

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**RENATA KELLY FERREIRA RIBEIRO**

**AVALIAÇÃO DOS REQUISITOS  
LVRT DE PARQUES EÓLICOS**

Porto Alegre  
2020

**RENATA KELLY FERREIRA RIBEIRO**

**AVALIAÇÃO DOS REQUISITOS  
LVRT DE PARQUES EÓLICOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de concentração: Energia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Chouhy  
Leborgne

Porto Alegre  
2020

**RENATA KELLY FERREIRA RIBEIRO**

**AValiação DOS REQUISITOS  
LVRT DE PARQUES EÓLICOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS  
Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho, UNIFEI  
Doutor pela Universidade Federal de Itajubá - Itajubá, Brasil

Prof. Dra. Mariana Resener, UFRGS  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Júnior, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Luis Haffner

Porto Alegre, Setembro de 2020.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha mamãe, Sandra Rejane Ferreira Ribeiro, sem você este trabalho e muito dos meus sonhos não se realizariam. Obrigada por ser minha inspiração, eu te amo muito!

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, por me proporcionar estes momentos e à todos que tornaram minha vida mais afetuosa, além de ter me dado uma família maravilhosa e amigos sinceros. Deus, que a mim atribuiu alma e missões pelas quais já sabia que eu iria batalhar e vencer, agradecer é pouco. Por isso lutar, conquistar, vencer e até mesmo cair e perder, e o principal, viver é o meu modo de agradecer sempre.

Aos meus pais, Ribeiro e Sandra, que nunca mediram esforços para oferecer o melhor para seus filhos, vocês são a razão de minha vida. Mãe, obrigada em especial, por fazer o possível e impossível por mim e por ser essa mulher forte que tanto me inspira. Amo muito vocês!

Ao meu avô materno, Fernando Alves Ferreira, “In Memoriam”, por sempre me mostrar a importância dos estudos e acreditar em mim, por ter me amado incondicionalmente. “Vovô, sua neguinha, jamais lhe esquecerá e deixará de te amar!”

Ao Professor Roberto Leborgne, pela sua orientação e ensinamentos que contribuíram para minha formação.

Agradeço aos meus amigos Roger Oliveira, Rafael Boeira e Lucas Murliky que compartilharam comigo dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo! E aos amigos do LASEP e com certeza futuros excelentes profissionais.

Ao PPGEE pela oportunidade de aperfeiçoamento e realização de trabalhos em minha área de pesquisa. E à CAPES pelo suporte financeiro.

## RESUMO

No presente trabalho são avaliados os requisitos LVRT (*Low Voltage Ride Through*) e o comportamento dinâmico de parques eólicos mistos PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*)/DFIG (*Double-Fed Induction Generator*) frente a afundamentos de tensão oriundos de faltas no sistema elétrico de potência. Trabalhos anteriores na literatura aplicaram afundamentos de tensão diretamente nos terminais das turbinas eólicas, o que significa que a propagação da transmissão para o nível de baixa tensão não foi considerada. Este trabalho tem como objetivo mostrar a operação esperada de uma usina eólica quando submetida a afundamentos de tensão causados por faltas no nível da transmissão, ou seja, considerando a propagação. A propagação dos afundamentos de tensão e a comparação dos mesmos é realizada de acordo com os requisitos de suportabilidade estabelecidos pelo submódulo 3.6 do PRODIST. Este requisito é definido por uma curva de magnitude e duração conhecida mundialmente por LVRT. Modelos equivalentes de um sistema de transmissão e um parque eólico foram usados para gerar cinco tipos de faltas e para acessar o comportamento do parque eólico durante esses eventos. Para este estudo foi utilizado o programa MATLAB<sup>®</sup>/Simulink para o desenvolvimento dos códigos e modelo equivalente do parque eólico. As análises obtidas com a aplicação desta metodologia permitiram determinar o impacto dos afundamentos de tensão nos terminais das turbinas e analisar o comportamento dinâmico dos modelos agregados das turbinas eólicas. Além disso, era possível realizar o levantamento das faixas de sobretensões e sobrecorrentes nos conversores de ambos aerogeradores, assim como o levantamento da área de vulnerabilidade do SEP em relação à mínima potência injetada na rede durante um afundamento. Os resultados mostraram uma leve superioridade do PMSG em fornecer energia durante afundamentos de tensão, tendo menos faltas com valores de potência injetada durante o afundamento abaixo de 0,6 p.u. O comportamento que leva à maior vulnerabilidade no DFIG está relacionado às sobrecorrentes que podem surgir no conversores MSC e GSC, enquanto para o PMSG, a característica de maior vulnerabilidade está relacionada às sobretensões no link DC, que controla o fluxo de potência entre os conversores. As faltas simétricas foram as que causaram afundamentos de tensão mais severos, enquanto as monofásicas foram as que menos impactaram no desempenho do parque eólico. O requisito LVRT foi atendido em aproximadamente 96% dos afundamentos simulados, ou seja, o parque permaneceria em operação na ocorrência destes eventos. Apenas 4% dos casos desligariam o parque.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia. LVRT. Afundamento de Tensão. DFIG. PMSG.

## ABSTRACT

In the present work, the requirements LVRT (*Low Voltage Ride Through*) and the dynamic behavior of mixed wind farms PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) / DFIG (*Double-Fed Induction Generator*) are evaluated in the face of voltage sags, caused by faults in the electrical power system. Previous works in the literature applied voltage dips directly to the wind turbine terminals, which means that the transmission spread to the low voltage level was not considered. This work aims to show the expected operation of a wind farm when subjected to voltage sags caused by faults in the transmission level, that is, considering the propagation. The propagation of voltage sags and their comparison is performed according to the supportability requirements established by PRODIST's sub-module 3.6. This requirement is defined by a magnitude and duration curve known worldwide as LVRT. Equivalent models of a transmission system and a wind farm were used to generate five types of faults and to simulate the behavior of the wind farm during these events. The MATLAB<sup>®</sup>/Simulink program was used for this study to develop the codes and equivalent model of the wind farm. The analyzes obtained with the application of such methodology allowed to determine the impact of the voltage sags in the turbine terminals and to analyze the dynamic behavior of the aggregated models of the wind turbines. Besides, it was possible to carry out the survey of the ranges of overvoltages and overcurrents in the converters of both wind turbines, as well as the survey of the SEP's area of vulnerability in relation to the minimum power injected into the network during a sinking. The results showed a slight superiority of the PMSG in supplying energy during voltage dips, with fewer faults with injected power values during sinking below 0.6 p.u. The behavior that leads to the greatest vulnerability in DFIG is related to the overcurrents that can arise in the MSC and GSC converters, while for the PMSG, the characteristic of greater vulnerability is related to the overvoltages in the DC link, which controls the power flow between the converters. Symmetrical faults were the ones that caused the most severe voltage sags, while single-phase faults were the ones that had the least impact on the performance of the wind farm. The LVRT requirement was met in approximately 96% of the simulated sags, i.e., the park would remain in operation in face of those events. Only 4% of cases would shut down the park.

**Keywords:** Power Quality. LVRT. Voltage Sags. DFIG. PMSG .

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Capacidade instalada a cada ano de geração eólica . . . . .   | 16 |
| Figura 2 – Capacidade instalada total de geração eólica . . . . .  | 16 |
| Figura 3 – Países com maior capacidade instalada no período de Jan-Dez 2019  | 17 |
| Figura 4 – Países com maior capacidade instalada total em MW (2019) . . .  | 17 |
| Figura 5 – Tipos de afundamentos de tensão de acordo com a classificação<br>ABC . . . . .  | 26 |
| Figura 6 – Conexão de um aerogerador de velocidade fixa . . . . .  | 27 |
| Figura 7 – Configuração de um aerogerador de indução duplamente alimentado   | 28 |
| Figura 8 – Configuração de um aerogerador com conversor de plena potência  | 29 |
| Figura 9 – Circuito equivalente da máquina . . . . .   | 29 |
| Figura 10 – Modelo esquemático do DFIG . . . . .   | 30 |
| Figura 11 – Circuito equivalente da máquina vista do lado do rotor . . . . .   | 30 |
| Figura 12 – Modelo esquemático do PMSG . . . . .   | 31 |
| Figura 13 – Tensão nos terminais dos aerogeradores . . . . .   | 33 |
| Figura 14 – Exemplo de área de vulnerabilidade para um SEP . . . . .   | 33 |
| Figura 15 – Fluxograma da metodologia implementada . . . . .   | 39 |
| Figura 16 – Modelo representativo: unidade geradora . . . . .  | 41 |
| Figura 17 – Modelo parâmetros distribuídos . . . . .   | 41 |
| Figura 18 – Modelo $\pi$ equivalente da linha . . . . .  | 42 |
| Figura 19 – Ícone dos modelos de linhas de transmissão . . . . .   | 42 |
| Figura 20 – Modelo circuito equivalente do transformador . . . . .   | 42 |
| Figura 21 – Ícone do modelo do bloco do transformador . . . . .  | 43 |
| Figura 22 – Rede interna do parque eólico . . . . .  | 45 |
| Figura 23 – Sistema de aerogerador equivalente . . . . .   | 46 |
| Figura 24 – Equivalência dos transformadores dos aerogeradores . . . . .   | 46 |
| Figura 25 – Equivalência dos filtros dos aerogeradores . . . . .   | 46 |
| Figura 26 – Curva de potência versus velocidade do vento . . . . .   | 47 |
| Figura 27 – Ícone do bloco de falta . . . . .  | 48 |
| Figura 28 – Localização do parque eólico e SEP . . . . .   | 50 |
| Figura 29 – Diagrama do sistema elétrico de potência modelado . . . . .  | 51 |
| Figura 30 – Diagrama do sistema elétrico de potência modelado . . . . .  | 52 |
| Figura 31 – Instalação interna do parque eólico . . . . .  | 53 |
| Figura 32 – Usina termoeletrica Presidente Médici . . . . .  | 54 |
| Figura 33 – Propagação do afundamento de tensão a nível de transmissão para<br>uma falta ABCG com termoeletrica em operação . . . . .      | 55 |
| Figura 34 – Propagação do afundamento de tensão a nível de transmissão para<br>uma falta ABCG com termoeletrica fora de operação . . . . . | 56 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 35 – Tensão Link DC gerada durante um falta ABCG com a termoelétrica em operação (superior) e fora de operação(inferior) . . . . .  | 57 |
| Figura 36 – Sobrecorrente do conversor MSC gerada durante um falta ABCG com a termoelétrica em operação (gráficos 1 e 2) e fora de operação (gráficos 3 e 4) . . . . .           | 58 |
| Figura 37 – Sobrecorrente do conversor GSC gerada durante um falta ABCG com a termoelétrica em operação (gráficos 1 e 2) e fora de operação (gráficos 3 e 4) . . . . .           | 59 |
| Figura 38 – Resultados requerimentos LVRT: considerando a termoelétrica em operação . . . . .  | 60 |
| Figura 39 – Resultados requerimentos LVRT: considerando a termoelétrica fora de operação . . . . .   | 61 |
| Figura 40 – Sobretensão Link DC- DFIG: considerando a termoelétrica em operação . . . . .  | 62 |
| Figura 41 – Sobretensão Link DC- PMSG: considerando a termoelétrica em operação . . . . .  | 62 |
| Figura 42 – Sobrecorrente MSC- DFIG: considerando a termoelétrica em operação . . . . .  | 63 |
| Figura 43 – Sobrecorrente MSC- PMSG: considerando a termoelétrica em operação . . . . .  | 63 |
| Figura 44 – Sobrecorrente GSC- DFIG: considerando a termoelétrica em operação . . . . .  | 64 |
| Figura 45 – Sobrecorrente GSC- PMSG: considerando a termoelétrica em operação . . . . .  | 64 |
| Figura 46 – Mínima potência- DFIG: considerando a termoelétrica em operação  | 65 |
| Figura 47 – Mínima Potência- PMSG: considerando a termoelétrica em operação  | 65 |
| Figura 48 – Sobretensão Link DC- DFIG: considerando a termoelétrica fora de operação . . . . .   | 66 |
| Figura 49 – Sobretensão Link DC- PMSG: considerando a termoelétrica fora de operação . . . . .   | 66 |
| Figura 50 – Sobrecorrente MSC- DFIG: considerando a termoelétrica fora de operação . . . . .   | 67 |
| Figura 51 – Sobrecorrente MSC- PMSG: considerando a termoelétrica fora de operação . . . . .   | 67 |
| Figura 52 – Sobrecorrente GSC- PMSG: considerando a termoelétrica fora de operação . . . . .   | 68 |
| Figura 53 – Sobrecorrente GSC- DFIG: considerando a termoelétrica fora de operação . . . . .   | 68 |
| Figura 54 – Mínima potência- DFIG: ângulo 90° considerando a termoelétrica fora de operação . . . . .  | 69 |
| Figura 55 – Mínima potência- PMSG: considerando a termoelétrica fora de operação . . . . .   | 69 |
| Figura 56 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta AG com a termoelétrica em operação (superior) e fora de operação (inferior) . . . . . | 71 |
| Figura 57 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta AB com a termoelétrica em operação (superior) e fora de operação (inferior) . . . . . | 72 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 58 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta ABG com a termoelétrica em operação (superior) e fora de operação (inferior) . . . . .  | 73 |
| Figura 59 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta ABC com a termoelétrica em operação (superior) e fora de operação (inferior) . . . . .  | 74 |
| Figura 60 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta ABCG com a termoelétrica em operação (superior) e fora de operação (inferior) . . . . . | 75 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Classificação das VTCDs de acordo com os Procedimentos de Rede   | 22 |
| Tabela 2 – Classificação das VTCDs de acordo com os Procedimentos de Distribuição . . . . .   | 23 |
| Tabela 3 – Probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de faltas . . . . .   | 24 |
| Tabela 4 – O efeito da conexão do transformador quando um afundamento de tensão se propaga do lado primário e secundário do transformador | 25 |
| Tabela 5 – Comparação dos estudos em relação a forma de simulação do afundamento de tensão . . . . .                                      | 37 |
| Tabela 6 – Comparativo de trabalhos relacionando características da modelagem de turbinas eólicas . . . . .                               | 37 |
| Tabela 7 – Implementação da metodologia . . . . .   | 40 |
| Tabela 8 – Produto Interno Bruto dos estados do Sul em 2018 . . . . .   | 43 |
| Tabela 9 – Localização e potência instalada do parque eólico . . . . .  | 52 |
| Tabela 10 – Dados dos transformadores dos aerogeradores . . . . .   | 52 |
| Tabela 11 – Parâmetros das linhas de transmissão do SEP . . . . .   | 84 |
| Tabela 12 – Parâmetros das cargas e geração das barras do SEP modelado. . . . .   | 85 |
| Tabela 13 – Fluxo de potência com operação da Presidente Médici. . . . .  | 86 |
| Tabela 14 – Fluxo de potência sem operação da Presidente Médici. . . . .  | 87 |
| Tabela 15 – Dados gerais das análises durante uma falta ABCG com a termoeleétrica fora de operação . . . . .                              | 88 |
| Tabela 16 – Dados gerais das análises durante uma falta ABG com a termoeleétrica fora de operação . . . . .                               | 89 |
| Tabela 17 – Dados gerais das análises durante uma falta ABC com a termoeleétrica fora de operação . . . . .                               | 90 |
| Tabela 18 – Dados gerais das análises durante uma falta AB com a termoeleétrica fora de operação . . . . .                                | 91 |
| Tabela 19 – Dados gerais das análises durante uma falta AG com a termoeleétrica fora de operação . . . . .                                | 92 |
| Tabela 20 – Dados gerais das análises durante uma falta ABCG com a termoeleétrica em operação . . . . .                                   | 93 |
| Tabela 21 – Dados gerais das análises durante uma falta ABG com a termoeleétrica em operação . . . . .                                    | 94 |
| Tabela 22 – Dados gerais das análises durante uma falta ABC com a termoeleétrica em operação . . . . .                                    | 95 |
| Tabela 23 – Dados gerais das análises durante uma falta AB com a termoeleétrica em operação . . . . .                                     | 96 |
| Tabela 24 – Dados gerais das análises durante uma falta AG com a termoeleétrica em operação . . . . .                                     | 96 |

trica em operação . . . . . 97

## LISTA DE ABREVIATURAS

|         |   |
|---------|---|
| ANEEL   | Agência Nacional de Energia Elétrica                          |
| DFIG    | <i>Doubly Fed Inductions Generator</i>                        |
| FEM     | Força Eletromotriz  |
| FRC     | <i>Fully Rated Converted</i>                                  |
| FRT     | <i>Fault-Ride Through</i>                                     |
| GB      | <i>Gearbox</i> (Caixa de engrenagem)                          |
| GSC     | <i>Grid Side Converter</i>                                    |
| GWEC    | <i>Global Wind Energy Council</i>                             |
| IEEE    | <i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>       |
| IEC     | <i>International Electrotechnical Commission</i>              |
| LVRT    | <i>Low Voltage Ride-Through</i>                               |
| MPPT    | <i>Maximum Power Point Tracking</i>                           |
| MSC     | <i>Machine Side Converter</i>                                 |
| ONS     | Operador Nacional do Sistema Elétrico                         |
| PAC     | Ponto de Acoplamento Comum                                    |
| PMSG    | <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>                 |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica             |
| PWM     | <i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação de Largura de Pulso) |
| SEP     | Sistema Elétrico de Potência                                  |
| SIN     | Sistema Interligado Nacional                                  |
| SCIG    | <i>Squirrel Cage Induction Generator</i>                      |
| VTCD    | Variação de Tensão de Curta Duração                           |
| WRIG    | <i>Wound Rotor Induction Generator</i>                        |

# SUMÁRIO

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                       | 15 |
| 1.1      | Motivação e Justificativa                               | 15 |
| 1.2      | Objetivos e Contribuições                               | 20 |
| 1.3      | Estrutura da Dissertação                                | 20 |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                            | 21 |
| 2.1      | Considerações Iniciais                                  | 21 |
| 2.2      | Afundamentos de Tensão                                  | 21 |
| 2.2.1    | Caracterização e Causas dos Afundamentos de Tensão      | 23 |
| 2.2.2    | Classificação dos Afundamentos de Tensão                | 24 |
| 2.2.3    | Ponto na onda   | 25 |
| 2.3      | Geradores Eólicos                                       | 26 |
| 2.4      | Circuito Elétrico Equivalente do DFIG                   | 29 |
| 2.5      | Comportamento Dinâmico do PMSG                          | 30 |
| 2.6      | Procedimentos de Rede (LVRT)                            | 32 |
| 2.7      | Área de Vulnerabilidade                                 | 32 |
| 2.8      | Revisão Bibliográfica                                   | 34 |
| 2.8.1    | Trabalhos Relacionados à Afundamentos de Tensão         | 34 |
| 2.8.2    | Trabalhos Relacionados ao DFIG                          | 34 |
| 2.8.3    | Trabalhos Relacionados ao PMSG                          | 35 |
| 2.8.4    | Observações e Ponderações sobre as Propostas Existentes | 36 |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b>                                      | 38 |
| 3.1      | Considerações Iniciais                                  | 38 |
| 3.2      | Metodologia Proposta                                    | 38 |
| 3.3      | Programa Utilizado                                      | 40 |
| 3.4      | Modelagem dos Elementos do Sistema                      | 40 |
| 3.4.1    | Unidade Geradora  | 41 |
| 3.4.2    | Linha de Transmissão                                    | 41 |
| 3.4.3    | Transformador   | 42 |
| 3.4.4    | Carga   | 43 |
| 3.4.5    | Parque Eólico   | 44 |
| 3.5      | Cenários de Simulação                                   | 47 |
| 3.5.1    | Consideração da Propagação do Afundamento de Tensão     | 48 |
| 3.5.2    | Avaliação do Requisito LVRT                             | 48 |
| 3.5.3    | Comportamento Dinâmico dos Aerogeradores                | 49 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>4</b> | <b>ESTUDO DE CASO E RESULTADOS</b>                    | 50 |
| 4.1      | Considerações Iniciais                                | 50 |
| 4.2      | Sistema de Transmissão e Parque Eólico                | 50 |
| 4.2.1    | Descrição do SEP                                      | 51 |
| 4.2.2    | Descrição do Parque Eólico                            | 51 |
| 4.3      | Formulação dos Casos e Cenários                       | 53 |
| 4.3.1    | Casos de Faltas                                       | 53 |
| 4.3.2    | Cenário de Geração                                    | 53 |
| 4.4      | Consideração da Propagação dos Afundamentos de Tensão | 54 |
| 4.5      | Avaliação do Requisito LVRT                           | 60 |
| 4.6      | Análises do Comportamento Dinâmico dos Aerogeradores  | 61 |
| 4.6.1    | Cenário um: Termoelétrica em Operação                 | 61 |
| 4.6.2    | Cenário dois: Termoelétrica fora de Operação          | 66 |
| 4.7      | Levantamento da Área de Vulnerabilidade               | 70 |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b>    | 76 |
| 5.1      | Conclusão   | 76 |
| 5.2      | Trabalhos futuros                                     | 77 |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                                    | 78 |
|          | <b>APÊNDICE</b>                                       | 84 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e Justificativa

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem apresentado um vasto crescimento de demanda, exigindo aumento de geração de energia elétrica. Logo, como alternativa para atender a demanda tem-se a utilização das fontes renováveis de energia. A presença das fontes alternativas de energia elétrica na matriz energética brasileira está aumentando a cada dia. Dos diversos tipos de fontes alternativas existentes, a energia eólica tem apresentado um maior crescimento em função dos custos e da disponibilidade da tecnologia. Os modernos parques eólicos integrados à rede podem produzir uma quantidade sustentável de energia que pode complementar a energia base gerada por qualquer usina térmica, nuclear ou hidrelétrica de capacidade média (CHAKRABORTY *et al.*, 2017).

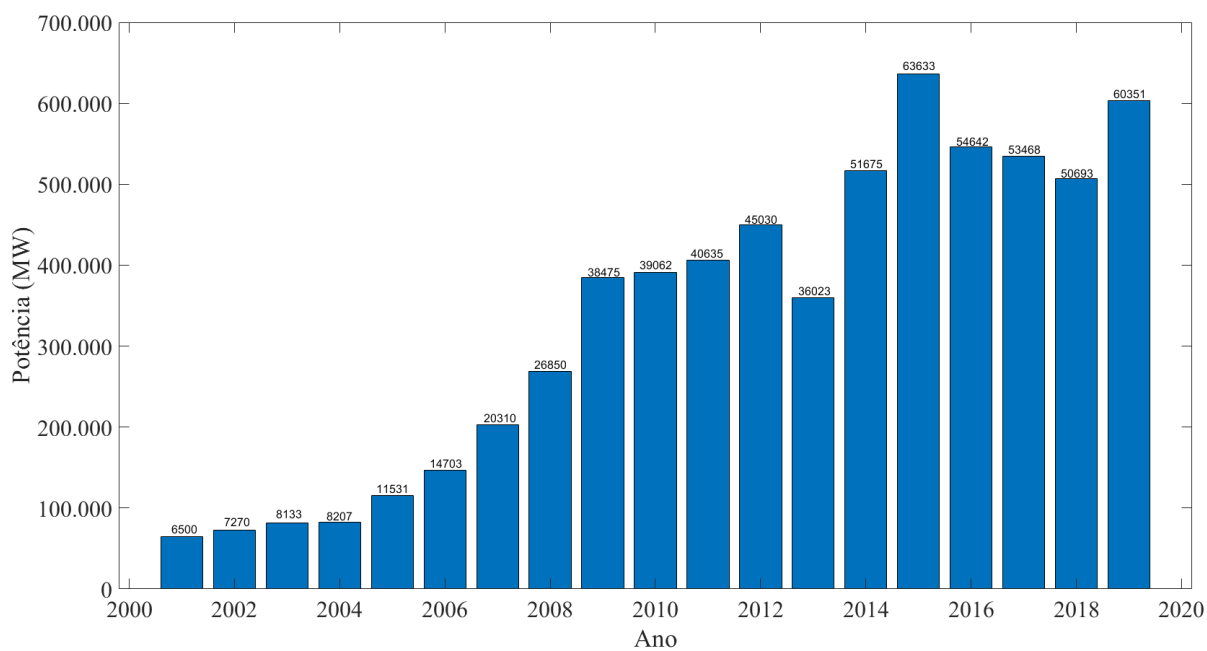
O forte crescimento da geração de energia eólica deve-se ao intenso desenvolvimento tecnológico que iniciou nos anos 1980 acompanhado pela economia de geração em alta escala que esta tecnologia proporciona. Durante esse período, a capacidade instalada no mundo foi de 7 MW, destacando-se países como Dinamarca e Estados Unidos pioneiros no uso comercial da energia eólica. Nas figuras 1 e 2 são apresentadas a capacidade instalada a cada ano e a capacidade total de geração eólica entre os anos de 2001 a 2019, respectivamente. Segundo dados divulgados pela (GWEC- *The Global Wind Energy Council*), a capacidade instalada teve uma taxa de crescimento de 20% ao ano. Em 2019, um aumento da potência instalada em geração eólica foi de aproximadamente 65 GW, totalizando 65,08 GW de capacidade global acumulada. Essa capacidade poderá chegar ainda em torno de 2600 GW entre anos 2040 e 2050, com expansão média anual de 75 GW, segundo dados previstos pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2017) (GWEC, 2020).

Conforme informado nas figuras 3 e 4, a China tem uma capacidade instalada de 237 GW e é líder em energia eólica, com mais de um terço da capacidade mundial. Os EUA vem em segundo lugar com 105 GW de capacidade instalada total. O país tem seis dos dez maiores parques eólicos em terra. Com 59,3 GW, a Alemanha tem a maior capacidade eólica instalada na Europa. Seus maiores parques eólicos offshore são os parques eólicos Gode, que têm uma capacidade combinada de 582 MW. Com 14,5 GW, o Brasil possui a maior capacidade eólica da América do Sul e ocupa o oitavo lugar no ranking mundial de capacidade total instalada de energia eólica (GWEC, 2020) (ABEEÓLICA, 2019).

A princípio, os primeiros aerogeradores eram inseridos no sistema de distribuição, individualmente ou em pequenos grupos, fornecendo pequenas quantidades de energia sempre com o objetivo de extrair ao máximo a energia oriunda dos ventos

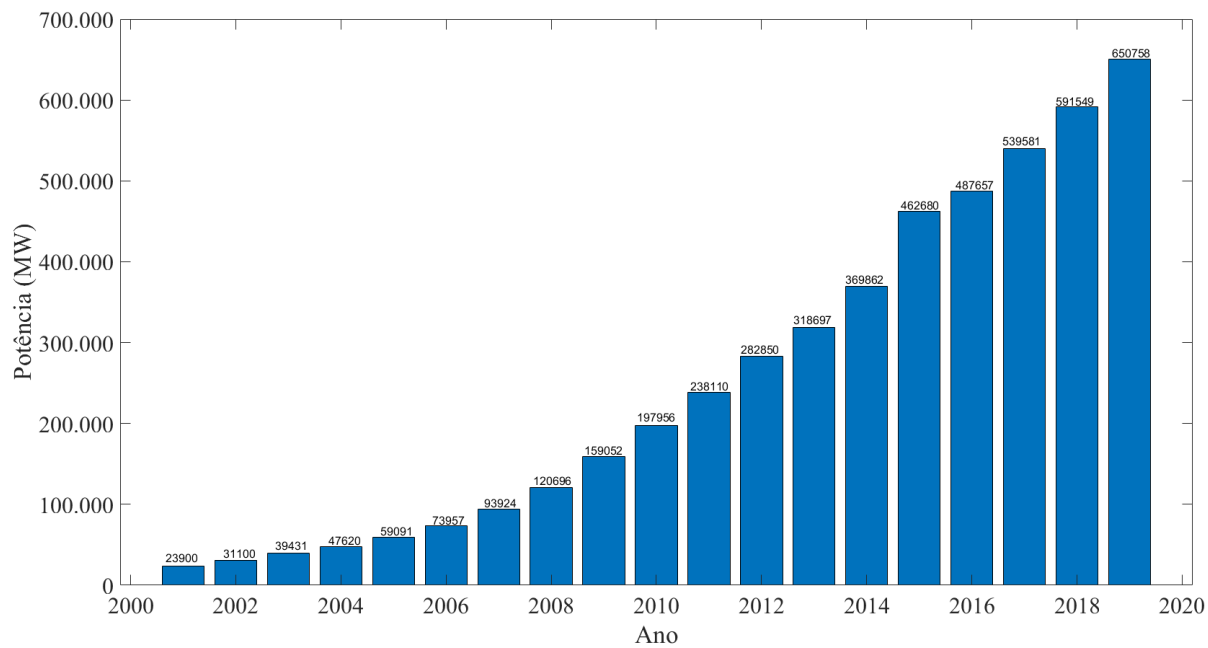


Figura 1: Capacidade instalada a cada ano de geração eólica



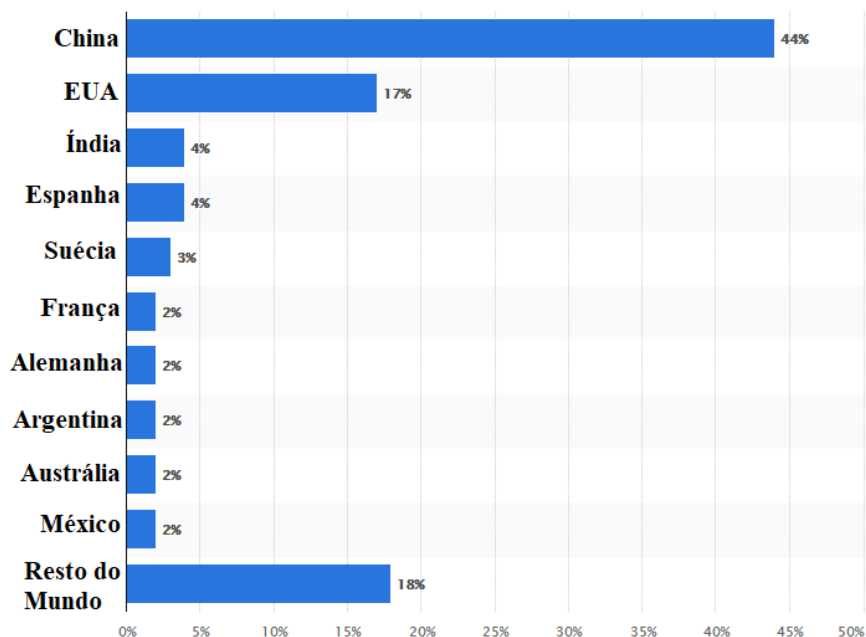
Fonte: Adaptado de (GWEC, 2020)

Figura 2: Capacidade instalada total de geração eólica



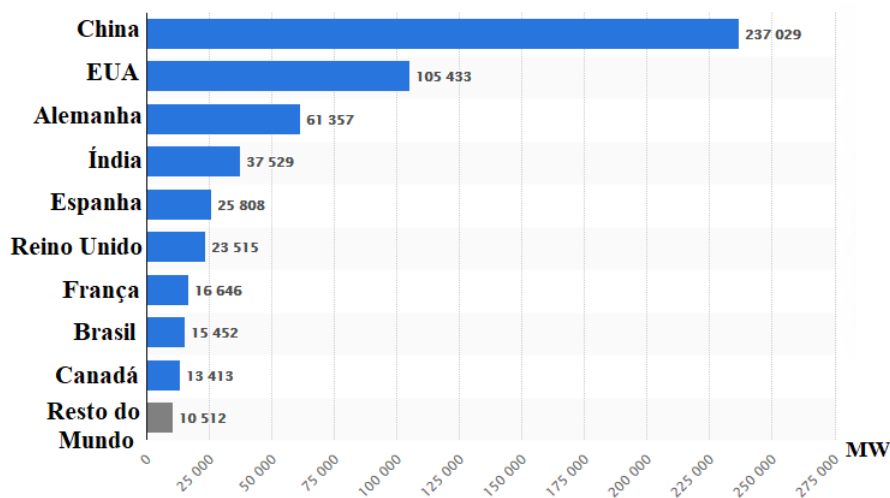
Fonte: Adaptado de (GWEC, 2020)

Figura 3: Países com maior capacidade instalada no período de Jan-Dez 2019



Fonte: Adaptado de (GWEC, 2020)

Figura 4: Países com maior capacidade instalada total em MW (2019)



Fonte: Adaptado de (GWEC, 2020)

em máxima potência ativa possível. Entretanto, quando ocorriam afundamentos ou elevações de tensão decorrentes de distúrbios oriundos do sistema elétrico, o parque eólico poderia ser desconectado da rede elétrica. Por outro lado, os aerogeradores se desenvolveram com o passar dos anos e, devido o aumento do tamanho dos parques eólicos a potência instalada excede a capacidade de inserção no sistema de distribuição e necessariamente o parque deve ser conectado ao sistema de transmissão. Por esta razão surge a necessidade de se preocupar com a estabilidade do sistema na ocorrência de curtos circuitos (SOHN, 2019).

