

Energia Solar e Eólica

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

 **Atena**
Editora

Ano 2019

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

Energia Solar e Eólica

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Karine de Lima

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E56 Energia solar e eólica [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 1)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-066-7

DOI 10.22533/at.ed.667192201

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. I. Abdala, Paulo Jayme Pereira.

CDD 621.042

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As chamadas energias renováveis, também conhecidas como energias alternativas ou ainda energias limpas são três denominações possíveis para qualquer forma de energia obtida por meio de fontes renováveis, e que não produzem grandes impactos ambientais negativos. Atualmente, com a grande preocupação mundial em compensar as emissões de CO₂, o consumo deste tipo de energia tem sido o foco de governos e empresas em todo globo.

Neste sentido, o Brasil possui uma matriz energética bastante limpa, onde predomina o uso de hidrelétricas, apesar do crescimento do uso de termelétricas, as quais são abastecidas por combustível fóssil. No Brasil, o setor energético é responsável por grande parte das emissões de CO₂, ficando atrás somente do setor agrícola que reapresenta a maior contribuição para o efeito estufa brasileiro.

A energia proveniente do sol é a alternativa renovável mais promissora para o futuro e, por este motivo tem recebido maior atenção e também mais investimentos. A radiação solar gratuita fornecida pelo sol pode ser captada por placas fotovoltaicas e ser posteriormente convertida em energia elétrica. Esses painéis usualmente estão localizados em construções, como indústrias e casas, o que proporciona impactos ambientais mínimos. Esse tipo de energia é uma das mais fáceis de ser implantada em larga escala. Além de beneficiar os consumidores com a redução na conta de energia elétrica reduzem as emissões de CO₂.

Com relação à energia eólica, o Brasil faz parte do grupo dos dez países mais importantes do mundo para investimentos no setor. As emissões de CO₂ requeridas para operar esta fonte de energia alternativa são extremamente baixas e é uma opção atrativa para o país não ser dependente apenas das hidrelétricas. Os investimentos em parques eólicos vem se tornando uma ótima opção para neutralização de carbono emitidos por empresas, indústrias e etc.

Neste contexto, este EBOOK apresenta uma importante contribuição no sentido de atualizar os profissionais que trabalham no setor energético com informações extremamente relevantes. Ele está dividido em dois volumes contendo artigos práticos e teóricos importantes para quem deseja informações sobre o estado da arte acerca do assunto.

Paulo Jayme Pereira Abdala

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	10
UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS	
Alexandre José Bühler Ivan Jorge Gabe Fernando Hoefling dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.6671922011	
CAPÍTULO 2	26
VALIDAÇÃO DE MODELOS DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO	
Bruna de Oliveira Busson Pedro Henrique Fonteles Dias Ivonne Montero Dupont Pedro Hassan Martins Campos Paulo Cesar Marques de Carvalho Edylla Andressa Queiroz Barroso	
DOI 10.22533/at.ed.6671922012	
CAPÍTULO 3	41
A GERAÇÃO SOLAR DE CALOR DE PROCESSOS INDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE GESSO BETA DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE	
André Vitor de Albuquerque Santos Kenia Carvalho Mendes	
DOI 10.22533/at.ed.6671922013	
CAPÍTULO 4	58
A UTILIZAÇÃO DO SILÍCIO NACIONAL PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS SOLARES: UMA REFLEXÃO DAS DIFICULDADES TECNOLÓGICA E FINANCEIRA	
Felipe Souza Davies Gustavo Luiz Frisso Matheus Vinícius Brandão	
DOI 10.22533/at.ed.6671922014	
CAPÍTULO 5	72
AEROPORTO DE VITÓRIA/ES: ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	
Ana Luiza Guimarães Valory Sidney Schaeffer Warley Teixeira Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.6671922015	
CAPÍTULO 6	87
ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO E POLICRISTALINO	
Suellen Caroline Silva Costa Janaína de Oliveira Castro Silva Cristiana Brasil Maia Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz	
DOI 10.22533/at.ed.6671922016	

CAPÍTULO 7	1043
ANÁLISE HARMÔNICA NOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS DE UMA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Alessandro Bogila Joel Rocha Pinto Thales Prini Franchi Thiago Prini Franchi	
DOI 10.22533/at.ed.6671922017	
CAPÍTULO 8	120
ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NO MODELO DE UMA ÁRVORE NA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	
Bárbara de Luca De Franciscis Gouveia	
DOI 10.22533/at.ed.6671922018	
CAPÍTULO 9	139
ANÁLISE FINANCEIRA DE SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA FINANCIADOS EM PALMAS - TO	
Brunno Henrique Brito Maria Lúcia Feitosa Gomes de Melo	
DOI 10.22533/at.ed.6671922019	
CAPÍTULO 10	152
APLICAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ESCOLAS MUNICIPAIS DA CIDADE DE CRUZ ALTA/RS: ANÁLISE DE IMPLANTAÇÃO E POTENCIAL DE ENERGIA GERADA	
Alessandra Haas Franciele Rohr Ísis Portolan dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.66719220110	
CAPÍTULO 11	165
APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Augusto Hafemeister João Batista Dias Leonel Augusto Calliari Poltosi	
DOI 10.22533/at.ed.66719220111	
CAPÍTULO 12	181
AR CONDICIONADO SOLAR – CICLO DE ADSORÇÃO	
Rafael de Oliveira Barreto Pollyanne de Oliveira Carvalho Malaquias Matheus de Mendonça Herzog Luciana Carvalho Penha Lucio Cesar de Souza Mesquita Elizabeth Marques Duarte Pereira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220112	
CAPÍTULO 13	194
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO COLETOR SOLAR PLANO ACOPLADO EM SECADOR HÍBRIDO	
Raphaela Soares da Silva Camelo	

Ícaro da Silva Misquita
Thais Andrade de Paula Lovisi
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira
Juliana Lobo Paes
Camila Lucas Guimarães

DOI 10.22533/at.ed.66719220113

CAPÍTULO 14 212

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE NOVO PROTÓTIPO DE FOTOBIORREATOR NÃO TRANSPARENTE PARA CULTIVO DE MICROALGAS COM ILUMINAÇÃO INTERNA ATRAVÉS DE POFS QUE RECEBEM A LUZ DE LENTES MONTADAS EM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

Gisel Chenard Díaz
Yordanka Reyes Cruz
Rene Gonzalez Carliz
Fabio Toshio Dino
Maurílio Novais da Paixão
Donato A. Gomes Aranda
Marina Galindo Chenard

DOI 10.22533/at.ed.66719220114

CAPÍTULO 15 225

AVALIAÇÃO DE WEBSITES BRASILEIROS PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE: PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS

Marina Calcagnotto Mascarello
Letícia Jenisch Rodrigues

DOI 10.22533/at.ed.66719220115

CAPÍTULO 16 241

AVALIAÇÕES DE CUSTO E DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TIPO SIGFI COM DIFERENTES PERÍODOS DE AUTONOMIA

Marta Maria de Almeida Olivieri
Leonardo dos Santos Reis Vieira
Marco Antonio Galdino
Márcia da Rocha Ramos

DOI 10.22533/at.ed.66719220116

CAPÍTULO 17 257

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO CONSIDERANDO O EFEITO DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS ATRAVÉS DO MODELO DO DISCO ATUADOR

Luiz Fernando Pezzi
Adriane Prisco Petry

DOI 10.22533/at.ed.66719220117

CAPÍTULO 18 272

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO - ESTUDO DE CASO EM CURITIBA

Danilo Carvalho de Gouveia
Jeanne Moro
Muza Iwanow
Rebecca Avença
Jair Urbanetz Junior

DOI 10.22533/at.ed.66719220118

CAPÍTULO 19	284
DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SUPERHIDROFÓBICAS COM EFEITO AUTOLIMPANTE PARA APLICAÇÕES EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Lucélio Oliveira Lemos	
Magnum Augusto Moraes Lopes de Jesus	
Aline Geice Vitor Silva	
Angela de Mello Ferreira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220119	
CAPÍTULO 20	297
DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Stéphane Rodrigues da Silva	
Érica Tiemi Anabuki	
Luis Cláudio Gambôa Lopes	
DOI 10.22533/at.ed.66719220120	
CAPÍTULO 21	312
DO PETRÓLEO À ENERGIA FOTOVOLTAICA: A INSERÇÃO DO BRASIL NESTE NOVO MERCADO	
Emilia Ribeiro Gobbo	
Maria Antonia Tavares Fernandes da Silva	
Rosemarie Bröker Bone	
DOI 10.22533/at.ed.66719220121	
CAPÍTULO 22	330
EFEITO DO SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
José Rafael Cápua Proveti	
Daniel José Custódio Coura	
Carlos Roberto Coutinho	
Adriano Fazolo Nardoto	
DOI 10.22533/at.ed.66719220122	
CAPÍTULO 23	342
ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA E DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO AO COMPLEXO AQUÁTICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA	
Helena Flávia Napolini	
Gustavo Xavier de Andrade Pinto	
Julio Boing Neto	
Ricardo Rütther	
DOI 10.22533/at.ed.66719220123	
CAPÍTULO 24	354
ESTUDO DA SECAGEM INTERMITENTE DA MANGA UTILIZANDO SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO	
Camila Lucas Guimarães	
Juliana Lobo Paes	
Raphaela Soares da Silva Camelo	
Madelon Rodrigues Sá Braz	
Ícaro da Silva Misquita	
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220124	

