

# Energia Elétrica e Sustentabilidade

Jaqueline Oliveira Rezende  
(Organizadora)



**Atena**  
Editora

Ano 2018

**JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE**

(Organizadora)

# **Energia Elétrica e Sustentabilidade**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Natália Sandrini

**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  
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  
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  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b> <b>(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E56	Energia elétrica e sustentabilidade [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-45-1 DOI 10.22533/at.ed.451180110  1. Desenvolvimento energético – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Energia elétrica. I. Rezende, Jaqueline Oliveira.  CDD 338.4
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

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

2018

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](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A sustentabilidade pode ser entendida como a capacidade de o ser humano utilizar os recursos naturais para satisfazer as suas necessidades sem comprometer esses recursos para atender as gerações futuras. Nesse contexto, a sustentabilidade está inter-relacionadas em diversos setores, sendo os principais o social, o ambiental e o econômico. Dessa forma, constitui um dos desafios da sociedade moderna o desenvolvimento sustentável que objetiva preservar o meio ambiente durante a realização de outras atividades.

A energia elétrica representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e, conseqüentemente, para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade. Portanto, esse setor também tem se preocupado com a geração, a transmissão, a distribuição de energia elétrica e a construção de novos empreendimentos, como as usinas hidrelétricas, de maneira a preservar o meio ambiente. Logo, a Engenharia Elétrica tem apresentado significativas pesquisas e resultados de ações pautadas na sustentabilidade.

Neste ebook é possível notar que a relação da Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade é de preocupação de diversos profissionais envolvidos nesse setor, sendo esses advindos da academia, das concessionárias de energia elétrica e do governo. Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação da preservação do meio ambiente na engenharia elétrica.

Inicialmente são apresentados artigos que discorrem sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade ambiental, custos ambientais em empreendimentos de geração de energia elétrica, recuperação ambiental, conservação da fauna, políticas administrativas e direcionamento de resíduos eletrônicos.

Em seguida, são descritos estudos sobre formas de geração de energia elétrica renováveis não convencionais, sendo apresentadas a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Essas formas de geração contribuem para o desenvolvimento sustentável, uma vez que geram energia elétrica utilizando recursos naturais não finitos, o vento na geração eólica e o sol na geração fotovoltaica.

Além disso, neste exemplar são expostos artigos que contemplam diversas áreas da engenharia elétrica, como redes smart grids, sistema de proteção, operação remota de usinas hidrelétricas, inteligência computacional aplicada a usina termelétrica, transformadores de potência, linhas de transmissão, tarifa horária, lâmpadas led, prevenção de acidentes em redes de média tensão e eficiência energética.

**Jaqueline Oliveira Rezende**

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
O PARADIGMA INTERDISCIPLINAR DO DESENVOLVIMENTO AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL	
<i>Tiago Borga</i>	
<i>Rodrigo Regert</i>	
<i>Ludimar Pegoraro</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>15</b>
SUSTENTABILIDADE, RECICLAGEM E MEIO AMBIENTE: A RELEVÂNCIA DA LOGÍSTICA	
<i>Welleson Feitosa Gazel</i>	
<i>Wesley Gomes Feitosa</i>	
<i>Antônio Adriano Alves de Souza</i>	
<i>Jeremias Monteiro Vaillant Junior</i>	
<i>Maria de Nazaré Souza Nascimento</i>	
<i>Márcio Costa</i>	
<i>Marcos José Alves Pinto Junior</i>	
<i>Carlos Renato Montel</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>32</b>
A CONTRIBUIÇÃO DO SISTEMA DE CONTAS ECONÔMICAS E AMBIENTAIS PARA ESTIMAR OS CUSTOS AMBIENTAIS NOS EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
<i>Adriana Maria Dassie</i>	
<i>José Eustáquio Diniz Alves</i>	
<i>David Montero Dias</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>42</b>
LEVANTAMENTO DOS IMPACTOS INERENTES À IMPLANTAÇÃO DE PCHS E IDENTIFICAÇÃO DO CUSTO DE OPORTUNIDADE NO RIO COXIM, MS, BRASIL	
<i>Thiago Oliveira Barbosa</i>	
<i>Poliana Ferreira da Costa</i>	
<i>Bruna Souza dos Santos</i>	
<i>Adriana Maria Güntzel</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>57</b>
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A AMPLIAÇÃO DAS SÉRIES DE DADOS DISPONÍVEIS, E AS POSSÍVEIS ALTERAÇÕES NO DIMENSIONAMENTO DE VERTEDORES	
<i>Marcos Vinicius Andriolo</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>66</b>
RECUPERAÇÃO SUSTENTÁVEL DO ENTORNO DE RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS: UM ESTUDO NA UHE CORUMBÁ IV	
<i>Jorge Santos Ribas Jr.</i>	
<i>José Roberto Ribas</i>	
<i>Tatiana Maria Soeltl</i>	
<i>André Nicolau Brylynskyi</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>81</b>
LT 500 KV ARA-TAU: COMO O LICENCIAMENTO AMBIENTAL PODE PROPICIAR A CONSERVAÇÃO DA ESPÉCIE AMEAÇADA <i>CALLITHRIX AURITA</i> (SAGUI-DA-SERRA-ESCURO)	
<i>Jéssica Motta Luiz Bom</i>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>95</b>
NOVAS DIMENSÕES DA GOVERNANÇA DO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO	
<i>Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.</i>	
<i>Ana Lúcia Rodrigues da Silva</i>	