Até aproximadamente 2001, geradores eólicos eram desconectados na ocorrência

de qualquer perturbação na rede elétrica. Em situações de instabilidade de velocidade e de tensão, por exemplo, os aerogeradores podem ser desconectados da rede elétrica via proteção por sobre-velocidade ou subtensão. Outra consequência possível devida a ação do sistema de proteção, seria o ilhamento de unidades de geração (situação em que a parte da rede de distribuição torna-se eletricamente isolada da subestação, porém continua sendo energizada por geradores conectados ao próprio subsistema isolado), para reduzir tal risco, as turbinas eram equipadas com relés de proteção de perda de rede para eventos de subtensão, sobretensão, subfrequência, sobrefrequência, taxa de variação de frequência e deslocamento de fase. Porém, o risco de disparo simultâneo de vários relés se torna uma realidade devido as perturbações que a rede elétrica pode sofrer e como consequência uma grande quantidade de energia oriunda dos aerogeradores seria perdida (SOHN, 2019).

O desafio atual, é conseguir que um sistema de potência opere de forma estável apesar das grandes quantidades de energia oriundas da geração eólica. Para isto, é necessário ter o controle dos níveis de tensão e frequência da energia elétrica que é entregue a rede. A variação da magnitude da tensão e da frequência são determinadas pela qualidade de energia elétrica que é produzida. Apesar de não existir um consenso sobre sua definição, a qualidade de energia elétrica abrange os seguintes estudos (ANEEL, 2016):

- variação de tensão de curta duração;
- tensão em regime permanente;
- distorção harmônica;
- interrupções de energia;
- desequilíbrio de tensão;
- flutuação de tensão.

Uma variação de tensão de curta duração é então definida como sendo uma mudança do valor eficaz da tensão em um curto intervalo de tempo, normalmente em poucos minutos. As principais causas de variações de tensão de curta duração na rede são devidas as variações na carga e nas unidades geradoras de potência. Quando a energia eólica é introduzida, as turbinas também são responsáveis por essas variações de tensão, que podem ser produzidas pelas oscilações do vento e pelo efeito sombra gerado pelas pás do gerador (RAMPINELLI, 2012).

Defini-se afundamentos de tensão como variação de tensão de curta duração, que é uma redução brusca do valor eficaz da tensão seguido de seu restabelecimento após um curto período de tempo. Na literatura internacional, um afundamento de tensão tem a sua definição feita por dois órgãos importantes, que são o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e a IEC (*International Electrotechnical Commission*). O IEEE Std 1346, (IEEE, 1998), define o afundamento de tensão como sendo um decréscimo entre 10 e 90% do valor eficaz da tensão nominal, com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto. Já, a IEC 61000-2-1, (IEC, 1999), define o afundamento de tensão como sendo uma redução súbita da tensão, seguida de seu restabelecimento após um curto período de tempo, entre 0,5 ciclo e poucos segundos. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define o afundamento de tensão

como um evento em que o valor eficaz da tensão do sistema é reduzido momentaneamente, para valores entre 10% e 90% da tensão nominal de operação, com duração entre 0,5 ciclo e 3 minutos. Existem várias causas de afundamento de tensão, as principais são :

- faltas elétricas;
- energização de transformadores;
- partida de motores de indução.

O afundamento de tensão causado a ocorrência de curto circuito no sistema elétrico é o tipo mais comum e grave (BOLLEN, 2000). Será propósito de estudo dessa dissertação.

Os tipos de afundamento de tensão dependem dos tipos de curto-circuito envolvido. Os curtos-circuitos ou faltas elétricas podem ser trifásicas (ABC), trifásicas a terra (ABCG), bifásicas (AB), bifásicas a terra (ABG) e monofásicas (AG). As faltas trifásicas e trifásicas a terra, são faltas simétricas e produzem afundamentos de tensão mais severos, contudo são mais raras. Já, as bifásicas, bifásicas à terra e monofásicas são faltas assimétricas que apresentam alta taxa de ocorrência produzindo afundamentos de tensão menos severos em relação a magnitude.

Com o aumento da geração eólica nos sistemas de energia elétrica, a desconexão dos parques eólicos durante um afundamento de tensão não é mais uma condição aceitável, uma vez que a confiabilidade do SEP pode ser comprometida. Para evitar situações de distúrbios no sistema elétrico de potência, procedimentos de rede demandam que os aerogeradores permaneçam conectados à rede elétrica no período transitório da perturbação, garantindo dessa forma, a estabilidade e confiabilidade do SEP.

Para garantir, portanto, tal estabilidade, os operadores do sistema aplicam requisitos de segurança e qualidade de energia. Os operadores do sistema elétrico têm desenvolvido critérios para a integração de usinas eólicas a rede elétrica. Estes critérios agregam, entre outros requisitos, a suportabilidade de parques eólicos frente a afundamentos de tensão causados por faltas. O requisito LVRT- *Low Voltage Ride-Through* é a capacidade que um sistema tem de suportar afundamentos de tensão, ou seja, estabelece que o parque eólico deve, obrigatoriamente, permanecer conectado à rede elétrica diante de níveis reduzidos de tensão nos terminais dos aerogeradores, definidos por intervalos de tempo específicos. Estes requisitos variam conforme os operadores do sistema elétrico de cada país.

A julgar pelo crescimento da inserção de geração eólica no SEP, um estudo que atente esses procedimentos de rede é de suma importância para contribuição às novas consultas de atualizações das normas. Bem como, propor medidas adequadas para amenizar ou reduzir determinados impactos na operação dinâmica do SEP. Dessa forma, a correta análise e simulação dessas unidades é fundamental para a obtenção de resultados confiáveis. A realização das simulações são relevantes, pois através dessas ferramentas é possível ser feito um planejamento mais preciso ao analisar o comportamento dos equipamentos em momentos de faltas, além de outras análises, e por consequência construir um sistema com qualidade, confiabilidade, segurança e disponibilidade.

## 1.2 Objetivos e Contribuições

O foco principal deste trabalho é analisar por meio de simulação computacional o desempenho de um parque eólico misto PMSG/DFIG frente a afundamentos de tensão sob condições de faltas. Assim, a pesquisa tem como objetivos:

- Analisar a propagação de afundamentos de tensão do sistema de transmissão até os terminais das turbinas eólicas;
- Comparar a suportabilidade de dois modelos diferentes de aerogeradores para afundamentos – DFIG e PMSG;
- Avaliar através da curva LVRT a continuação da operação do parque eólico;
- Analisar o comportamento dinâmico dos modelos agregados dos aerogeradores;
- Levantar a área de vulnerabilidade no SEP de acordo com a operação dos aerogeradores.

Assim, essa dissertação contribuirá para a:

- Comparação dos dois tipos de aerogeradores (DFIG e PMSG) quanto ao comportamento dinâmico durante os afundamentos;
- Levantamento das faixas esperadas de sobretensão e sobrecorrente nos conversores de ambos aerogeradores considerando a propagação dos afundamentos;
- Identificação das áreas mais críticas do SEP quando em situações de falta para o parque eólico.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Além do exposto neste capítulo, esta dissertação esta estrutura da seguinte forma: No segundo capítulo são debatidos os conceitos básicos de afundamentos de tensão, explanando sua caracterização e causas, e também característica do ponto de início da onda. Os modelos de geradores eólicos são abordados, apresentando seus conceitos e diferentes tipos de tecnologia, com ênfase no comportamento das máquinas em estudo do modelo equivalente do parque eólico simulado (DFIG e PMSG) frente a um afundamento de tensão sob condições de faltas. Por fim, é apresentada a padronização nacional que aborda os requisitos de acesso, as curvas de suportabilidade a afundamentos de tensão, resultando em uma área de vulnerabilidade da redução da potência injetada na rede durante o afundamento.

O terceiro capítulo é dedicado a explicar a metodologia proposta, os programas utilizados para as simulações e a forma que é modelado o sistema elétrico de potência e o parque eólico.

Já no quarto capítulo, apresenta-se o estudo de caso proposto e resultados desta dissertação. São apresentados os resultados e as discussões, relacionadas ao comportamento dinâmico dos aerogeradores e obtenção das áreas de vulnerabilidade, considerando dois cenários de operação.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização do estudo, considerando as respectivas contribuições agregadas e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são disponibilizadas as referências bibliográficas e apêndices.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos básicos de qualidade de energia elétrica, com foco em afundamentos de tensão. Bem como, descrever os principais tipos de geradores e as condições dinâmicas de funcionamento nos aerogeradores diante de afundamentos de tensão. Também são discutidos os requisitos estabelecidos por órgãos reguladores e operadores com a finalidade de definir as condições de operação dos aerogeradores.

Na literatura são encontrados diversos estudos diferentes de requisitos LVRT e afundamentos de tensão em parques eólicos entre simulações, medições e análise da influência à rede elétrica. Neste contexto, foi realizado um levantamento dos principais trabalhos existentes e o comparativo com o presente estudo.

### 2.2 Afundamentos de Tensão

A qualidade da energia elétrica tem-se tornado uma preocupação crescente e comum as empresas de energia elétrica e aos consumidores. A evolução tecnológica dos equipamentos eletroeletrônicos utilizados em diversos segmentos seja ele no âmbito industrial, comercial ou residencial exige uma tensão de alimentação senoidal com amplitude e frequência constantes para que funcione dentro das condições nominais ou limites aceitáveis de operação. Paralelo a isto, o afundamento de tensão faz parte dos fenômenos definidos como “variação de curta duração” (VTCD) que são distúrbios de qualidade de energia elétrica que mais afetam sistemas industriais, podendo causar prejuízos como perdas de produção devido às interrupções de processos, custos relacionados a mão de obra e reparos ou substituição de equipamentos danificados (MIRANDA, 2016; RAMOS, 2009).

Um afundamento de tensão é definido como sendo uma redução no valor eficaz da tensão de alimentação, em uma ou mais fases do sistema, para um valor inferior a 90% e igual ou superior a 10% da tensão nominal, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto (R.C. DUGAN M.F. MCGRANAGHAN, 1996). Os afundamentos de tensão, em geral, estão associados a faltas e energização de transformadores para o caso de transmissão e distribuição, também partidas de grandes motores.

De acordo com a padronização IEEE Std 1346 (IEEE, 1998), um afundamento de tensão é um decréscimo no valor eficaz da tensão durante um período de tempo compreendido entre 1/2 ciclo e 1 minuto. O IEEE também classifica os afundamentos de acordo com sua duração, em três categorias:

- Instantâneos: entre 0.5 ciclo e 30 ciclos;
- Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;
- Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

Similarmente, os afundamentos de tensão podem ser definidos também conforme a intensidade de tensão pela visão da queda do valor eficaz da tensão, segundo (IEC, 1999). Neste caso, é classificado como afundamento de tensão um evento onde ocorra uma queda do valor eficaz da tensão entre 0,10 e 0,99 p.u, durante um período entre 0,5 ciclo e alguns segundos.

Em âmbito nacional, a regulamentação da qualidade do produto pode ser estratificada de duas formas, uma visando o âmbito do sistemas interligado (Rede Básica) e outra no âmbito dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Para o caso de Rede Básica, a regulamentação existente são os submódulos 2.8 (ONS, 2016) e 3.6 (ONS, 2019) dos Procedimentos de Rede do ONS. Na transmissão entende-se por VTCD um desvio significativo da magnitude da tensão em um intervalo curto de duração. A partir da duração e magnitude, as VTCDs são classificadas como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação das VTCDs de acordo com os Procedimentos de Rede

| Denominação                      | Duração  | Amplitude em relação a tensão nominal            |
|----------------------------------|--|--|
| Interrupção Momentânea de Tensão | Inferior ou igual a três segundos                                | Inferior a 0,1 p.u                               |
| Afundamento Momentâneo de Tensão | Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos | Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u |
| Elevação Momentânea de Tensão    | Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos | Superior a 1,1 p.u                               |
| Interrupção Temporária de Tensão | Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto         | Inferior a 0,1 p.u                               |
| Afundamento Temporário de Tensão | Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto         | Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u |
| Elevação Temporária de Tensão    | Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto         | Superior a 1,1 p.u                               |

Fonte: (ONS, 2016)

No primeiro caso, afundamento momentâneo de tensão, a duração do evento tem período entre um ciclo a três segundos e amplitude de tensão entre 0,1 p.u e 0,9 p.u, em relação à tensão de referência. No segundo caso, afundamento temporário de tensão, a duração do evento tem um período de ocorrência de três segundos a um minuto, com a mesma faixa de variação do primeiro item em relação à tensão nominal (0,1 p.u a 0,9 p.u).

Em relação a distribuição de energia elétrica, a regulamentação é o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (ANEEL, 2016). Na distribuição, VTCD é semelhante à rede básica com desvios significativos na magnitude do valor eficaz durante um intervalo de duração inferior a três minutos. As VTCDs são classificadas de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das VTCDs de acordo com os Procedimentos de Distribuição

| Denominação                      | Duração  | Amplitude em relação a tensão nominal            |
|----------------------------------|--|--|
| Interrupção Momentânea de Tensão | Inferior ou igual a três segundos                                | Inferior a 0,1 p.u                               |
| Afundamento Momentâneo de Tensão | Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos | Superior ou igual a 0,1 p.u                      |
| Elevação Momentânea de Tensão    | Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos | Superior a 1,1 p.u                               |
| Interrupção Temporária de Tensão | Superior a três segundos e inferior ou igual a três minutos      | Inferior a 0,1 p.u                               |
| Afundamento Temporário de Tensão | Superior a três segundos e inferior ou igual a três minutos      | Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u |
| Elevação Temporária de Tensão    | Superior a três segundos e inferior ou igual a três minutos      | Superior a 1,1 p.u                               |

Fonte: (ANEEL, 2016)

### 2.2.1 Caracterização e Causas dos Afundamentos de Tensão

Os principais parâmetros na caracterização dos afundamentos de tensão são a magnitude e a duração do evento. A duração é o tempo que o valor eficaz da tensão permanece abaixo da tensão de referência. A magnitude é a tensão remanescente durante a ocorrência do evento. A duração, normalmente, corresponde ao instante de início da falta até a atuação do sistema de proteção (LEBORGNE *et al.*, 2003).

Segundo a (ANEEL, 2016), a relação entre a tensão residual e a tensão de referência define a amplitude de uma VTCD e a diferença entre os instantes inicial e final que ocorrem durante o evento caracteriza a sua duração, conforme ilustrado nas equações (1) e (2):

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\Delta_{te} = t_f - t_i, \quad (2)$$

onde,  $V_{res}$  e  $V_{ref}$  são a tensão residual e a tensão referência, respectivamente,  $t_i$  é o instante inicial e  $t_f$  é o instante final.

As principais causas dos afundamentos de tensão são:

- chaveamento de cargas pesadas;
- energização de transformadores;
- partidas de grandes motores em indústrias e processos industriais;
- problemas ocasionados por curtos-circuitos como poluição de centros urbanos pode afetar os isoladores das linhas de transmissão e distribuição, animais podem estar sobre as linhas ou transformadores bem como fenômenos da natureza, por exemplo, descargas atmosféricas, fortes ventos, tempestades, toque de galhos de árvores nos alimentadores, etc.

A origem dos afundamentos pode ser classificada em: afundamentos externos, de origem externa a instalação que se está monitorando e afundamento interno, de origem na própria instalação.



A causa mais comum de afundamento externo é uma falta à montante com reflexos na tensão de suprimento de outras instalações. É o caso, por exemplo, de curto trifásico no circuito de transmissão, onde um grande número de usuários será afetado pelo afundamento de tensão mas, normalmente, não ocorre a interrupção no fornecimento de energia. A situação persistirá até que haja a atuação da proteção com o desligamento do circuito.

Afundamentos por razões internas são em geral provocados por partidas de grandes motores que consomem grandes volumes de energia reativa e que não são suportadas adequadamente pelas redes e circuitos de distribuição, em função de baixa potência de curto-circuito do seu conjunto. Também ocorrem quando há mudança de fonte de alimentação ou em operação de uma mesma carga por geradores de “back-up” com impedâncias típicas bem maiores que as fontes originais dos transformadores. Além disso, defeitos internos nas instalações, como maus contatos, também podem ser potenciais fontes de afundamentos de tensão.

### 2.2.2 Classificação dos Afundamentos de Tensão

Os tipos de afundamentos de tensão estão ligados diretamente ao tipo de curto circuito que ocorrem no sistema. As faltas no sistema elétrico podem ser trifásicas (ABC), trifásicas a terra (ABCG), bifásicas (AB), bifásicas a terra (ABG) e monofásica (AG). As faltas trifásicas e trifásicas a terra, são faltas simétricas e produzem afundamentos de tensão mais severos, contudo são mais raros. Já, as bifásicas, bifásicas à terra e monofásica são faltas assimétricas que apresentam alta taxa de ocorrência produzindo afundamentos de tensão menos severos. Existem cinco tipos de faltas que podem ocorrer no sistema elétrico. Esses tipos de falta e suas probabilidades de ocorrência são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de faltas

| Monofásica | Bifásica a terra | Bifásica | Trifásica a terra | Trifásica |
|------------|------------------|----------|-------------------|-----------|
| 75%        | 17%              | 3%       | 3%                | 2%        |

Fonte: (BOLLEN, 2003)

De acordo com o tipo de falta e o tipo de conexão dos transformadores entre o local da falta e o ponto de monitoração, os afundamentos de tensão são designados por A, B, C, D, E, F e G. A Figura 5 mostra os fasores e as equações das tensões para cada tipo de afundamento de tensão (BOLLEN, 2000). A classificação ABC é usada para quedas de tensão desbalanceadas.  $E_1$  é a tensão complexa de pré-falta da fase 'a' e  $V^*$  é a diferença de tensão entre as fases com falha.

Na Tabela 4 é apresentado o efeito da conexão de diferentes tipos de transformadores quando um afundamento de tensão se propaga do lado primário para o secundário do transformador. As faltas simétricas resultam na mesma queda de tensão nas três fases. O afundamento de tensão do Tipo A não muda ao se propagar do sistema de transmissão até os terminais das turbinas. Os afundamentos desbalanceados são causados por faltas assimétricas em algum nível de transmissão, tendo dois estágios de recuperação e quedas de tensão similar em duas das três fases. O tipo de afundamento muda ao se propagar pelos transformadores que estão presentes na rede do sistema.

Tabela 4 – O efeito da conexão do transformador quando um afundamento de tensão se propaga do lado primário e secundário do transformador

| Configuração de Transformador | Afundamento no lado Primário |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | Tipo A                       | Tipo B | Tipo C | Tipo D | Tipo E | Tipo F | Tipo G |
| YNyn                          | A                            | B      | C      | D      | E      | F      | G      |
| Yy, Dd, Dz                    | A                            | D*     | C      | D      | G      | F      | G      |
| Yd, Dy, Yz                    | A                            | C*     | D      | C      | F      | G      | F      |

$C^*D^*$  - indica que a magnitude do afundamento não será  $V^*$ , mas será igual a  $(\frac{1}{3} + \frac{2}{3})V$ .

Fonte: (BOLLEN, 2000)

### 2.2.3 Ponto na onda

O ponto na onda é uma característica adicional dos afundamentos de tensão. Refere-se ao ângulo da onda de tensão correspondente ao momento em que o afundamento de tensão começa e termina (BOLLEN, 2000). É caracterizado pelo ponto exato inicial na forma de onda senoidal quando começa o afundamento de tensão (S. SANTOSO, 1999). Significa que o sinal do afundamento de tensão tem dois pontos de onda característicos: o ponto de onda inicial e o ponto de onda da recuperação de tensão (HASAN; MUTTAQI; BOUZERDOUM, 2016).

Diferentes estudos analisaram a influência do ponto na onda do início do afundamento. Um experimento conduzido por (COLLINS; BRIDGWOOD, 1997) mostrou que para a mesma magnitude de afundamentos de tensão ocorreu o desligamento do contato elétrico e magnético devido à variação do ângulo no início do afundamento de tensão. Isso foi confirmado testando os contatos eletromagnéticos para diferentes magnitudes de tensão, durações e diferentes pontos na onda de início de afundamento. E com isso foi mostrado que ocorre um impacto significativo na carga dependendo do ponto na onda de início do afundamento.

Em um experimento realizado por (EPRI, 2007), foi verificado que em um sistema de energia os conversores CA são mais sensíveis à afundamentos de tensão cujo ponto na onda de início do afundamento é  $90^\circ$  para uma duração de afundamento entre 4 à 5 ciclos. Outros trabalhos na literatura, também demonstram que há impactos significativos no comportamento de alguns equipamentos dependendo do ponto de recuperação da tensão. Muitos trabalhos têm focado no teste de imunidade aos equipamentos para diferentes pontos de onda iniciais de afundamentos de tensão, mas a questão é porque alguns equipamentos são mais sensíveis para certos pontos de onda iniciais.

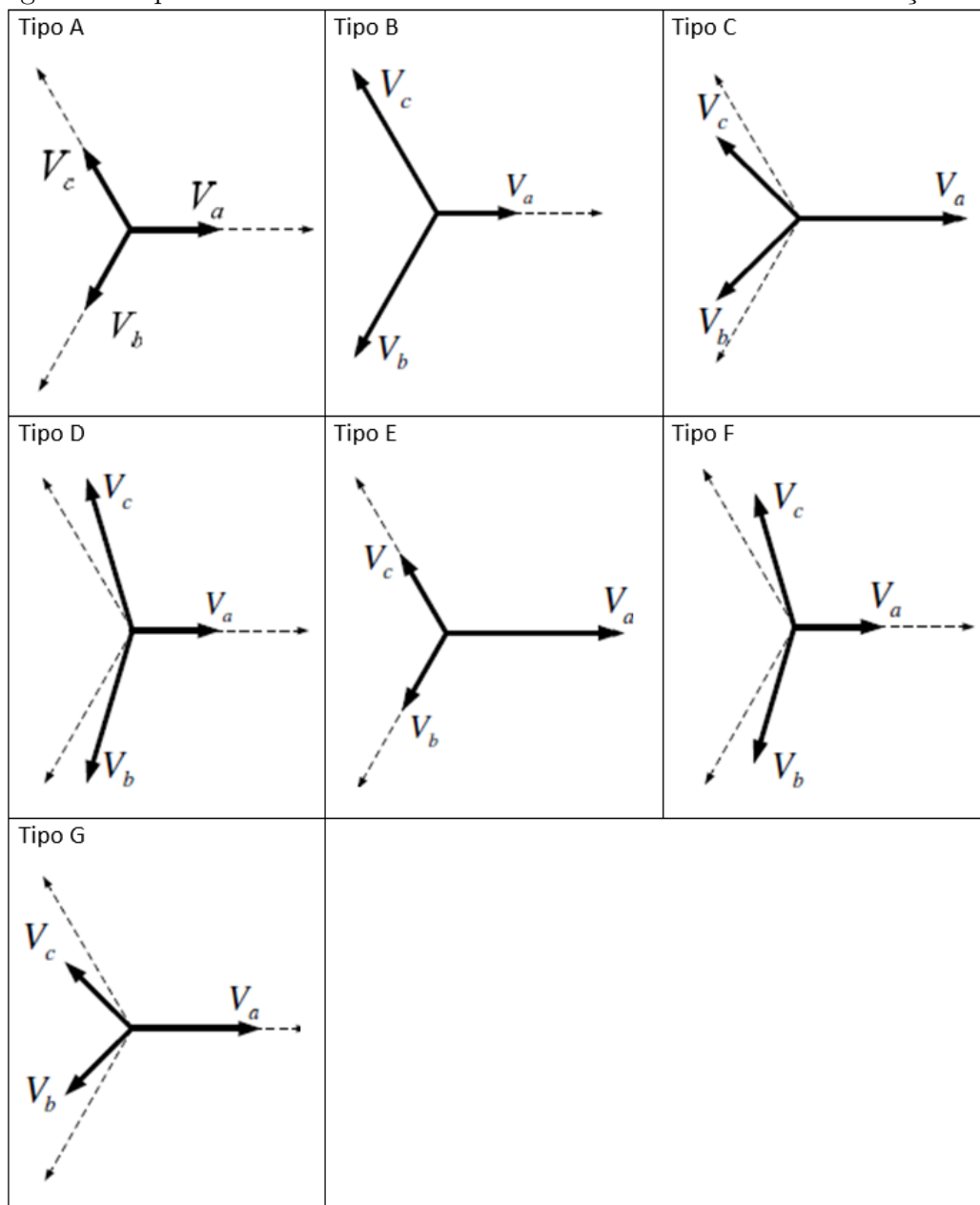
Para calcular o ponto de onda inicial é considerado um sinal de tensão  $v(\theta)$  sujeito a um eventual afundamento causado por um curto circuito. Se  $\theta_i$  é o ângulo inicial do afundamento, a expressão de tensão em termos do ângulo de afundamento pode ser escrito por (3):

$$v(\theta_i) = V \sin(\theta_i + \delta), \quad (3)$$

onde,

$$v - > v\{v_a, v_b, v_c\}; \delta\{\delta_a, \delta_b, \delta_c\}, \theta_i\{0^\circ a 360^\circ\}. \quad (4)$$

Figura 5: Tipos de afundamentos de tensão de acordo com a classificação ABC



Fonte: (BOLLEN; ZHANG, 2003)

## 2.3 Geradores Eólicos

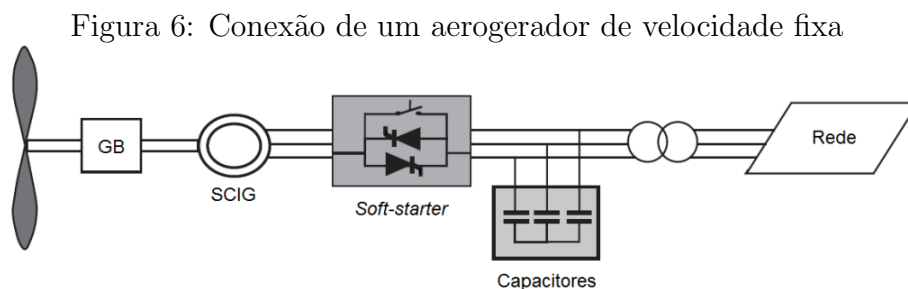
Geradores eólicos são sistemas capazes de converter energia cinética dos ventos em energia elétrica. O funcionamento de um aerogerador divide-se em duas partes: a turbina, que retira energia cinética do vento e o gerador elétrico que converte em eletricidade. A turbina eólica é composta pelo cubo do rotor e pás. Basicamente, os aerogeradores podem ser divididos em dois grupos: os que operam com velocidade fixa e os que operam com velocidade variável, sendo estes grupos subdivididos em diferentes tipos de geradores.