CAPÍTULO 25	367
ANÁLISE PRÉVIA DO VALOR DA DEPENDÊNCIA DO SOLO PARA AS ATIVIDADES AGRÍCOLAS COM A POSSÍVEL IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO DA SERRA, EM SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS	
Antonio Robson Oliveira da Rosa Leonardo Beroldt Rafael Haag	
DOI 10.22533/at.ed.66719220125	
CAPÍTULO 26	379
APLICAÇÃO DE UM DVR EM AEROGERADORES SCIG E DFIG PARA AUMENTO DE SUORTABILIDADE FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	
Edmar Ferreira Cota Renato Amorim Torres Victor Flores Mendes	
DOI 10.22533/at.ed.66719220126	
CAPÍTULO 27	398
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA REGIÃO COM TOPOGRAFIA COMPLEXA UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	
William Corrêa Radünz Alexandre Vagtinski de Paula Adriane Prisco Petry	
DOI 10.22533/at.ed.66719220127	
CAPÍTULO 28	410
EDIFICAÇÃO DE ENERGIA POSITIVA: ANÁLISE DE GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR EM CURITIBA	
Larissa Barbosa Krasnhak Elis Almeida Medeiros de Mello Jair Urbanetz Junior Eloy Casagrande Junior	
DOI 10.22533/at.ed.66719220128	
CAPÍTULO 29	422
ESTAÇÃO METEOROLÓGICA WIFI DE BAIXO CUSTO BASEADO EM THINGSPEAK	
Renan Tavares Figueiredo Odélsia Leonor Sanchez de Alsina Diego Lopes Coriolano Eurípes Lopes de Almeida Neto Ladjane Coelho dos Santos Iraí Tadeu Ferreira de Resende Ana Claudia de Melo Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220129	
SOBRE O ORGANIZADOR.....	431

APLICAÇÃO DE UM DVR EM AEROGERADORES SCIG E DFIG PARA AUMENTO DE SUORTABILIDADE FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Edmar Ferreira Cota

edmar.elt@gmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Eletrônica e Biomédica

Belo Horizonte - Minas Gerais

Renato Amorim Torres

renatoamorimtorres@gmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Belo Horizonte - Minas Gerais

Victor Flores Mendes

victormendes@cpdee.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Belo Horizonte - Minas Gerais

RESUMO: A energia eólica é a energia renovável que mais cresce em todo mundo e uma das mais aplicadas para geração de eletricidade. Dentre as tecnologias de aerogeradores empregadas, a tecnologia que utiliza geradores de indução com rotor em gaiola ou *squirrel cage induction generator* (SCIG) é a mais simples e com menor custo. Já a tecnologia com geradores de indução duplamente excitados ou *doubly-fed induction generator* (DFIG) é a mais difundida, devido à sua característica de poder funcionar a velocidade variável e ter conversores de menor potência

conectados ao rotor. Todavia os códigos de rede de vários países não permitem a desconexão imediata de um aerogerador perante faltas na rede elétrica, sendo que as tecnologias SCIG e DFIG apresentam certa fragilidade a essas faltas, uma vez que os estatores dos geradores são conectados diretamente ao ponto de conexão comum (PCC) da rede elétrica. Neste trabalho é realizado um estudo, baseado em simulações no *software* Matlab/Simulink, utilizando-se um restaurador dinâmico de tensão ou *dynamic voltage restorer* (DVR) para aumentar a robustez de aerogeradores SCIG e DFIG perante afundamentos de tensão na rede elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica, Suportabilidade de Aerogeradores a Afundamentos de Tensão, Restaurador Dinâmico de tensão (DVR).

ABSTRACT: Wind power is the fastest growing renewable energy worldwide and one of the most applied for electricity generation. Among the wind turbine technologies, the technology squirrel cage induction generator (SCIG) is the simplest and lowest cost. Since the technology doubly excited induction generator (DFIG) is the most widespread, due to its characteristic of being operated at variable speed and it has less power converters connected to the rotor. However, grid codes of several countries don't allow immediate disconnection of a wind turbine

during voltage sags in the electrical grid and the SCIG and DFIG are technologies that presents a certain fragility to these faults, since their stators are directly connected to the common connection point (PCC). This paper presents a simulation in Matlab/Simulink software using a dynamic voltage restorer (DVR) to increase the robustness of SCIG and DFIG wind turbines during voltage sags in the electric grid.

KEYWORDS: Wind power, Low Voltage Ride Through, Dynamic Voltage Restorer.

1 | INTRODUÇÃO

Dentre as energias renováveis, a que apresenta maior crescimento nas últimas décadas é a energia eólica, pois possui grande potencial energético, abundância de matéria prima, o vento, e menor preço em relação às outras fontes renováveis. O Brasil está entre os 5 países com maior número de novas instalações eólicas em 2014, apesar de ainda estar distante de países como China, EUA e Alemanha no que diz respeito a potência eólica total instalada (GWEC, 2015).

Quanto às tecnologias de aerogeradores existentes, as mesmas podem ser agrupadas nos aerogeradores a velocidade fixa e a velocidade variável. O primeiro grupo, utiliza um gerador SCIG conectado diretamente à rede elétrica, com apenas um *soft-starter* para uma partida mais suave. Como a velocidade do gerador é fixa, não se consegue a máxima eficiência da turbina para a faixa de velocidades de vento em que o aerogerador opera, sendo essa tecnologia simples e de baixo custo. Essas turbinas se encontram presentes principalmente em países europeus, que investem em energia eólica há mais tempo (YARAMASU *et al.*, 2015).

Já no grupo de aerogeradores a velocidade variável, uma das tecnologias mais usadas é a DFIG, pois como os conversores são conectados ao rotor, os mesmos possuem menor potência (em geral em torno de 30% da potência nominal do gerador), o que diminui seus custos em relação às tecnologias que empregam conversores plenos no estator. Os aerogeradores desse grupo apresentam um custo maior que os de velocidade fixa, porém maximizam o rendimento da turbina eólica (IBRAHIM *et al.*, 2011). A Fig.1 representa os aerogeradores com as tecnologias SCIG e DFIG conectados à rede elétrica.

Contudo em ambas as tecnologias, o estator do gerador é conectado diretamente ao PCC, o que faz com que as mesmas sejam mais sensíveis a afundamentos de tensão na rede elétrica. Durante tais distúrbios, o gerador SCIG apresenta uma oscilação no torque eletromagnético, que pode levar o aerogerador a ter danos mecânicos (PAPATHANASSIOU; PAPADOPOULOS, 2001). Já para o DFIG, além de possuir o mesmo problema, tem o agravante de altas tensões e correntes poderem ser induzidas no rotor do gerador, elevando a tensão do barramento c.c. e podendo provocar danos permanentes aos conversores (IBRAHIM *et al.*, 2011).

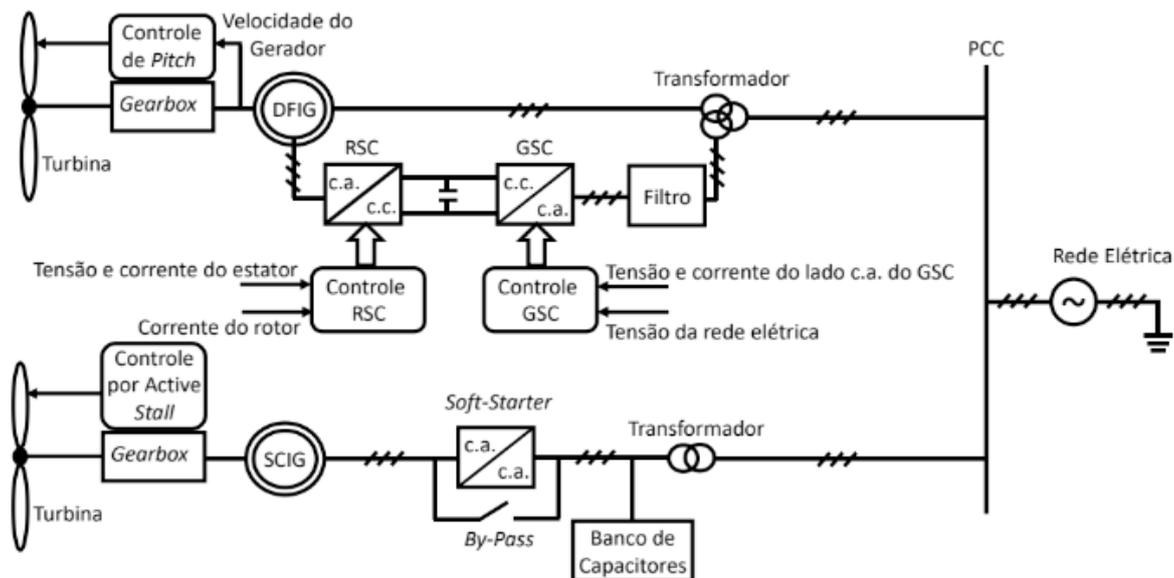


Figura 1 – Aerogeradores com Tecnologia DFIG e SCIG.

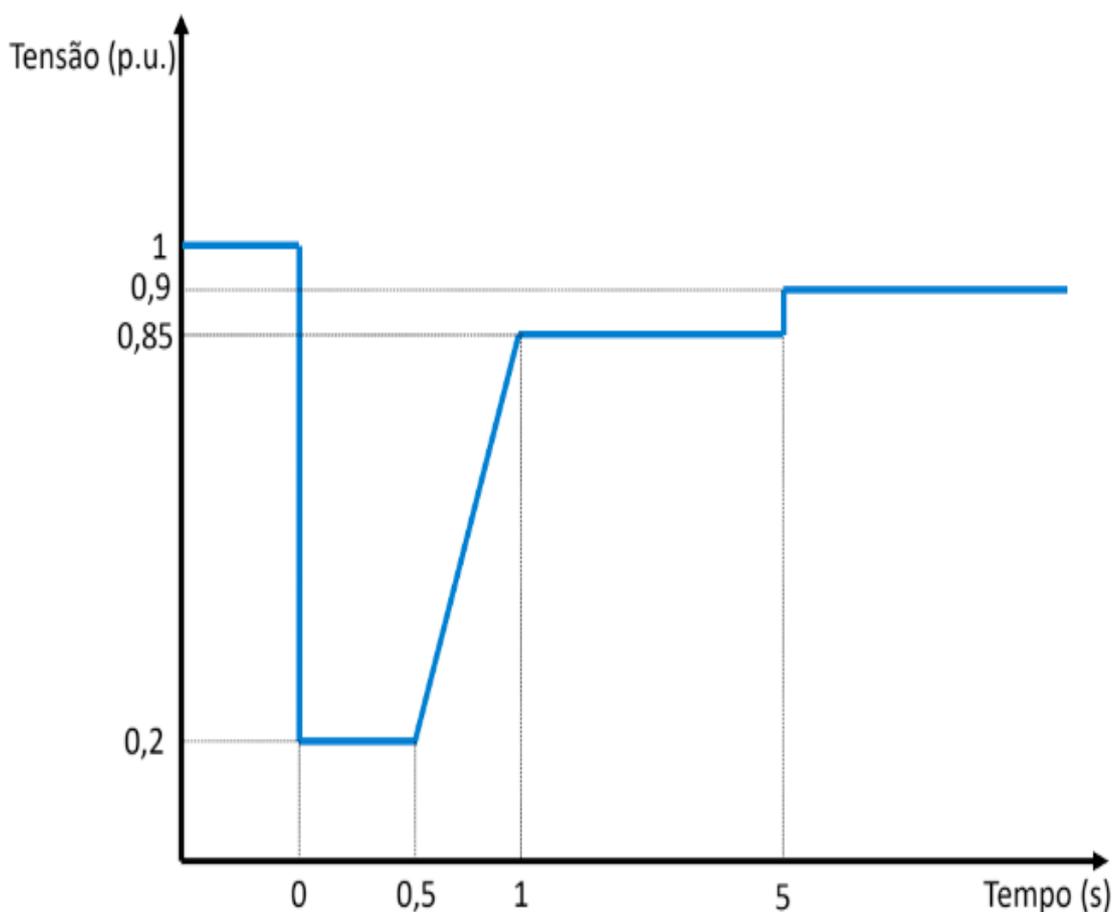


Figura 2 – Curva de suportabilidade de aerogeradores a afundamentos de tensão (ONS, 2009).

