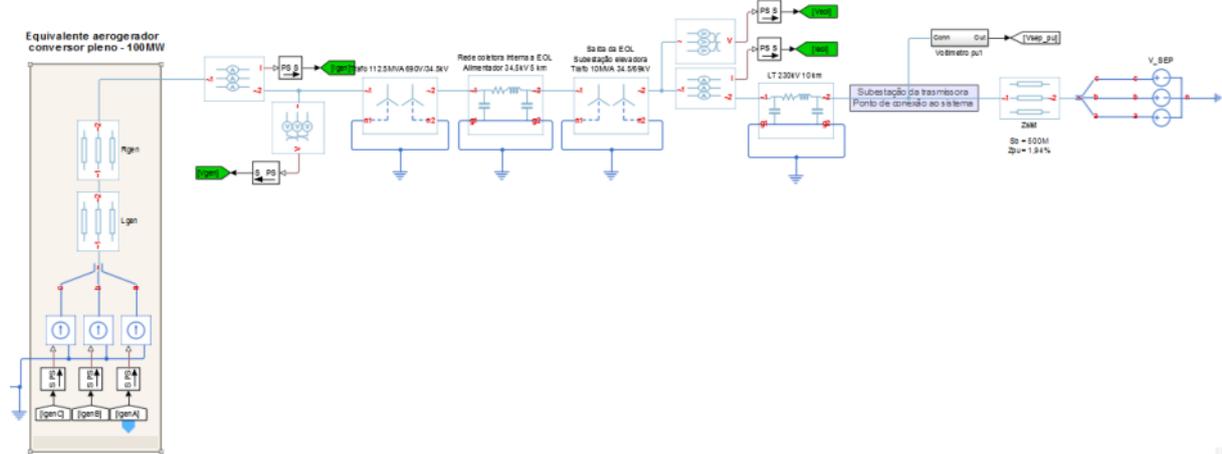


Figura 6 - Diagrama de blocos do sistema teste com geração eólica em Simulink®

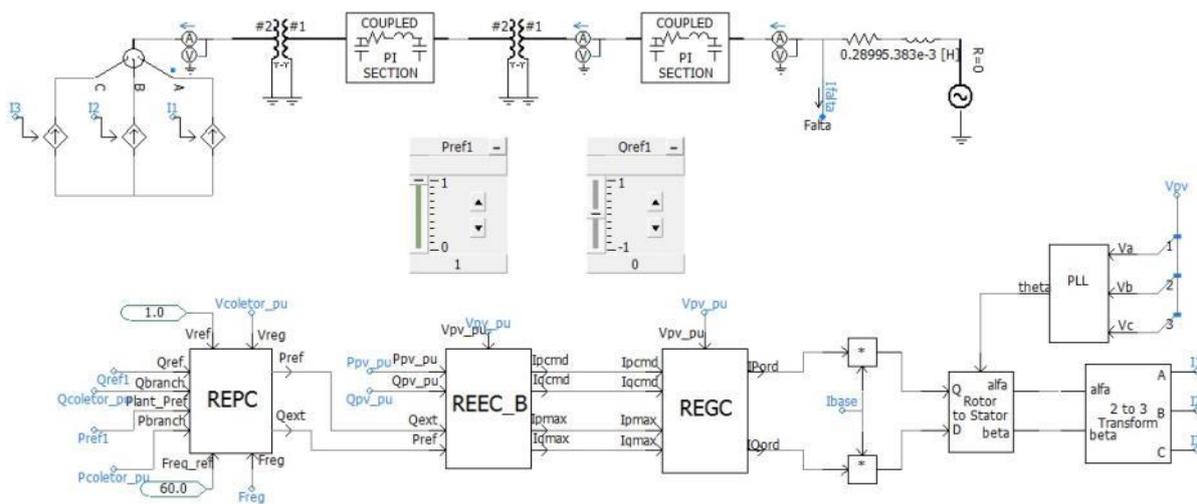


Figura 7 - Diagrama de blocos do sistema teste com geração fotovoltaica em PSCAD™

Os parâmetros utilizados para as plantas de geração foram baseados nos documentos publicados pelo WECC e, como destacado naqueles documentos, embora os modelos sejam realistas os resultados de desempenho apresentados não representam qualquer planta real [4].