O padrão dos geradores instalados nos anos de 1980 e no início dos anos 1990 era de operação com velocidade fixa. Estes aerogeradores independentemente da veloci-

dade do vento mantêm a velocidade do rotor fixa, que é controlada pela frequência da rede, pela relação de engrenagens e pelo projeto do gerador.

Os aerogeradores de velocidade fixa são equipados com gerador de indução (gaiola de esquilo ou rotor bobinado) e são diretamente conectados à rede através de um transformador, com um *soft-starter* e um capacitor para compensar os reativos necessário à operação. Este tipo de topologia foi desenvolvidas para operarem em sua máxima eficiência em uma determinada velocidade do vento. Para aumentar a sua potência, uns geradores possuem configurações para baixas, médias e altas velocidades (ACKERMANN, 2012). Turbinas de velocidade fixa tem como vantagem de serem simples, robustos, confiáveis e baixo custo das partes elétricas. Suas desvantagens são a falta de controle de energia reativa e a baixa qualidade da energia fornecida.

Na Figura 6, é mostrado a conexão de um aerogerador de velocidade fixa com rotor do tipo gaiola de esquilo (SCIG - *Squirrel Cage Induction Generator*) diretamente conectado à rede. Um *soft-starter* é utilizado durante a conexão da rede com o aerogerador minimizando a corrente *in-rush* que pode chegar até 7 a 8 vezes a corrente nominal, sem esse componente poderia causar grandes distúrbios de tensão em redes fracas. Além de uma caixa de engrenagens (GB - *gearbox*) que estão acoplados o gerador e o rotor da turbina eólica. Neste tipo de aerogerador as pequenas variações no gerador são devidas somente às alterações no valor do escorregamento e conseqüentemente da potência ativa fornecida.



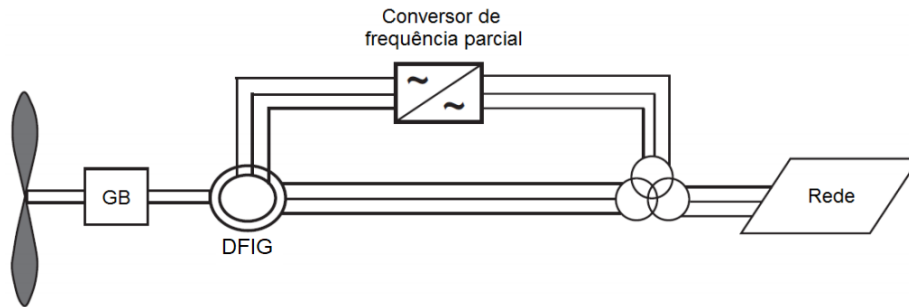
Fonte: (ACKERMANN, 2012)

Atualmente, os aerogeradores mais dominantes no mercados são os de velocidade variável. Estes aerogeradores são projetados para conseguir a máxima eficiência em uma larga faixa de velocidade do vento. Com turbinas de velocidade variáveis é possível acelerar ou desacelerar a sua velocidade rotacional de acordo com a velocidade do vento (ACKERMANN, 2012). Normalmente eles são equipados com um gerador síncrono ou de indução e a sua conexão a rede é através de um conversor de potência. As suas vantagens são melhor eficiência energética, melhor qualidade de energia e menor perturbação mecânica na turbina eólica. As desvantagens são o uso de mais componentes, aumento do custo devido a tecnologia da eletrônica de potência e perdas geradas no conversor.

O gerador de indução duplamente alimentado (DFIG- *Doubly Fed Inductions Generator*) corresponde a um aerogerador de velocidade variável com conversor parcial, como mostrado na Figura 7. As máquinas de indução duplamente alimentadas são de velocidade variável e acionadas por um conversor de potência dimensionado para uma pequena porcentagem (30%) da potência nominal da turbina. Em uma configuração de turbinas eólicas baseadas no modelo DFIG os terminais do estador

estão conectados diretamente no transformador da nacela. As três fases do rotor estão conectadas a um conversor de modulação PWM de quatro quadrantes. Consequentemente, o estator permanece constante na frequência fundamental da rede, enquanto o gerador opera em velocidades variáveis.

Figura 7: Configuração de um aerogerador de indução duplamente alimentado



Fonte: (ACKERMANN, 2012)

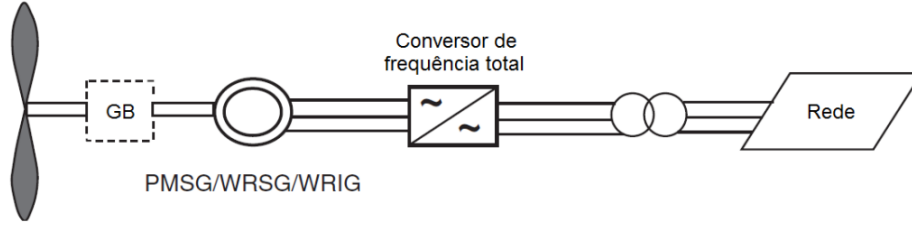
Conforme (LEAO, P. S. *et al.*, 2009), a potência de escorregamento desse tipo de máquina é manipulada unicamente pelo conversor, a potência do conversor é de apenas 20% a 35% da potência nominal do gerador. A compensação da potência reativa é realizada através do conversor de frequência, consumindo ou produzindo reativos, assim permitindo uma conexão mais suave com a rede.

O DFIG tem diversas vantagens, como grande eficiência na transformação eletromecânica de energia (RUNICOS *et al.*, 2014). O uso de um conversor de frequência torna essa configuração interessante do ponto de vista econômico e técnico, já que o conversor tem aproximadamente 30% da potência do gerador e o estator, que supre na maior parte da potência, está ligado diretamente à rede. Suas principais desvantagens são o uso de anéis coletores, multiplicadores de velocidade, custo mais elevado e injetam harmônicas de alta frequência na rede (LEAO, P. S. *et al.*, 2009).

Os autores em (PENA; CLARE; ASHER, 1996a; LEONHARD, 2001) demonstram uma estratégia hierárquica da estrutura do controle do DFIG, que é composta por um *Double-Control-Loop*. Esse tipo de abordagem é caracterizada por controles independentes do torque elétrico (potência ativa) e dos enrolamentos da máquina (potência reativa).

Outro tipo de configuração, mostrado na Figura 8, corresponde a um aerogerador de velocidade variável com um conversor de plena potência. O conversor de frequência é capaz de assimilar a mesma potência nominal do gerador (FRC - *Fully Rated Converted*). Os geradores síncronos são mais caros e complexos mecanicamente quando comparados com os geradores de indução. São conectados à rede através de conversores eletrônicos de potência, os quais realizam a compensação de reativos e propiciam uma conexão suave com a rede para toda faixa de velocidade. O gerador é desacoplado da rede pelo conversor permitindo a conversão eletromecânica da energia numa ampla faixa de velocidade dos ventos (RUNICOS *et al.*, 2014).

Figura 8: Configuração de um aerogerador com conversor de plena potência

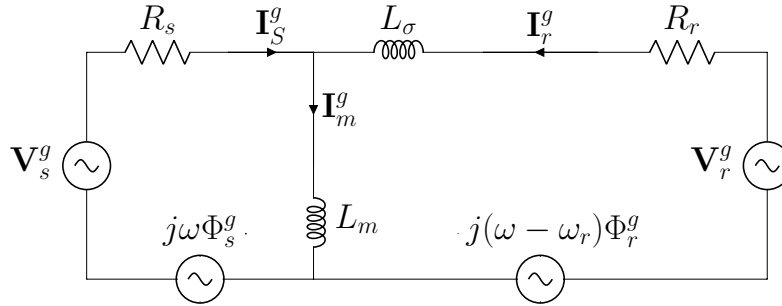


Fonte: (ACKERMANN, 2012)

## 2.4 Circuito Elétrico Equivalente do DFIG

A modelagem teórica do DFIG é apresentada por (MOHSENI; ISLAM; MASOUM, 2011a). Nela o circuito apresentado na Figura 9 demonstra os fasores de tensão do estator e do rotor que podem ser obtidos por (5) e (6):

Figura 9: Circuito equivalente da máquina



Fonte: A autora, 2020

$$V_s^g = R_s I_s^g + \frac{d\Phi_s^g}{dt} + j\omega\Phi_s^g, \quad (5)$$

$$V_r^g = R_r I_r^g + \frac{d\Phi_r^g}{dt} + j(\omega - \omega_r)\Phi_r^g, \quad (6)$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular, os subscritos  $s$  e  $r$  distinguem quantidades ou parâmetros nos lados, respectivamente, do estator e do rotor. O controlador vetorial orientado ao fluxo do estator é adotado no conversor do lado da máquina (MSC) para controlar as potências ativa e reativa do DFIG, enquanto o conversor do lado da rede (GSC) visa manter a tensão do link DC quase constante. O modelo esquemático do DFIG é apresentado na Figura 10.

O fluxo do espaço vetorial são definidos em (7) e (8):

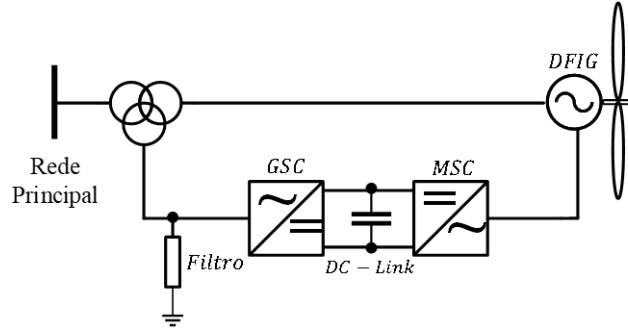
$$\Phi_s^g = L_m(I_s^g + I_r^g) = L_m I_m^g, \quad (7)$$

$$\Phi_r^g = L_\sigma I_r^g + L_m(I_s^g + I_r^g), \quad (8)$$

onde  $L_m$  e  $L_\sigma$  são, respectivamente, as indutâncias de magnetização e de dispersão. Usando (7) e (8), o fasor de tensão elétrica do rotor é definido em (9):

$$\mathbf{V}_r^g = R_r \mathbf{I}_r^g + L_\sigma \frac{d\mathbf{I}_r^g}{dt} + \frac{d\Phi_s^g}{dt} + j(\omega - \omega_r)(L_\sigma \mathbf{I}_r^g + \Phi_s^g). \quad (9)$$

Figura 10: Modelo esquemático do DFIG



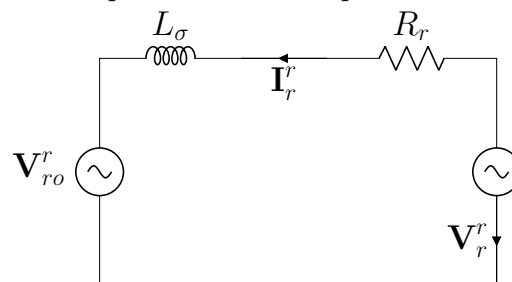
Fonte: A autora, 2020

O fasor  $\mathbf{V}_r^r$  pode expressar o lado do rotor por (10) :

$$\mathbf{V}_r^r = \mathbf{V}_{ro}^r + \left( R_r \mathbf{I}_r^r + L_\sigma \frac{d\mathbf{I}_r^r}{dt} \right) \approx \mathbf{V}_{ro}^r = \frac{d\Phi_s^r}{dt}. \quad (10)$$

Como apresentado em (LÓPEZ *et al.*, 2007, 2008) a tensão do rotor,  $\mathbf{V}_r^r$ , é definida pelo junção de duas componentes: a FEM, induzida pelo vetor do fluxo do estator; e por uma queda de tensão ocasionada por  $R_r$  e  $L_\sigma$  mostrada na Figura 11. Os parâmetros  $R_r$  e  $L_\sigma$  são consideravelmente pequenos em relação ao  $\mathbf{V}_{ro}^r$ , logo a tensão do rotor pode ser definida por  $\frac{d\Phi_s^r}{dt}$ .

Figura 11: Circuito equivalente da máquina vista do lado do rotor

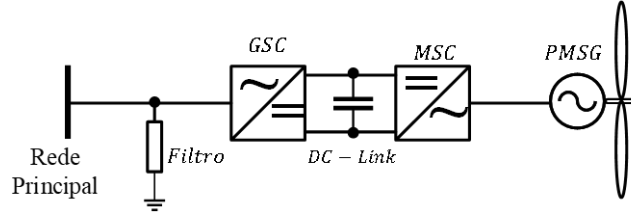


Fonte: A autora, 2020

## 2.5 Comportamento Dinâmico do PMSG

O PMSG, possui uma turbina eólica de velocidade variável com gerador síncrono com ímãs permanentes, conectado à rede elétrica através de um conversor eletrônico, como mostrado na Figura 12. Esta topologia pode ou não possuir uma caixa multiplicadora, a inexistência dessa caixa diminui o seu custo e aumenta a sua robustez (PAVINATTO, 2005). A resposta dinâmica das turbinas PMSG é principalmente a

Figura 12: Modelo esquemático do PMSG



Fonte: A autora, 2020

interação entre a rede e o controle da interface do conversor de potência, e não entre a rede e o gerador, como ocorre com as turbinas DFIG (LÓPEZ *et al.*, 2008).

Em operação normal, o MSC é responsável pelo controle da velocidade do gerador, operando em ponto rastreador de potência máxima ou MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), possibilitando fornecimento máximo de potência. Na ocorrência de um afundamento de tensão, o MSC é desacoplado da rede pelo GSC. Porém, devido ao limite de corrente GSC, a potência da rede pode diminuir durante um afundamento, enquanto a potência do lado do gerador permanece constante. O excesso de potência causará o aumento na tensão do link DC. O valor de pico da tensão do link DC é um índice adequado para caracterizar o impacto do afundamento de tensão.

O GSC é um controlador típico de fonte de tensão, o controlador é projetado para manter constante a tensão do link DC e controlar o fator de potência da potência de saída pelas correntes dos eixos rotativos  $d$  e  $q$ . Nesta estrutura rotativa, a equação dinâmica do GSC pode ser expressa pelas equações (11) e (12) (KIM *et al.*, 2012; CONROY; WATSON, 2007; DENG; CHEN, 2009):

$$\mathbf{V}_{Gd} = -\mathbf{I}_{Gd}\mathbf{R}_G - \mathbf{L}_{Gd}\frac{d\mathbf{I}_{Gd}}{dt} + \mathbf{W}_G\mathbf{L}_{Gq}\mathbf{I}_{Gq} + \mathbf{V}_G, \quad (11)$$

$$\mathbf{V}_{Gq} = \mathbf{I}_{Gq}\mathbf{R}_G - \mathbf{L}_{Gq}\frac{d\mathbf{I}_{Gq}}{dt} - \mathbf{W}_G\mathbf{L}_{Gd}\mathbf{I}_{Gd}, \quad (12)$$

onde  $V_G$  é a tensão,  $I_G$  a corrente,  $R_G$  a resistência,  $L_G$  a indutância e  $W_G$  a frequência. Todas as variáveis estão relacionadas com a rede e variando nos eixos rotativos  $d$  e  $q$ .

A potência ativa e reativa,  $P_{Grid}$  e  $Q_{Grid}$ , respectivamente, são controladas pela corrente de eixo  $d$  e  $q$  separadamente. A corrente do eixo  $q$  pode ser controlada para ajustar o fator de potência. A potência ativa e reativa do lado da rede são obtidas das expressões (13) e (14) (KIM *et al.*, 2012; CONROY; WATSON, 2007; DENG; CHEN, 2009):

$$\mathbf{P}_{Grid} = \frac{3}{2}(\mathbf{V}_{Gd}\mathbf{I}_{Gd} + \mathbf{V}_{Gq}\mathbf{I}_{Gq}) = \frac{3}{2}\mathbf{V}_{Gd}\mathbf{I}_{Gd}, \quad (13)$$

$$\mathbf{Q}_{Grid} = \frac{3}{2}(\mathbf{V}_{Gd}\mathbf{I}_{Gq} + \mathbf{V}_{Gq}\mathbf{I}_{Gd}) = \frac{3}{2}\mathbf{V}_{Gd}\mathbf{I}_{Gq}. \quad (14)$$

O desequilíbrio da potência entre a rede e o gerador, afetado pelo controle do lado da rede e pelo dispositivo limitador de corrente, leva ao desequilíbrio em torno do link DC. Consequentemente, a corrente DC aumentará causando um transiente excedente na tensão DC. A tensão link DC retornará ao seu valor nominal pelo



controle do GSC para afundamentos rasos. Para afundamentos de tensão severos, o GSC perderá o controle da corrente, pois a corrente do GSC é limitada.

## 2.6 Procedimentos de Rede (LVRT)

Os SEPs devem ter características como segurança, confiabilidade e qualidade. Estes critérios definem os padrões de qualidade da energia elétrica, padrões que cada vez mais estão sendo exigentes, com o propósito de aperfeiçoar a qualidade da energia elétrica que chega ao consumidor final. Para garantir estes padrões foram estabelecidos procedimentos de rede. No Brasil, tais padrões foram definidos pelo ONS e homologados pela ANEEL.

A curva de suportabilidade a afundamentos de tensão é o principal requisito da regulamentação mínima para a conexão à rede básica, conhecida mundialmente por LVRT (Low Voltage Ride Through), que dependendo da norma do país estabelecem parâmetros com maior nível de exigência a suportar os afundamentos de tensão na rede elétrica. Cada norma tem por finalidade definir as condições de operação dos aerogeradores de forma a garantir estabilidade e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica. O atendimento da curva LVRT significa que os geradores eólicos irão permanecer conectados à rede durante o acontecimento de um determinado afundamento de tensão. A LVRT é geralmente descrita por uma curva de magnitude e duração de afundamento. Caso o fenômeno de afundamento de tensão no ponto de conexão da central de geração eólica se encontre acima da curva referida, os aerogeradores devem continuar em operação. Caso contrário, é permitido que o parque saia de operação.

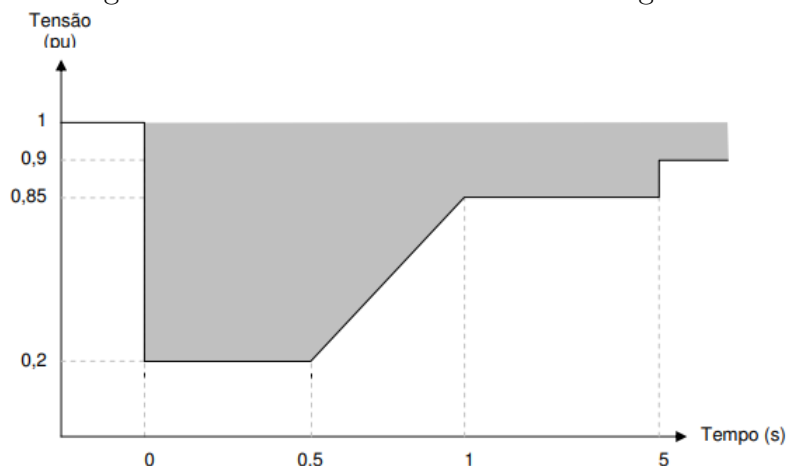
Em função disso, para a conexão de geradores eólicos no sistema elétrico, requisitos operativos em situações de falta, englobando as mínimas condições nas quais os geradores devem continuar em operação, devem ser cumpridos para que esses parques eólicos não sejam desconectados do sistema. A capacidade de permanecer em operação é vinculado a fatores atribuídos aos aerogeradores da planta e do sistema em que a planta esta conectada. Com relação ao lado da geração, os fatores que contribuem para a ininterrupção da geração e permanência dos geradores estão associados, por exemplo, com aspectos construtivos e de controle, resposta e controle da turbina. Já do lado do sistema essa capacidade está relacionada com fatores como curva de tensão e duração, tipo de falta, tempo de recuperação, localização das faltas e nível do afundamento de tensão.

No Brasil, para parque eólicos conectados na rede básica existe um critério específico para suportabilidade a afundamentos de tensão, na ocorrência de um afundamento de tensão em uma ou mais fases no ponto de conexão da central de geração eólica esta deverá permanecer operando se a tensão em seus terminais estiver acima da curva LVRT. O procedimento de rede brasileiro, (ONS, 2019), estabelece que para durações de afundamentos de tensão abaixo de 500 ms, o aerogerador deve suportar até 0,2 p.u de tensão, conforme pode ser visto na Figura 13.

## 2.7 Área de Vulnerabilidade

Área de vulnerabilidade também conhecida por zona crítica (GOMEZ *et al.*, 2002), ou região de sensibilidade (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 2004) ou também área exposta (KEMPNER, 2017) a área de vulnerabilidade é utilizada para

Figura 13: Tensão nos terminais dos aerogeradores

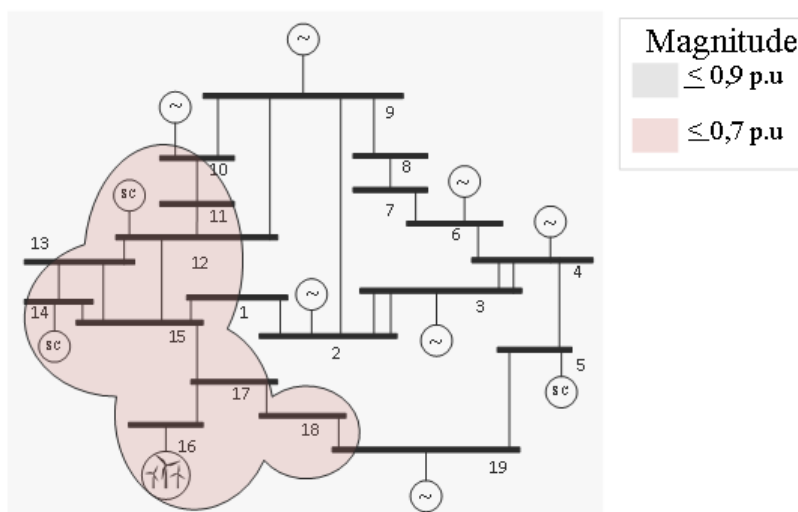


Fonte: (ONS, 2019)

análise de afundamentos de tensão em sistemas elétricos. Segundo (CARPINELLI *et al.*, 2009), é associada a um ponto de monitoração, uma barra de análise, onde a ocorrência de faltas nas demais barras poderá ocasionar afundamentos de tensão na barra analisada abaixo de limites críticos, que podem ocasionar o desligamento de cargas sensíveis.

Na Figura 14 é mostrada a área de vulnerabilidade em referência ao parque eólico conectado na barra 16. A área de vulnerabilidade foi estabelecida considerando a região do SEP onde faltas podem provocar afundamentos de tensão de magnitude inferior a 0,7 p.u na barra do parque eólico. Geralmente, a área de vulnerabilidade é obtida através de simulações de faltas em todas as linhas do SEP. Vale ressaltar que faltas nas linhas mais próximas do parque eólico são as que geram afundamentos mais severos, com menor tensão residual.

Figura 14: Exemplo de área de vulnerabilidade para um SEP



Fonte: A autora, 2020

## 2.8 Revisão Bibliográfica

Na literatura são encontradas diversas abordagens diferentes do tema de afundamentos de tensão entre simulações, medições e análise da influência sobre a rede de transmissão e distribuição. Nesta seção são destacados os trabalhos utilizados para desenvolver essa dissertação. São trabalhos que tem como foco estudos considerando afundamentos de tensão, requisitos LVRT e máquinas DFIG e PMSG.

### 2.8.1 Trabalhos Relacionados à Afundamentos de Tensão

De acordo com a literatura as faltas elétricas e os afundamentos de tensão possuem grande correlação.

Neste contexto, (MCGRANAGHAN; MUELLER; SAMOTYJ, 1993), descreve as características de afundamentos de tensão e a sensibilidade dos equipamentos. Através dessas informações, é possível realizar o mapeamento da área de sensibilidade em relação a localização das faltas. As opções para melhorar o desempenho dos equipamentos na presença de afundamentos de tensão incluem condicionamento de energia ou modificações no projeto dos equipamentos.

Em (BOLLEN, 2003) se estuda a recuperação da tensão após um afundamento de tensão devido a uma falta em um sistema trifásico. A recuperação de tensão é descrita de forma sistemática usando a classificação de afundamentos de tensão desbalanceados. Os autores demonstram que a recuperação da tensão precisa ser modelada corretamente para estudos de imunidade a equipamentos contra afundamentos de tensão.

(ALAM; MUTTAQI; BOUZERDOUM, 2015; CAMARILLO-PEÑARANDA; RAMOS, 2018) apresentam um algoritmo para detecção, classificação e caracterização de afundamentos e oscilações de tensão em redes de eletricidade usando parâmetros de elipse de tensão trifásica. O método proposto emprega a magnitude instantânea dos sinais de tensão trifásicos em três eixos, que são separados um do outro por  $120^\circ$ . Assim, o vetor rotativo resultante, ou seja, o vetor de tensão trifásico, traça uma elipse. Em seguida, os parâmetros da elipse, que incluem eixo menor, eixo principal e ângulo de inclinação, são usados para desenvolver o algoritmo proposto para classificação e caracterização de afundamentos e oscilações de tensão. O salto do ângulo de fase e a característica do ponto de início da onda não foram abordados.

Em (CAMARILLO-PEÑARANDA; RAMOS, 2019) é proposto o método baseado em transformação de Clarke para classificar e calcular a tensão residual, ponto na onda e salto do ângulo de fase a partir dos dados registrados. A vantagem de aplicar a metodologia proposta foi a redução das variáveis em consideração ao calcular o salto do ângulo de fase e a duração do afundamento de tensão no caso do ponto de início e de recuperação da onda.

### 2.8.2 Trabalhos Relacionados ao DFIG

Um modelo contínuo equivalente de turbinas eólicas baseada no DFIG é apresentado em (LÓPEZ *et al.*, 2007, 2008). Os autores estudaram afundamentos de tensão por faltas simétricas e assimétricas, usando uma ferramenta gráfica chamada de Representação Macroscópica Energética. Em (LÓPEZ *et al.*, 2007) duas estratégias de controle do fluxo do estator são apresentadas, incluindo uma abordagem síncrona com um controle de fluxo em malha aberta e uma abordagem assíncrona com um controle de fluxo em malha fechada. Já em (LÓPEZ *et al.*, 2008) há uma extensão

do estudo para afundamentos de tensão desequilibrados, como aqueles causados por faltas monofásicas e bifásicas. Os afundamentos assimétricos são mais prejudiciais ao gerador do que os simétricos, pois induzem sobretensões mais altas no rotor. Nesse estudo, não foi considerado a propagação do afundamento e sim foi realizado uma redução da tensão diretamente nos terminais da máquina.

O trabalho apresentado (MOHSENI; ISLAM; MASOUM, 2011b) tem como objetivo abordar as limitações e os impactos de afundamentos simétricos e assimétricos de tensão na operação de turbinas eólicas baseadas em DFIG, através da redução da tensão nos terminais das turbinas. O gerador eólico é simulado no MATLAB<sup>®</sup>/Simulink e sujeito a várias condições de afundamentos para investigar as ultrapassagens transitórias e as oscilações do estado estacionário que aparecem na corrente do rotor e na tensão do link DC em diferentes tipos de afundamentos de tensão. Também são examinados os efeitos do processo de salto do ângulo de fase e recuperação de tensão. Além de investigar a influência dos parâmetros de afundamentos (tipo, ponto de início da onda e salto do ângulo de fase) nos valores de pico da corrente do rotor e da tensão do link DC.

(BAGHERI *et al.*, 2018) verificaram o comportamento dinâmico de turbinas eólicas baseadas em DFIG na presença de afundamentos de tensão ou transitórios devido a várias origens: faltas elétricas, energização de transformadores, energização de capacitores e energização de cabos. Essas origens diferentes resultam em características diferentes de afundamentos de tensão em termos de tensão residual, duração, tipo de afundamento, distorção harmônica e assim por diante. Cada uma dessas características tem diferentes impactos nos parâmetros elétricos das turbinas eólicas. A capacidade de suportabilidade a afundamento de tensão das instalações de turbinas eólicas é fornecida por códigos de rede que são derivados com base em afundamentos de tensão de origem de falta elétrica, considerando apenas duas características: tensão residual e duração. A turbina eólica baseada em DFIG é simulada no ambiente MATLAB<sup>®</sup>/Simulink para investigar o comportamento dinâmico dos parâmetros elétricos críticos, incluindo tensão no link DC e corrente do rotor.

Em (DUONG *et al.*, 2018) foi proposto um esquema de turbinas eólicas DFIG baseado em faltas trifásicas com proteção *crowbar*, lado do rotor e lado da rede, para melhorar a estabilidade transitória. No trabalho (CHEN *et al.*, 2019) é abordado a amplitude e a distorção harmônica total da corrente do rotor e do estator, bem como a tensão do DFIG no link DC durante vários tipos de afundamentos de tensão com magnitude diferente, para diferentes ponto de início da onda e salto do ângulo de fase.

### 2.8.3 Trabalhos Relacionados ao PMSG

No trabalho, (AMEI *et al.*, 2002), é proposto um sistema de gerador eólico usando um conversor boost para controle de geração do PMSG. E, a análise teórica das características da geração de energia é discutida. O valor de cada parte do sistema é calculado com base na velocidade de rotação observada pelo sensor de rotação. A consideração das características do aerogerador é desnecessária, porque o torque é controlado na proporção da velocidade de rotação do gerador e porque as características são refletidas na alteração da velocidade de rotação. Portanto, este método pode ser aplicado a todos os aerogeradores.