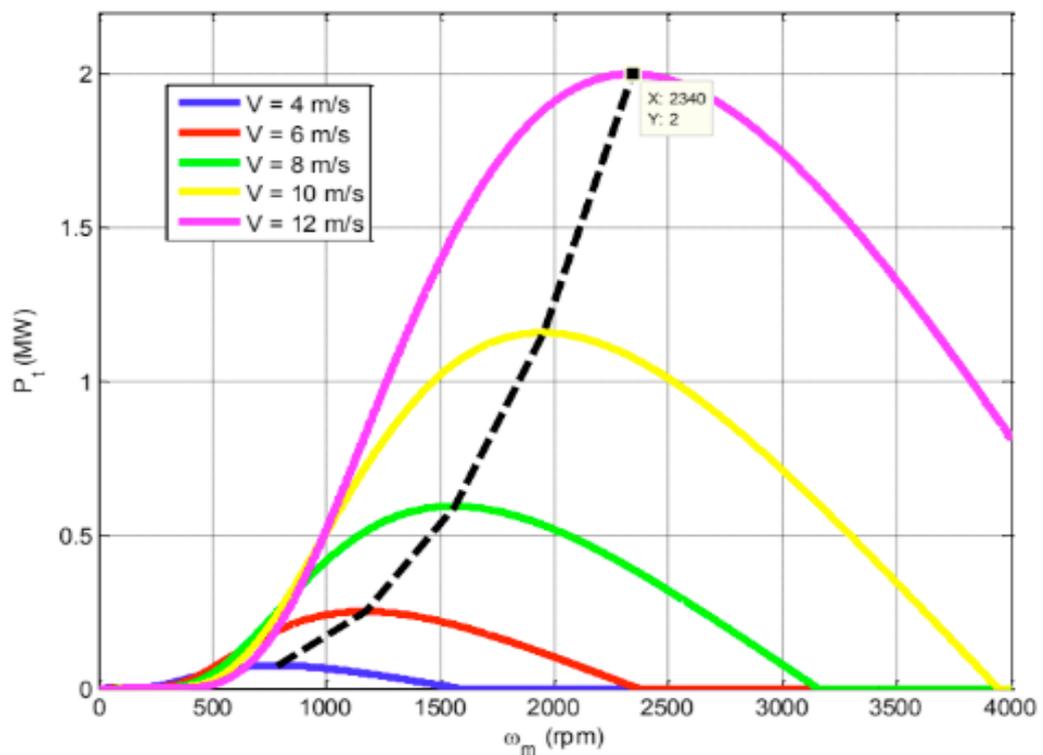
Nos códigos de rede atuais, se faz necessário que o aerogerador continue conectado à rede mesmo durante um afundamento de tensão. A Fig. 2 mostra a curva de suportabilidade de aerogeradores para o código brasileiro. Como se nota, apenas para afundamentos de tensão abaixo de 0,2 p.u., o aerogerador pode-se desconectar

imediatamente, enquanto que para tensões acima de 0,9 p.u., o a aerogerador não pode se desconectar.

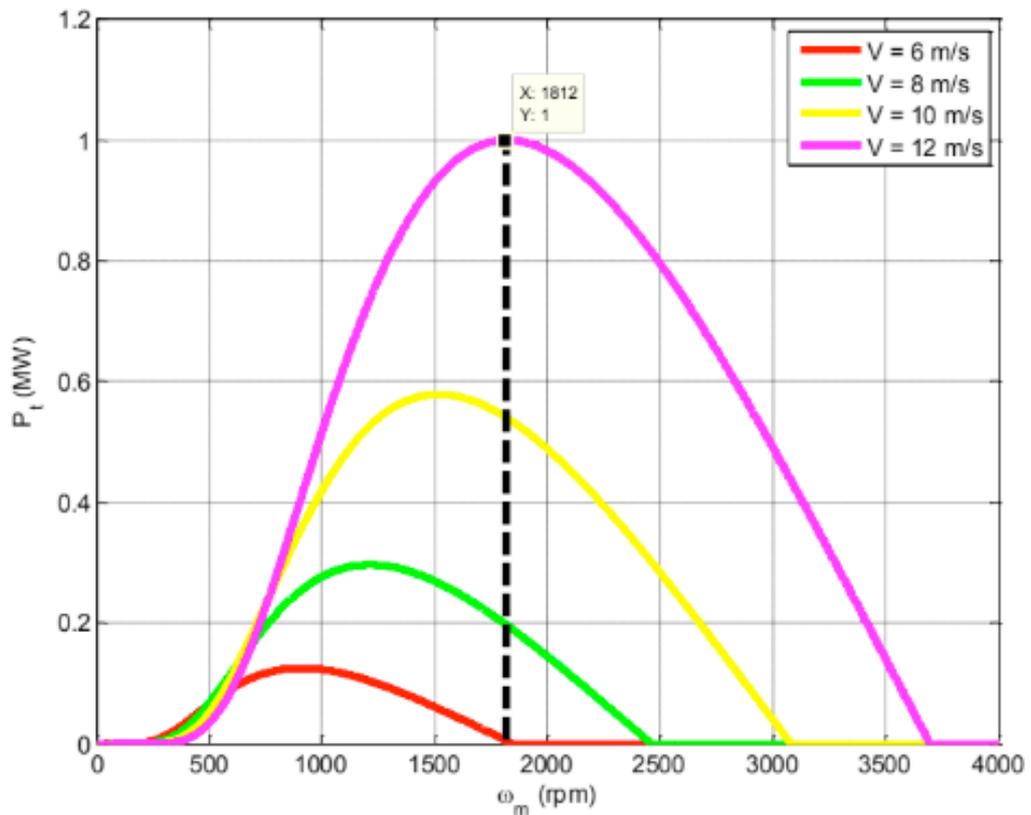
Assim neste trabalho pretende-se, com o auxílio do DVR, restaurar a tensão nos terminais dos aerogeradores DFIG e SCIG, perante afundamentos equilibrados e desequilibrados. Com isso, aumenta-se a suportabilidade de tais tecnologias de aerogeradores durante as faltas, para que as mesmas estejam dentro das normas estabelecidas pela ONS. Os resultados serão obtidos por meio de simulações no *software* Matlab/Simulink.

2 | AEROGERADORES COM TECNOLOGIA SCIG E DFIG

Para a simulação dos aerogeradores SCIG e DFIG, deve-se primeiro modelar a turbina eólica como (AKHMATOV, 2003). Assim para cada velocidade do vento, existe uma velocidade angular da turbina (e conseqüentemente um valor para velocidade angular do gerador,) que permite uma máxima extração de potência do vento pela turbina .



(a)



(b)

Figura 3 – Potência da turbina pela velocidade angular do gerador em várias velocidades de vento para (a)DFIG e (b)SCIG.

A Fig. 3 mostra para um aerogerador DFIG e outro SCIG, as curvas de potência da turbina pela velocidade do gerador, para diversas velocidades do vento, desde a *cut-in* (4m/s para o DFIG e 6m/s para o SCIG) até a nominal (12m/s). Como se observa no aerogerador com a tecnologia DFIG, o mesmo sempre extrai a maior potência do vento, pois permite variação na velocidade do gerador. Já para a tecnologia SCIG, apenas na velocidade de vento nominal o aerogerador apresenta o máximo rendimento. Essas turbinas são as mesmas utilizadas nesse trabalho.

O próximo passo para a implementação dos aerogeradores é modelar os geradores. O SCIG possui uma máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo, enquanto que o DFIG tem uma máquina de indução com rotor bobinado. Ambos modelos das máquinas são idênticos, a não ser pela tensão do rotor ser nula para o SCIG. Como pode ser obtido em (NOVOTNY; LIPO, 1996), as equações do modelo de uma máquina de indução em coordenadas girantes ($dq0$) são dadas por:

$$\begin{aligned}
 \vec{v}_{dq0s} &= R_s \vec{i}_{dq0s} + \frac{d\vec{\psi}_{dq0s}}{dt} + j\omega_s \vec{\psi}_{dq0s} & \vec{\psi}_{dq0s} &= L_{ls} \vec{i}_{dq0s} + L_m (\vec{i}_{dqs} + \vec{i}_{dqr}) \\
 \vec{v}_{dq0r} &= R_r \vec{i}_{dq0r} + \frac{d\vec{\psi}_{dq0r}}{dt} + j(\omega_s - \omega_e) \vec{\psi}_{dq0r} & \vec{\psi}_{dq0r} &= L_{lr} \vec{i}_{dq0r} + L_m (\vec{i}_{dqr} + \vec{i}_{dqs}) \\
 T_e &= \frac{3P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) & \frac{2J}{P} \frac{d\omega_e}{dt} &= T_e - T_m
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