A análise do comportamento dinâmico das plantas foi realizada para condição de curto-circuito trifásico no sistema elétrico de potência de modo a causar redução na tensão para 0,98pu e afundamento de tensão para 0,29pu, ambos de 1s de duração, no ponto comum de conexão, na barra B5, da Figura 1.

Os resultados obtidos com a simulações estão apresentados nas Figuras 8 a 13. Esses resultados foram agrupados por fonte geradora, ou seja, as Figuras 8,10 e 12 representam as repostas da usina eólica em Simulink e PSCAD™, enquanto as Figuras 9, 11 e 13 representam o desempenho da usina fotovoltaica em Simulink® e PSCAD™.

Durante as simulações, foi considerado que as plantas de geração operavam com potência nominal (100MW), fator de potência unitário, e controle da potência reativa realizado pelo controlador do parque (REPC), cujo valor foi definido pelo operador do sistema. Os controladores das fontes geradoras em REEC foram configurados para coordenarem com o REPC o controle de potência reativa definido. A planta eólica foi simulada com o módulo de trem de acionamento habilitado e com o controle de frequência ativado.

As Figuras 8 e 9 mostram a tensão rms na barra B5 e a tensão terminal dos geradores/inversores (barra B1) em regime normal de operação e durante os curtos circuitos ocorridos no sistema. Durante o afundamento de tensão para 0,29 pu, observa-se que os controladores das fontes atuam tornando esse afundamento menos severo nos terminais das fontes devido à injeção de reativos durante a falta. Nota-se ainda que essa regulação de tensão não se apresenta relevante no PCC. Também é perceptível a desconexão das usinas após 0,6s de início do segundo distúrbio. Isso ocorre em atenção à prerrogativa estabelecida pelo procedimento de rede quanto aos requisitos de desempenho de fontes de geração mediante afundamentos de tensão.

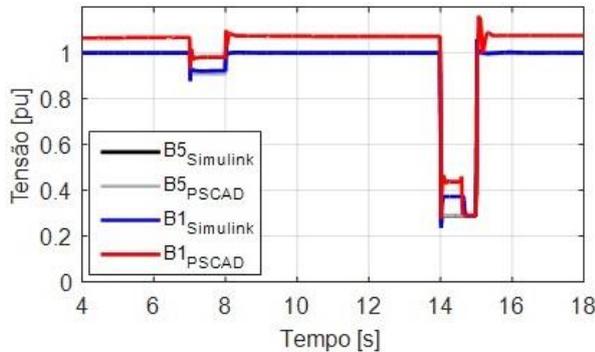


Figura 8 - Tensões no PCC (barra 5) e no terminal dos geradores eólicos (barra 1)

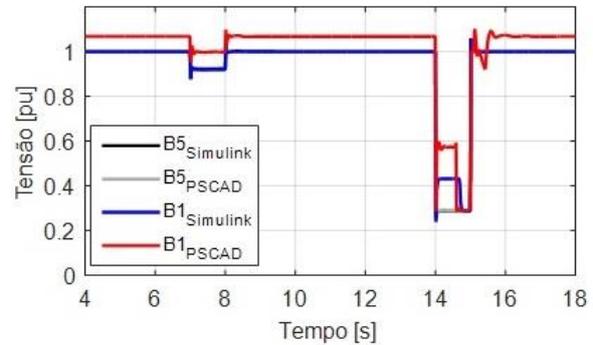


Figura 9 - Tensões no PCC (barra 5) e no terminal dos inversores da geração fotovoltaica (barra 1)