A referência (MORREN; PIERIK; DE HAAN, 2004) relatou métodos de controle para cada parte do PMSG para melhorar a capacidade do LVRT com a variação do

passo de velocidade. Esta contribuição apresenta um controlador que pode ser usado para manter turbinas eólicas de acionamento direto com gerador de ímã permanente conectado à rede durante distúrbios de tensão. A referência (YANG *et al.*, 2009) realizou um estudo que durante um afundamentos de tensão, a estratégia proposta pode limitar a tensão DC e a velocidade de rotação aos seus valores de referência, respectivamente, ajustando a potência do gerador e fornecendo energia reativa para a rede. No trabalho, (YANG; DUAN; BAI, 2009), é proposta uma estratégia de controle do conversor sem dispositivos adicionais para melhorar a capacidade LVRT em turbinas PMSG durante afundamentos de tensão. Os resultados da simulação mostraram que durante afundamentos de tensão simétricos e assimétricos, a estratégia proposta poderia limitar a corrente do inversor, a tensão DC e a velocidade da turbina. A capacidade LVRT do PMSG é aprimorada, mantendo o equilíbrio de energia do PMSG e do conversor.

Em (HAMIED; EL.AMARY, 2016) uma abordagem teórica foi elaborada para descrever o problema de estabilidade do gerador síncrono de ímã permanente. Algumas das vantagens da abordagem é a confiabilidade e eficácia. A técnica proposta é obtida em três etapas. O primeiro estágio é aplicar a aproximação linear ao sistema original. O segundo estágio é obter a função de transferência. O último estágio é separar o zero instável do sistema original. Uma vez separado, um feedback adequado é projetado para tratar os fenômenos de instabilidade. A técnica proposta é simulada e testada usando o programa MATLAB<sup>®</sup>. Os resultados mostram que a abordagem desenvolvida prova ser uma ferramenta poderosa para controlar o gerador síncrono do PMSG.

Em (GAJEWSKI; PIENKWSKI, 2018) é descrito o esquema de controle avançado de turbinas eólicas PMSG, onde o sistema mecânico da turbina eólica e gerador de acionamento direto é considerado. Na ocorrência de afundamentos de tensão na rede, os esquemas de controle do conversor MSC e GSC são forçados a atender aos requisitos do LVRT. O esquema de controle proposto permite armazenar a potência excedente na inércia da turbina durante as faltas. Com esse estudo, percebe-se que a redução da potência do PMSG permite equilibrar os conversores MSC e GSC durante o afundamento de tensão.

#### 2.8.4 Observações e Ponderações sobre as Propostas Existentes

Na seção anterior foram citados os principais trabalhos relacionados a afundamentos de tensão e comportamento de parques eólicos com diferentes tipo de máquinas adotadas.

A Tabela 5 apresenta a comparação da análise proposta nesta dissertação com trabalhos que contemplam afundamento de tensão em diferentes tipos de turbinas eólicas, bem como o método de análise da forma de simulação do afundamento de tensão. Desta maneira, é notado que a maioria dos trabalhos atentam a avaliação do afundamento de tensão por métodos alternativos sem considerar a propagação do afundamento.

Igualmente, a Tabela 6 apresenta a comparação de trabalhos recentes que contemplam diferentes tipos de turbinas eólicas e seu comportamento dinâmico durante afundamentos de tensão. Pelo levantamento feito, percebe-se que nenhuma das referências anteriores contemplou um estudo com os dois tipos de aerogeradores. Assim, na análise do SEP e parque eólico durante afundamentos de tensão pode-se comparar o comportamento de ambas as máquinas, sendo esta uma das contribuições

deste trabalho.

Tabela 5 – Comparação dos estudos em relação a forma de simulação do afundamento de tensão

| Análise do afundamento de tensão | A | B | C | D | E | F | G | H | * |
|----------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Propagação do afundamento        | X |   |   |   |   | X |   |   | X |
| Sistema Coletor                  |   |   |   | X |   |   |   | X |   |
| Terminais das turbinas eólicas   |   |   |   |   |   |   | X |   |   |
| Redução da tensão nos terminais  |   | X | X |   | X |   |   |   |   |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 6 – Comparativo de trabalhos relacionando características da modelagem de turbinas eólicas

| Tipo de aerogerador | A | B | C | D | E | F | G | H | * |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DFIG                | X | X | X |   | X |   | X |   | X |
| PMSG                |   |   |   | X |   | X |   | X | X |

Fonte: A autora, 2020

REFERÊNCIA A (MORREN; DE HAAN, 2005)

REFERÊNCIA B (LÓPEZ *et al.*, 2007)

REFERÊNCIA C (LÓPEZ *et al.*, 2008)

REFERÊNCIA D (DENG; CHEN, 2009)

REFERÊNCIA E (MOHSENI; ISLAM; MASOUM, 2011b)

REFERÊNCIA F (ARANI; MOHAMED, 2016)

REFERÊNCIA G (ALSMADI *et al.*, 2018)

REFERÊNCIA H (GENG; LIU; LI, 2018)

REFERÊNCIA \* (Análise proposta nesta dissertação)

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Considerações Iniciais

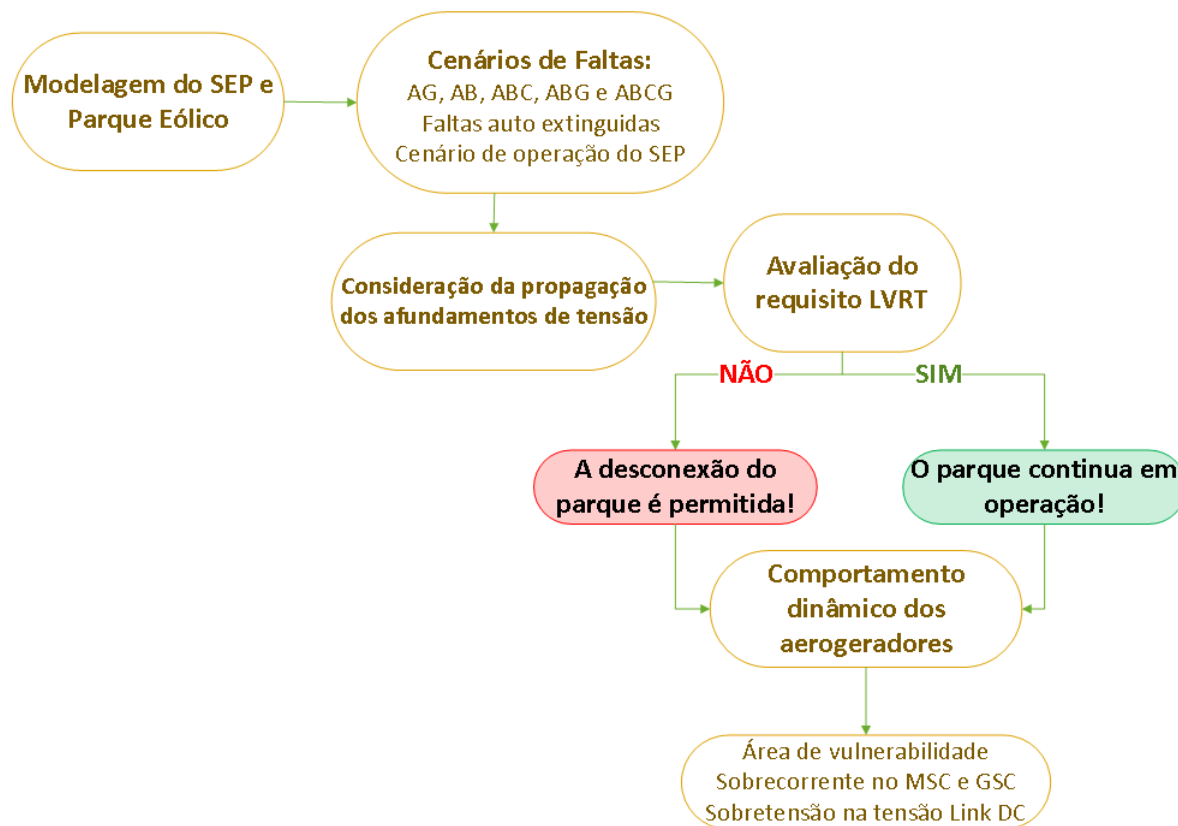
Neste capítulo é descrita a metodologia proposta e os modelos utilizados para simular afundamentos de tensão sob condições de faltas observados em parques eólicos conectados no sistema de transmissão. A metodologia baseia-se na representação agregada de aerogeradores do tipo DFIG e do tipo PMSG. A simulação dos afundamentos de tensão causados por faltas no sistema de transmissão considera a propagação dos mesmos até os terminais dos aerogeradores. A descrição da metodologia inclui uma breve apresentação dos programas de simulação utilizados.

### 3.2 Metodologia Proposta

O objetivo é implementar uma metodologia para analisar a operação de parques eólicos quando submetido a afundamentos de tensão causados por faltas simétricas e assimétricas em sistemas de transmissão. Desta maneira, os afundamentos de tensão simulados a partir de faltas no sistema de transmissão são realísticos por considerar a propagação até os terminais dos aerogeradores. Isso permite entender melhor os limites, os possíveis problemas e o comportamento de turbinas eólicas.

A Figura 15 sintetiza a metodologia detalhada nessa seção, que inicia com a modelagem do SEP, do parque eólico e os cenários de faltas. Os parâmetros de entrada são inseridos no *software* e o fluxo de potência é resolvido, com isso é possível realizar a análise da propagação do afundamento de tensão, que têm como resultado a magnitude do afundamento de tensão nos terminais das turbinas. A partir desses resultados é possível verificar o requisito LVRT dos aerogeradores. Ou seja, com os valores obtidos, é analisado se os geradores eólicos tem condições de manter a operação durante o afundamento de tensão. Também são analisadas as características do comportamento dinâmico dos aerogeradores. Um mapeamento da área de vulnerabilidade em relação a potência é realizado, além de analisar as sobretensões e sobrecorrentes nos conversores MSC e GSC. Essa sequência se repete para todas as faltas simuladas em todos os cenários.

Figura 15: Fluxograma da metodologia implementada



Fonte: A autora, 2020

Nesse contexto, propõe-se a elaboração de cenários que possibilitam avaliar o impacto de afundamentos de tensão em parques eólicos conectados ao sistema de transmissão através do comportamento dinâmico dos aerogeradores. Essa análise pode mostrar, em particular, o comportamento dos aerogeradores durante a ocorrência dos afundamentos de tensão.

Baseado nos cenários de operação do SEP e casos de faltas formulados, utiliza-se um programa que simule o modelo equivalente de um sistema de transmissão onde o parque eólico está conectado para gerar cinco tipos de faltas, auto extinguidas com uma duração de 0,1s, e para acessar a magnitude do afundamento de tensão nos terminais das turbinas durante esses eventos. Essas simulações recebem como dados de entrada os parâmetros do SEP e da potência nominal instalada do parque eólico.

Durante um evento, uma das linhas é submetida a um tipo de falta, onde será monitorada a propagação do afundamento de tensão até os terminais das turbinas eólicas. Por consequência, será analisada a magnitude do afundamento de tensão, verificando se atende à curva LVRT. Caso ocorra o cumprimento do requisito LVRT, o parque continua em operação, sendo, então, analisado o comportamento dinâmico dos aerogeradores. Este comportamento é avaliado através do monitoramento da redução da potência injetada na rede, da tensão no link DC e das sobrecorrentes nos conversores. Isso ressalta a importância de explorar eventos que considerem diferentes tipos de faltas elétricas e cenários de operação.



### 3.3 Programa Utilizado

O programa MATLAB<sup>®</sup>/Simulink foi usado para implementar os modelos equivalentes do SEP e do parque eólico. Com a ferramenta Simulink torna-se possível montar diagramas inteiros de sistemas. O *software* pode ser utilizado também para gerar os códigos para simular as faltas no SEP, de forma individual ou geral.

As etapas de modelagem do SEP e do parque eólico do fluxograma apresentado na Figura 15, na seção 3.2, são realizadas no Simulink, enquanto a atualização dos parâmetros das componentes do sistema, a propagação da magnitude dos afundamentos de tensão, a avaliação do requisito LVRT e a análise do comportamento dinâmico dos aerogeradores são realizadas pelo MATLAB<sup>®</sup>.

O pseudoalgoritmo da metodologia da Figura 15 é apresentada na Tabela 7 para melhor entendimento da sua implementação.

Tabela 7: Implementação da metodologia

|  |
|--|
| ENTRADA: Dados do SEP e rede interna do parque eólico equivalente, cenários de operação e casos de falta |
| REPETIR: Passos de 1 a 5 para cada cenário de operação e tipo de falta                                   |
| Passo 1: Rodar fluxo de potência para o SEP equivalente conectado ao parque eólico                       |
| Passo 2: Simular cada caso: Método das posições das faltas   |
| Passo 3: Obter as variáveis dinâmicas de interesse   |
| Passo 4: Montar matriz de resultados   |
| Passo 5: Analisar o comportamento dinâmico dos aerogeradores   |

Fonte: A autora, 2020

O método proposto, conhecido como método das posições de falta, consiste em simular faltas em todas as linhas de transmissão do sistema e classificar os afundamentos observados no ponto de conexão analisado em uma tabela, pela sua duração e amplitude. Assim, é avaliada a influência da posição de falta tanto na magnitude como na duração dos afundamentos de tensão (BOLLEN, 2000).

A modelagem geral do método sugere que serão aplicadas faltas em todas as linhas do sistema, obtendo valores de magnitudes correspondentes nas barras consideradas, conforme as diferentes naturezas de faltas elétricas. Para cada simulação serão salvos os valores das saídas do gerador em uma matriz para análise posterior.

### 3.4 Modelagem dos Elementos do Sistema

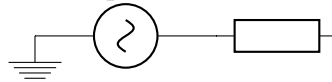
Essa seção visa descrever como são modelados cada um dos elementos do sistema de transmissão de energia elétrica e do parque eólico, que são foco do estudo, e detalhar os parâmetros utilizados de acordo com os modelos correspondentes.

O estudo da propagação de afundamentos de tensão no sistema de transmissão de energia elétrica é, geralmente, executado através de simulações utilizando modelos representativos dos elementos e da topologia da rede elétrica. Uma possibilidade para modelagem é não considerar todos os parâmetros por questão de simplicidade, reduzindo um sistema muito grande em um equivalente de Thévenin e determinar a área do sistema a ser analisado.

### 3.4.1 Unidade Geradora

O modelo das unidades geradoras modeladas do SEP corresponde a um circuito simplificado composto por uma fonte de tensão ideal e reatância síncrona, conforme a Figura 16. Foi utilizado uma modelagem simplificada pois o foco da análise está nos aerogeradores, e portanto o comportamento dinâmico dos demais geradores será desprezado. A caracterização do bloco na simulação computacional é feita definindo a potência e a tensão da geração sendo constantes.

Figura 16: Modelo representativo: unidade geradora

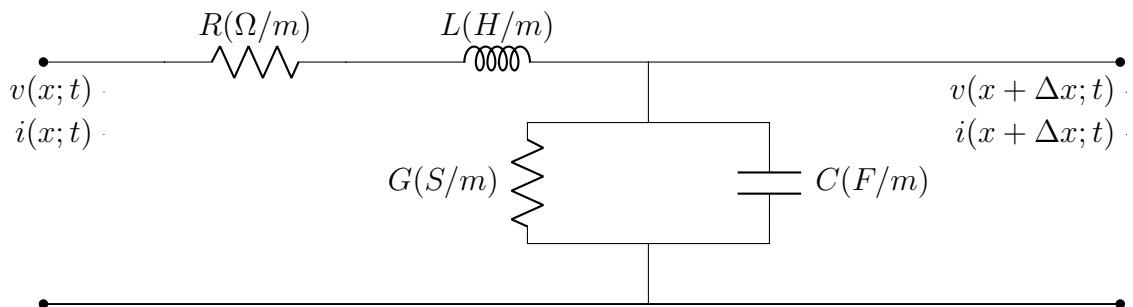


Fonte: A autora, 2020

### 3.4.2 Linha de Transmissão

Normalmente, para as linhas de transmissão os modelos mais indicados dependem de sua extensão. Para as linhas longas utiliza-se o modelo a parâmetros distribuídos, mostrado na Figura 17. O modelo com parâmetros distribuídos é adequado para qualquer comprimento de linha. Para as LTs do parque eólico que são muito curtas, utiliza-se o modelo  $\pi$ , apresentado na Figura 18.

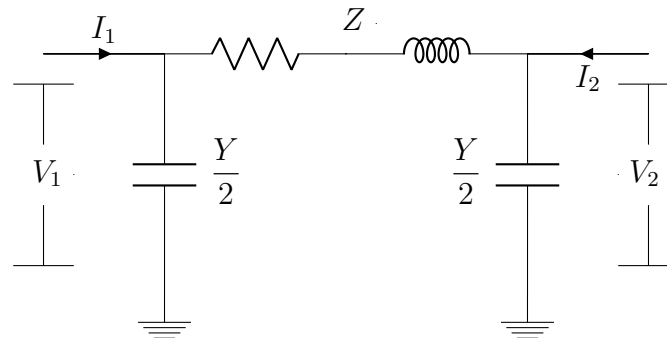
Figura 17: Modelo parâmetros distribuídos



Fonte: Adaptado de (NUNES, 2007)

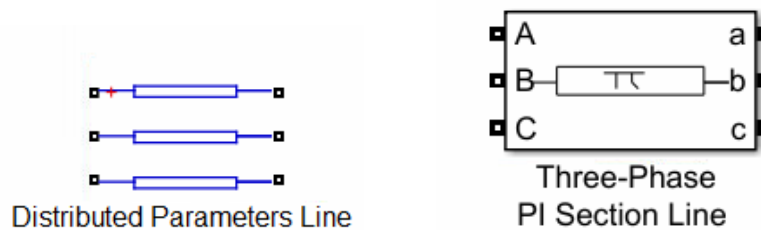
O modelo de parâmetros distribuídos está inserido no bloco *Distributed Parameter Line* da biblioteca, como mostra a Figura 19. São inseridos os parâmetros resistência, indutância e capacitância (por km), o número de fases do sistemas, a frequência (60 Hz) e o comprimento da LT (km), a condutância shunt da linha é desprezada.

Para implementação dos modelos de LTs, são utilizados blocos disponíveis na biblioteca *Power Systems* do *toolbox Simscape*. A implementação do modelo  $\pi$ , modelo de parâmetros concentrados, é executada a partir do bloco  $\pi$  *Section Line* da biblioteca, como mostra a Figura 19. Este bloco modela uma linha de transmissão trifásica e requer a inserção dos parâmetros de sequência zero e positiva de resistência, indutância e capacitância (por km); também é inserida a frequência (60 Hz) e o comprimento da LT (km).

Figura 18: Modelo  $\pi$  equivalente da linha

Fonte: Adaptado de (KERSTING, 2006)

Figura 19: Ícone dos modelos de linhas de transmissão



(a) Modelo parâmetros distribuídos

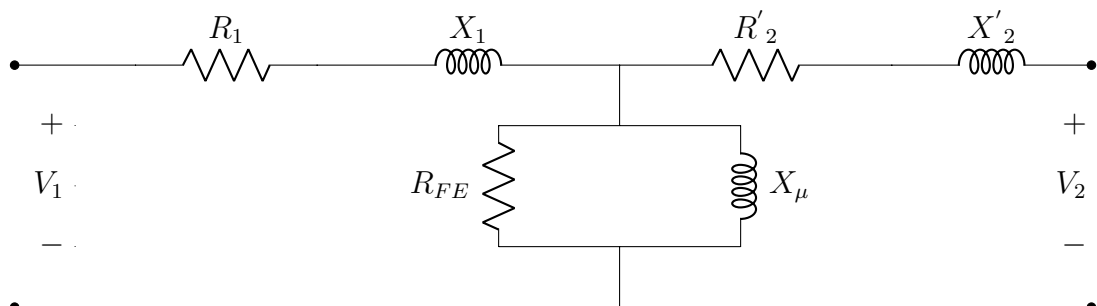
(b) Modelo  $\pi$ 

Fonte: Simulink, 2020

### 3.4.3 Transformador

A Figura 20 apresenta o circuito equivalente tradicional de transformadores referido ao primário. São apresentados a resistência do enrolamento primário ( $R_1$ ), reatância de dispersão primária ( $X_1$ ), resistência do enrolamento secundário ( $R'_2$ ), reatância de dispersão primária ( $X'_2$ ), reatância de magnetização ( $X_\mu$ ) e resistência de perdas do núcleo ( $R_{FE}$ ).

Figura 20: Modelo circuito equivalente do transformador

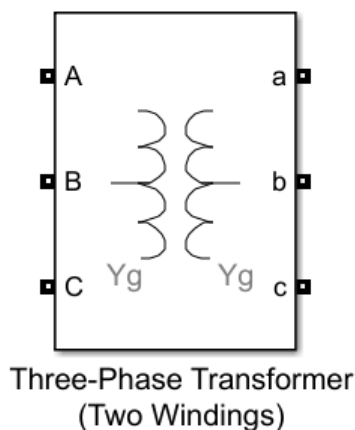


Fonte: Adaptado de (KERSTING, 2006)

O modelo do transformador implementado no *software* Simulink está inserido no

bloco *Three-Phase Transformer (Two Windings)* da biblioteca, como mostrado na Figura 21. Para a modelagem do transformador são inseridos: forma de conexão dos enrolamentos, potência, frequência, níveis de tensão, resistências e indutâncias primária, secundária e de magnetização. Este bloco implementa um transformador trifásico usando três transformadores monofásicos. A saturação do núcleo é desprezada.

Figura 21: Ícone do modelo do bloco do transformador



Fonte: Simulink, 2020

#### 3.4.4 Carga

Para estimar a carga do sistema elétrico modelado, foram utilizadas base de dados do SIN (Sistema Interligado Nacional) através da plataforma SINDAT, disponibilizada pelo ONS, e do acompanhamento da curva de carga disponibilizada no site da ONS.

No (SINDAT, 2020), foram coletados os dados de potência nominal de todos os transformadores rebaixadores de alta tensão para média tensão nas subestações Rio Grande do Sul. São estes transformadores que, afinal, conectam as cargas em níveis mais baixos de tensão. Um fator de potência de 0,92 foi considerado para a operação dos transformadores.

Pelo site da ONS, acompanhou-se a curva de carga da região Sul do país, que abrange os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. A curva fornece os dados de potência ao longo do dia. Foi obtida uma média da carga através desta curva e, para se estimar a representatividade do Estado do Rio Grande do Sul na carga de toda a região, foi utilizado o PIB de cada Estado. A Tabela 8 fornece o PIB de cada Estado para o ano de 2018.

Tabela 8: Produto Interno Bruto dos estados do Sul em 2018

| PIB da região Sul (BILHOES DE REAIS) |                |        |
|--------------------------------------|----------------|--------|
| Rio Grande do Sul                    | Santa Catarina | Paraná |
| 445                                  | 277,2          | 438    |

Fonte: A autora, 2020

O PIB do Rio Grande do Sul representa 38% do PIB da região. Com a obtenção

dos dados da curva da ONS, a média da carga, ao longo do dia, fica em torno de 15 GW. Assim, estima-se que o Estado do Rio Grande do Sul represente, também, 38% da carga do total da região, com uma estimativa de carga de 5,75 GW.

Com estes dados avaliados, fez-se uma comparação com os dados obtidos através da plataforma SINDAT. A capacidade nominal de potência total dos transformadores no Rio Grande do Sul é de 11,74 GVA. Com o fator de potência considerado, o Fator de Carga que confere uma potência aproximada à 5,75 GW fica em torno de 53%.

Nas simulações realizadas, a carga foi modelada na forma de potência ativa e reativa constante e com um fator de carga de 50%, a partir de uma parametrização dos componentes do sistema com dados de entrada definidos pelo usuário. O fluxo de potência é gerado no programa MATLAB<sup>®</sup> antes da execução dos cenários de simulação.

### 3.4.5 Parque Eólico

Em um parque eólico típico, cada aerogerador é associado a um transformador de turbina. Como o nível de tensão nos aerogeradores é tipicamente de 575 V, não é possível transmitir a potência de saída com baixo nível de tensão dos terminais do gerador até a subestação de transmissão. Portanto, um transformador de turbina local é instalado com cada gerador para aumentar a tensão do terminal para o nível de média tensão. O transformador no sistema de transmissão centralizado é usado para aumentar ainda mais a tensão para o nível de transmissão da rede conectada. A topologia delta estrela é a conexão dos enrolamentos mais comum para transformadores de aerogeradores. O modelo do transformador utilizado foi descrito em 3.4.3.

Uma topologia típica de conexão do parque eólico ao sistema de potência é mostrado na Figura 22. A modelagem do sistema de média tensão do parque foi realizada utilizando dados obtidos em (SCHWANZ, 2013). Um modelo reduzido do parque eólico real é feito com base em (PERDANA; CARLSON, 2009), que conclui que a representação equivalente a uma máquina de um grande parque eólico é suficiente para investigações de estabilidade de tensão a curto prazo.

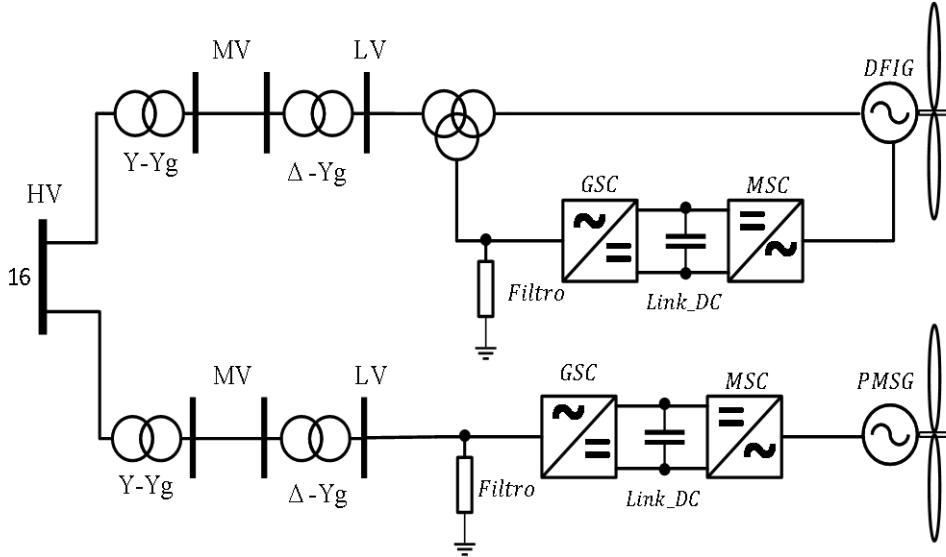
Para modelo agregado, todas as turbinas eólicas no parque eólico são combinadas em um modelo equivalente de máquina única. É concluído em (ACKERMANN, 2012) que quando há um curto-circuito no sistema de potência, os aerogeradores em um parque eólico responderão da mesma forma. Portanto, o modelo agregado é usado no estudo de estabilidade em parques eólicos e estudo LVRT. Por esses motivos, um modelo agregado é aplicado neste trabalho e o parque eólico é representado por uma turbina única equivalente para cada tipo de máquina.

Em grandes parques eólicos existem várias turbinas o que acarreta em uma complexidade elevada do detalhamento, resultando em um tempo de simulação muito longo. Assim, as seguintes premissas são feitas para representar um parque eólico.

1. Um grande parque eólico é dividido em vários grupos de turbinas, dependendo de suas características;
2. Para cada grupo de turbinas é considerado uma velocidade de vento uniforme;
3. Os grupos são arranjados dependendo da velocidade de vento de cada grupo;
4. Todas as turbinas são expostas ao mesmo nível de turbulência;

5. As redes de distribuição no parque eólico são representadas a partir de uma rede equivalente.

Figura 22: Rede interna do parque eólico



Fonte: A autora, 2020

Afim de agregar um conjunto de turbinas eólicas pode ser assumido uma representação da média da impedância do ramo do sistema. Dessa maneira, um conjunto de aerogeradores pode ser representado como apenas um aerogerador no sistema com impedância equivalente. A Figura 23 demonstra como um ramo de geradores pode ser representado no sistema através de uma única impedância equivalente,  $Z_{eq}$ , que é definida segundo a equação (15):

$$Z_{eq} = \frac{\sum_1^m \sum_1^s Z_{ms}}{m}, \quad (15)$$

onde  $m$  é a quantidade de coletores e  $s$  é o número de trechos entre cada aerogeradores para cada coletor. A subestação de Cerro Chato é o ponto comum da rede interna do parque eólico para os equivalentes dos aerogeradores. Além dos aerogeradores equivalentes, é realizada a equivalência dos transformadores e filtros, conforme mostram as Figuras 24 e 25 respectivamente. A equivalência dos transformadores se dá através da equação (16):

$$Z_{Teq} = \frac{Z_T}{n}, \quad (16)$$

As equações (17), (18) e (19) representam respectivamente a equivalência dos resistores, indutores e capacitores dos filtros:

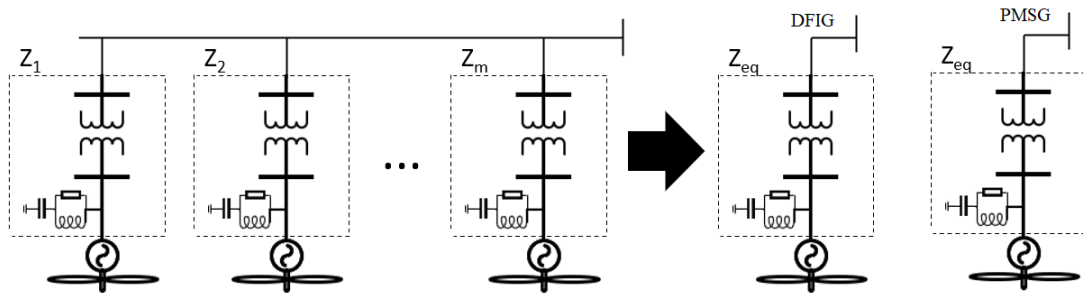
$$R_{eq} = \frac{R}{n}, \quad (17)$$

$$L_{eq} = \frac{L}{n}, \quad (18)$$

$$C_{eq} = Cn, \quad (19)$$

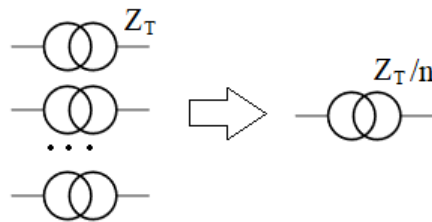
onde  $n$  é o número de aerogeradores.