<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>107</b>
A GOVERNANÇA COMO INSTRUMENTO DE POLÍTICA PÚBLICA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL	
<i>Denise Pereira Barros</i>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>120</b>
O ACORDO DE PARIS E OS NOVOS CAMINHOS PARA A GESTÃO SOCIOAMBIENTAL: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA AS EMPRESAS DO SETOR ELÉTRICO	
<i>Gustavo André Santana de Sá</i> <i>Pedro Magalhães Sobrinho</i>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>133</b>
OS CRITÉRIOS ENERGÉTICO-ECONÔMICOS UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: REFLEXÕES SOBRE ALGUNS MITOS E A NECESSIDADE DE UMA NOVA AGENDA	
<i>Luiz Claudio Gutierrez Duarte</i>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>151</b>
MITIGAÇÃO DO RISCO HIDROLÓGICO- LEILÃO DE COMPRA E VENDA DE ENERGIA NA MODALIDADE SWAP DA ELETRONORTE	
<i>Ivan Rezende</i> <i>Virginia Fernandes Feitosa</i> <i>João David Resende</i> <i>Dante de Castro Simplicio</i> <i>Rafael Capistrano dos Santos Stanzani</i> <i>Gervásio Nery De Albuquerque</i>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>159</b>
A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA COMO RESULTADO DO APROVEITAMENTO DO CAPITAL INTELECTUAL PROTEGIDO PELO DIREITO DA PROPIEDADE INTELECTUAL – UM VETOR DE AUMENTO DE RECEITA EM POTENCIAL	
<i>Fernando da Silva Jansen</i>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>174</b>
O CUSTO E A ESTRUTURA DE CAPITAL PARA A INDÚSTRIA DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA: ASPECTOS METODOLÓGICOS E APLICAÇÕES	
<i>Luiz Claudio Gutierrez Duarte</i> <i>Washington Blanco</i>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>188</b>
GESTÃO DE CUSTOS EMPRESARIAIS NO NEGÓCIO TRANSMISSÃO	
<i>Ana Rita Xavier Haj Mussi</i> <i>Marcos Paulo Boaventura Severino Rezende</i>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>202</b>
GESTÃO E GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS EM GARANHUNS-PE	
<i>Rosalva Raimundo da Silva</i> <i>José Romenik de Almeida</i> <i>Marcela Caroline S F Azevedo</i> <i>Maria Claudjane J. L. Alves</i>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>213</b>
METODOLOGIA PARA O PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO CONSIDERANDO A INSERÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA EM LARGA ESCALA NA MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL	
<i>Sérgio Pinheiro dos Santos</i> <i>Fernando Rodrigues Alves</i>	

*Antônio Roseval Ferreira Freire  
Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino  
Otoni Nóbrega Neto  
Pedro Alves de Melo*

**CAPÍTULO 18 ..... 225**

GRUPO GPT, GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS  
COMPARAÇÃO DE CÁLCULO DE PRODUÇÃO EÓLICA UTILIZANDO WSP, OPENWIND E WINDSIM EM  
TERRENO COMPLEXO NA BAHIA, BRASIL

*Daniel Agnese Ramos  
Vanessa Gonçalves Guedes  
Angelo Alberto Mustto Cabrera  
Sérgio Roberto Ferreira Cordeiro de Melo  
Wady Abrahamo Cury Netto  
Tulio Anselmo dos Santos Valentim*

**CAPÍTULO 19 ..... 235**

A INFLUÊNCIA, SOB O ASPECTO DE CURTO-CIRCUITO, DE GERADORES EÓLICOS NO SISTEMA  
ELÉTRICO DE POTÊNCIA.

*Eloi Rufato Junior  
Lucas Marino Bianchessi Sganzeta  
William Da Veiga*

**CAPÍTULO 20 ..... 247**

PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE IOT INTEGRADO A SISTEMA DE GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA

*Caio Castro Rodrigues  
Joice Machado Martins  
Layse Pereira do Nascimento  
João Vitor Natal Silva Quincó Maciel  
Otavio Andre Chase  
José Felipe Souza de Almeida*

**CAPÍTULO 21 ..... 258**

DETERMINAÇÃO DE PROCESSOS PARA LEVANTAMENTO PRÁTICO DAS CURVAS  
CARACTERÍSTICAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

*Jaqueline Oliveira Rezende  
Sebastião Camargo Guimarães Júnior*

**CAPÍTULO 22 ..... 272**

ANÁLISE DO PAYBACK DE UM GERADOR FOTOVOLTAICO EM UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR  
NO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

*Samara Iasmim Schardong  
Andréia Balz  
Fábio Augusto Henkes Huppés  
Mauro Fonseca Rodrigues*

**SOBRE A ORGANIZADORA ..... 283**

## A INFLUÊNCIA, SOB O ASPECTO DE CURTO-CIRCUITO, DE GERADORES EÓLICOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.

**Eloi Rufato Junior**

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná  
Curitiba – PR

**Lucas Marino Bianchessi Sganzeta**

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná  
Curitiba – PR

**Willian Da Veiga**

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná  
Curitiba – PR

**RESUMO:** Com o aumento da geração eólica, o estudo técnico referente ao comportamento do sistema eólico frente a perturbações é cada vez mais necessário, uma vez que o Operador Nacional do Sistema define diretrizes e requisitos mínimos de operação e de transmissão da energia no Sistema Interligado Nacional. Diante disso, o presente trabalho apresenta um estudo da contribuição de aerogeradores nas correntes de curtos-circuitos, que podem ocorrer nas centrais de geração eólica, sendo elaborada a modelação de uma central de geração eólica, implementada em simulações em ferramenta computacional, sob condições de falta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia eólica, gerador eólico, curto-circuito, eficiência energética.

**ABSTRACT:** With the increase of wind generation, technical study regarding the behavior of the wind power system against disturbances is increasingly necessary, since the National System Operator defines guidelines and minimum requirements for the operation of transmission of energy in the National Interconnected System. New work and results, regarding the diversification of the Brazilian electrical matrix, have been presented. Therefore, this work presents a study of the contribution of wind turbines in the currents of short circuits that can occur in wind power plants. The modeling of a wind power plant, implemented in simulations in computational tool, under fault conditions is elaborated.

**KEYWORDS:** wind energy, wind generator, short circuit.

### 1 | INTRODUÇÃO

O número de parques eólicos no Brasil tem aumentado significativamente nas últimas décadas, bem como sua capacidade instalada. Isso se deve ao crescente valor dos preços da geração de energia por fontes não renováveis e por fontes hídricas, utilizadas em grande escala em todo o mundo. Por isso é constante o investimento em fontes alternativas de energia para diversificar a matriz energética brasileira.