Na sequência têm-se nas Figuras 10 (eólica) e 11 (fotovoltaica) as potências geradas, medidas na saída da subestação concentradora/elevadora das plantas (Barra 4 na Figura 1), em regime normal de operação e durante os curtos-circuitos. Observa-se a atuação dos controladores que mantiveram a geração constante, nos montantes despachados, durante o primeiro distúrbio para 0,92, e a redução da potência ativa durante a segunda falta para 0,29 pu para possibilitar a injeção de reativos para suporte à tensão no segundo distúrbio. Verifica-se pelas Figuras 12 e 13 que não há contribuição das fontes para as correntes de falta, mas apenas uma elevação controlada para manter a potência constante durante o primeiro curto-circuito e uma injeção limitada de corrente, proporcional à tensão de terminal observada pelos aerogeradores e pelos inversores da fonte fotovoltaica durante o afundamento de tensão.

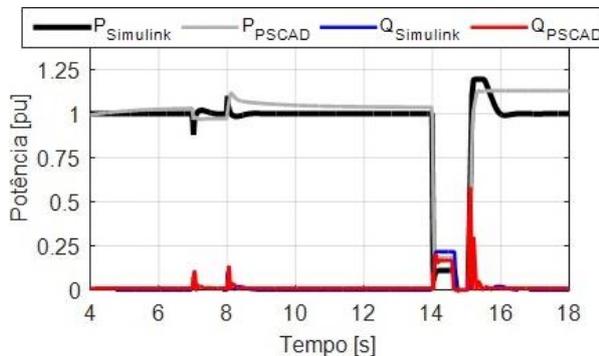


Figura 10 - Potências ativa e reativa gerada pela fonte eólica

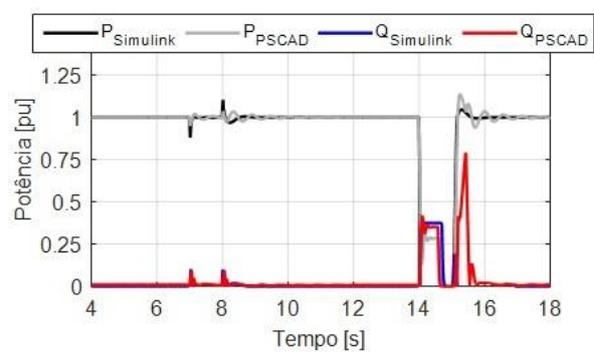


Figura 11 - Potências ativa e reativa gerada pela fonte fotovoltaica

As Figuras 12 e 13 demonstram que o modelo proposto simula o controle das correntes de falta das usinas, que limita as correntes geradas durante os curtos-circuitos a fim de proteger os conversores e controladores de potência. Mediante afundamentos de tensão, os controladores estão programados para despachar até 1,3 pu da corrente nominal de cada aerogerador ou inversor de potência, no caso da planta fotovoltaica. É possível observar a desconexão das usinas após o tempo máximo estabelecido pelo ONS nos Procedimentos de Rede [8], o que contribuiu para o aumento da severidade desse afundamento, conforme observado nas Figuras 8 e 9.