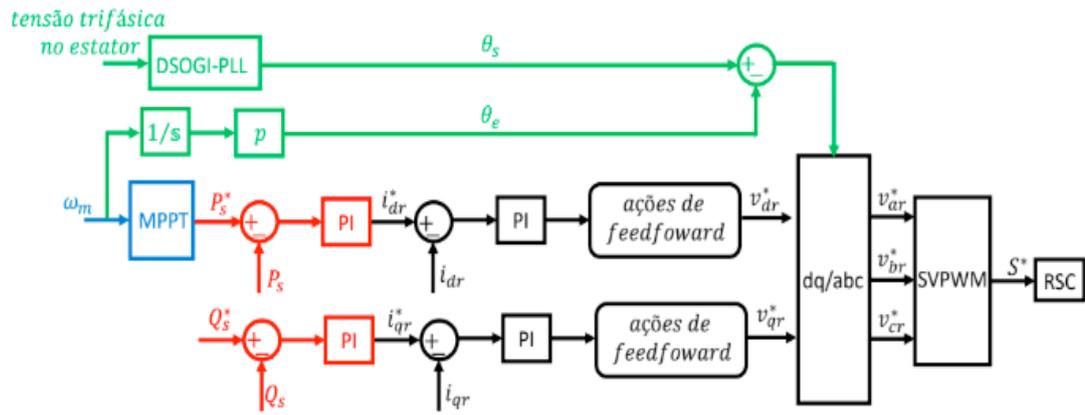
Nas equações acima todos subscritos $dq0$ se referem às coordenadas de eixo direto, de quadratura e de sequência zero respectivamente. Já s e r correspondem a estator e rotor. Os termos v , i e ψ significam tensão, corrente e enlace de fluxo respectivamente. Já R_s e R_r são as resistências dos enrolamentos do estator e rotor, enquanto que L_{ls} , L_{lr} e L_m são as indutâncias de dispersão do estator, de dispersão do rotor e de magnetização. Por fim, ω_s é a frequência das variáveis do estator (no caso igual a da rede), ω_e é a velocidade elétrica de giro da máquina, T_e é o torque eletromagnético, T_m o torque de carga (no aerogerador será o da turbina), P é o número de par de polos e J é o momento de inércia do gerador.

Deve-se atentar que as variáveis do rotor são referidas ao estator e o torque eletromagnético pode ser obtido de várias formas. Outra observação é que na coordenada de sequência zero não há acoplamento entre as variáveis do rotor e estator. Além disso, no caso de distúrbio na rede elétrica, existe uma dinâmica da máquina para componentes de sequência positiva e negativa (existe também para sequência zero, caso os enrolamentos do estator sejam aterrados).

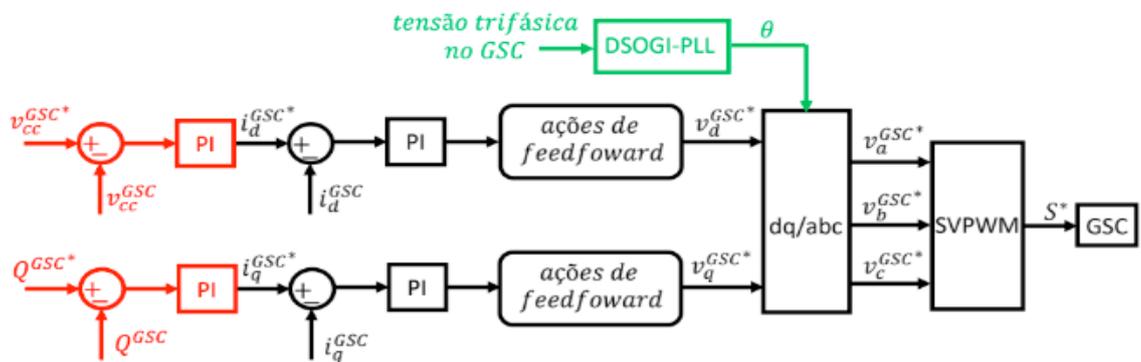
A tecnologia SCIG não possui um controle sobre a velocidade do gerador. Logo em regime de operação normal, o mesmo gira praticamente com velocidade fixa, tendo um escorregamento máximo entre 1 e 2%. Ainda para compensar os reativos do gerador, é necessário instalar um banco de capacitores, sendo que esse banco pode ser chaveado segundo a potência reativa do gerador (PAPATHANASSIOU; PAPADOPOULOS, 2001). Já tecnologia DFIG possui conversores na configuração *back-to-back* conectados ao rotor do gerador, como já mostrado na Fig. 1. Neste trabalho o conversor conectado do lado do rotor da máquina é denominado de RSC (*rotor side converter*), enquanto que o conversor conectado à rede elétrica é denominado de GSC (*grid side converter*).

O RSC é responsável por controlar a potência ativa e reativa que flui pelo estator da máquina. Para isso, o mesmo possui internamente às malhas de potência ativa (P_s) e reativa (Q_s) do estator, malhas que controlam a corrente do rotor em referencial girante (i_{dr} e i_{qr}). Deve-se ainda ressaltar, que externamente à malha de potência ativa, há um seguidor de máxima potência ou *maximum power point tracking* (MPPT) que tem o objetivo de fazer com que o aerogerador extraia para qualquer velocidade do vento, entre a nominal e a de *cut-in* a maior potência possível. Para isso, utiliza-se da velocidade mecânica do gerador (ω_m). A Fig. 4(a) representa o controle do conversor RSC.

Já o GSC possui malhas internas que controlam as correntes do lado c.a. do conversor (i_d^{GSC} e i_q^{GSC}). Essas malhas são utilizadas para controlar, através de malhas externas, a potência reativa no conversor (Q^{GSC}) e a tensão no barramento c.c. (v_{cc}^{GSC}). Além disso, projetou-se um filtro LCL no lado c.a. do GSC para filtrar os harmônicos de corrente oriundos do conversor, segundo (LISERRE; BLAABJERG; HANSEN, 2001). O controle do conversor GSC está na Fig. 4(b).



(a)



(b)

Figura 4 – Controle (a) RSC e (b) GSC.

A estratégia de chaveamento utilizada foi o SVPWM (*space vector pulse width modulation*), que permite maior aproveitamento da tensão do barramento c.c. (HAVA; KERKMAN; LIPO, 1999). Além disso, como as malhas de controle são em coordenadas girantes ($dq0$), foi feito uso da DSOGI-PLL (*double second order generalized integrator phase locked loop*), que é uma PLL que apresenta maior robustez às faltas na rede (RODRIGUEZ et al., 2006). Maiores detalhes sobre o controle clássico do DFIG podem ser vistos em (MENDES et al., 2015).

3 | DVR

Com o estator conectado diretamente ao PCC, os aerogeradores SCIG e DFIG são bastante sensíveis aos afundamentos de tensão na rede, podendo ocasionar danos permanentes na ausência de proteções. Para o DFIG, em que se há a preocupação adicional durante tais distúrbios com o conversor do rotor, o mesmo pode ter algumas proteções específicas, como um dispositivo *crowbar*.

Esse dispositivo é conectado ao rotor do DFIG durante os afundamentos de tensão, a fim de limitar as sobretensões e sobrecorrentes no rotor. Contudo o mesmo não consegue eliminar as oscilações de torque e faz o gerador drenar grande

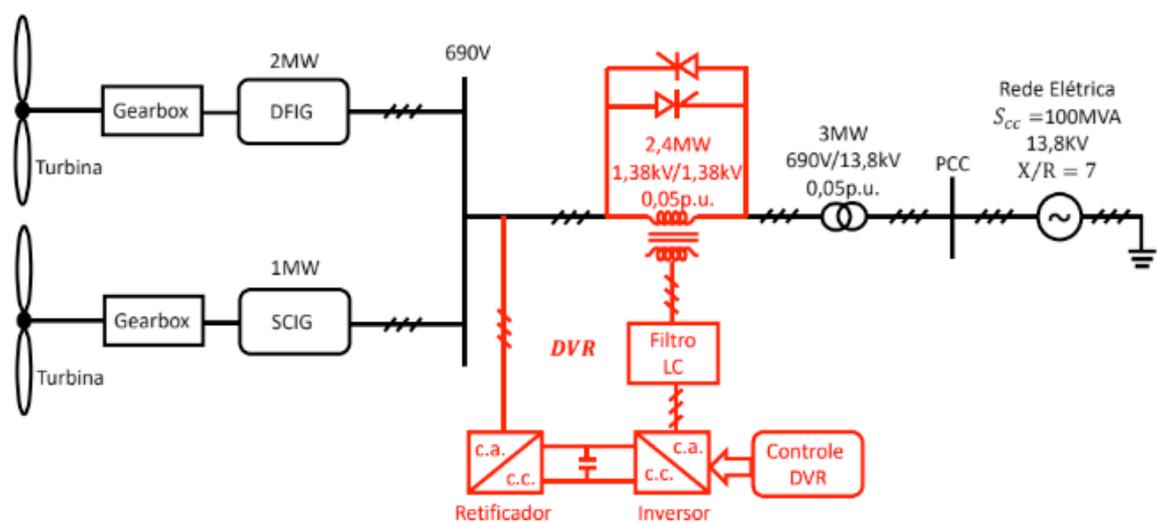
quantidade de energia reativa durante a falta, o que é uma não conformidade com vários códigos de rede (WESSELS; GEBHARDT; FUCHS, 2011).

Outro dispositivo que também é utilizado para proteção do DFIG e também do SCIG é o STATCOM, que consegue restaurar a tensão nominal no PCC através do fluxo de potência reativa, fazendo com que o gerador sinta um menor impacto durante um afundamento de tensão. Contudo o mesmo deve ter uma potência bastante elevada para restaurar a tensão, o que eleva seu custo e o limita a ser aplicado a apenas um aerogerador para potências mais elevadas (WESSELS; GEBHARDT; FUCHS, 2011).

Esses problemas podem ser contornados com o uso de um DVR, pois o mesmo restaura a tensão para os aerogeradores, diminuindo as oscilações de torque e o aumento das correntes. Além disso, tendo que o DVR opere apenas durante o afundamento de tensão, que em geral é durante um curto período de tempo, o mesmo pode ter uma potência mais reduzida e ser aplicado a mais de um aerogerador (IBRAHIM *et al.*, 2011).