Figura 23: Sistema de aerogerador equivalente



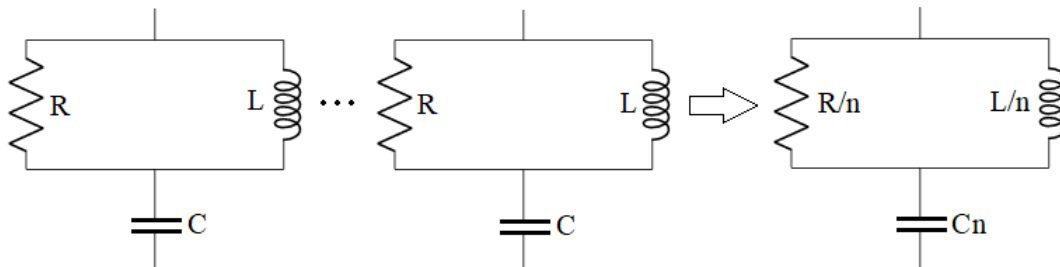
Fonte: A autora, 2020

Figura 24: Equivalência dos transformadores dos aerogeradores



Fonte: A autora, 2020

Figura 25: Equivalência dos filtros dos aerogeradores



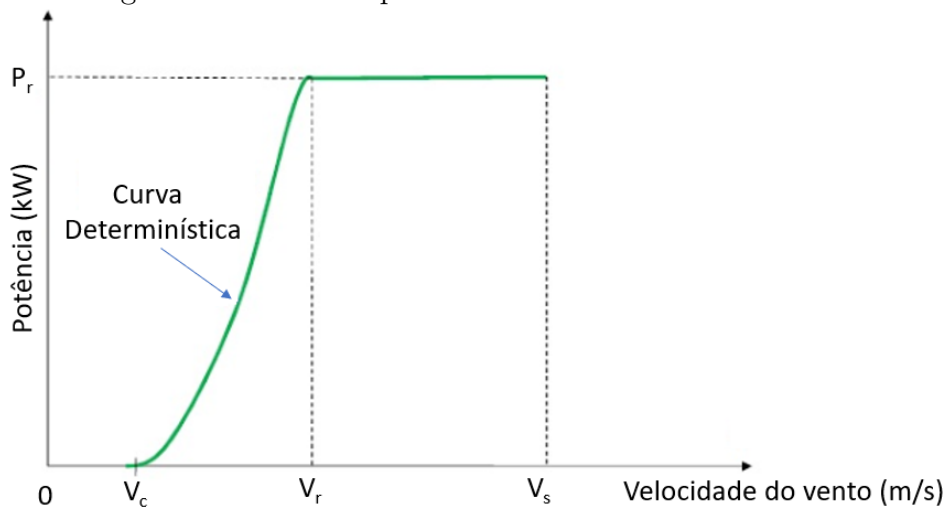
Fonte: A autora, 2020

Os aerogeradores de velocidade variável são compostos por um gerador eólico, um transformador e um conversor de frequência utilizado para a sua conexão à rede elétrica. Na Figura 22 é mostrada a topologia da conexão dos aerogeradores

na rede interna do parque. Para uma máquina DFIG, os terminais do estator são conectados diretamente à rede, enquanto os enrolamentos do rotor são conectados ao MSC (conversor do lado da máquina) e GSC (conversor do lado da rede). Os conversores são conectados através de um capacitor, conhecido como link DC. O sistema é alimentado a partir de um transformador com dois secundários ou dois transformadores abaixadores para adequar os níveis de tensão da máquina e dos conversores. Já os aerogeradores do tipo PMSG, possuem uma turbina eólica de velocidade variável com um gerador síncrono com ímãs permanentes, conectado à rede elétrica por meio de um conversor de frequência com a mesma potência nominal do gerador.

Na metodologia proposta, a potência gerada no sistema eólico possui a maior potência produzida na turbina eólica. Ou seja, nas simulações realizadas o valor de  $v_r$  é assumido com um valor constante para produzir a potência máxima no sistema. A potência de uma turbina eólica pode ser determinada através da curva de potência versus velocidade do vento, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26: Curva de potência versus velocidade do vento



Fonte: Modificado de (SADA, 2011)

A potência mecânica pode ser calculada através de (20):

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\beta; \lambda) v^3, \quad (20)$$

onde  $\rho$  é a densidade do vento,  $R$  é o raio da pá,  $C_p$  é a eficiência aerodinâmica,  $\beta$  é o ângulo de inclinação e  $\lambda$  é a velocidade específica na ponta da pá.

### 3.5 Cenários de Simulação

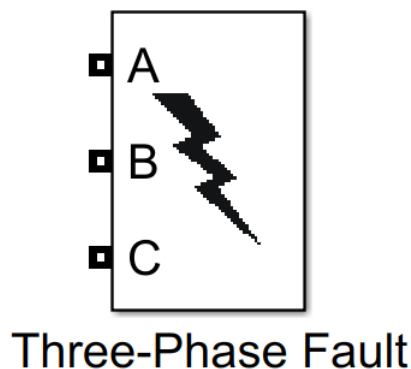
Para simular o fluxo de potência é utilizado Simscape<sup>TM</sup>. Essa ferramenta permite determinar a magnitude da tensão, ângulo de tensão, potência ativa e reativa em cada barra do sistema. O fluxo de potência é determinado através do método de Newton-Raphson. Através do fluxo de potência são estabelecidas as condições pré-falta do sistema, que são influenciadas pelos parâmetros das impedâncias das linhas por km, fator de carga, fator de potência, características das cargas e comprimento



das linhas. O fluxo de potência em regime permanente esta operando adequadamente dentro dos limites estabelecidos pela (ONS, 2018). Conseqüentemente, o modelo adotado para estudo de caso possui validação e comportamento adequado. Valores apresentados nas Tabelas 13 e 14 do Apêndice.

Como mencionado no fluxograma da Figura 15, os cenários de simulação estão definidos pelos tipos de faltas e pela operação de outras usinas geradoras próximas aos parques eólicos. As faltas são ocasionadas no modelo através do bloco *Three-Phase Fault* (Figura 27) que permite realizar todos os tipos de faltas. Os tipos de faltas simulados foram: AG, AB, ABG, ABC e ABCG. Todas as faltas foram geradas na metade de cada linha de transmissão e com uma duração de 100 ms. Foi utilizado essa duração devido ser adequado para estudos de afundamentos de tensão causados por faltas no sistema de transmissão. O curto é aplicado no instante de 2s e eliminada no instante de 2,1s.

Figura 27: Ícone do bloco de falta



Fonte: Simulink,2020

### 3.5.1 Consideração da Propagação do Afundamento de Tensão

Na ocorrência de um afundamento de tensão, é analisada a propagação do afundamento até o ponto de conexão dos aerogeradores. A etapa de avaliação da propagação do afundamento de tensão consiste na medição nos terminais da turbina eólica do valor da tensão devido às faltas no SEP. Neste trabalho será considerada a propagação do afundamento, diferentemente de outros trabalhos que consideram somente a tensão no ponto de conexão no sistema de transmissão.

### 3.5.2 Avaliação do Requisito LVRT

Uma vez obtido o afundamento de tensão, a magnitude e a duração são comparados com a curva de suportabilidade a afundamento de tensão, ou seja, a avaliação do requisito LVRT. O requisito LVRT, como ressaltado no capítulo 2, é descrito por uma curva da magnitude e duração do afundamento de tensão, que dependendo do país estabelecem parâmetros com maior nível de exigência a suportar os afundamentos na rede elétrica.

De tal maneira, quando a magnitude do afundamento se encontra acima da curva o parque continua em operação e será analisado o comportamento dinâmico dos aerogeradores. Caso contrário, ocorre a desconexão do parque eólico. Na metodologia

proposta nesta dissertação considera-se a LVRT dos Procedimentos de Rede do ONS (ONS, 2019) .

### **3.5.3 Comportamento Dinâmico dos Aerogeradores**

A partir dos modelos de aerogeradores descritos na seção 3.4.5, é possível fazer o levantamento da área de vulnerabilidade da redução da potência injetada na rede durante o afundamento de tensão. Como descrito no Capítulo 2, essa área está associada a um ponto de monitoração, onde a ocorrência de faltas no sistema elétrico pode gerar afundamentos severos no ponto de observação. Conseqüentemente, tal mapeamento permitirá delimitar as regiões do sistema elétrico onde as faltas produzem afundamentos de tensão mais severos para os aerogeradores, podendo delimitar as áreas em função de faixas de desvios da potência injetada pelo parque eólico.

Além de auxiliar no levantamento da área de vulnerabilidade, o afundamento de tensão simulado permite observar o comportamento dinâmico dos aerogeradores, como as sobrecorrentes nos conversores MSC/GSC e sobretensões no link DC. O comportamento do aerogerador depende do tipo de afundamento de tensão.

Para cada falta simulada são registrados: mínima magnitude do afundamento de tensão, potência mínima, sobretensão link DC e sobrecorrentes nos conversores MSC e GSC.

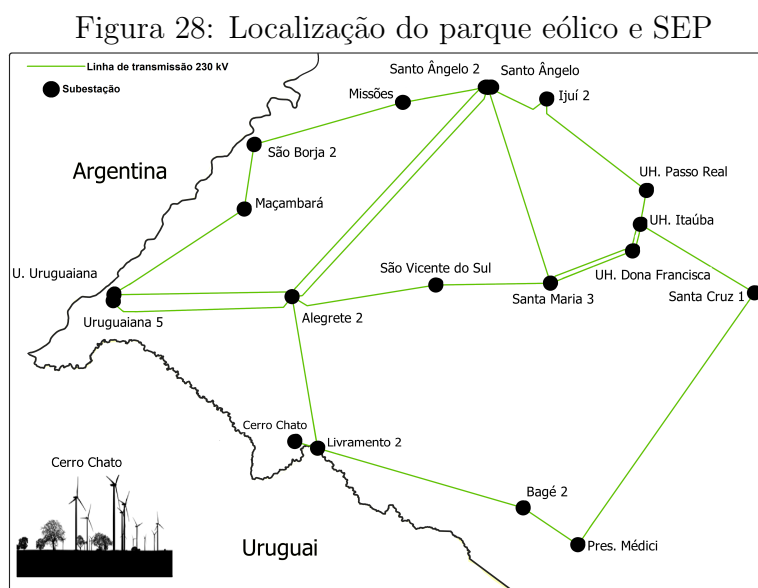
## 4 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

### 4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo da dissertação, são descritos os estudos de caso implementados e detalhamento das simulações realizadas. É apresentado o sistema de transmissão e parque eólico que serão utilizados para aplicar a metodologia proposta, além da descrição dos casos e cenários simulados. Por fim são explanados e discutidos os resultados obtidos para cada cenário de operação, com uma comparação entre os cenários que resume os resultados finais.

### 4.2 Sistema de Transmissão e Parque Eólico

Neste tópico são apresentadas as descrições do sistema de potência e parque eólico modelado, além dos casos de faltas e cenários de operação no SEP. As simulações foram realizadas com uma janela de duração do afundamento de tensão de 100 ms e com um tempo de amostragem de  $8,5 \mu\text{s}$ . A velocidade do vento é considerada constante durante as simulações. A Figura 28 mostra a localização do parque eólico e os respectivos sistemas de energia.



Fonte: A autora, 2020

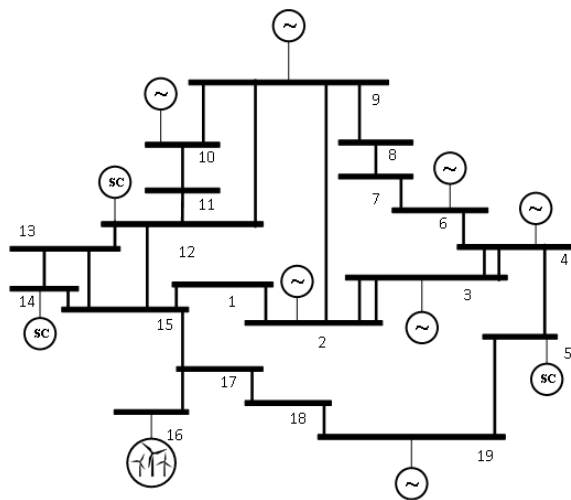
### 4.2.1 Descrição do SEP

Um sistema de potência com 26 linhas aéreas de transmissão em 230 kV foi modelado no MATLAB<sup>®</sup>/Simulink. O modelo equivalente computacional possui 19 barras e 26 linhas de transmissão no total. Todos os parâmetros e dados do modelo foram retirados do ONS. Esses parâmetros são a impedância das linhas, carga e geração de cada barra, disponibilizadas no apêndice dessa dissertação. O diagrama na Figura 29 mostra todos os barramentos e linhas do sistema. O parque eólico está localizado na barra de número 16. Na barra de número 14 está instalado um compensador síncrono que é utilizado para estabilização de tensão e correção de fator de potência em redes de energia.

O sistema de potência equivalente foi dividido em três subsistemas de acordo com a localização geográfica: Oeste, Centro e Fronteira Sul. A Figura 30 mostra os subsistemas modelados e o ponto de conexão comum no parque eólico Cerro Chato.

Os dados reais para este trabalho foram obtidos no (SINDAT, 2020), onde será realizado a modelagem de geradores, barras, linhas de transmissão e diferentes tipos de cenários de operação do SEP do estado do Rio Grande do Sul no *software* Simulink, possibilitando assim as simulações a ocorrência de curtos circuitos na rede elétrica. Simulações das faltas realizadas no MATLAB<sup>®</sup>.

Figura 29: Diagrama do sistema elétrico de potência modelado



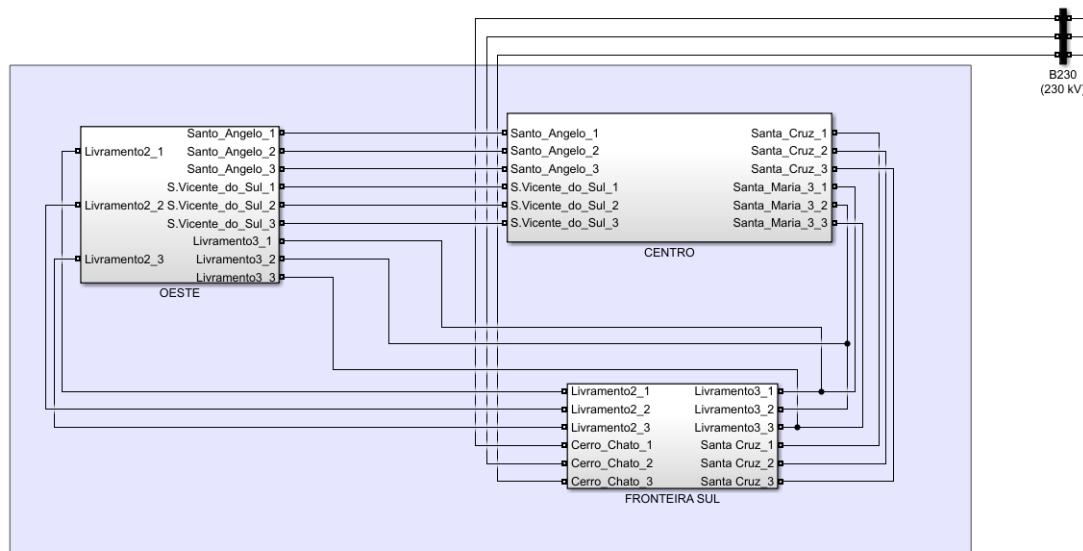
Fonte: A autora, 2020

### 4.2.2 Descrição do Parque Eólico

Foi realizado um estudo de caso no Parque Eólico Cerro Chato localizado no município de Santana do Livramento no estado do Rio Grande do Sul com uma potência nominal de 90MW, sendo este parque dividido em 3 complexos de 30MW cada, foi feita a modelagem do equivalente do parque pelo programa computacional MATLAB<sup>®</sup>/Simulink. Na Tabela 9 é apresentada a localização geográfica e potência instalada de cada parque eólico mencionado. A Figura 31 mostra o sistema interno do parque eólico com um bloco de gerador equivalente para o DFIG e outro para PMSG. Os blocos utilizados no Simulink, foram blocos já existentes e disponibilizados pelo programa, onde foram informados apenas o número de turbinas e sua potência nominal. Os parâmetros utilizados para modelagem do PAC até os

terminais de cada tipo de aerogerador foram os mesmos, pois uma das contribuições dessa dissertação é a comparação entre as máquinas.

Figura 30: Diagrama do sistema elétrico de potência modelado



Fonte: A autora, 2020

Tabela 9: Localização e potência instalada do parque eólico

| Parque Eólico   | Potência | Coordenadas   |              |
|-----------------|----------|---------------|--------------|
|                 |          | Latitude      | Longitude    |
| Cerro Chato I   | 30 MW    | 30°50'37.1" S | 55°43'8.3"W  |
| Cerro Chato II  | 30 MW    | 30°49'37.9"S  | 55°41'16.8"W |
| Cerro Chato III | 30 MW    | 30°48'21.1"S  | 55°43'4.7"W  |

Fonte: (SINDAT, 2020)

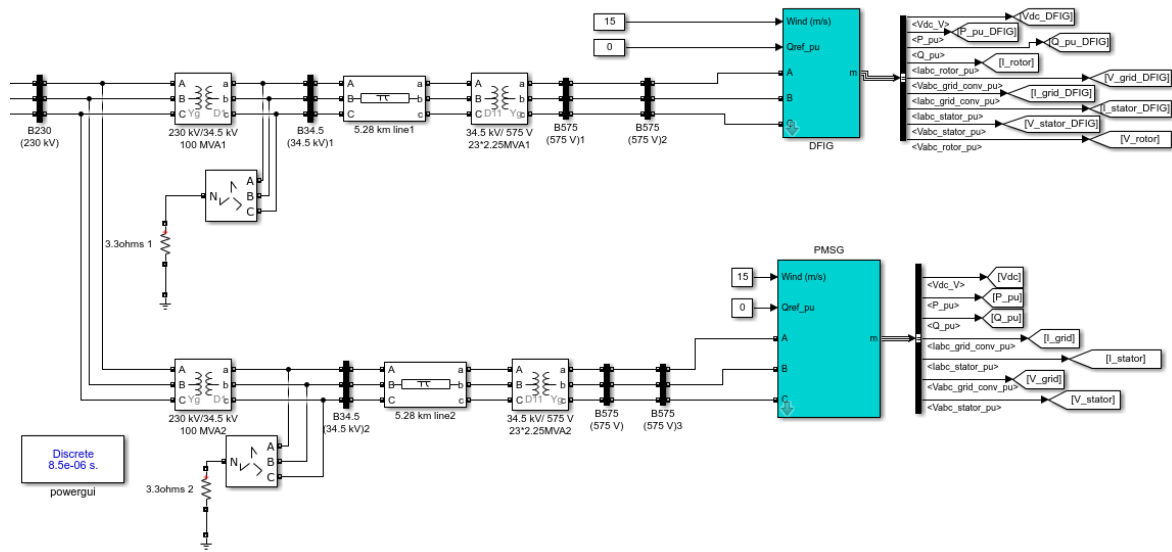
A rede coletora é conectada ao sistema de transmissão através de transformadores estrela aterrada- estrela aterrada (Yg-Yg). De cada transformador 230/34,5 kV da Subestação Cerro Chato, parte uma rede de média tensão até os barramentos de cada bloco equivalente de aerogerador com uma linha de 5,28km, obtido da média do comprimento dos 3 circuitos dos 3 complexos estudados. Cada bloco de aerogerador é composto por 23 turbinas com uma potência de 2MW do modelo DFIG e PMSG. Os dados dos transformadores são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Dados dos transformadores dos aerogeradores

| Dados            | Valores       |
|------------------|---------------|
| Potência Nominal | 2 MW          |
| Tensão Nominal   | 34,5/0,575 kV |
| Frequência       | 60 Hz         |
| Conexão          | $\Delta/Y$    |

Fonte: A autora, 2020

Figura 31: Instalação interna do parque eólico



Fonte: A autora, 2020

### 4.3 Formulação dos Casos e Cenários

Esta seção descreve os casos de faltas e cenários de geração formulados para avaliar os impactos do afundamento de tensão em parques eólicos inseridos em um sistema de transmissão.

#### 4.3.1 Casos de Faltas

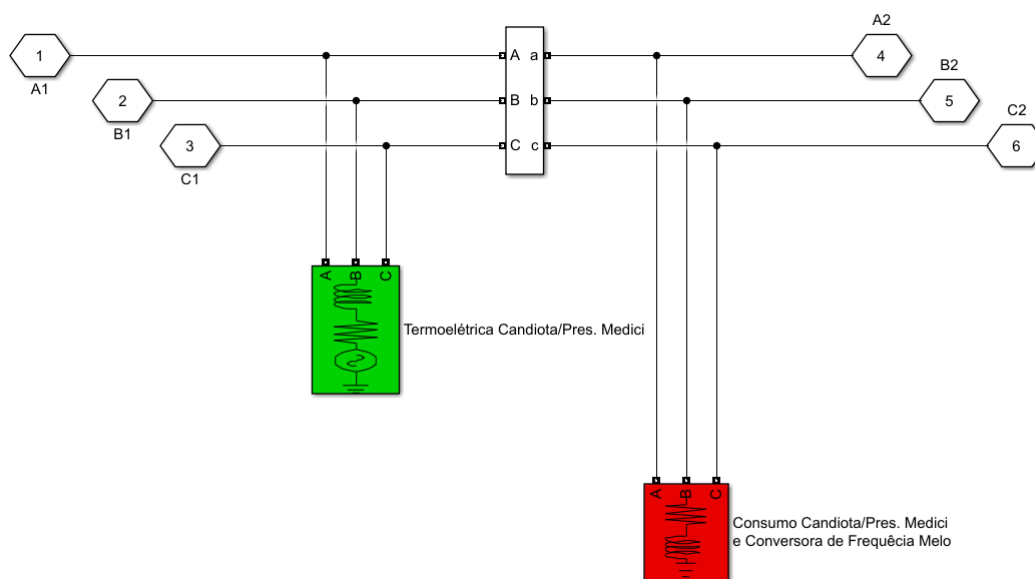
Foram consideradas cinco condições de faltas, aplicadas no meio de cada linha de transmissão. As faltas tem uma duração de 100ms, foi adotado essa duração devido ser um tempo adequado para medições de afundamentos de tensão. As faltas são de impedância zero para retratar o pior cenário para avaliar o comportamento dos aerogeradores. São apresentados os resultados do afundamento de tensão nos terminais das turbinas eólicas, sobretensão no link DC, sobrecorrentes do lado do gerador e da rede e redução da potência ativa injetada na rede durante o afundamento de tensão.

#### 4.3.2 Cenário de Geração

A Figura 32 mostra a usina de carvão Presidente Médici o qual foi utilizada como cenário de geração e que esta localizada no SEP na barra de número 19. Duas condições de operação foram assumidas para a termoeletrica: em serviço e fora de serviço.

O primeiro cenário supõe que a termoeletrica esteja em operação. Esse cenário visa avaliar a influência individual da termoeletrica no SEP na ocorrência de afundamentos de tensão. O segundo cenário supõe que a termoeletrica não esteja em operação.

Figura 32: Usina termoeétrica Presidente Médici



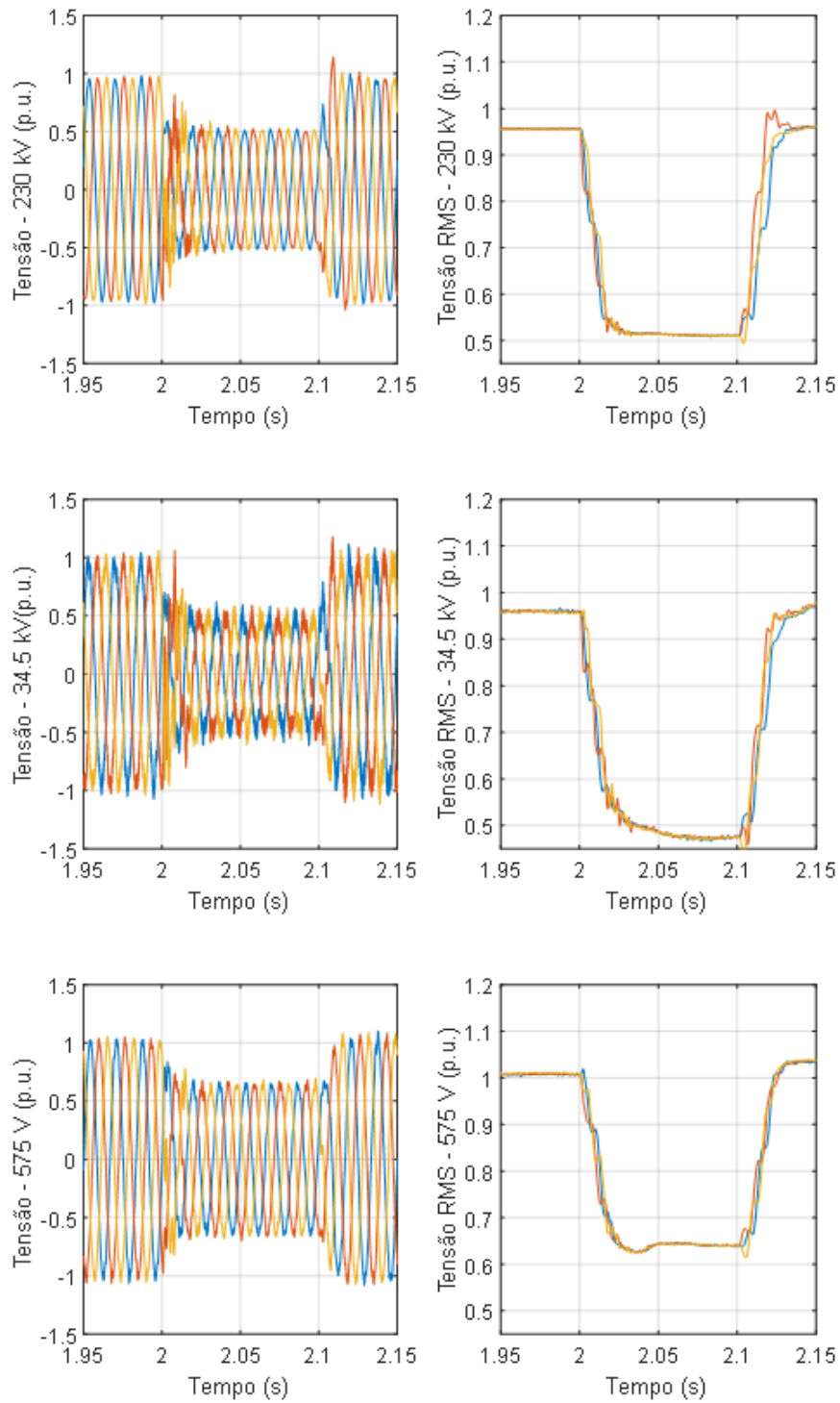
Fonte: A autora, 2020

#### 4.4 Consideração da Propagação dos Afundamentos de Tensão

Nesse estudo foi considerado a propagação do afundamento de tensão, desde o nível de transmissão, barramento de 230 kV, percorrendo o transformador do sistema de coleta centralizado, barramento de 34,5 kV, até chegar aos terminais dos aerogeradores, barramento de 575 V. O terminal do aerogerador é o barramento de estudo para as análises da magnitude do afundamento.

As Figuras 33 e 34 mostram a propagação do afundamento de tensão ocasionado por uma falta trifásica a terra em uma das linhas do SEP considerando os cenários de geração. Assim pode-se observar o comportamento da magnitude e o tipo de afundamento gerado em cada barramento. O afundamento de tensão originado por uma falta simétrica não sofre alteração na sua classificação, independentemente do tipo de conexão dos transformadores. A classificação do tipo de afundamento é descrito na seção 2.2.2. Observando as Figuras 33 e 34 nota-se que o afundamento não muda sua classificação durante a propagação, permanecendo afundamento do tipo A. Para o primeiro caso onde a termoeétrica está operante, Figura 33, há uma variação da magnitude durante a propagação, resultando em um afundamento de tensão de 0,628 p.u nos terminais dos aerogeradores. Para o segundo caso onde a termoeétrica está fora de operação, Figura 34, a magnitude do afundamento de tensão é de 0,432 p.u medido nos terminais dos aerogeradores. Como se observa, a magnitude do afundamento que se propaga até o lado de baixa tensão do transformador dos aerogeradores é menor quando a termoeétrica está fora de operação. Para os dois casos o requisito LVRT é atendido.