Parte dessa energia é gerada a partir de aerogeradores, convertendo a força dos ventos em energia elétrica sob forma de força eletromotriz.

Com o aumento da capacidade instalada e o grande potencial eólico que o Brasil possui, faz-se cada vez mais necessário o estudo e o aprimoramento dos conhecimentos sobre aerogeradores, e como eles se comportam quando são conectados ao Sistema Elétrico de Potência – SEP – e no momento da ocorrência de defeitos, como o curto-circuito, nas redes e linhas de transmissão que interligam os aerogeradores ao SEP.

A ampliação da capacidade de gerar energia elétrica, a partir da fonte eólica no Brasil, foi iniciada em 2002, com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que estimulou o desenvolvimento de fontes alternativas de energias destinadas a diversificar a matriz energética do país, 3.300 MW de capacidade distribuída entre as fontes contempladas, 1.423 MW foram de projetos de geração eólica elétrica. Foi registrada a existência de 51 parques eólicos, totalizando 926 MW de potência instalada, correspondentes a 40 projetos deste programa até 2010 (NEVES, 2014 apud Renergy, 2010). Com o PROINFA, a geração eólica continua recebendo incentivos através de mecanismos de contratação regulada habilitados pelo MME (Ministério de Minas e Energia), para a contratação de energia elétrica através de leilões (Leilão de Energia de Reserva - LER 2009, Leilão de Energia de Fontes Alternativas - LFA 2010, LER 2010 e 2011, e LFA 2012), que permitiria aumentar até 5.300 MW de potência eólica instalada, para o horizonte de 2013, e 8.802,1 MW até 2017, conforme mostra a Figura 1.

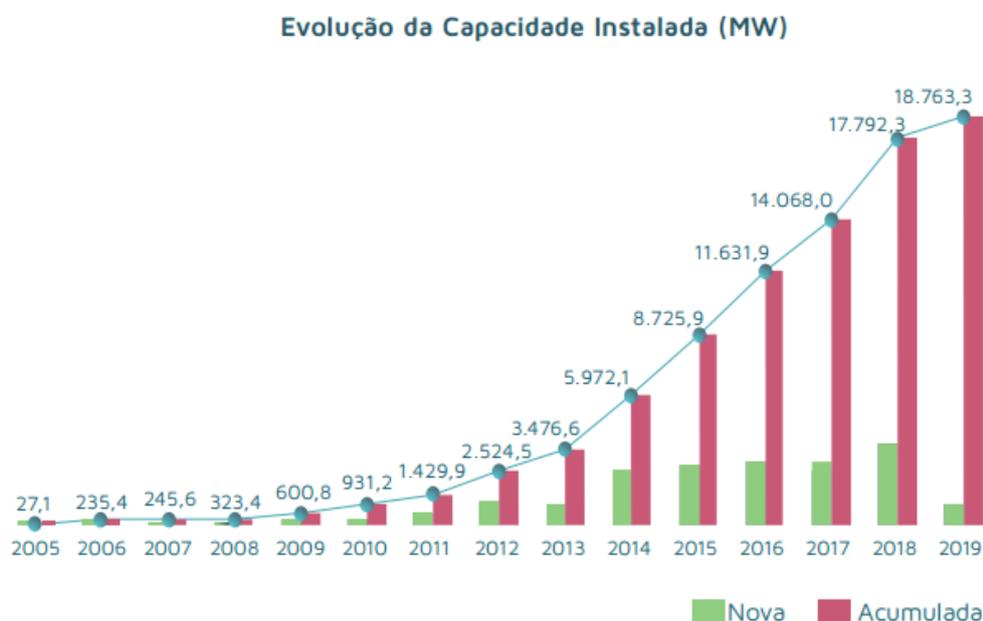


FIGURA 1 – Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil.

Fonte – ABEEólica (2015).

A participação da geração de energia eólica no Brasil ainda é pequena comparada à geração hidroelétrica e as gerações por fontes não renováveis. Segundo a ANEEL, em 2003, eram apenas 6 centrais eólicas operando no Brasil, totalizando cerca de

22.075 kW (quilowatt) de capacidade instalada, e mais 92 empreendimentos eólicos autorizados a iniciarem suas construções, podendo agregar ao setor mais 6.500 MW (megawatt).

Com esse aumento significativo na última década da capacidade instalada de parques eólicos e a previsão da expansão desta capacidade, torna-se importante o estudo elétrico de plantas eólicas, mais especificamente, aqueles relacionados as contribuições dos aerogeradores nos frequentes curtos-circuitos que ocorrem no SEP, colaborando, assim, com a engenharia de proteção de centrais de geração eólica.

## 2 | DISCUSSÃO E RESULTADOS

A Figura 2 mostra a central de geração eólica (CGE) na qual este estudo é baseado, esta central é composta por 11 unidades geradoras de 2,7 MW e tensão de saída igual a 1.000 V, totalizando 29,7 MW de capacidade instalada e 16,0 MW de garantia física de energia. Ela alimenta a subestação 2 (SE2), a qual recebe energia elétrica de mais 5 centrais geradoras.

Para cada aerogerador há um transformador trifásico elevador de 1.000/34.500 V, com ligação estrela aterrada no lado de 1.000 V e triângulo no lado de 34,5 kV, com potência de 4 MVA. As unidades geradoras SH-01 a SH-05 e SH-06 a SH-11, estão agrupadas ao fim de linhas de 1.100 m e 110 m, respectivamente. Na SE2 é realizado a elevação da tensão de 34,5 kV para 138 kV, através de um transformador trifásico de três enrolamentos, com ligações estrela aterrada nos lados de 138 kV e 34,5 kV e delta no enrolamento terciário (compensação de harmônicos), com potência de 80 MVA, visto a subestação ser alimentada por mais CGEs.