A Fig. 5(a) mostra o esquemático do DVR implementado, protegendo os aerogeradores. Como se nota, o DVR possui um retificador a diodos para carregar o barramento c.c. e um inversor para controlar as tensões a serem induzidas na linha. Na saída do inversor há um filtro passa-baixa para filtrar os harmônicos de corrente do conversor. Os tiristores em paralelo com o transformador do DVR, fazem o *by-pass* do mesmo na ausência de afundamentos de tensão na rede. Além disso, a tensão no transformador é o dobro da tensão dos aerogeradores para evitar a saturação.

A malha de controle do inversor do DVR está no diagrama da Fig. 5(b), em que as variáveis se encontram no referencial girante, com malhas internas que controlam a corrente do lado c.a. do inversor e malhas externas que controlam a tensão induzida pelo DVR na linha. Novamente se fez uso da DSOGI-PLL e da técnica de chaveamento SVPWM. Detalhes sobre o controle do DVR podem ser encontrados em (IBRAHIM *et al.*, 2011; WESSELS; GEBHARDT; FUCHS, 2011).



(a)

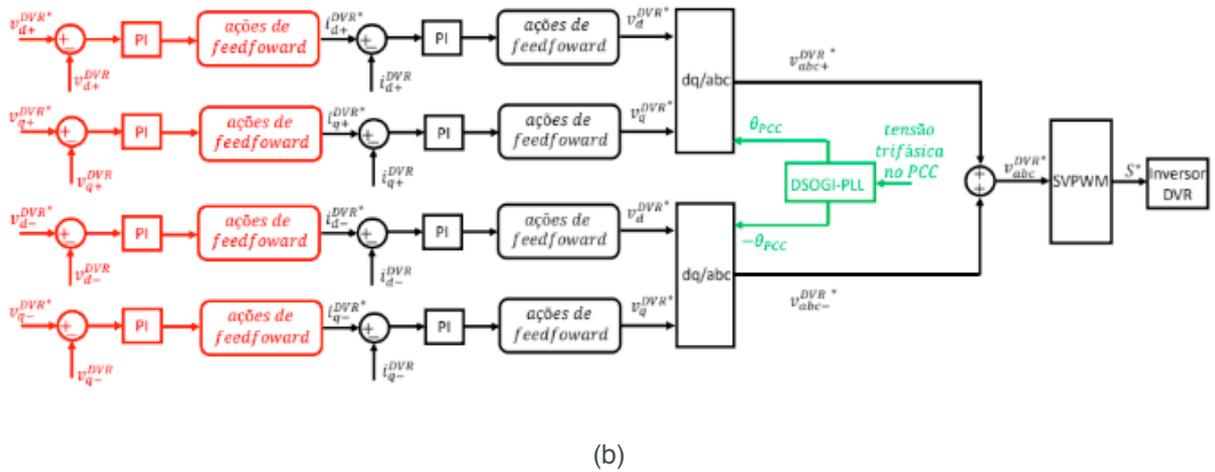


Figura 5 – (a) DVR aplicado ao SCIG e ao DFIG e (b) Malha de controle do DVR.

Como o afundamento na rede elétrica pode ser desequilibrado, é necessário implementar também uma malha de controle para as componentes de sequência negativa. Técnicas para desacoplar as componentes de sequência negativa das componentes de sequência positiva podem ser encontradas em (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011).

4 | RESULTADOS

Como já dito anteriormente a tecnologia DFIG é a mais aplicada em turbinas eólicas e em muitos países há aerogeradores SCIG. Logo não é estranho que parques eólicos com aerogeradores DFIG e SCIG estejam próximos. Assim nesse trabalho dois aerogeradores, cada um de uma tecnologia, estarão conectados à rede elétrica como demonstrado na Fig. 5(a). Em ambos será estudado o comportamento para um afundamento com tensão residual de 0,2 p.u. no PCC durante 0,5 segundos, com e sem a proteção do DVR. A velocidade de vento será a nominal, com os geradores gerando a máxima potência.

4.1 Afundamento Trifásico

Em primeiro momento será simulado um afundamento trifásico equilibrado no PCC entre os intervalos de 1 a 1,5 segundos. A Fig. 6 mostra as tensões de fase da rede, imposta pelo DVR e nos aerogeradores. Nota-se que a tensão nos aerogeradores é restaurada ao seu valor nominal com a atuação do restaurador dinâmico de tensão. Ainda na Fig. 6 é mostrada a tensão no barramento c.c. do DVR. Durante a falta essa tensão eleva-se, devido a energia consumida pelo dispositivo dos aerogeradores. Logo é necessário a instalação do *chopper* nesse barramento a fim de limitar a tensão, como demonstrado.

Na Fig. 7 é representada a corrente do estator, o torque eletromagnético, a potência ativa e reativa para o aerogerador SCIG sem e com o DVR. Como se observa, sem o restaurador, a corrente apresenta valores bem maiores no início e principalmente no final do afundamento. Isso se deve ao fato de que nesses instantes, há uma componente natural (transitório) e forçada (permanente), sendo que a componente forçada é maior quanto mais elevada à tensão do gerador (MORREN; HAAN, 2007). Para o caso com proteção, percebe-se um transitório mais evidente somente no início da falta. A justificativa para tal é que o DVR demanda um tempo para restaurar a tensão do gerador como está na Fig. 6c.

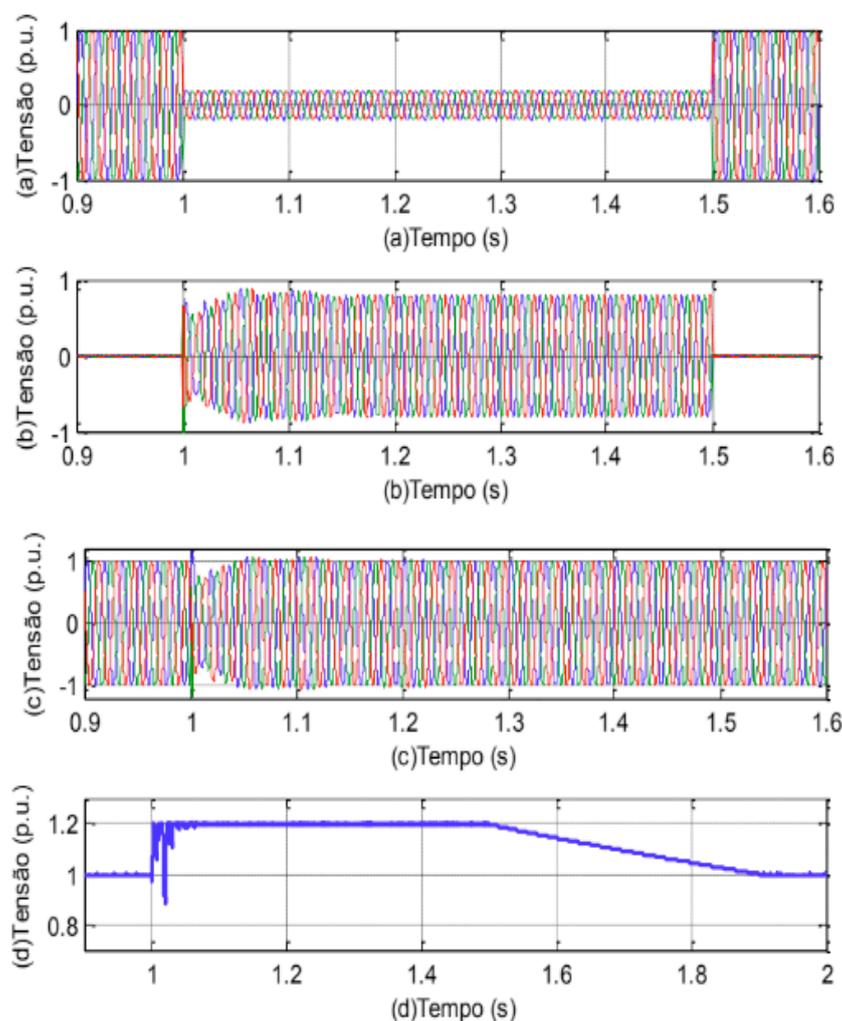


Figura 6 – Tensão (a) de fase da rede (b) do DVR (c) de fase nos aerogeradores e (d) no barramento c.c. do DVR.

Quanto ao torque eletromagnético, o mesmo diminui com o SCIG sem proteção, o que faz com que o aerogerador acelere. Essa aceleração depende do momento de inércia da turbina e tende a ser menor para aerogeradores de grande porte. Além disso, as oscilações de conjugado são maiores para o caso sem o DVR, elevando as chances de danos mecânicos.

Já a potência ativa decai em módulo durante o afundamento para o SCIG sem DVR. Isso é a causa da diminuição do torque eletromagnético e aceleração

do gerador, que converte uma parcela da potência absorvida pela turbina do vento, em energia cinética. Com a proteção, a aerogerador consegue continuar gerando aproximadamente a mesma potência ativa, com exceção dos instantes após o início da falta, uma vez que sua tensão é restaurada.