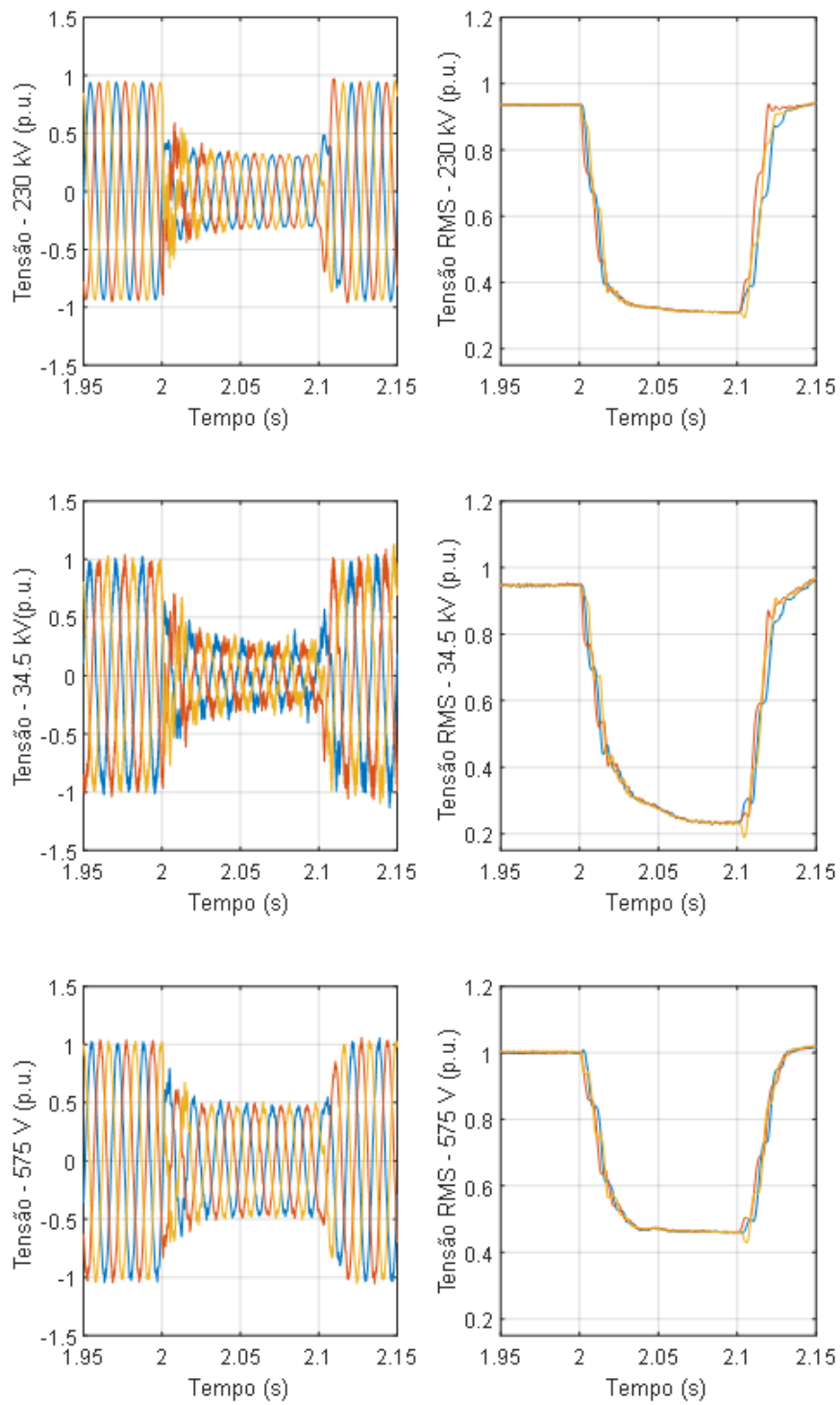
Figura 33 – Propagação do afundamento de tensão a nível de transmissão para uma falta ABCG com termoeletrica em operação



Fonte: A autora, 2020



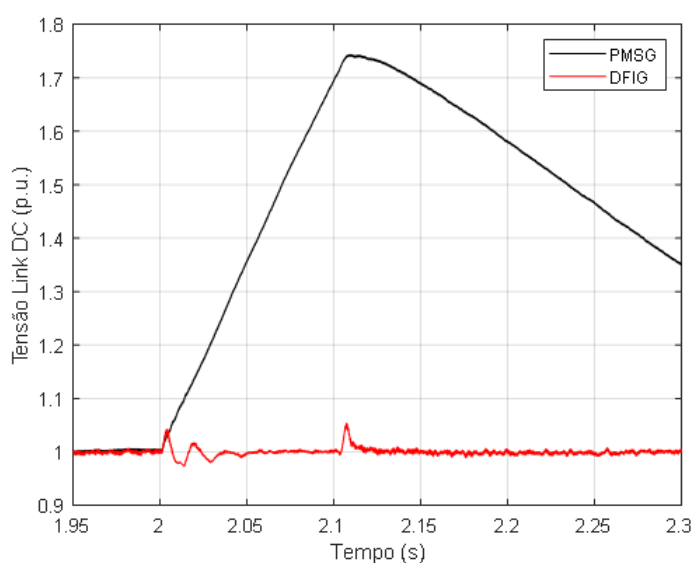
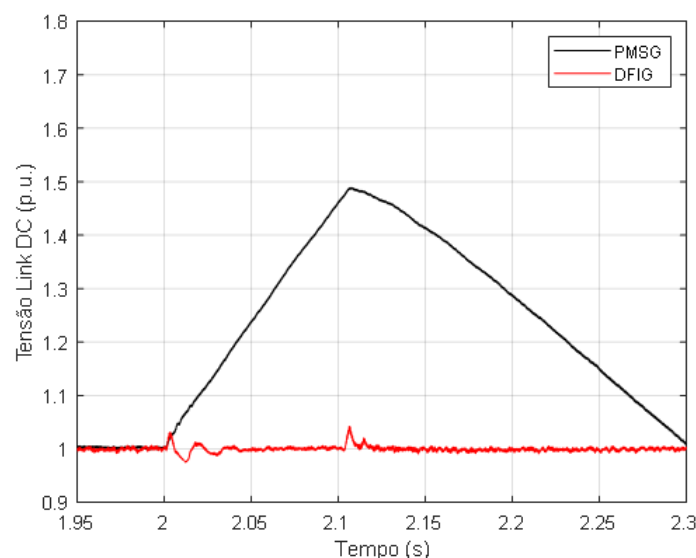
Figura 34 – Propagação do afundamento de tensão a nível de transmissão para uma falta ABCG com termoelétrica fora de operação



Fonte: A autora, 2020

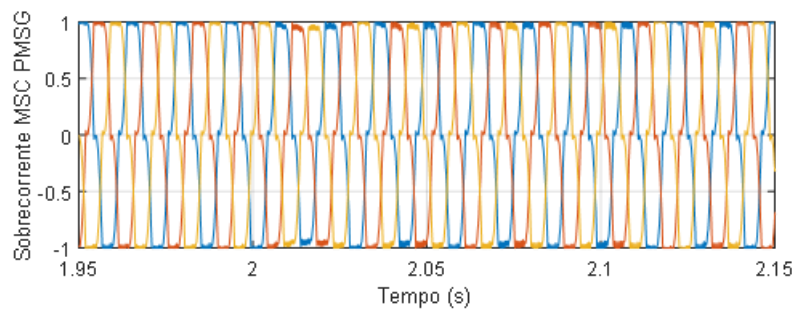
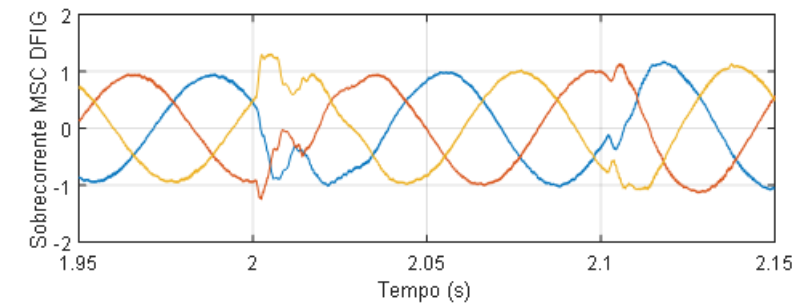
A Figura 35 apresenta a sobretensão no link DC observada durante uma falta ABCG. Observa-se que a tensão do link DC da turbina equivalente DFIG para ambos cenários consegue se manter dentro de uma faixa de 0,98- 1,1 p.u, devido à capacidade do conversor GSC em mantê-la constante. A sobretensão gerada pelas turbinas PMSG atingiu aproximadamente 2 p.u, quase o dobro em relação ao aerogerador DFIG devido a seu conversor ser conectado diretamente ao estator da máquina. A sobrecorrente do conversor MSC é exibida na Figura 36, vê-se que a corrente no MSC para turbinas equivalentes do tipo PMSG é desconsiderada, pois o gerador síncrono é desacoplado da rede pelo seu conversor de potência máxima. Já na Figura 37 é mostrada a sobrecorrente no GSC ocasionada durante a falta, onde podem ser observadas maiores sobrecorrentes na rede quando a termoelétrica está fora de operação.

Figura 35 – Tensão Link DC gerada durante um falta ABCG com a termoelétrica em operação (superior) e fora de operação(inferior)

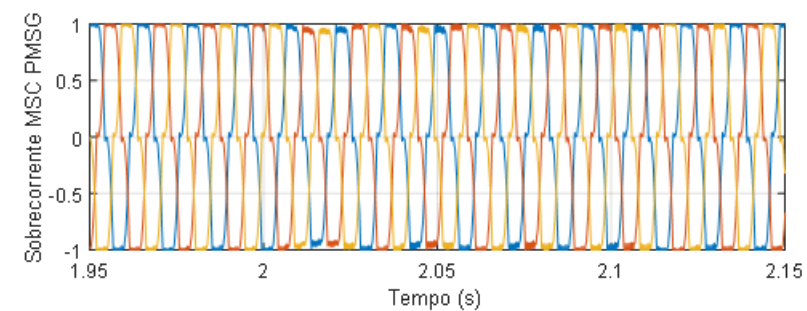
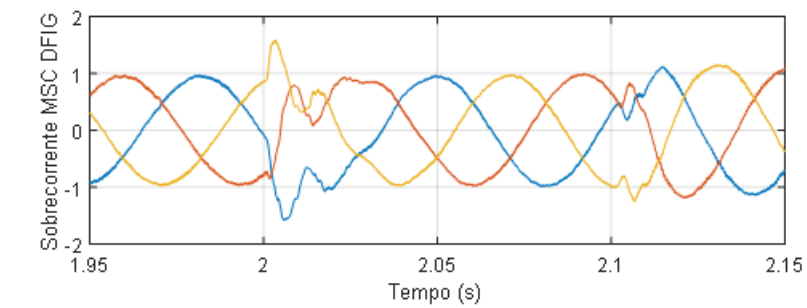


Fonte: A autora, 2020

Figura 36 – Sobrecorrente do conversor MSC gerada durante um falta ABCG com a termoelétrica em operação (gráficos 1 e 2) e fora de operação (gráficos 3 e 4)



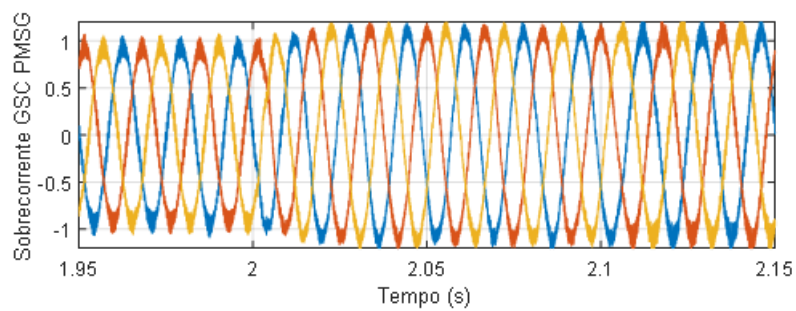
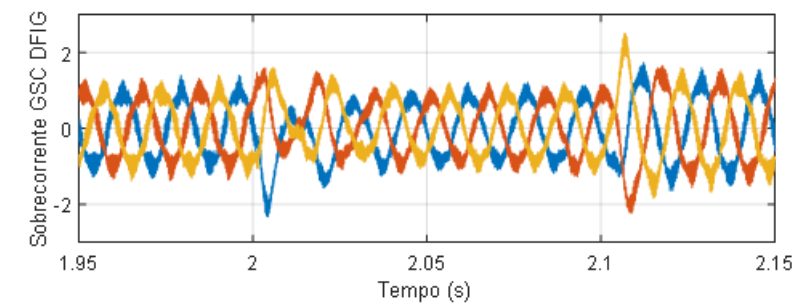
Gráficos 1 e 2



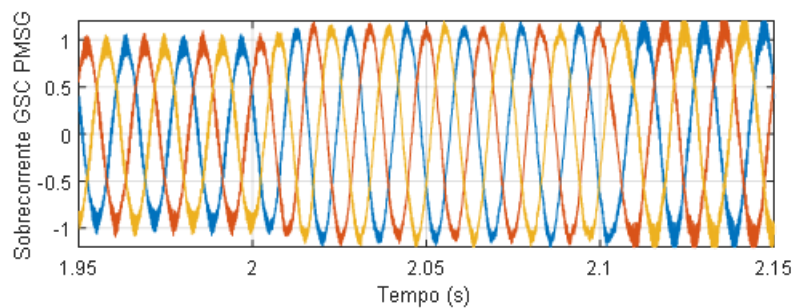
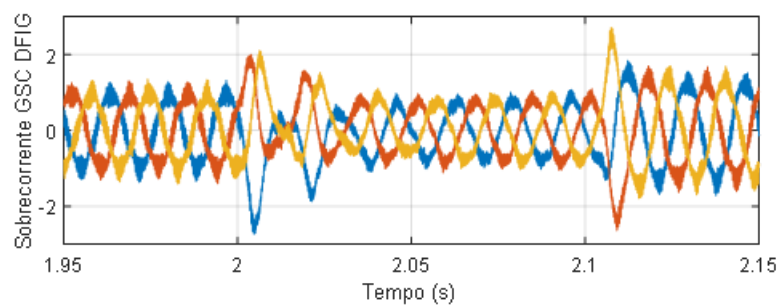
Gráficos 3 e 4

Fonte: A autora, 2020

Figura 37 – Sobrecorrente do conversor GSC gerada durante um falta ABCG com a termoelétrica em operação (gráficos 1 e 2) e fora de operação (gráficos 3 e 4)



Gráficos 1 e 2



Gráficos 3 e 4

Fonte: A autora, 2020

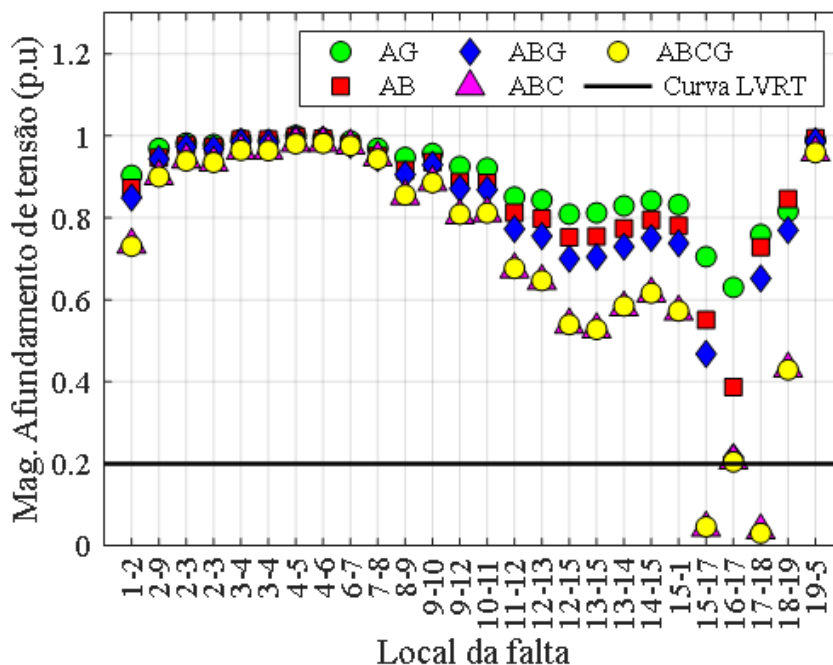
## 4.5 Avaliação do Requisito LVRT

O parque eólico pode ser desconectado da rede devido a afundamentos de tensão que permanecem abaixo das curvas padrão do LVRT. A duração da falta simulada é inferior a 500 ms. Para afundamentos com duração inferior a 500 ms, o aerogerador deve suportar até 0,2 p.u de magnitude de afundamento de tensão de acordo com o código de rede brasileiro.

As Figuras 38 e 39 mostram a magnitude do afundamento de tensão para faltas simétricas e assimétricas quando comparadas ao padrão brasileiro (ONS, 2019): monofásica (AG), bifásica (AB), bifásica aterrada (ABG), trifásica (ABC) e trifásica aterrada (ABCG).

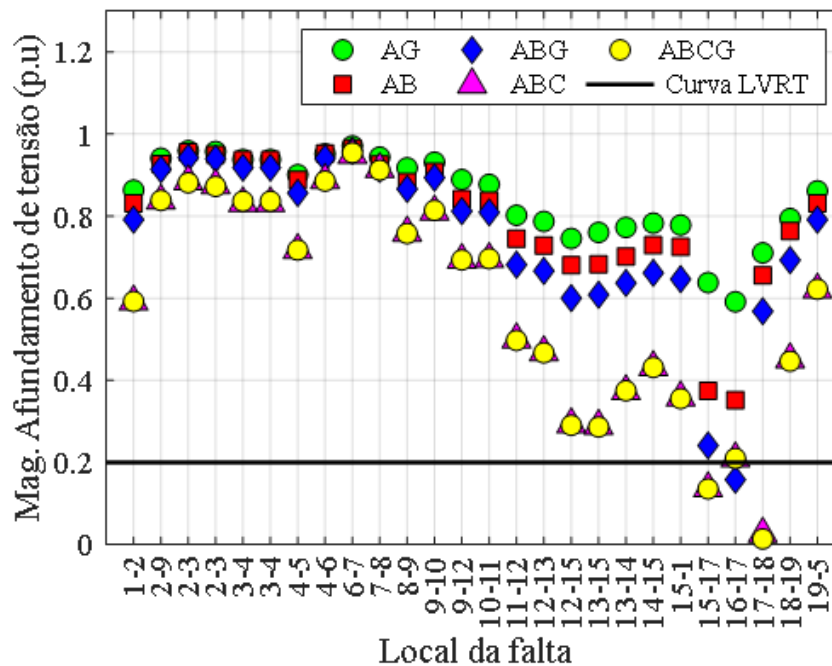
Na Figura 38, cenário com a termoeletrica operante, as faltas simétricas causaram afundamentos de tensão abaixo de 0,2 p.u, nas linhas entre as barras 16-17, 17-15 e 17-18, para ambos os tipos de faltas. As faltas que causam menor magnitude são as mais próximas ao barramento 16, que é precisamente a barra onde o parque eólico de Cerro Chato está conectada. A falta ABC mais crítica gerou um afundamento com magnitude de 0,03 p.u. a falta ocorreu na linha entre as barras 17-18. Para todos os outros casos, o parque deve continuar em operação. Na Figura 39, cenário com a termoeletrica não operante, além das faltas simétricas, as faltas bifásicas à terra ocasionaram magnitudes de tensão inferiores a 0,2 pu, levando à desconexão do parque.

Figura 38 – Resultados requerimentos LVRT: considerando a termoeletrica em operação



Fonte: A autora, 2020

Figura 39 – Resultados requerimentos LVRT: considerando a termoeletrica fora de operação



Fonte: A autora, 2020

## 4.6 Análises do Comportamento Dinâmico dos Aerogeradores

Esta seção concentra os resultados dos estudos de casos implementados com variação do cenário de geração para os cinco tipos de faltas. Todas as simulações de faltas foram realizadas no ponto de início da onda de 90°.

### 4.6.1 Cenário um: Termoeletrica em Operação

As Figuras 40 e 41 apresentam o comportamento da tensão do link DC para ambos tipos de aerogeradores. A turbina DFIG equivalente apresenta um comportamento mais aleatório com menores sobretensões quando comparado ao PMSG. As maiores sobretensões foram devido às faltas ABC e ABCG para ambos os tipos de geradores. As turbinas PMSG atingiram uma sobretensão de aproximadamente 2 p.u, muito maior que as sobretensões causado no DFIG, que não chegou a 1,1 p.u. As principais sobretensões ocorreram por faltas nas linhas próximas ao parque eólico Cerro Chato, entre as barras 16-17, 15-17 e 17-18.

As turbinas DFIG em situações de faltas podem manter sua tensão do link DC dentro da faixa de 1,01 - 1,07 p.u. Através da capacidade de armazenamento de energia no capacitor (ou na combinação de capacitores), o conversor GSC consegue manter a tensão DC quase constante (PENA; CLARE; ASHER, 1996b). O PMSG experimenta uma maior sobretensão no link DC, pois seu conversor de potência total é diretamente conectado ao estator da máquina. O desequilíbrio da potência que flui através dos conversores do PMSG durante uma falta é muito maior quando comparado ao DFIG.

Figura 40 – Sobretensão Link DC- DFIG: considerando a termoelétrica em operação

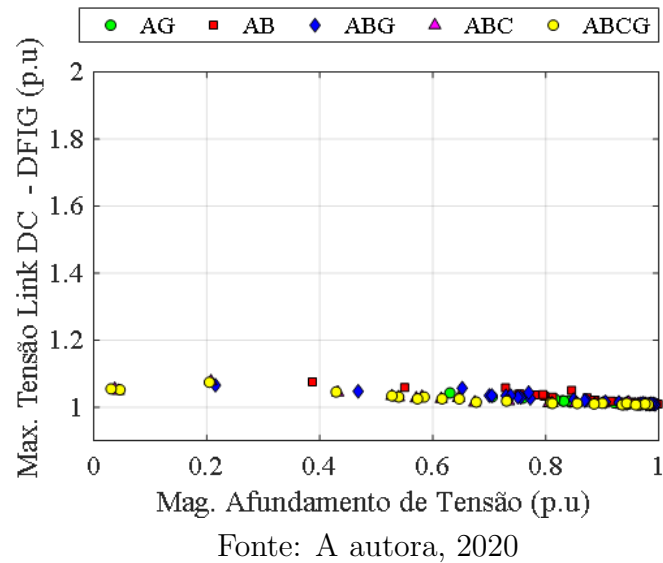
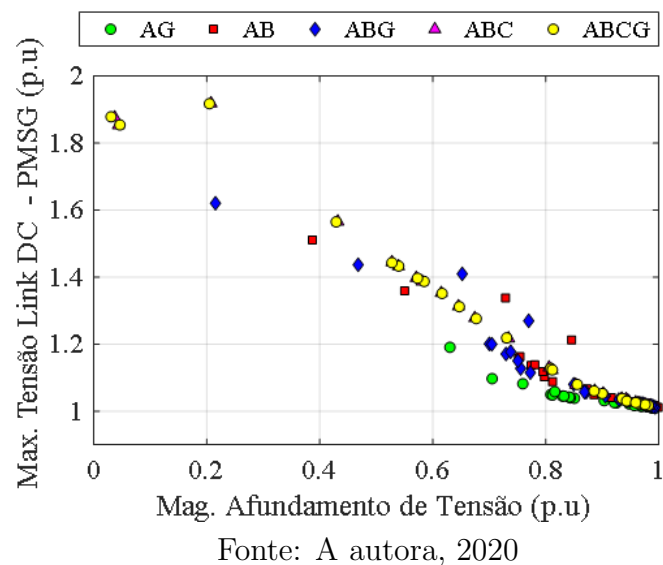


Figura 41 – Sobretensão Link DC- PMSG: considerando a termoelétrica em operação



O comportamento de ambos os geradores para correntes do MSC durante um afundamento de tensão é mostrada nas Figuras 42 e 43. A sobrecorrente do MSC para o PMSG é irrelevante, pois o gerador síncrono é desacoplado da rede pelo conversor de potência total. A eficácia do PMSG em enfrentar faltas pode ser vista na Figura 43. Apesar dos mais severos afundamentos serem devidos as faltas trifásicas, as principais sobrecorrentes do DFIG devem-se a faltas assimétricas por causa da componente de sequência negativa que aparecem nesse tipo de falta, conforme descrito em (MOHSENI; ISLAM; MASOUM, 2011b).

O comportamento de ambos os geradores para as correntes do GSC durante o afundamento de tensão é mostrado nas Figuras 44 e 45. A corrente GSC do DFIG é

Figura 42: Sobrecorrente MSC- DFIG: considerando a termoelétrica em operação

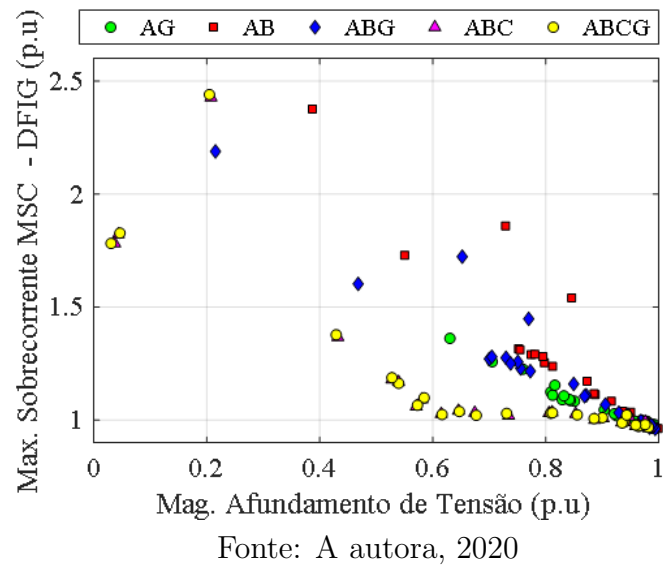
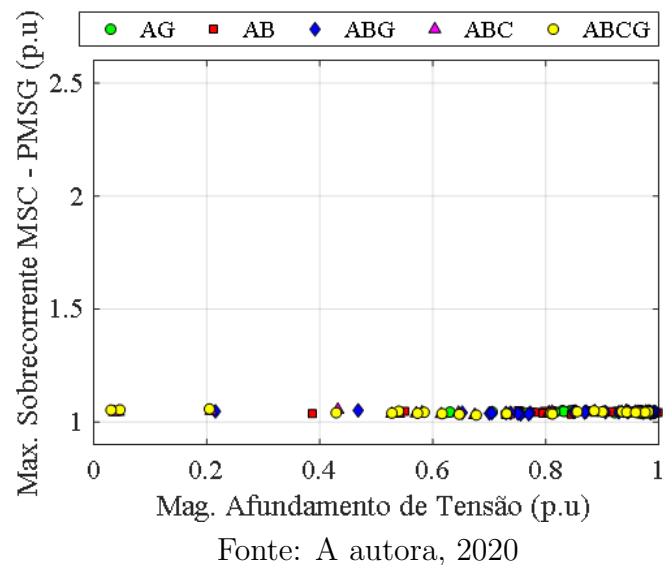


Figura 43: Sobrecorrente MSC- PMSG: considerando a termoelétrica em operação



alterada de acordo com o tipo de afundamento de tensão. Afundamentos de tensão causadas por faltas simétricas causaram menor sobrecorrente quando comparado às faltas assimétricas. Os afundamentos simétricos com magnitude entre 0,5 e 0,9 p.u apresentaram a mesma sobrecorrente. Por outro lado, a sobrecorrente do GSC diminuiu de acordo com o aumento da magnitude para afundamentos assimétrico. A sobrecorrente mais alta foi próxima de 4 p.u. para afundamentos com 0,2 p.u de magnitude causada por faltas ABCG, AB e ABG. O mesmo valor alto de sobrecorrente foi atingido durante um afundamento de tensão com 0,4 p.u de magnitude causado por uma falta AB.

A sobrecorrente no GSC do PMSG equivalente foi inferior ao DFIG para os



mesmos afundamentos de tensão. A mais alta sobrecorrente do GSC foi de 1,25 p.u atingida durante 0,57 p.u de afundamento de tensão causada por uma falta ABCG. Afundamentos de tensão simétricos e assimétricos na faixa de 0,4 a 0,8 p.u causaram sobrecorrentes entre 1,2 e 1,25 p.u. A sobrecorrente do GSC diminuiu de 1,25 para 1,1 p.u para afundamentos de tensão com magnitude entre 0,8 a 0,9 p.u.