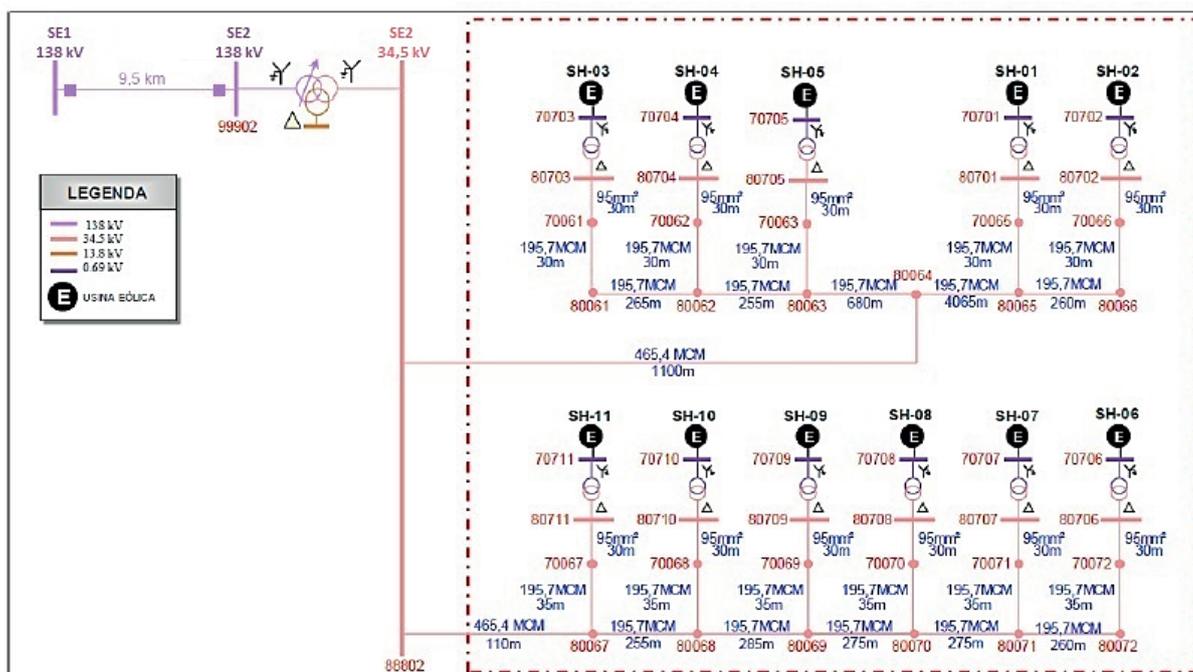


FIGURA 2 – Estrutura da central de geração eólica em estudo.

Fonte - Autoria própria.

Para o caso em estudo considerou-se os aerogeradores do tipo gaiola de esquilo e duplamente alimentado utilizados em sistemas de aerogeração, apresentados a seguir.

## 2.1 - Gerador de indução em gaiola de esquilo (GIGE)

Consiste em um gerador assíncrono de velocidade fixa, conectado diretamente a rede por meio de um soft-starter, utilizado para diminuir a corrente de magnetização da máquina durante a partida. Para compatibilizar a baixa velocidade de rotação do eixo das pás com a velocidade exigida pelo rotor do gerador, utiliza-se uma caixa de engrenagens designada a multiplicar o valor da rotação da turbina. Neste tipo de aerogerador emprega-se também um banco de capacitores na saída do enrolamento do estator, destinados a controlar o consumo de potência reativa da rede mostrado na Figura 3.

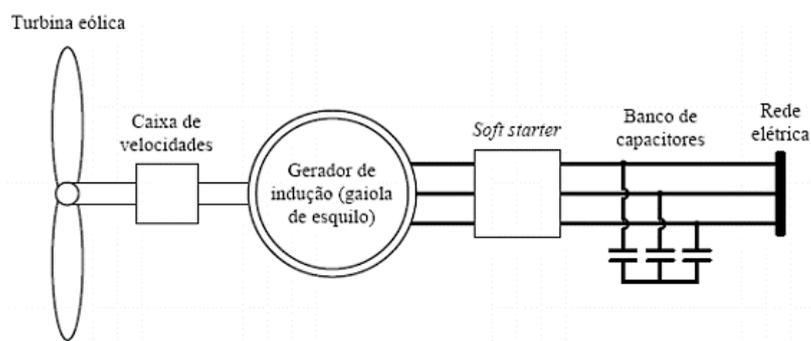


FIGURA 3 – Gerador de indução em gaiola de esquilo.

Fonte. Carvalho (2006).

## 2.2 - Geradores de indução duplamente alimentados (GIDA)

Consiste em um gerador de indução de velocidade variável, esta configuração em velocidade variável desagrega a velocidade de operação do gerador da frequência de operação da rede elétrica, ao qual a central está conectada. Assim, o gerador pode ser controlado para adaptar a velocidade rotacional para a velocidade momentânea do vento, a fim de melhorar a eficiência da geração. Nessa tecnologia de indução duplamente alimentada faz-se o uso de conversores de potência, CA-CC-CA, entre o rotor e a rede elétrica, para conseguir um maior controle sobre as potências injetadas na rede, sendo que o estator destes geradores está conectado diretamente a rede conforme esquema da Figura 4. Durante a ocorrência de curtos-circuitos próximos ao gerador, elevadas correntes podem ser induzidas nos enrolamentos do rotor, devido a isso, é utilizado um tipo de proteção chamado crowbar, composto de resistências em série ligadas ao rotor.

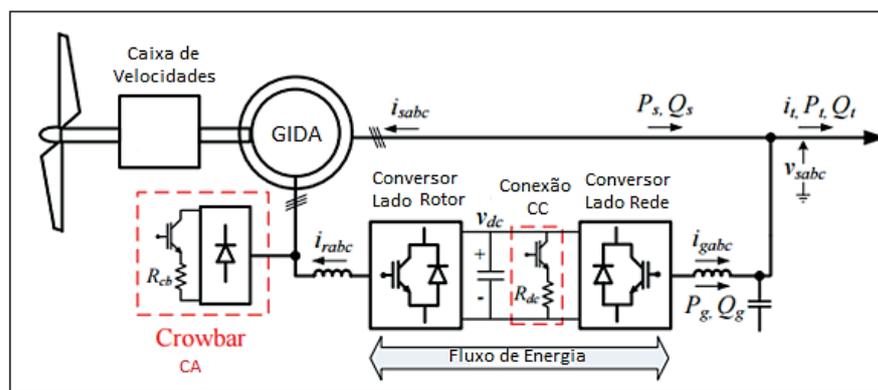


FIGURA 4 – Gerador de indução duplamente alimentado.