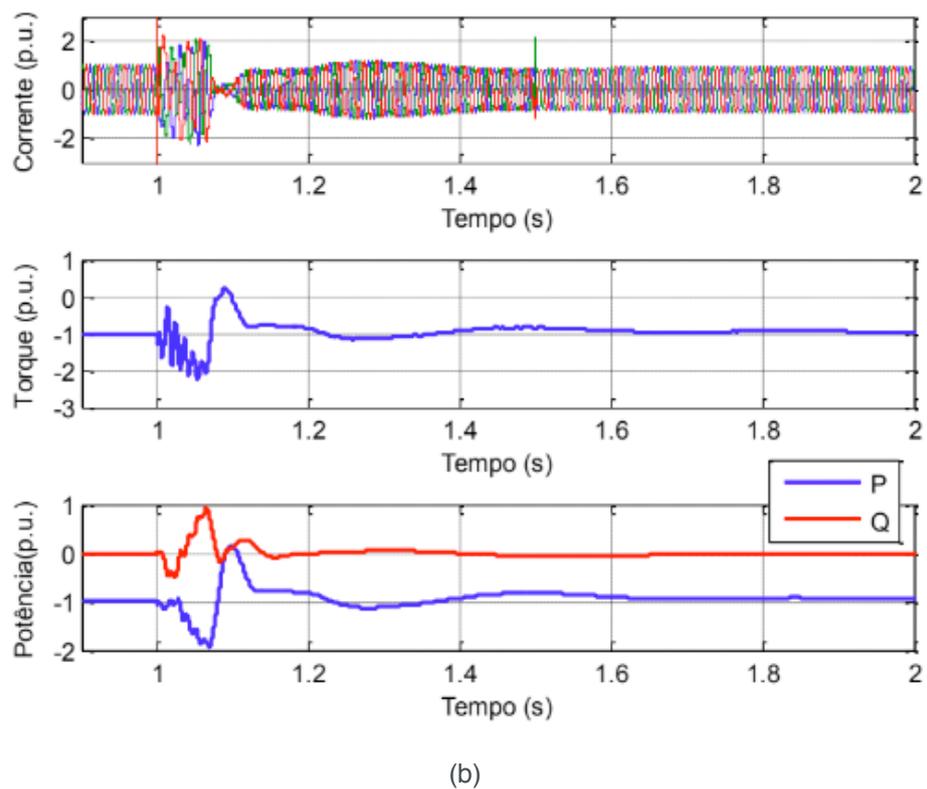
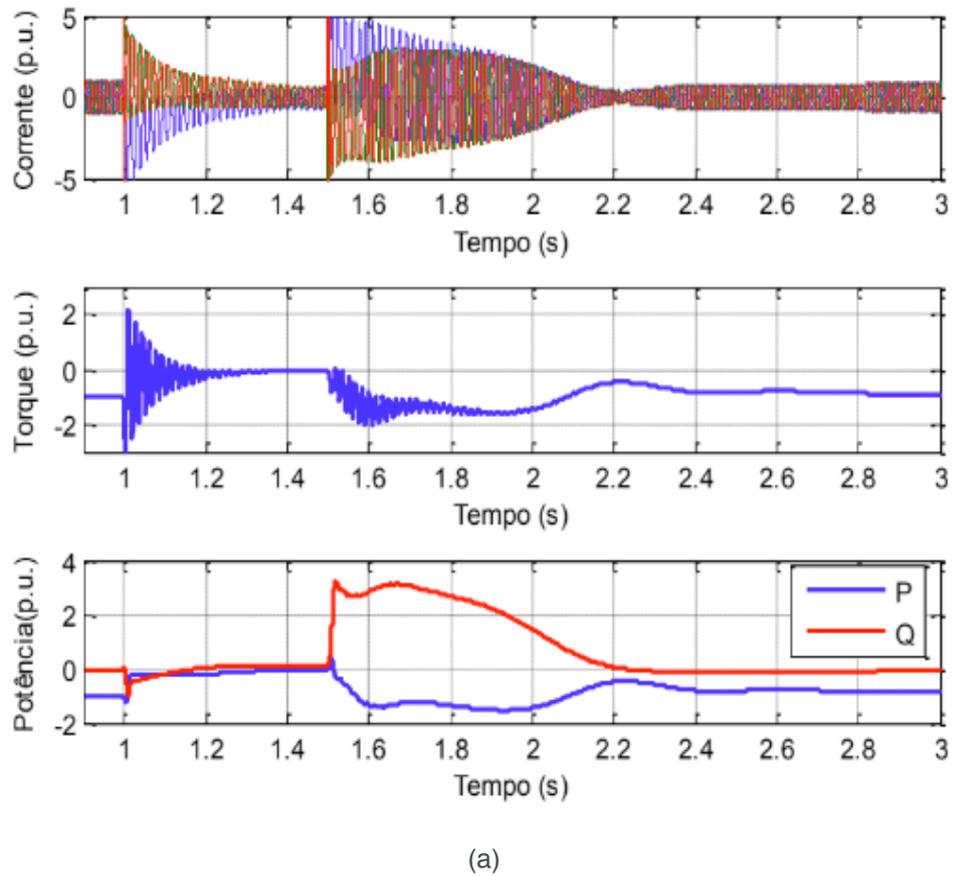
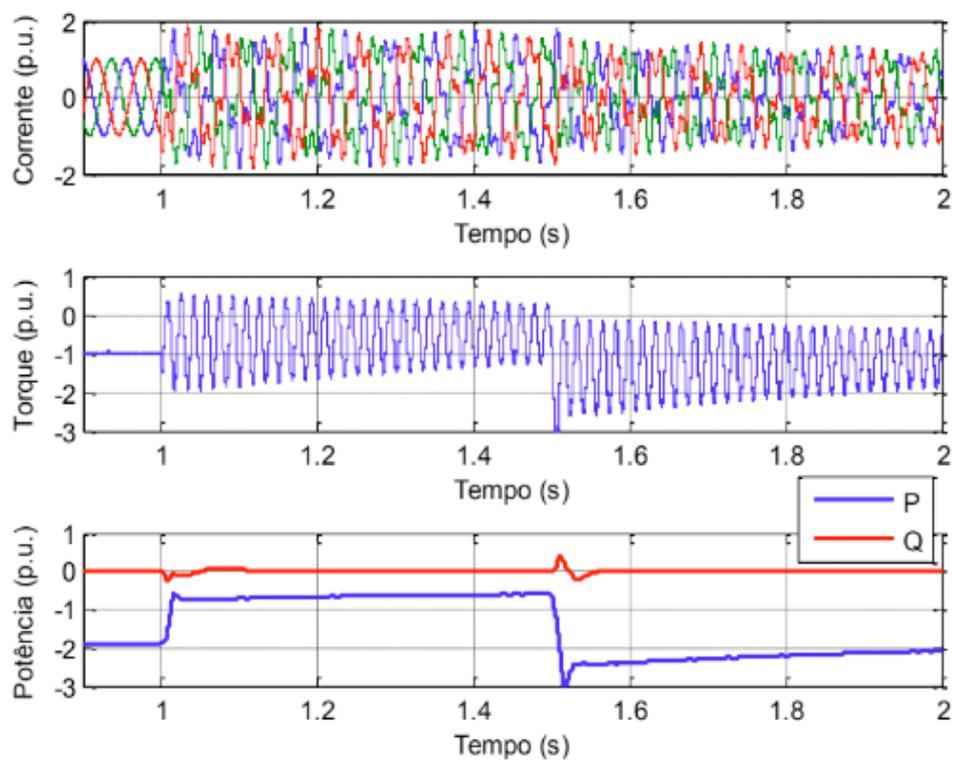


Figura 7 – Afundamento trifásico para o SCIG (a) sem DVR e (b) com DVR.

A última variável analisada para o SCIG é a potência reativa. Sem o DVR, no início do afundamento a máquina diminui sua magnetização, fazendo com que o aerogerador tenha um fluxo de potência reativa capacitivo. Contudo o banco de capacitores para correção de fator de potência diminui sua energia armazenada com a queda de tensão, e antes do fim da falta o SCIG tem um fluxo de potência reativa indutivo. Com a tensão no PCC restaurada, a máquina aumenta sua magnetização (o que pode levá-la à saturação), tornando o fator de potência mais indutivo e tendo um pico de potência reativa de mais de 3p.u. Todavia, à medida que o tempo passa, a potência reativa tende a zero, pois o banco de capacitores volta a elevar sua tensão. Com o DVR, a potência reativa do SCIG apenas oscila inicialmente, devido ao transitório da corrente, tendendo a um valor nulo antes do fim da falta.



(a)

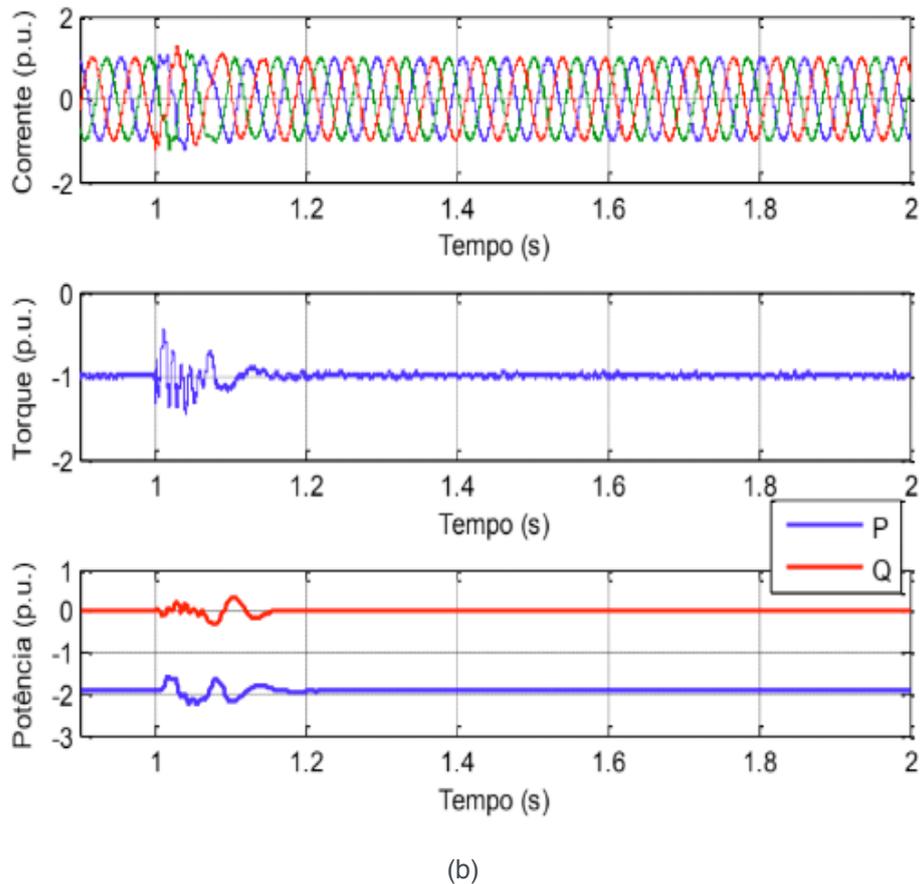


Figura 8 – Afundamento trifásico para o DFIG (a) sem DVR e (b) com DVR.

Os resultados para o DFIG estão apresentados na Fig. 8. Os gráficos de corrente, dizem respeito às correntes do rotor e como se observa se tornam deformadas sem o DVR, que se deve a componente natural do enlace de fluxo do estator (MORREN; HAAN, 2007). Além disso, essas correntes praticamente dobram de amplitude no intervalo da falta e demoram a estabilizar após a mesma, o que pode causar danos aos conversores.