Figura 44: Sobrecorrente GSC- DFIG: considerando a termoelétrica em operação

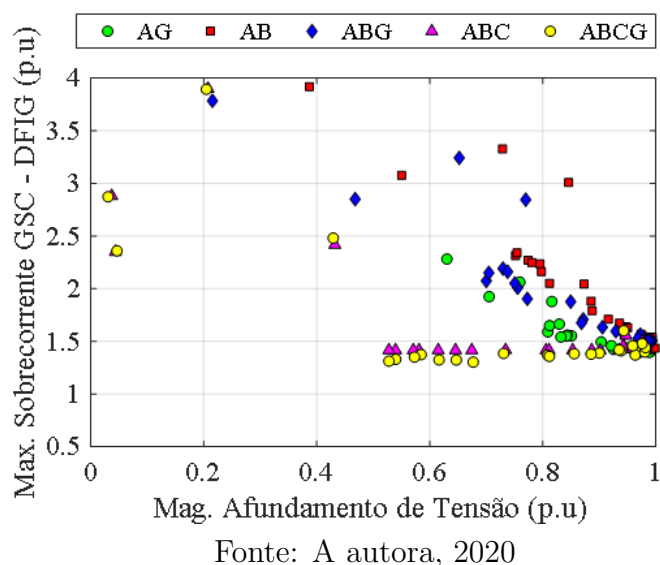
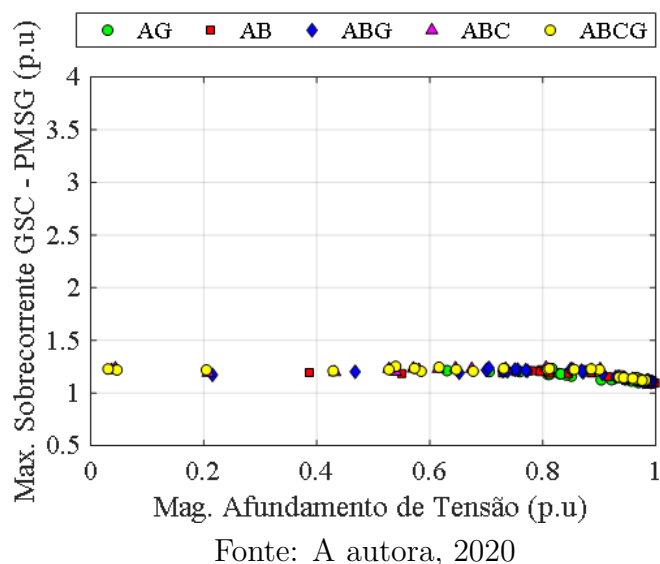


Figura 45: Sobrecorrente GSC- PMSG: considerando a termoelétrica em operação



As Figuras 46 e 47 mostram a mínima potência ativa injetada na rede durante a ocorrência de um afundamento de tensão para turbinas do tipo DFIG e PMSG. Para ambos aerogeradores, a redução na potência ativa é proporcional à magnitude do afundamento de tensão devido à limitação da sobrecorrente do GSC usado nos dois

tipos de turbinas eólicas. As imagens mostram uma dependência linear da potência ativa em função da magnitude do afundamento de tensão. Os casos das faltas AG mostraram a menor redução da potência ativa entre os cinco tipos de faltas. Ambos os geradores injetaram uma potência ativa mínima de 0,74 p.u para faltas AG. Para uma falta AB, é observado que a potência ativa mínima de ambos os geradores tinha um valor mínimo de 0,51 p.u. Já no caso da falta ABG, um valor mínimo de 0,4 p.u foi observado para os dois casos. Vale ressaltar que o afundamentos do tipo A foram os que mais afetaram a operação do parque, com aproximadamente 12% deles levando a uma injeção de potência ativa abaixo de 0,27 p.u.

Figura 46: Mínima potência- DFIG: considerando a termoelétrica em operação

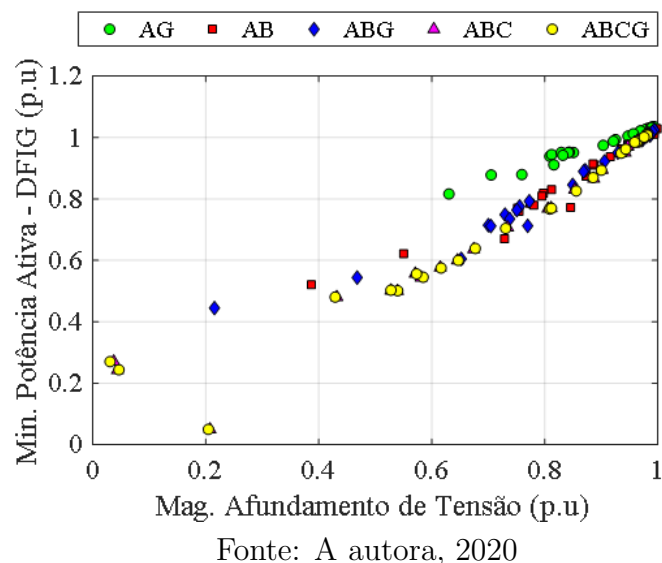
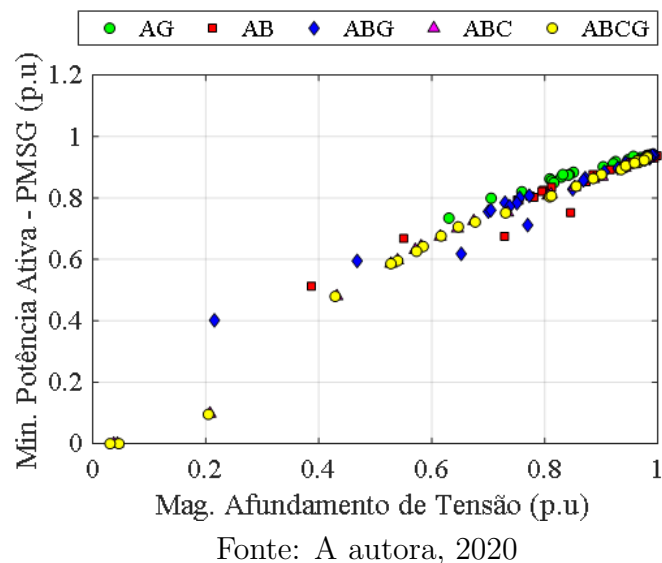


Figura 47: Mínima Potência- PMSG: considerando a termoelétrica em operação



Aproximadamente em 85% dos afundamentos de tensão simulados os aeroge-

radores mantiveram a injeção de potência ativa acima de 0,5 p.u no sistema. Os resultados mostram uma leve superioridade do PMSG em injetar potência ativa durante afundamentos de tensão com baixas magnitude.

#### 4.6.2 Cenário dois: Termoelétrica fora de Operação

O comportamento da tensão do link DC para os modelos DFIG e PMSG são apresentados nas Figuras 48 e 49, respectivamente. De acordo com a análise, a turbina PMSG equivalente apresentou um comportamento mais linear com maiores sobretensões comparado ao DFIG, assim como no caso de geração onde a termoelétrica esta em operação.

Figura 48 – Sobretensão Link DC- DFIG: considerando a termoelétrica fora de operação

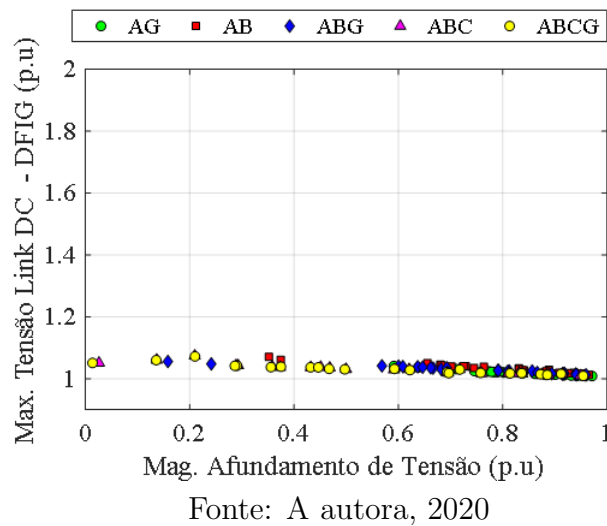
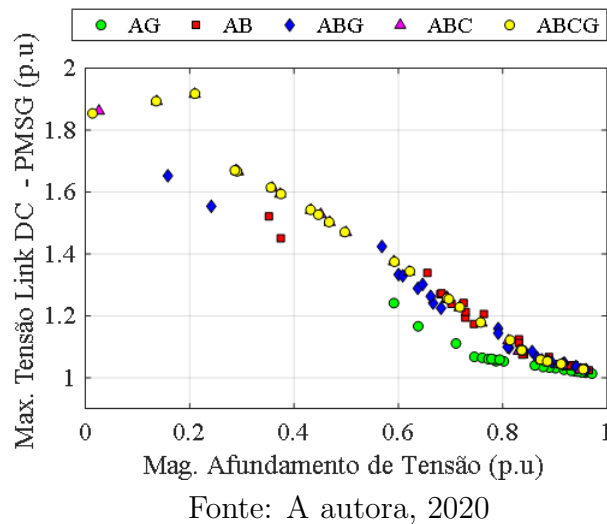


Figura 49 – Sobretensão Link DC- PMSG: considerando a termoelétrica fora de operação



Maiores valores de sobretensões para todos os cinco tipos de faltas comparando com o primeiro cenário. As faltas simétricas para ambos tipos de máquinas resultaram nas maiores sobretensões. Os aerogeradores do tipo DFIG, independente do cenário adotado, mostraram através dos resultados que o conversor GSC consegue manter a tensão link DC do aerogerador quase constante. Os aerogeradores do tipo PMSG, devido a sua estrutura de controle, padecem de grandes sobretensões, chegando bem próximo de 2 p.u.

As Figuras 50 e 51 apresentam o comportamento da corrente do conversor MSC para o DFIG e PMSG, respectivamente. Comparando os dois cenários de geração propostos observa-se que a magnitude do afundamento de tensão é menor para o caso da termoeletrica fora de operação e tem valores de sobrecorrentes maiores para os dois tipos de aerogeradores.

Figura 50 – Sobrecorrente MSC- DFIG: considerando a termoeletrica fora de operação

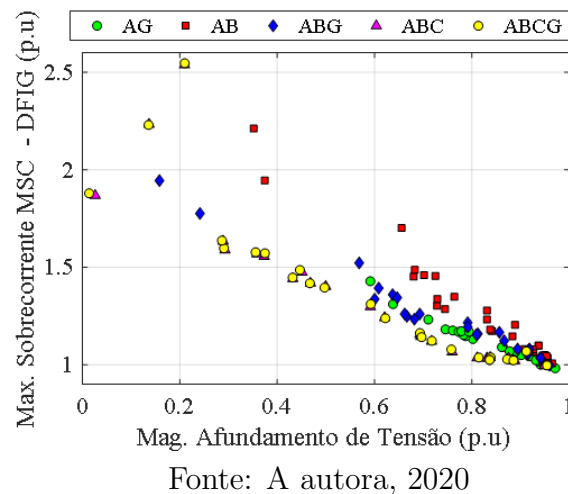
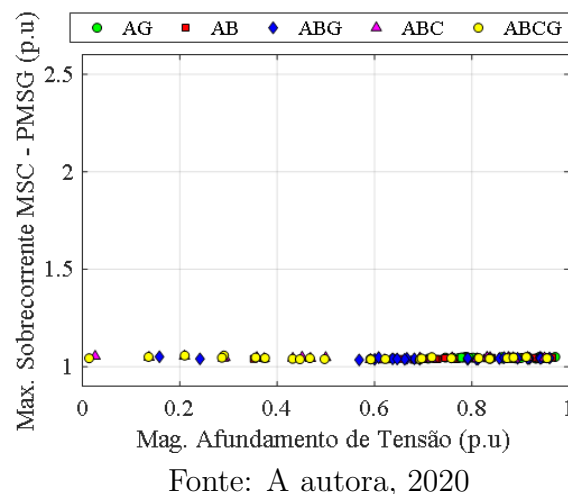
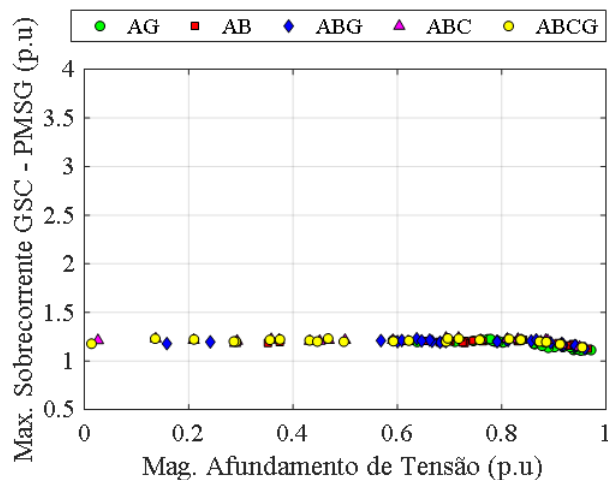


Figura 51 – Sobrecorrente MSC- PMSG: considerando a termoeletrica fora de operação



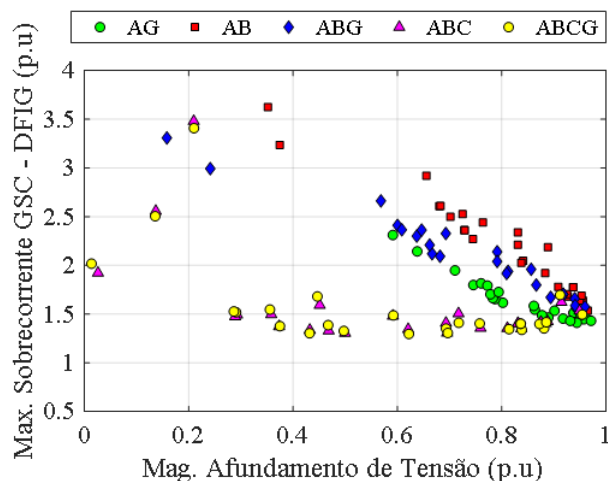
O comportamento das correntes do conversor GSC de ambos aerogeradores é apresentado nas Figuras 52 e 53. Menores valores de sobrecorrentes para as turbinas do tipo PMSG, Figura 52, são obtidos ao ser comparados com o primeiro cenário. Observa-se que os valores de sobrecorrentes conseguiram se manter constante entre uma faixa de 1,1 a 1,24 p.u para todos tipos de afundamentos de tensão.

Figura 52 – Sobrecorrente GSC- PMSG: considerando a termoelétrica fora de operação



Fonte: A autora, 2020

Figura 53 – Sobrecorrente GSC- DFIG: considerando a termoelétrica fora de operação



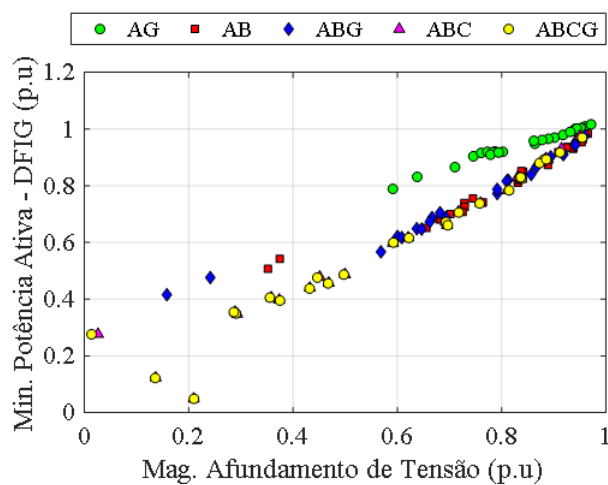
Fonte: A autora, 2020

As sobrecorrentes no conversor GSC de turbinas DFIG, Figura 53, foram maiores para afundamentos gerados por faltas nas linhas mais próximas do parque eólico. Afundamentos gerados por faltas simétricas provocaram valores menores de sobrecorrentes quando comparados com afundamentos gerados por faltas assimétricas,

com exceção dos afundamentos gerados por faltas na linha diretamente ligada ao parque. A sobrecorrente gerada por afundamentos de tensão devido a faltas AG teve um comportamento linear e mais controlado para faltas em todas as linhas.

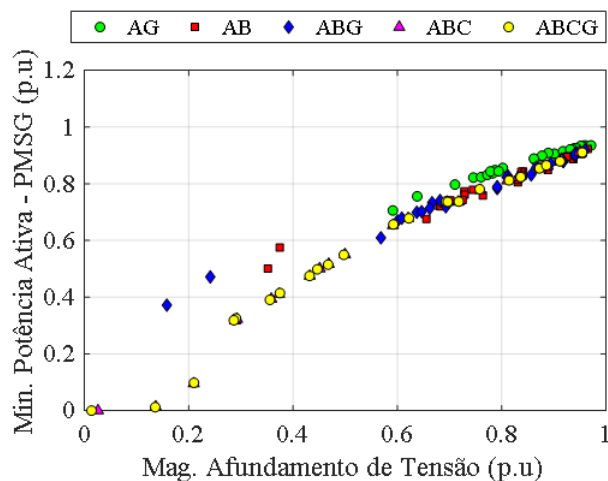
A mínima potência ativa injetada na rede é apresentada nas Figuras 54 e 55 para os aerogeradores DFIG e PMSG, respectivamente. A potência apresenta para todos os tipos de faltas valores menores comparado ao primeiro cenário independente do tipo de máquina.

Figura 54 – Mínima potência- DFIG: ângulo  $90^\circ$  considerando a termoelétrica fora de operação



Fonte: A autora, 2020

Figura 55 – Mínima potência- PMSG: considerando a termoelétrica fora de operação



Fonte: A autora, 2020

A redução da potência injetada foi maior para afundamentos devido a faltas simétricas em linhas próximas ao parque eólico. Comparando os dois tipos de aerogeradores pode-se concluir que o PMSG possui valores menores de potência durante um afundamento de tensão.

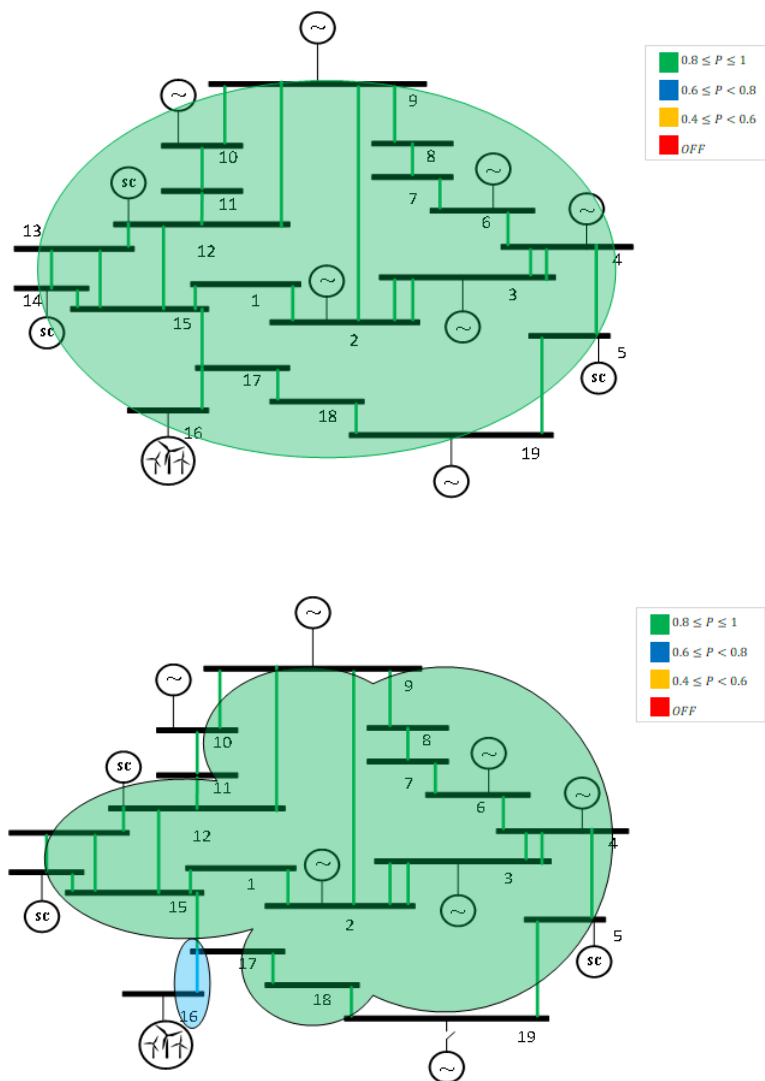
## 4.7 Levantamento da Área de Vulnerabilidade

As Figuras 56 - 60 apresentam as áreas do SEP, identificadas em cores diferentes, onde faltas provocam variação da potência ativa gerada no parque eólico. Para ambas as turbinas, a redução na potência é proporcional à magnitude do afundamento de tensão devido à limitação de sobrecorrente no controle do GSC. São apresentados os dois cenários considerando a operação ou não da usina termoeétrica relevante na região.

A Figura 56 mostra a área de vulnerabilidade gerada para faltas AG considerando os cenários de geração. Ao comparar ambos os cenários, nota-se que: para o primeiro cenário, termoeétrica em operação, este tipo de falta terá menos impacto, com uma potência injetada de até 0,8 p.u. Para o segundo cenário, termoeétrica fora de operação, com exceção de faltas na linha ligada diretamente ao parque eólico, a potência injetada foi de até 0,8 pu para afundamentos gerados por faltas nas outras linhas do sistema. Para faltas AB, segundo a área de vulnerabilidade mostrada na Figura 57, para ambos os cenários faltas nas linhas mais distantes do parque causaram uma redução mínima da potência injetada de 0,8 p.u e para linhas mais próximas uma redução de até 0,4 p.u. Para faltas ABG, a área de vulnerabilidade mostrada na Figura 58, apresenta uma certa harmonia para os dois cenários em estudo, onde um maior número de linhas geram uma redução da potência injetada para valores de até 0,8 p.u.

As faltas simétricas levaram o SEP aos casos mais severos de afundamento de tensão e as maiores reduções da potência ativa. Este foi o único tipo de falta que causou o desligamento do parque eólico. Pode-se observar pelas Figuras 59 e 60 que as áreas de vulnerabilidade em relação a potência mínima injetada na rede durante um afundamento de tensão são semelhantes para ambos tipos de faltas simétricas, isto se dá devido o sistema ser equilibrado. Verifica-se que a área de vulnerabilidade considerando o desligamento do parque eólico é menor quando a usina termoeétrica conectada na barra 19 está em operação. A área de vulnerabilidade para faltas simétricas considerando um limite de potência injetada de 0,8 p.u é menor para o caso em que a usina termoeétrica está fora de operação.

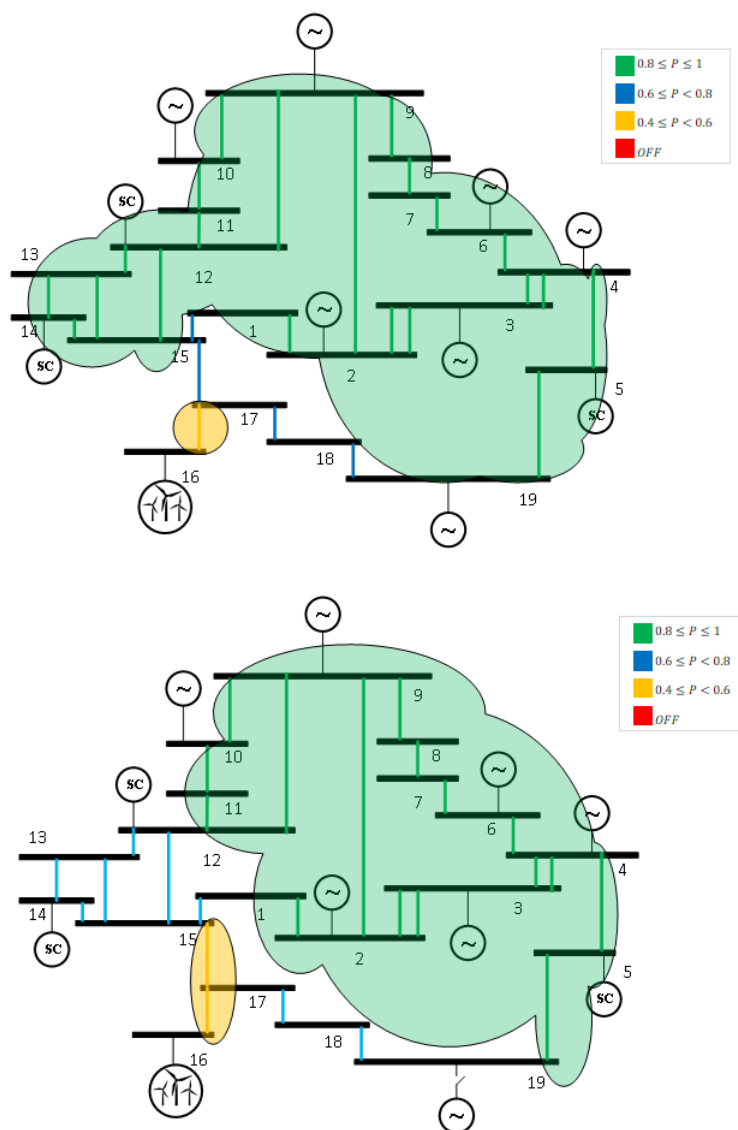
Figura 56 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta AG com a termoelétrica em operação (superior) e fora de operação (inferior)



Fonte: A autora, 2020

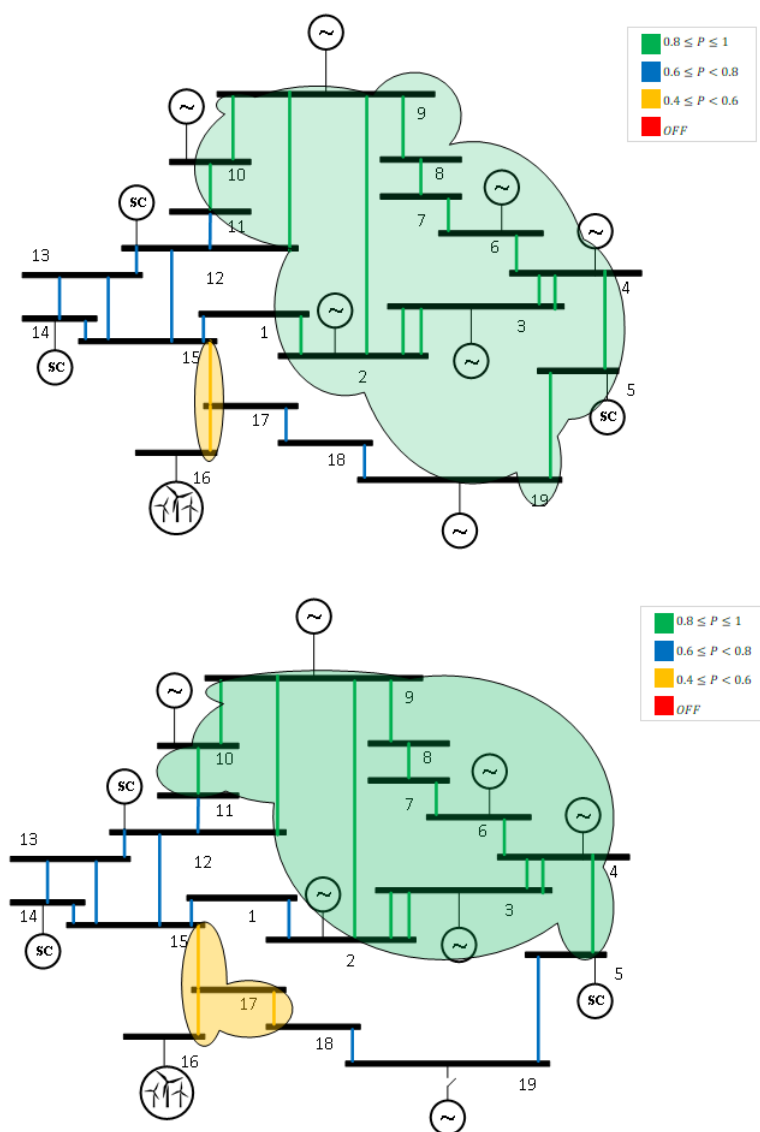


Figura 57 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta AB com a termoeletrica em operação (superior) e fora de operação (inferior)



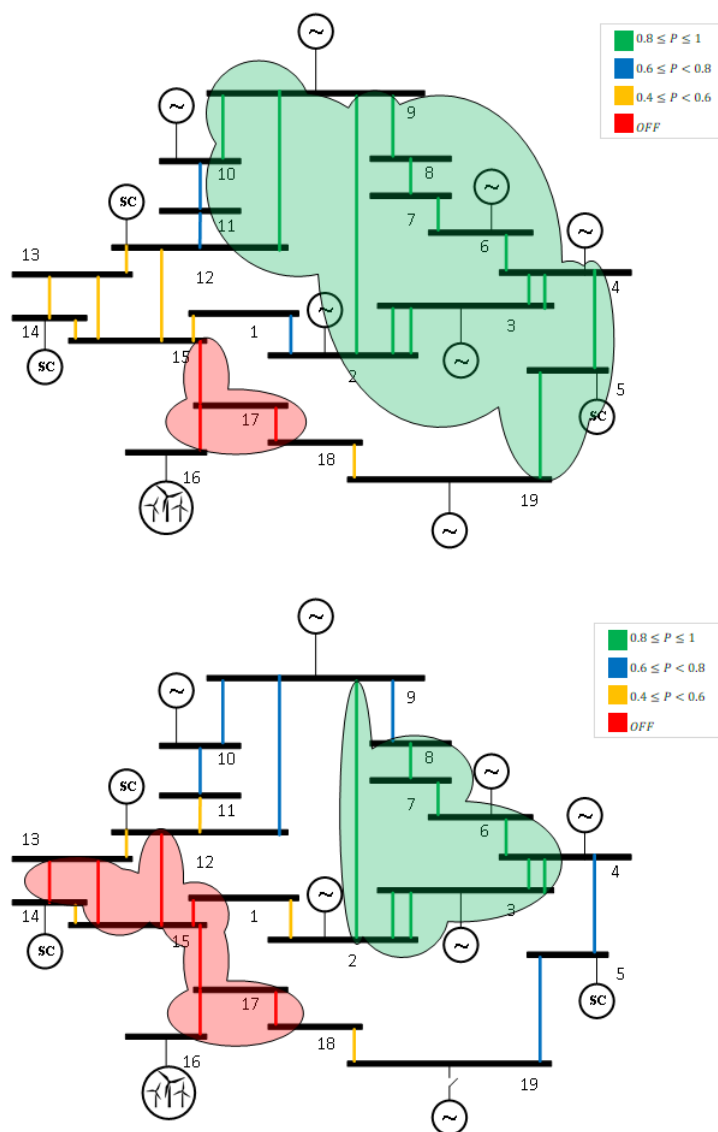
Fonte: A autora, 2020

Figura 58 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta ABG com a termoeétrica em operação (superior) e fora de operação (inferior)



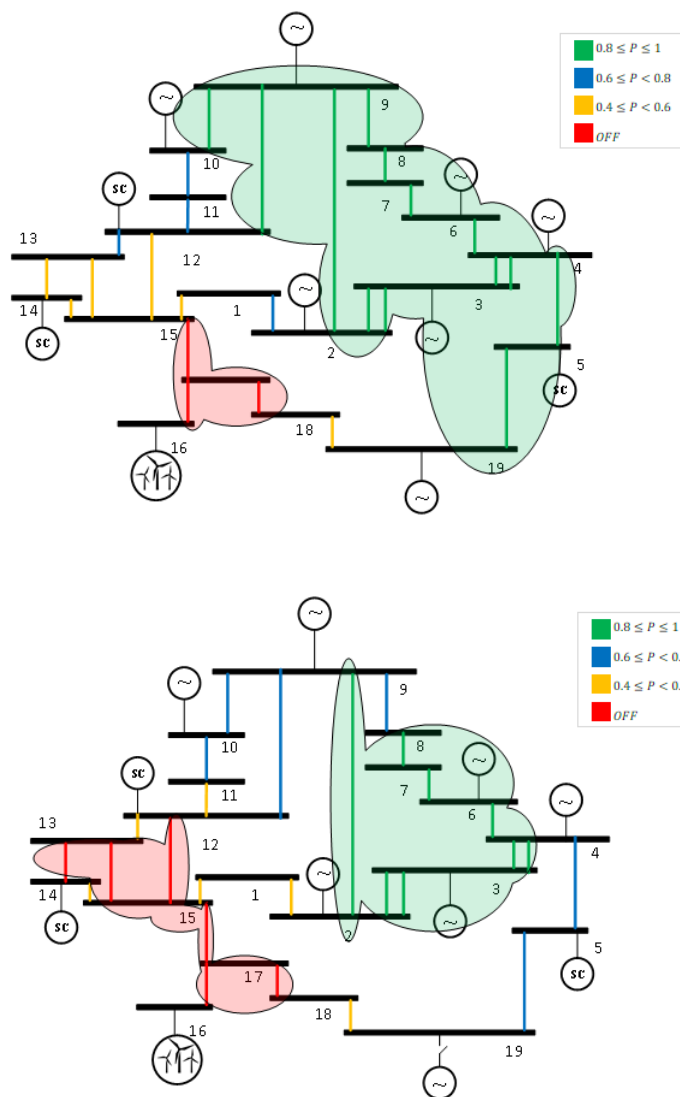
Fonte: A autora, 2020

Figura 59 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta ABC com a termelétrica em operação (superior) e fora de operação (inferior)



Fonte: A autora, 2020

Figura 60 – Área de vulnerabilidade considerando a potência ativa gerada durante uma falta ABCG com a termoelétrica em operação (superior) e fora de operação (inferior)



Fonte: A autora, 2020

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho. Como também, serão apresentados as melhorias e trabalhos futuros que podem ser realizados neste estudo.