Fonte – Howard (2013).

## 2.3 - Considerações

Para se realizar as análises de influências dos aerogeradores tipo GIGE e tipo GIDA, foram feitas as seguintes considerações para simplificação da implementação da CGE em estudo:

- Os aerogeradores SH-01 a SH-11 estão agrupados ao fim das linhas de maior distância do barramento da SE2, isso é, ao fim de uma linha de 5,5 km estão agrupados os aerogerados SH-01 a SH-05, os aerogeradores SH-06 a SH-11, por sua vez, estão agrupados ao fim de uma linha de 1,5 km;

- As impedâncias  $R1\%=0,098$ ,  $X1\%=0,2309$ ,  $R0\%=0,196$  e  $X0\%=1,1545$  foram adotadas para todas as linhas de 34,5 kV da simulação;

- As turbinas dos aerogeradores GIGE e GIDA fornecem potência nominal aos geradores com ventos de 10 m/s;

- Foram simulados dois sistemas para a mesma CGE, um composto apenas por aerogeradores tipo GIGE e outro por aerogeradores tipo GIDA.

Quanto as condições de perturbação, foi considerada uma falta a 100 m do lado de 34,5 kV do transformador do aerogerador 7 (SH-07), realizando as simulações para as seguintes condições de falta:

- Falta fase-terra, com resistência de aterramento de  $0,00001 \Omega / 40 \Omega / 100 \Omega / 1000 \Omega$ ;
- Falta fase-fase-terra, com resistência de aterramento de  $0,00001 \Omega$

Para a simulação destas condições de falta o método de simulação adotado foi o modelo contínuo (tipo fasor), onde as tensões e correntes senoidas são substituídas por quantias fasoriais (numeros complexos), isso é, as tensões e correntes são exibidas com base nos seus valores de pico, na frequência nominal do sistema (60 Hz), devido às características da simulação.

## 2.4 Simulações em Aerogeradores Gige

Os aerogeradores de 2,7 MW usam geradores de indução com rotor em gaiola de esquilo. O enrolamento do estator é conectado diretamente a rede de 60 Hz e o rotor é movido por uma turbina eólica com ângulo de ataque variável. Este ângulo de ataque é controlado com o fim de limitar a potência de saída do gerador, ao seu valor

nominal, para ventos superiores a velocidade nominal (10 m/s). Para gerar energia, a velocidade do GIGE tem que estar ligeiramente acima da velocidade síncrona. A velocidade varia entre 1 e 1,007 pu aproximadamente.

A potência reativa absorvida pelos GIGEs é parcialmente compensada pelo banco de capacitores conectados no barramento de saída em baixa tensão de cada aerogerador (1,465 Mvar). O resto de potência reativa requerida para manter a tensão no barramento B34 em, aproximadamente, 1 pu é provida pelo STATCOM de 3 Mvar.

Nesta simulação o sistema é observado durante 20 s. Inicialmente a velocidade do vento é ajustada em 9 m/s e então é elevada para 10 m/s no tempo  $t = 3$  s para os aerogeradores 1 e 6,  $t = 5$  s para os aerogeradores 2 e 7,  $t = 7$  s para os aerogeradores 3 e 8,  $t = 9$  s para os aerogeradores 4 e 9,  $t = 11$  s para os aerogeradores 5 e 10 e  $t = 13$  s para o aerogerador 11, visto que, ao se aplicar a velocidade de vento nominal, num mesmo instante de tempo sobre todos os geradores, o sistema perde a estabilidade com a potência ativa caindo para um valor próximo a zero e a potência reativa se elevando rapidamente.

A falta é aplicada pelo período de 9 ciclos (0,15 s) em  $t=15$  s. As curvas características de funcionamento da central de geração eólica, sem ocorrência de falta são apresentadas nas Figuras 5 e 6.

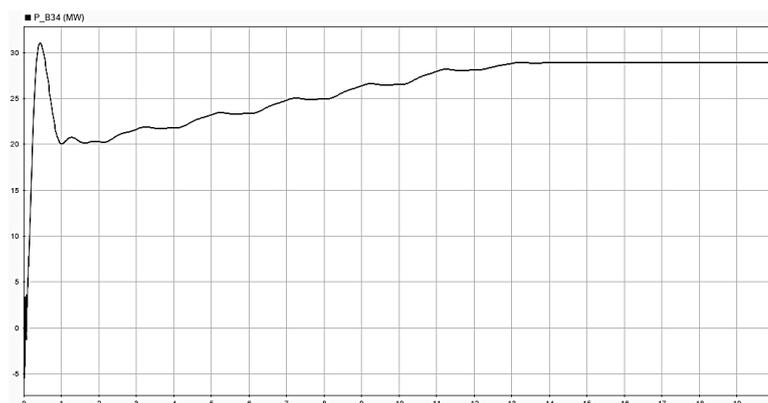


FIGURA 5 - Potência ativa no barramento B34 – GIGE

Fonte – Autoria Própria

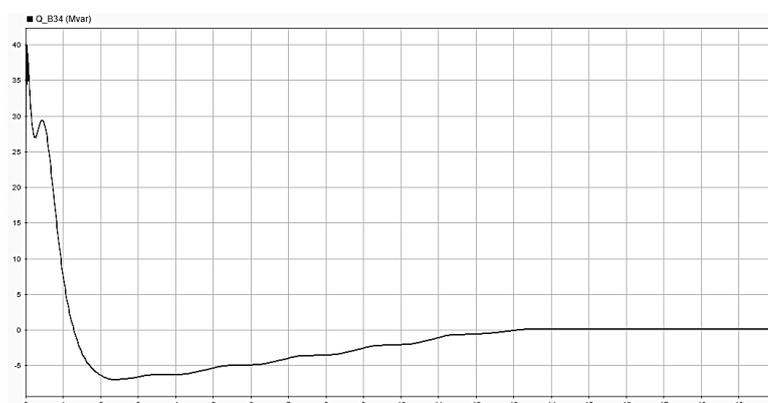


FIGURA 6 - Potência reativa no barramento B34 - GIGE

Fonte – Autoria Própria

Observa-se o valor da potência ativa estabilizando em 28,71 MW a partir de  $t=13$

s, um valor muito próximo a capacidade de geração da CGE (29,7 MW), já a potência reativa assume um valor próximo a zero devido a compensação fornecida pelo banco de capacitores e pelo STATCOM. A corrente e tensão de sequência positiva possuem valores próximos a 1 pu. A corrente da linha do aerogerador 07 se estabilizou em 62 A.