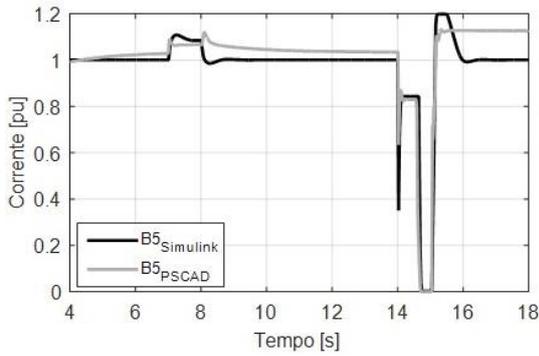


Figura 12 - Corrente injetada pela planta eólica

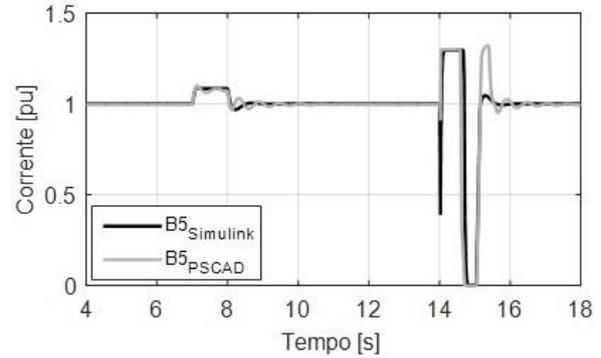


Figura 13 - Corrente injetada pela usina fotovoltaica

5.0 - CONCLUSÃO

Modelos genéricos desenvolvidos pela WECC para plantas solar fotovoltaica e eólica de conversor pleno foram simuladas nas plataformas MATLAB Simulink e PSCAD. Observou-se que os modelos de plantas de geração a energia renovável podem ser representados em aplicativos computacionais distintos sem perda de representatividade do comportamento das fontes. Os modelos de ambas as fontes de energia apresentaram bom desempenho e os controles das plantas operaram de forma a minimizar os efeitos de uma falta trifásica, podendo inclusive desconectá-las do sistema dependendo da severidade do distúrbio. Embora o controle de tensão seja pouco perceptível na barra B5, o seu efeito pode ser melhor visualizado na barra B1. É possível também observar pequenas diferenças nas respostas dadas pelos dois softwares para o mesmo distúrbio. Isso ocorre devido às especificidades na forma de simulação e processamento de dados de cada software. De forma geral as simulações realizadas no software PSCAD™ apresentaram maiores variações quando comparadas ao Simulink®, necessitando de um maior tempo de estabilização. Em contrapartida, as simulações no software Simulink® demandaram maior tempo de simulação se comparado ao software PSCAD™ que apresentou uma resposta de simulação aproximadamente 5 vezes mais rápida.

Os modelos genéricos representam um avanço na avaliação da influência das fontes de potência de saída variável sobre os sistemas elétricos de potência.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração Distribuída. Disponível em: Agência Nacional de Energia Elétrica. Acessado em 27.02.2017.
- [2] Global Wind Statistics 2016. Global Wind Energy Council. 2017.
- [3] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: Agência Nacional de Energia Elétrica. Acessado em 29.03.2017.
- [4] WECC. Western Electricity Coordinating Council. Disponível em: <https://www.wecc.biz/Pages/PageNotFound.aspx?requestUrl=https://www.wecc.biz/committees/StandingCommittees/PCC/TSS/MVWG/Shared%20Documents/MVWG%20Approved%20Documents/WECC%20Solar%20Plant%20Dynamic%20Modeling%20Guidelines.pdf#k=>. Acessado em 29.03.2017.
- [5] Sorensen, P., Andresen, B., Bech, J., Fortmann, J. and Pourbeik, P. Progress in IEC 61400-27 Electrical simulation models for wind power generation. 11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems. Lisbon. 2012.
- [6] Das K., Hansen, Anca D. and Sørensen, P. Understanding IEC standard wind turbine models using SimPowerSystems. Wind Engineering 40(3) · April 2016. DOI: 10.1177/0309524X16642058. 2016.
- [7] Pourbeik, P. Model Overview. WECC Renewable Energy System Models Webcast. EPRI. 2015.57p.
- [8] ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de Rede. Módulo 3.6 Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão. Rev.No.2016.12. Disponível em: http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento_rede/procedimento_rede.aspx. Acessado em 01.04.2017.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Janaina Barbosa Almada. Professora da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará.

Deleon Ponte Parente. Eng. Eletricista da Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados do Estado do Ceará (ARCE) e mestrando na Universidade Federal do Ceará.

Vinicius Gadelha Teixeira Filho. Graduando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Ceará.

Ruth Pastôra Saraiva Leão. Professora Titular, PhD, da Universidade Federal do Ceará.

Raimundo Furtado Sampaio. Professor, Me, da Universidade Federal do Ceará.