Para o torque eletromagnético, o mesmo é bastante oscilante sem o restaurador, novamente devido a componente natural do enlace de fluxo do estator, que distorce correntes do estator e rotor. Além disso, o seu valor médio diminui durante o afundamento, devido à queda da potência ativa entregue à rede, ocorrendo o inverso após a falta. Na presença do dispositivo de proteção, o torque do DFIG oscila apenas no início do afundamento, devido ao transitório da tensão restaurada, o que também causa um pequeno transitório na potência ativa.

Já a potência reativa do DFIG não há grandes variações tanto com e sem o DVR, diferentemente do ocorrido com o SCIG. Isso se deve principalmente pelo fato dos conversores do DFIG controlarem a potência reativa, o que não ocorre no SCIG.

4.2 Afundamento Monofásico

O afundamento mais comum a que os aerogeradores estão sujeitos é o

monofásico. Assim sendo, neste item será analisado esse afundamento no intervalo de 1 a 1,5 segundos, com uma tensão residual de 0,2 p.u. A Fig. 9 mostra as tensões de fase no PCC, as tensões impostas pelo DVR e as tensões de linha nos aerogeradores. Novamente se nota que a tensão nas turbinas eólicas é restaurada para o valor nominal durante a falta. Uma observação é que foi analisada a tensão de linha para os geradores, devido ao fato que um afundamento desequilibrado gera tensões de fase de sequência zero e a mesma não é compensada pelo DVR. Contudo esse fato não é um problema, uma vez que os geradores não são aterrados e não há circulação de correntes de sequência zero.

Ainda na Fig. 9 é representada a tensão no barramento c.c. do DVR. Como se observa a mesma não aumenta demasiadamente como no caso anterior, uma vez que a potência absorvida pelo dispositivo é bem menor. Contudo o mesmo apresenta oscilações devido ao desequilíbrio das tensões na rede, tendo em vista que esse barramento não é controlado.

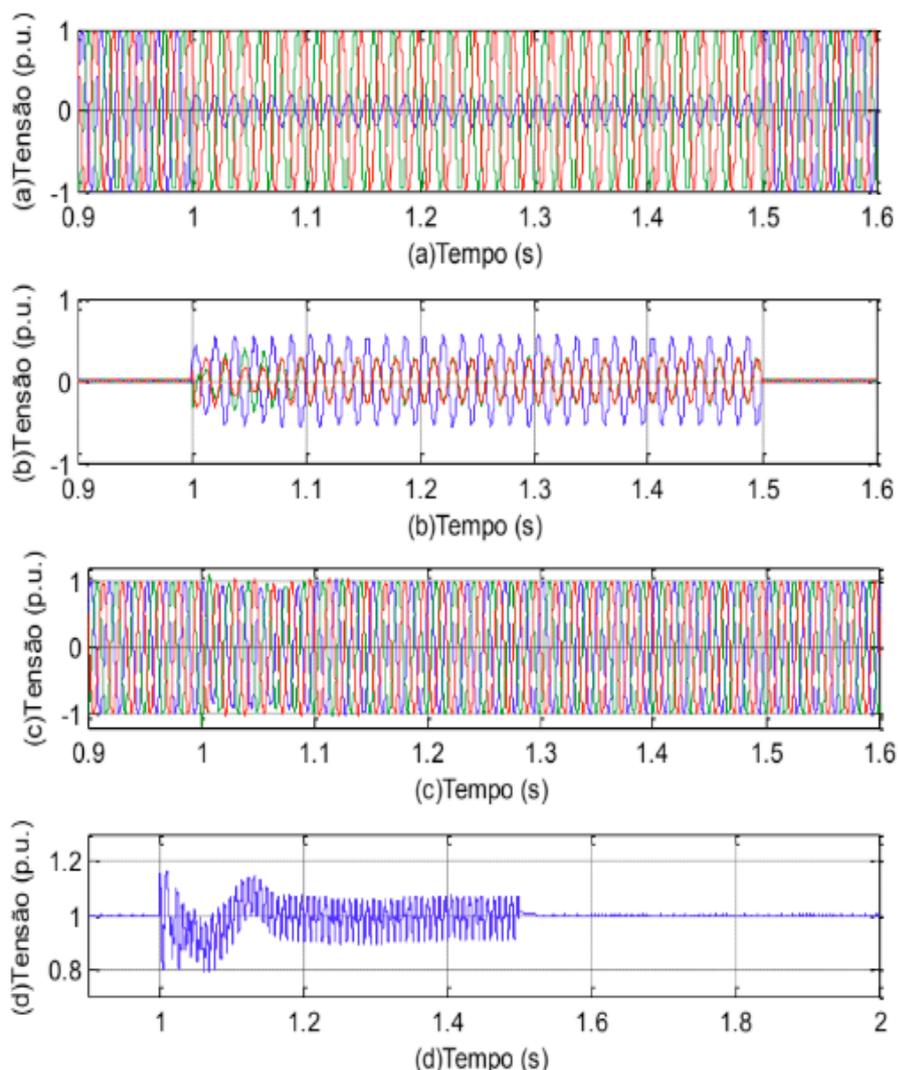


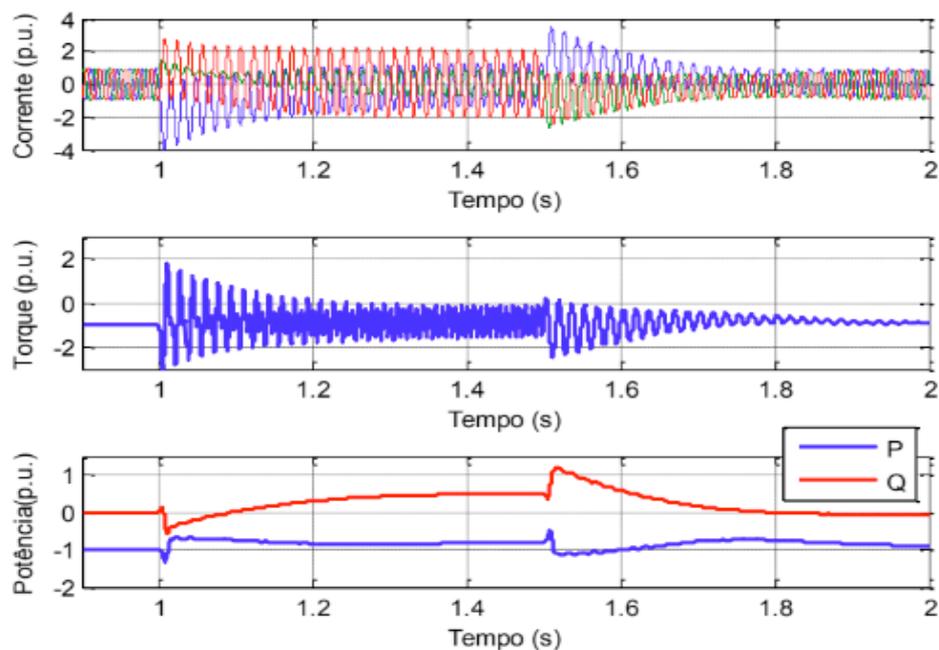
Figura 9 – Tensão(a) de fase na rede (b) do DVR (c) de linha nos aerogeradores e (d) no barramento c.c. do DVR.

A Fig. 10 apresenta os resultados durante a falta para o SCIG, com e sem

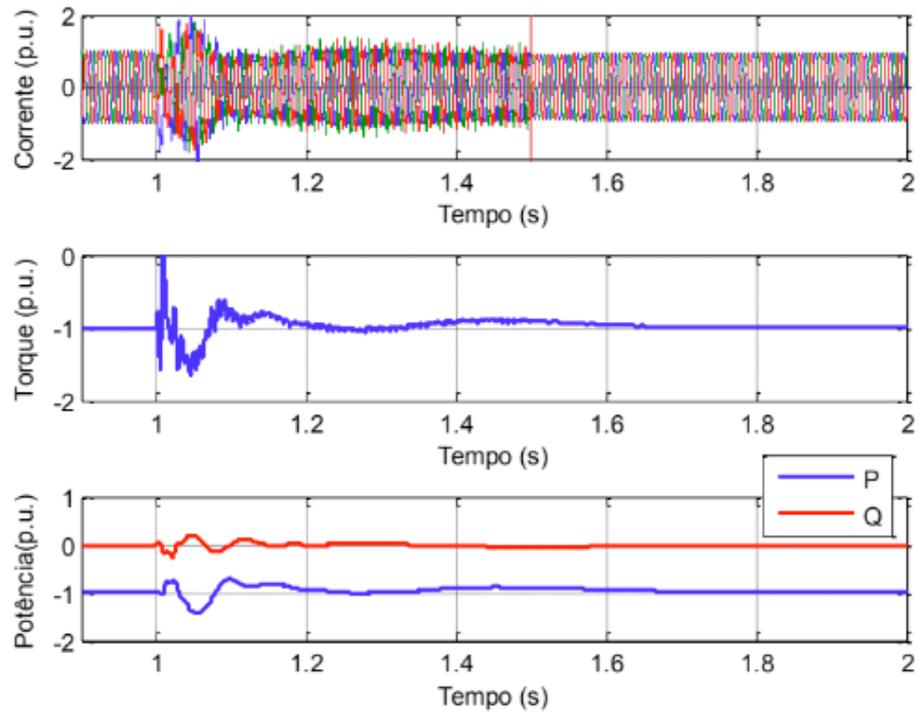
proteção. Como se percebe, sem o restaurador, a corrente do estator torna-se desequilibrada com picos elevados no início e fim do afundamento. Já com o DVR, a corrente apresenta um transitório inicial e depois tende a se tornar mais equilibrada, apesar de apresentar distorções até o fim da falta.

Para o torque eletromagnético, as oscilações são mais severas para o SCIG sem proteção, tanto durante quanto após o afundamento. Isso se deve ao fato de que em um afundamento desequilibrado, as correntes e enlaces de fluxo da máquina também tendem a se tornar desequilibrados, gerando variações bruscas no conjugado.