Nessas condições foram realizadas as simulações com ocorrências de falta para o parque eólico composto de aerogeradores tipo GIGE. As análises são realizadas observando a potência ativa (MW) e a potência reativa (Mvar) no barramento B34, as tensões de fase (V) e as correntes de falta (A) no ponto de curto.

Devido ao método de simulação adotado representam-se as ondas senoidais de tensão e corrente em função de seus valores de pico, gerando gráficos lineares. Desta maneira, a tensão de fase de uma linha de 34,5 kV será exposta graficamente com um valor constante de 28,169 kV (tensão de pico de uma fase). O comportamento do sistema no barramento de 34,5 kV, em situação de falta com resistência de aterramento 0,00001  $\Omega$ , está apresentado nas Figuras 7 a 9.

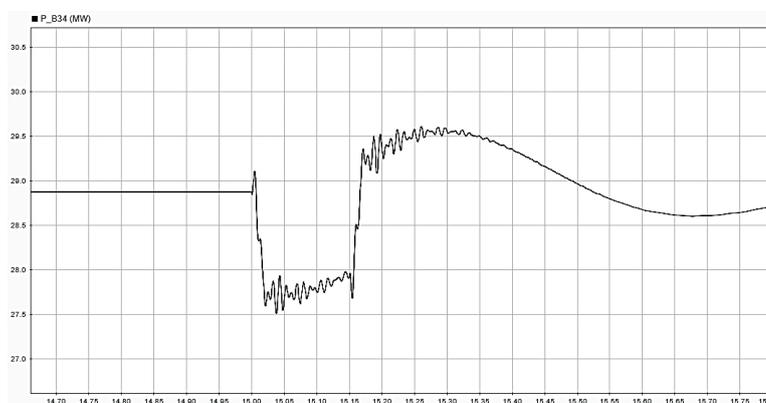


FIGURA 7 - Curva da potência ativa para falta fase-terra (0,00001 Ohm) GIGE

Fonte – Autoria Própria

Nesse caso, de curto-circuito próximo ao real (resistência de aterramento igual a zero), observa-se na Figura 7 uma pequena queda na potência ativa, chegando a 27,5 MW, em um intervalo de tempo muito curto, cerca de 0,04 s. A potência ativa volta a estabilidade em  $t=16,5$  s. A Figura 8 apresenta o aumento de aproximadamente 9,5 Mvar da potência reativa durante o curto circuito.

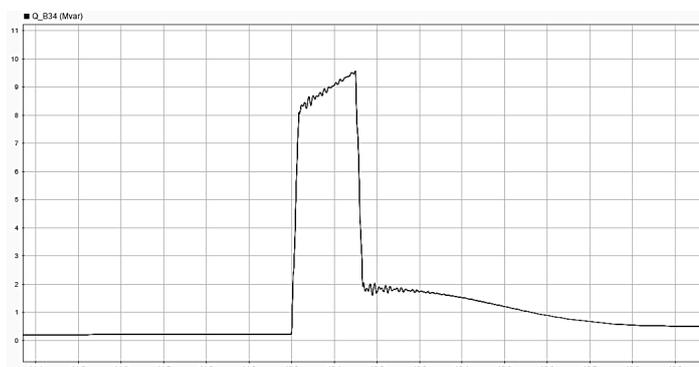


FIGURA 8 - Curva da potência reativa para falta fase-terra (0,00001 Ohm) GIGE

Fonte – Autoria Própria

Para a fase A, onde ocorre a falta, a tensão cai a zero, enquanto que para as fases B e C há a elevação da tensão até aproximadamente 40 kV, em  $t=15,15$  s. As tensões sofrem pequenas oscilações até estabilizarem em seus valores nominais no tempo de 15,4 s. A corrente de falta para este caso se eleva a um valor máximo de 900 A, ver Figura 9.

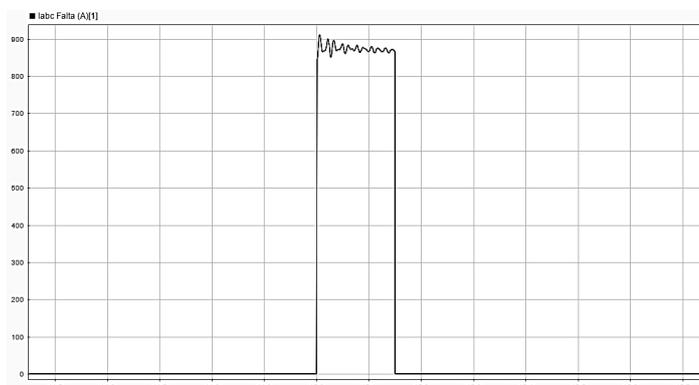


FIGURA 9 - Curva da corrente de falta para fase-terra (0,00001 Ohm) GIGE

Fonte – Autoria Própria

## 2.5 - Simulações com Aerogerador Giga

A tecnologia do GIDA permite extrair a máxima energia do vento para baixas velocidades de vento otimizando a velocidade da turbina, enquanto minimiza o estresse mecânico durante rajadas de vento. A velocidade da turbina otimizada, que produz a energia mecânica máxima para uma determinada velocidade de vento, é proporcional a velocidade do vento e regida por uma curva que determina o funcionamento do aerogerador, uma vez que o GIDA é controlado para segui-la.

A falta é aplicada no GIDA pelo mesmo período do GIGE de 9 ciclos (0,15 s) em  $t=15$  s. As curvas características de funcionamento da central de geração eólica, sem ocorrência de falta, mostrados na Figura 10.