Avaliando as potências ativa e reativa, tem-se que para o caso com o restaurador, que as variações são mais brandas, sendo mais nítidas no início da falta, devido os transitórios da corrente. Já sem o dispositivo de proteção, as alterações de potências são mais elevadas, com a potência ativa reduzindo durante o afundamento, enquanto a potência reativa se torna indutiva durante quase todo intervalo após início da falta. As justificativas para tais comportamentos são a mesmas das já descritas para o afundamento trifásico e são mais brandas devido ao menor número de fases que diminuem as tensões.



(a)



(b)

Figura 10 – Afundamento monofásico para o SCIG (a) sem DVR e (b) com DVR.

Por fim a Fig. 11 mostra os resultados para o DFIG. Como no caso trifásico, as correntes do rotor e o torque eletromagnético são mais oscilatórios e atingem grandes amplitudes sem o DVR, sendo que com o dispositivo de proteção essas variáveis quase que não se modificam com o afundamento. Já para as potências ativa e reativa, não se vê grandes diferenças, a não ser pelas variações ao final do afundamento que ocorrem para a situação sem DVR.

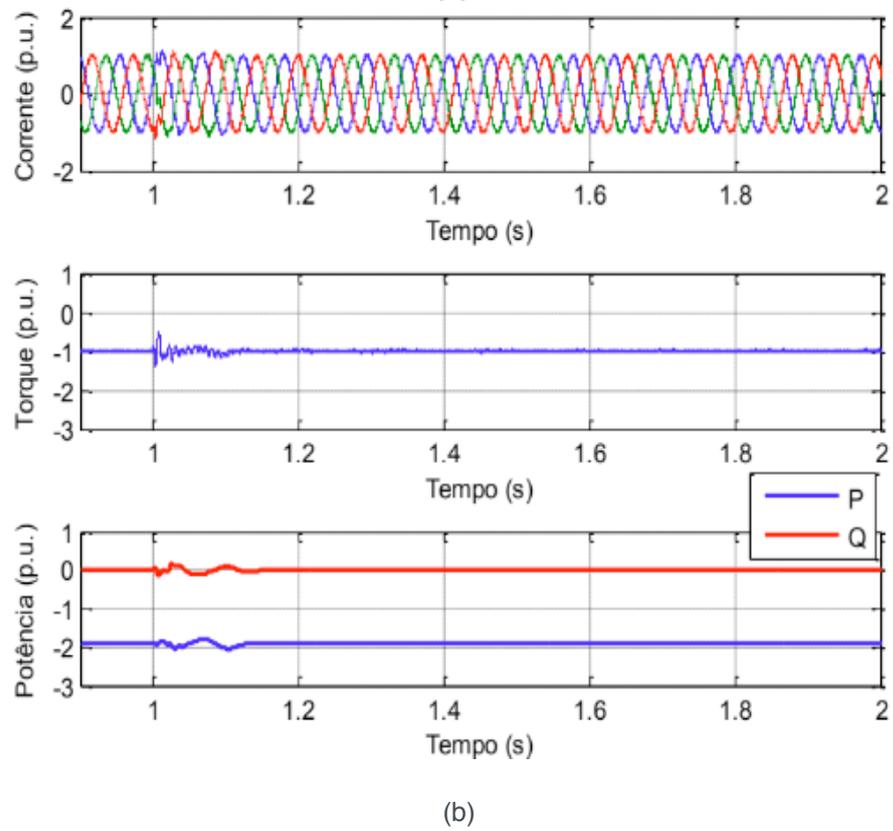
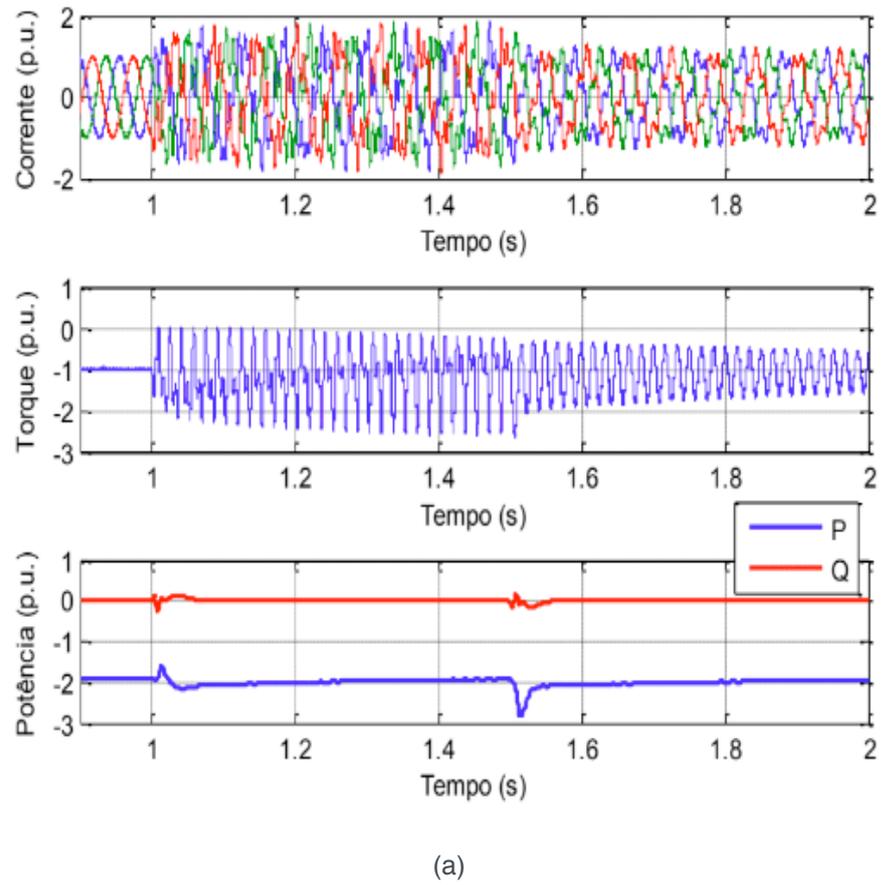


Figura 11 – Afundamento monofásico para o DFIG (a) com DVR e (b) sem DVR.

5 | CONCLUSÃO

Neste trabalho foram discutidos os problemas que aerogeradores SCIG e DFIG possuem com afundamentos de tensão na rede elétrica, além das condições impostas pelo código de rede brasileiro para que os mesmos possam operar durante tais distúrbios. Também foram apresentadas as principais características dessas tecnologias de aerogeradores e suas modelagens.

Resultados de simulação com e sem DVR, mostram como a suportabilidade perante afundamentos de tensão dos aerogeradores SCIG e DFIG melhoram com o acréscimo do restaurador. Com o dispositivo de proteção, as oscilações de torque eletromagnético dos geradores diminuem consideravelmente, podendo evitar danos mecânicos. Além disso, as potências ativa e reativa conseguem manter-se em torno dos valores anteriores a falta. Por fim, as correntes de rotor para o DFIG e estator para o SCIG, apresentam menores distorções e acréscimos em amplitude, protegendo os enrolamentos dos geradores e seus conversores.

6 | REFERÊNCIAS

AKHMATOV, V. **Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power**, Technical University of Denmark (Tese de PhD), Abril 2003.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC. **Global Wind Statistics 2014**, 2015.

HAVA, A. M.; KERKMAN, R. J.; LIPO, T. A. **Simple Analytical and Graphical Methods for Carrier-Based PWM-VSI Drives**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. Vol. 14, n. Nº 1, p. 49 - 61, Janeiro 1999.

IBRAHIM, A. O. et al. **A Fault Ride-Through Technique of DFIG Wind Turbine Systems Using Dynamic Voltage Restorers**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. Vol. 26, n. Nº. 3, p. 871 - 882, Março 2011.

LISERRE, M.; BLAABJERG, L.; HANSEN, S. **Design and control of an LCL-filter Based Three-Phase Active Rectifier**, v. Vol: 41, n. Nº: 5, p. 1281-1291, 2001.

MENDES, V. F. et al. **Doubly-fed Induction Generator Ride-Through Fault Capability Using Resonant Controllers for Asymmetrical Voltage Sags**. The Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation 2015, v. 4, Abril 2015.

MORREN, J.; HAAN, S. W. H. D. **Short-Circuit Current of Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generator**. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007. 174 - 180, Vol.22, No: 1.

NOVOTNY, D. W.; LIPO, T. A. **Vector Control and Dynamics of AC Drives**. 1ª. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1996.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Submódulo 3.6 - Requisitos Técnicos Mínimos para Conexão à Rede Básica**, 2009.

PAPATHANASSIOU, S. A.; PAPADOPOULOS, M. P. **Mechanical Stresses in Fixed-Speed Wind Turbines Due to Network Disturbances**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 16, n. 4, p. 361 - 367, Dezembro 2001.

RODRIGUEZ, P. et al. **New Positive-Sequence Voltage Detector for Grid Synchronization.** 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '06., 18 - 22 Junho 2006. 1 - 7.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems.** [S.l.]: John Wiley and Sons, 2011.

WESSELS, C.; GEBHARDT, F.; FUCHS, F. W. **Fault Ride-Through of a DFIG Wind Turbine Using a Dynamic Voltage Restorer During Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. Vol. 26, n. N.º. 3, p. 807 - 815, Março 2011.

YARAMASU, V. et al. **High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies.** Proceedings of the IEEE, v. 103, n. 5, p. 740 - 788, Maio 2015.

SOBRE O ORGANIZADOR:

Paulo Jayme Pereira Abdala possui graduação em Engenharia Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - RJ (1988), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005) e pós-graduação em Gestão de Aviação Civil pela Universidade de Brasília (2003). Entre 1989 e 2008 foi Chefe do Laboratório de Ruído Aeronáutico e Emissões de Motores do DAC/ANAC, tendo desenvolvido centenas de estudos sobre poluição sonora e atmosférica oriundas da atividade aeronáutica. Foi representante oficial do Brasil em diversos Fóruns Internacionais sobre meio ambiente promovidos pela Organização de Aviação Civil Internacional OACI - Agência da ONU. Foi Coordenador dos Cursos de Engenharia de Produção, Elétrica, Civil e Mecânica na UNOPAR/PG entre 2013 e 2018. Atualmente é Consultor Independente para a AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, OACI e INFRAERO. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: acústica, meio ambiente e pedagogia (metodologia TRAINAIR/OACI).

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-066-7