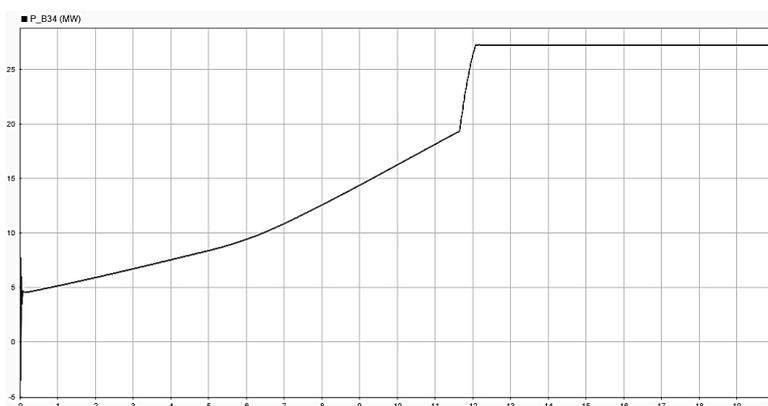


FIGURA 10 - Potência ativa no barramento B34 - GIDA

Fonte – Autoria Própria

Neste caso é o valor da potência ativa se estabiliza em 27,20 MW a partir de  $t=12,5$  s, um valor um pouco menor do que o observado na simulação para o GIGE,

devido a carga resistiva de 150 kW colocada na saída de cada aerogerador. Nesta CGE não foi necessário o uso de um banco de capacitores para cada aerogerador, também não foi utilizado o STATCOM para realizar a regulação de tensão na linha de 34,5 kV. A corrente de sequência positiva se estabiliza em 0,91 pu.

O comportamento do sistema GIDA no barramento de 34,5 kV, em situação de falta com resistência de aterramento  $0,00001 \Omega$ , são mostrados nas curvas das Figuras 11 e 12.

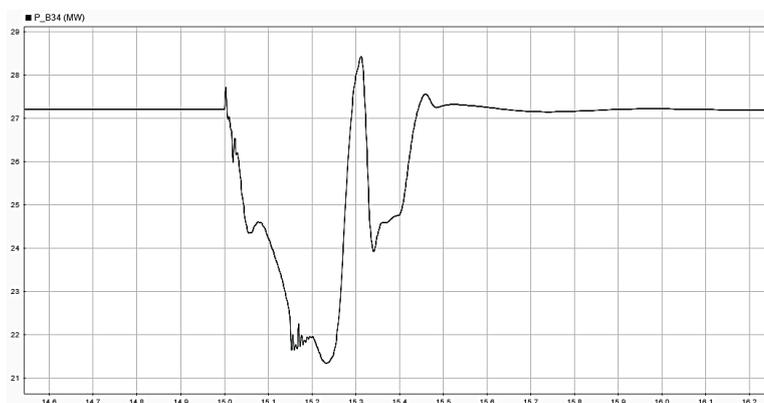


FIGURA 11 - Curva da potência ativa para falta fase-terra ( $0,00001 \Omega$ ) GIDA

Fonte – Autoria Própria

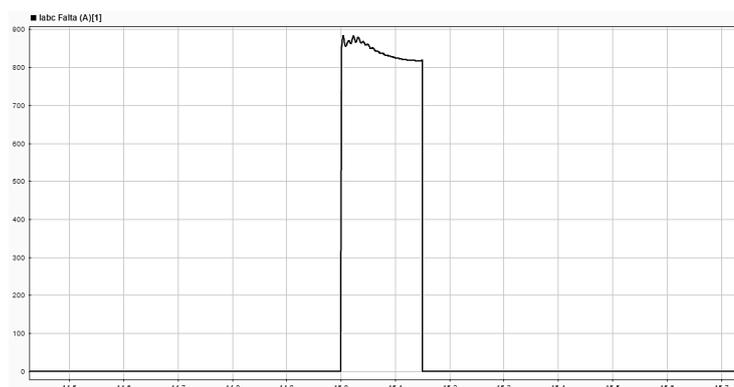


FIGURA 12 - Curva da corrente de falta para fase-terra ( $0,00001 \Omega$ ) GIDA

Fonte – Autoria Própria

Assim como no GIGE, a potência ativa para o curto-circuito com resistência de aterramento próxima a zero mostra as maiores distorções dentre os curtos realizados. Porém, verifica-se também a mudança de comportamento das potências ativa e reativa, aquela mostrada na Figura 11, em relação ao comportamento exibido na simulação para o tipo GIGE. Devido ao sistema controle presente no tipo GIDA, a queda da potência ativa ocorre mais lentamente, não caindo abruptamente como no caso do GIGE, ainda assim, apresenta uma maior queda de potência ativa ao final do curto, em  $t = 15,15$  s, do que a exibida na simulação para o tipo GIGE.

Para a simulação com o GIGE, a potência ativa oscila com uma variação de 0,5 MW até  $t = 16,5$  s, ver Figura 7. Já com o GIDA, a potência ativa cai mais 0,5 MW

depois do fim da falta e, em  $t = 15,32$  s, tem um pico de 28,4 MW, voltando a cair para se estabilizar após  $t = 15,6$  s. A potência reativa tem um comportamento semelhante, após o fim do curto a potência reativa cai a -5 Mvar, em  $t = 15,3$  s, se elevando a um valor máximo de 2,2 MVar, para então se estabilizar em  $t = 16,4$  s.

## 2.6 Resultados

Realizando uma comparação de todos os casos de curto circuito simulados, as tabelas 1 e 2 mostram os valores obtidos.

EM REGIME I = 62 A	Valores de Corrente em A		Variação %	
	GIGE	GIDA	GIGE	GIDA
Curto Monofásico 0,0001 $\Omega$	910	892	1367,74	1338,71
40 $\Omega$	552	550	790,32	787,10
100 $\Omega$	270	268	335,48	332,26
1000 $\Omega$	28,5	28	-54,03	-54,84
Curto Bifásico 0,0001 $\Omega$	1980	1810	3093,55	2819,35

Tabela 1 – Tabela comparativa dos valores de corrente de curto-circuito do GIGE e do GIDA

Fonte – Autoria Própria

	EM REGIME V = 28,169 kV	Valores de Tensão em kV			Variação %	
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase B	Fase C
GIGE	Curto Monofásico 0,0001 $\Omega$	0	39,7	39,4	40,94	39,87
	40 $\Omega$	0	42,5	47,5	50,88	68,63
	100 $\Omega$	0	46,2	50	64,01	77,50
	1000 $\Omega$	0	49	49,1	73,95	74,31
	Curto Bifásico 0,0001 $\Omega$	0	0	38,8	---	37,74
GIDA	Curto Monofásico 0,0001 $\Omega$	0	39,5	39,5	40,23	40,23
	40 $\Omega$	0	41,7	47,5	48,04	68,63
	100 $\Omega$	0	46,1	50	63,66	77,50
	1000 $\Omega$	0	49	49,1	73,95	74,31
	Curto Bifásico 0,0001 $\Omega$	0	0	44,7	---	58,69

Tabela 2 – Tabela comparativa dos valores de tensão de curto-circuito do GIGE e do GIDA

Fonte – Autoria Própria

A partir destas tabelas podem-se estabelecer algumas considerações sobre os sistemas, como:

- Tanto para a simulação da CGE com geradores tipo GIGE quanto para a CGE com geradores tipo GIDA, funcionando em regime, a tensão e a corrente no barramento de 34,5 kV, tem seu valor próximo de 1 pu. Ambas as simulações chegam a aproximadamente 29,7 MW de potência ativa e 0 Mvar de potência reativa, quanto ao GIDA, devido a carga colocada na saída de cada aerogerador, a potência ativa se mantém em 27,2 MW. As correntes nas linhas onde foram aplicadas as faltas eram de

aproximadamente 60 A para os dois tipos de aerogeradores;

- A CGE composta de aerogeradores tipo GIGE, obteve os maiores valores de pico, para as correntes de curto-circuito, principalmente para a falta bifásica, a qual teve uma variação percentual maior de 3000%. Para os outros tipos de curto-circuito, os resultados mostraram uma discrepância de 2 a 30% das variações de corrente encontradas para a CGE tipo GIDA;

- A potência ativa durante o período de curto-circuito, em ambos os geradores, decaiu, tendo as maiores quedas nas menores resistências, com menor oscilação para as maiores resistências. Em contrapartida, a potência reativa gerada aumentou durante o período de curto-circuito, como esperado, já que nessas condições a produção de reativo da rede é elevada, tendo menores oscilações para os maiores valores de resistência de aterramento;

- No período pós- defeito, a CGE com o tipo GIDA teve as curvas de potência, tanto ativa como reativa, com maiores oscilações, contudo, retornou ao período de estabilidade mais rapidamente do que a CGE com o tipo GIGE, em torno de milissegundos.

### 3 | CONCLUSÕES

Como é imprescindível dispor-se de parâmetros construtivos e operacionais, reais, para a realização de uma simulação que descreva o comportamento mais próximo do prático de um sistema de geração eólica, foram realizadas as simulações adotando um conjunto de informações provindas de muitos estudos, em conjunto com valores que a própria ferramenta computacional Simulink fornece e considerações realizadas para a simplificação da implementação do caso em estudo.

Desse modo, as simulações efetuadas mostraram que uma máquina de indução com rotor bobinado, quando duplamente alimentada pela rede (diretamente no estator e através de conversores no circuito rotórico, GIDA) é a mais recomendada a operar como gerador de turbinas eólicas, devido ao seu maior controle de potência gerada e também de potência reativa da rede, realizado pelos conversores rotóricos, do que o gerador de gaiola de esquilo. Dado que, o gerador GIDA consegue manter os níveis de potência reativa da linha próximos de zero, enquanto o GIGE precisa de agentes externos como bancos de capacitores e STATCOMs para o controle e refinamento da potência reativa e conseqüentemente tensão e corrente.

Sob outra perspectiva, em parques eólicos compostos de geradores do tipo GIDA, nota-se nas simulações a maior rapidez do sistema em se estabilizar após o curto-circuito e voltar a entregar potência nominal a subestação. Todavia, também se verificou maiores oscilações no período de curto e de pós-curto para as potências ativa e reativa, no barramento B34.

Similarmente, mesmo com variações máximas muito próximas umas das outras,

as simulações com aerogeradores tipo GIDA e aerogeradores tipo GIGE revelam comportamentos diferentes, durante e pós-falta, entre suas tensões e entre suas correntes. Visto que, o método de simulação adotado apenas permitiu a análise com base nos valores máximos das ondas senoidais, não é possível inferir com precisão o quanto essas ondas de tensão e corrente diferem entre os tipos GIDA e GIGE, entretanto, estes comportamentos revelados através dos gráficos das simulações apontam para existência de diferentes contribuições dos aerogeradores estudados na operacionalidade do sistema elétrico de potência, frente a situações de falta.

Estes resultados realçam a necessidade e importância do estudo da influência da inserção da matriz eólica ao SIN, quanto ao seu comportamento em variadas condições, visando auxiliar o processo de diversificação da matriz elétrica brasileira, como previsto para os próximos anos. Dado que, o desempenho dinâmico global do SIN pode ser impactado fortemente, no que se refere a estas interligações. Dessarte, estudos como este serão cada vez mais necessário para o desenvolvimento do conhecimento e da tecnologia envolvida na elaboração de projetos, construção e proteção de grandes centrais de geração eólica.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). **Boletim Anual da Geração Eólica**. 2015.

CARVALHO, B. C. **Desenvolvimento de modelo computacional de sistemas eólicos utilizando geradores síncronos para estudos de desempenho no contexto da qualidade da energia elétrica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

HOWARD, D. F. **Short-Circuit Currents in Wind-Turbine Generator Networks**. Tese de Doutorado. Georgia Institute of Technology. December, 2013.

NEVES, P. S. **Interligação da geração eolielétrica com o sistema elétrico de potência**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. 2014.

## **SOBRE A ORGANIZADORA**

**Jaqueline Oliveira Rezende** Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-45-1