### 5.1 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma metodologia para analisar o desempenho de parques eólicos frente a afundamentos de tensão. O desempenho analisado está baseado no comportamento dinâmico do aerogerador durante afundamentos e na capacidade de manter o nível de geração de potência ativa. Além disso, foi realizado um estudo comparativo do comportamento dinâmico dos modelos dos aerogeradores PMSG e DFIG. A metodologia proposta é capaz de prover os resultados necessários para análise do requisito LVRT e possibilita realizar um comparativo entre os dois tipos de aerogeradores adotados na modelagem do parque eólico. De maneira geral, os resultados obtidos nos estudos de caso verificam com sucesso a análise teórica.

No decorrer deste estudo verificou-se que existem inúmeras maneiras de simular parques eólicos e cada interpelação adotada influencia na escolha dos modelos que irão compor o estudo. Neste trabalho foi estabelecido o agrupamento das componentes do parque eólico, sendo elas as turbinas, cabos, transformadores e filtros resultando em um modelo único de máquina equivalente e, conseqüentemente, com menos esforço computacional. A modelagem é implementada com a integração dos programas MATLAB<sup>®</sup> e Simulink. Destaca-se a versatilidade da codificação implementada, que pode ser adaptada para distintos equipamentos e critérios, bastando utilizar outros dados de entrada para gerar cenários diferentes.

Os resultados obtidos mostraram que os afundamentos de tensão são menos severos em termos da magnitude quando se propagam do sistema de transmissão para os terminais das turbinas. Conforme discutido no Capítulo 4, verificou-se que esta influência é importante para uma análise mais detalhada do afundamento de tensão. Além disso, notou-se que a magnitude é a principal característica de um afundamento de tensão: se a magnitude for abaixo de um certo nível, a corrente do conversor do DFIG e a tensão do link DC do PMSG perderiam o controle e a superação desses parâmetros poderia danificar a máquina. Com o levantamento da magnitude do afundamento de tensão em todo o SEP para todos os tipos de faltas e cenários observa-se que o requisito LVRT foi atendido em aproximadamente 96% dos

casos simulados, ou seja, o parque permaneceria em operação na ocorrência destes eventos. Apenas 4% dos casos desligariam o parque eólico.

Outra consideração importante realizado neste trabalho foi que afundamentos de tensão devido a faltas em locais diferentes, mas com a mesma magnitude, podem afetar as turbinas eólicas de maneiras diferentes. As faltas monofásicas ocasionaram menos impacto ao SEP durante um afundamento de tensão. Entretanto, apenas as faltas trifásicas que ocorram em linhas de transmissão muito próximas ao parque geram um afundamento de tensão que pode desligar os aerogeradores.

Ademais, neste estudo, pôde-se concluir que os aerogeradores do tipo PMSG apresentam um comportamento levemente superior em relação ao aerogerador DFIG considerando a injeção de potência ativa durante afundamentos de tensão. Por conseguinte, o aerogerador do tipo DFIG é mais vulnerável a afundamentos de tensão do que a tecnologia PMSG. Conseqüentemente, as correntes do conversor do DFIG, para faltas assimétricas, atingiram valores elevados, mesmo com magnitude de afundamento acima de 0.7 p.u. Enquanto o aerogerador PMSG equivalente sofre uma maior sobretensão, atingindo o dobro da sobretensão sofrida pelo DFIG.

A operação da termoelétrica utilizada como cenário de geração mostrou uma importante relevância para o desempenho do parque eólico frente a afundamentos de tensão quando está em operação tendo uma injeção melhor de potência ativa na rede durante a ocorrência do mesmo.

Em suma, neste trabalho pôde-se determinar através de um estudo de caso o desempenho de parques eólicos frente à afundamento de tensão considerando a propagação do afundamento de tensão, verificar o requisito LVRT e o comportamento dinâmicos dos aerogeradores. Deste modo, pôde-se identificar diferenças e realizar considerações sobre as metodologias e abordagens realizadas.

## 5.2 Trabalhos futuros

Diante do exposto na pesquisa, são sugeridos como futuros trabalhos:

- analisar outras características dos afundamentos de tensão, tais como o salto do ângulo de fase e alterações no ponto na onda de início do afundamento e de recuperação da tensão;
- analisar os impactos de outras perturbações, como sobretensões sustentadas, de curta duração e transitórias;
- analisar outros aspectos relacionados ao comportamento das máquinas, tais como nível de distorção harmônica e controle de potências ativa e reativa.

## REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Brasil fica em 5º colocado no Ranking Mundial de capacidade eólica nova onshore instalada em 2018**. São Paulo, Brasil, 2019.

ACKERMANN, T. **Wind Power in Power Systems**. New Jersey, EUA: Wiley John & Sons, 2012.

ALAM, M. R.; MUTTAQI, K. M.; BOUZERDOUM, A. Characterizing Voltage Sags and Swells Using Three-Phase Voltage Ellipse Parameters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, EUA, v. 51, n. 4, p. 2780–2790, July 2015.

ALSMADI, Y. M. *et al.* Detailed Investigation and Performance Improvement of the Dynamic Behavior of Grid-Connected DFIG-Based Wind Turbines Under LVRT Conditions. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, EUA, v. 54, n. 5, p. 4795–4812, 2018.

AMEI, K. *et al.* A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit. *In*: PROCEEDINGS OF THE POWER CONVERSION CONFERENCE, 2., 2002, Osaka. **Proceedings** [...] Osaka: Nagaoka, 2002. v. 3, p. 1447–1452.

ANEEL. **PRODIST Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, Brasil, 2016.

ARANI, M. F. M.; MOHAMED, Y. A. I. Assessment and Enhancement of a Full-Scale PMSG-Based Wind Power Generator Performance Under Faults. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, New York, EUA, v. 31, n. 2, p. 728–739, 2016.

BAGHERI, A. *et al.* Importance of Voltage-Dip Knowledge for Improving Fault-Ride-Through of Wind-Power Installations. *In*: SOLAR & WIND INTEGRATION WORKSHOP, 8., 2018, Stockholm. **Proceedings** [...] Stockholm: IET, 2018.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding Power Quality Problems: voltage sags and interruptions**. New York, EUA: IEEE Press series on power engineering, 2000.

BOLLEN, M. H. J. Voltage recovery after unbalanced and balanced voltage dips in three-phase systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, EUA, v. 18, n. 4, p. 1376–1381, Oct 2003.

- BOLLEN, M.; ZHANG, L. Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults. **Electric Power Systems Research**, Amsterdã, Holanda, v. 66, n. 1, p. 59 – 69, 2003. Power Quality.
- CAMARILLO-PEÑARANDA, J. R.; RAMOS, G. Characterization of Voltage Sags Due to Faults in Radial Systems Using Three-Phase Voltage Ellipse Parameters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, EUA, v. 54, n. 3, p. 2032–2040, May 2018.
- CAMARILLO-PEÑARANDA, J. R.; RAMOS, G. Fault Classification and Voltage Sag Parameter Computation Using Voltage Ellipses. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, EUA, v. 55, n. 1, p. 92–97, Jan 2019.
- CARPINELLI, G. *et al.* Methods for Assessing the Robustness of Electrical Power Systems Against Voltage Dips. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, EUA, v. 24, n. 1, p. 43–51, 2009.
- CHAKRABORTY, A. *et al.* Analyzing the dynamic behavior of a DFIG-based wind farm under sudden grid disturbances. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SUSTAINABLE SYSTEMS (ICISS), 1., 2017, Tirupur. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2017. p. 336–341.
- CHEN, C. *et al.* The impact of voltage dips to low-voltage-ride-through capacity of doubly fed induction generator based wind turbine. *In*: IEEE MILAN POWERTECH, 13., 2019, Milano. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2019. p. 1–6.
- COLLINS, E. R.; BRIDGWOOD, M. A. The impact of power system disturbances on AC-coil contactors. *In*: IEEE ANNUAL TEXTILE, FIBER AND FILM INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 7., 1997, Charlotte. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 1997. p. 2–6.
- CONROY, J. F.; WATSON, R. Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator. **IET Renewable Power Generation**, London, v. 1, n. 3, p. 182–189, 2007.
- DENG, F.; CHEN, Z. Low-voltage ride-through of variable speed wind turbines with permanent magnet synchronous generator. *In*: ANNUAL CONFERENCE OF IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS 35TH, Porto, 35., 2009. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2009. p. 621–626.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. Electrical power systems quality. **New York, NY: McGraw-Hill, c2004**, New York, EUA, 2004.
- DUONG, Q. *et al.* A Comparative Study on Controllers for Improving Transient Stability of DFIG Wind Turbines During Large Disturbances. **Energies**, Amsterdã, Holanda, v. 11, p. 480, 02 2018.
- EPRI. The effects of point-on-wave on low-voltage tolerance of industrial process devices. *In*: POWER QUALITY TESTING NETWORK BRIEF, 2007. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2007.



GAJEWSKI, P.; PIENKWSKI, K. Control of Wind Turbine System with PMSG for Low Voltage Ride Through. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL MACHINES (SME)*, Andrychów, 3., 2018. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2018. p. 1–5.

GENG, H.; LIU, L.; LI, R. Synchronization and Reactive Current Support of PMSG-Based Wind Farm During Severe Grid Fault. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, New York, EUA, v. 9, n. 4, p. 1596–1604, 2018.

GOMEZ, J. C. *et al.* Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, EUA, v. 17, n. 2, p. 434–440, 2002.

GWEC. **Leading countries in new installed wind power capacity in 2019**. Bruxelas, Bélgica, 2020.

HAMIED, M. A.; ELAMARY, N. H. Permanent Magnet Synchronous Generator Stability Analysis and Control. **Procedia Computer Science**, Los Angeles, EUA, v. 95, p. 507–515, 2016.

HASAN, M. S.; MUTTAQI, K. M.; BOUZERDOUM, A. Characterization of voltage sag based on Point-on-Wave. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (ICECE)*, Dhaka, 9., 2016. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2016. p. 259–262.

IEC. **IEC 61000-2-11**: electromagnetic compatibility (emc) - part 2-11: environment - classification of hemp environments. Genebra, Suíça, 1999.

IEEE. **Standard 1346**: ieee recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment. Nova Jersey, EUA, 1998.

KEMPNER, T. R. **Análise da robustez e da sensibilidade de sistemas de distribuição para a alocação otimizada de medidores frente às variações de tensão de curta duração**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2017.

KERSTING, W. h. **Distribution system modeling and analysis**. 2nd. ed. EUA: CRC Press, 2006.

KIM, K. *et al.* LVRT Scheme of PMSG Wind Power Systems Based on Feedback Linearization. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, EUA, v. 27, n. 5, p. 2376–2384, 2012.

LEAO, P. S., R. *et al.* A Comprehensive Overview on Wind Power Integration to the Power Grid. **IEEE Latin America Transactions**, New York, EUA, v. 7, n. 6, p. 620–629, Dec 2009.

LEBORGNE, R. C. *et al.* Alternative methodology for characterization of industrial process sensitivity to voltage sags. *In: POWER TECH CONFERENCE PROCEEDINGS*, Bologna, 2003. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2003. p. 1–6.

LEONHARD, W. **Control of Electrical Drives**. 3rd. ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.

LÓPEZ, J. *et al.* Dynamic Behavior of the Doubly Fed Induction Generator During Three-Phase Voltage Dips. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, New York, EUA, v. 22, n. 3, p. 709–717, Sep. 2007.

LÓPEZ, J. *et al.* Wind Turbines Based on Doubly Fed Induction Generator Under Asymmetrical Voltage Dips. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, New York, EUA, v. 23, n. 1, p. 321–330, March 2008.

MCGRANAGHAN, M. F.; MUELLER, D. R.; SAMOTYJ, M. J. Voltage sags in industrial systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, EUA, v. 29, n. 2, p. 397–403, March 1993.

MIRANDA, J. F. **Agrupamento de subestações para estudos de fundamentos de tensão por análise de componentes principais**. Minas Gerais, Brasil, 2016.

MME. **Energia Eólica no Brasil e Mundo**. Brasília, Brasil, 2017.

MOHSENI, M.; ISLAM, S. M.; MASOUM, M. A. S. Enhanced Hysteresis-Based Current Regulators in Vector Control of DFIG Wind Turbines. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, EUA, v. 26, n. 1, p. 223–234, Jan 2011.

MOHSENI, M.; ISLAM, S. M.; MASOUM, M. A. S. Impacts of Symmetrical and Asymmetrical Voltage Sags on DFIG-Based Wind Turbines Considering Phase-Angle Jump, Voltage Recovery, and Sag Parameters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, EUA, v. 26, n. 5, p. 1587–1598, May 2011.

MORREN, J.; DE HAAN, S. W. H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, New York, IEEE, v. 20, n. 2, p. 435–441, 2005.

MORREN, J.; PIERIK, J. T. G.; DE HAAN, S. W. H. Voltage dip ride-through control of direct-drive wind turbines. *In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING*, 39., 2004, Bristol. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2004. p. 934–938.

NUNES, R. V. **Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido às cargas residenciais e comerciais com a utilização do ATP**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFMG, Minas Gerais, Brasil, 2007.

ONS. **Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica**. 2016.

ONS. **Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos**. 2018.

ONS. **Submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica**. 2019.

PAVINATTO, E. F. **Ferramenta para Auxílio à Análise de Viabilidade Técnica da Conexão de Parques Eólicos à Rede Elétrica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

PENA, R.; CLARE, J. C.; ASHER, G. M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, New York, EUA, v. 143, n. 3, p. 231–241, May 1996.

PENA, R.; CLARE, J. C.; ASHER, G. M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, New York, EUA, v. 143, n. 3, p. 231–241, 1996.

PERDANA, A.; CARLSON, O. Aggregated Models of a Large Wind Farm Consisting of Variable Speed Wind Turbines for Power System Stability Studies. *In*: INTERNATIONAL WORKSHOP ON LARGE-SCALE INTEGRATION OF WIND POWER INTO POWER SYSTEMS AS WELL AS ON TRANSMISSION NETWORKS FOR OFFSHORE WIND FARMS, 8., 2009, Bremen. **Proceedings** [... ] Gothenburg: Energynautics, 2009.

RAMOS, A. C. L. **Impacto da impedância de falta em afundamentos de tensão**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFRGS, Rio Grande do Sul, Brasil, 2009.

RAMPINELLI, J. **Análise da geração eólica na matriz brasileira de energia elétrica**. Santa Catarina, Brasil: Revista Ciências Exatas e Naturais, 2012.

R.C. DUGAN M.F. MCGRANAGHAN, H. B. **Electrical Power Systems Quality**. 2nd. ed. Nova York, EUA: Springer-Verlag, 1996.

RUNICOS, F. *et al.* **GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA – TECNOLOGIAS ATUAIS E FUTURAS**. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

S. SANTOSO, D. S. Waveform Characteristics of Voltage Sags: a statistical analysis. *In*: ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI), 18., 1999, Palo Alto. **Proceedings** [... ] Palo Alto: EPRI, 1999.

SADA, F. J. **Aggregate Model of Large Wind Parks for Power System Studies**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) Stockholm, Sweden, Stockholm, Sweden, 2011.

SCHWANZ, D. **Análise da distorção harmônica de um parque eólico através da sua modelagem no domínio do tempo e da frequência**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio Grande do SUL, Rio Grande do Sul, Brasil, 2013.

SINDAT. **SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS CADASTRAIS DO SIN - Rede de operação**. 2020.

SOHN, A. P. **Avaliação da estabilidade de aerogeradores via método direto**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo EESC/USP, São Paulo, Brasil, 2019.

YANG, X.; DUAN, X.; BAI, Y. Asymmetrical voltage dip ride-through enhancement of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE POWER GENERATION AND SUPPLY*, Nanjing, 1., 2009. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2009. p. 1–6.

YANG, X. *et al.* Low Voltage Ride-Through of Directly Driven Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator. *In: ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE*, Wuhan, 1., 2009. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 2009. p. 1–5.

## APÊNDICE A

Tabela 11: Parâmetros das linhas de transmissão do SEP

| <b>Linhas de transmissão</b>  | R (ohm/km) | L (H/km) | L (km) |
|-------------------------------|------------|----------|--------|
| S.VICENTE SUL / SANTA MARIA 3 | 0,09564    | 0,00140  | 82,4   |
| SANTA MARIA 3 / SANTO ANGELO2 | 0,04026    | 0,00091  | 159,0  |
| SANTA MARIA 3 / U.D.FRANCISCA | 0,09451    | 0,00139  | 67,2   |
| SANTA MARIA 3 / U.D.FRANCISCA | 0,09866    | 0,00133  | 63,0   |
| U.D.FRANCISCA / ITAUBA        | 0,09732    | 0,00142  | 21,2   |
| U.D.FRANCISCA / ITAUBA        | 0,08920    | 0,00130  | 23,1   |
| ITAUBA / SANTA CRUZ1          | 0,08953    | 0,00133  | 129,4  |
| ITAUBA / PASSO REAL           | 0,08993    | 0,00134  | 30,0   |
| IJUI 2 / PASSO REAL           | 0,10678    | 0,00133  | 104,0  |
| IJUI 2 / SANTO ANGELO2        | 0,10771    | 0,00133  | 43,2   |
| SANTO ANGELO / SANTO ANGELO2  | 0,04673    | 0,00094  | 6,0    |
| MISSOES / SANTO ANGELO        | 0,11903    | 0,00159  | 64,0   |
| MACAMBARA / SANTO ANGELO      | 0,05832    | 0,00126  | 205,0  |
| MISSOES / SAO BORJA2          | 0,09069    | 0,00134  | 112,0  |
| MACAMBARA / SAO BORJA2        | 0,10086    | 0,00134  | 53,5   |
| U.URUGUAIANA / MACAMBARA      | 0,05127    | 0,00111  | 130,0  |
| ALEGRETE2 / MACAMBARA         | 0,10091    | 0,00134  | 82,8   |
| ALEGRETE2 / U.URUGUAIANA      | 0,05097    | 0,00067  | 129,7  |
| URUGUAIANA5 / U.URUGUAIANA    | 0,08993    | 0,00134  | 5,0    |
| ALEGRETE2 / URUGUAIANA5       | 0,10070    | 0,00134  | 127,1  |
| ALEGRETE2 / S.VICENTE SUL     | 0,07933    | 0,00127  | 104,0  |
| ALEGRETE2 / LIVRAMENTO 2      | 0,10103    | 0,00134  | 128,3  |
| CERRO CHATO / LIVRAMENTO 2    | 0,13325    | 0,00183  | 18,5   |
| BAGE2 / LIVRAMENTO 2          | 0,10102    | 0,00134  | 151,3  |
| PRE.MEDICI / BAGE2            | 0,09042    | 0,00133  | 50,9   |
| PRE.MEDICI / SANTA CRUZ1      | 0,09002    | 0,00130  | 237,0  |

Fonte: (SINDAT, 2020)

Tabela 12: Parâmetros das cargas e geração das barras do SEP modelado

| <b>Subestação</b>  | Carga ativa(MW) | Carga Reativa(Mvar) | Geração(MW) |
|--------------------|-----------------|---------------------|-------------|
| S. VICENTE SUL     | 71,25           | 23,42               | 0           |
| SANTA MARIA 3      | 118,275         | 38,88               | 180         |
| UH. DONA FRANCISCA | 0               | 0,00                | 125         |
| UH ITAÚBA          | 0               | 0,00                | 500         |
| SANTA CRUZ 1       | 165,775         | 54,49               | 0           |
| UH PASSO REAL      | 71,25           | 23,42               | 158         |
| IJUI 2             | 78,85           | 25,92               | 0           |
| SANTO ANGELO 2     | 78,85           | 25,92               | 0           |
| SANTO ANGELO       | 0               | 0,00                | 0           |
| MISSOES            | 0               | 0,00                | 77          |
| SÃO BORJA 2        | 71,25           | 23,42               | 0           |
| MAÇAMBARA          | 118,275         | 38,88               | 0           |
| U. URUGUAIANA      | 0               | 0,00                | 600         |
| URUGUAIANA 5       | 118,275         | 38,88               | 50          |
| ALEGRETE 2         | 78,85           | 25,92               | 0           |
| CERRO CHATO        | 0               | 0,00                | 500         |
| LIVRAMENTO 2       | 47,5            | 15,61               | 70          |
| BAGÉ               | 71,25           | 23,42               | 0           |
| PRESIDENTE MEDICI  | 54,625          | 17,95               | 350         |

Fonte: (SINDAT, 2020)

Tabela 13: Fluxo de potência com operação da Presidente Médici

| Fluxo de potência do SEP |              |                |                               |              |                |
|--------------------------|--------------|----------------|-------------------------------|--------------|----------------|
| Barras                   | Tensão (p.u) | Ângulo (graus) | Linhas de transmissão         | Tensão (p.u) | Ângulo (graus) |
| Santa Maria 3            | 1            | 0.39           | S.VICENTE SUL / SANTA MARIA 3 | 0.9737       | -0.04          |
| UH. Dona Francisca       | 1            | 0.69           | SANTA MARIA 3 / SANTO ANGELO2 | 0.9324       | -6.06          |
| UH. Itaúba               | 1            | 0.00           | SANTA MARIA 3 / U.D.FRANCISCA | 0.9969       | -2.58          |
| UH. Passo Real           | 1            | -0.26          | SANTA MARIA 3 / U.D.FRANCISCA | 1.0034       | -1.09          |
| Ijuí 2                   | 0.9373       | -5.83          | U.D.FRANCISCA / ITAUBA        | 1.001        | 0.53           |
| Santo Ângelo 2           | 0.9268       | -6.28          | U.D.FRANCISCA / ITAUBA        | 1.0009       | 0.53           |
| Santa Cruz 1             | 0.9173       | 4.77           | ITAUBA / SANTA CRUZ1          | 1.0001       | 0.34           |
| S. Vicente do Sul        | 0.9444       | -0.46          | ITAUBA / PASSO REAL           | 1.0001       | 0.34           |
| Santo Ângelo             | 0.9972       | -2.51          | IJUI 2 / PASSO REAL           | 0.9611       | 2.25           |
| Bagé                     | 0.9810       | 36.07          | IJUI 2 / SANTO ANGELO2        | 1.0002       | -0.13          |
| Cerro Chato              | 1            | 44.80          | SANTO ANGELO / SANTO ANGELO2  | 0.9697       | -2.99          |
| Pres. Médici             | 1            | 37.47          | MISSOES / SANTO ANGELO        | 0.9757       | 41.42          |
| Livramento2              | 0.9547       | 37.89          | MACAMBARA / SANTO ANGELO      | 0.9723       | 36.91          |
| Uruguaiana 5             | 0.9108       | -1.73          | MISSOES / SAO BORJA2          | 0.9909       | 36.77          |
| U. Uruguaiana            | 0.9124       | -1.52          | MACAMBARA / SAO BORJA2        | 0.9307       | 21.72          |
| Alegrete 2               | 0.9028       | 2.79           | U.URUGUAIANA / MACAMBARA      | 0.9997       | -1.99          |
| Maçambará                | 0.9345       | -3.41          | ALEGRETE2 / MACAMBARA         | 0.9741       | -3.00          |
| São Borja                | 0.9466       | -4.27          | ALEGRETE2 / U.URUGUAIANA      | 0.9756       | -2.84          |
| Missões                  | 1            | -1.44          | URUGUAIANA5 / U.URUGUAIANA    | 0.9411       | -3.85          |
|                          |              |                | ALEGRETE2 / URUGUAIANA5       | 0.9269       | -2.50          |
|                          |              |                | ALEGRETE2 / S.VICENTE SUL     | 0.9186       | -0.38          |
|                          |              |                | ALEGRETE2 / LIVRAMENTO 2      | 0.9116       | -1.62          |
|                          |              |                | CERRO CHATO / LIVRAMENTO 2    | 0.9092       | 0.48           |
|                          |              |                | BAGE2 / LIVRAMENTO 2          | 0.9252       | 1.11           |
|                          |              |                | PRE.MEDICI / BAGE2            | 0.8885       | 20.81          |
|                          |              |                | PRE.MEDICI / SANTA CRUZ1      | 0.9102       | 0.58           |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 14: Fluxo de potência sem operação da Presidente Médici

| Fluxo de potência do SEP |              |                |                               |              |                |
|--------------------------|--------------|----------------|-------------------------------|--------------|----------------|
| Barras                   | Tensão (p.u) | Ângulo (graus) | Linhas de transmissão         | Tensão (p.u) | Ângulo (graus) |
| Santa Maria 3            | 1            | -2.03          | S.VICENTE SUL / SANTA MARIA 3 | 0.9866       | -4.19          |
| UH. Dona Francisca       | 1            | 0.07           | SANTA MARIA 3 / SANTO ANGELO2 | 0.9421       | -7.94          |
| UH. Itaúba               | 1            | 0              | SANTA MARIA 3 / U.D.FRANCISCA | 10.011       | -6.88          |
| UH. Passo Real           | 1            | -0.59          | SANTA MARIA 3 / U.D.FRANCISCA | 10.051       | -4.47          |
| Ijuí 2                   | 0.9650       | -7.43          | U.D.FRANCISCA / ITAUBA        | 1.0008       | -0.99          |
| Santo Ângelo 2           | 0.9386       | -8.44          | U.D.FRANCISCA / ITAUBA        | 1.0007       | -0.99          |
| Santa Cruz 1             | 0.9273       | -10.03         | ITAUBA / SANTA CRUZI          | 1.0001       | 0.04           |
| S. Vicente do Sul        | 0.9715       | -6.37          | ITAUBA / PASSO REAL           | 1.0001       | 0.04           |
| Santo Ângelo             | 1,0015       | -6.83          | IJUI 2 / PASSO REAL           | 0.9632       | -4.86          |
| Bagé                     | 0.8884       | -1.78          | IJUI 2 / SANTO ANGELO2        | 1.0002       | -0.30          |
| Cerro Chato              | 1            | 20.63          | SANTO ANGELO / SANTO ANGELO2  | 0.9729       | -3.94          |
| Pres. Médici             | 0.8904       | -4.89          | MISSOES / SANTO ANGELO        | 0.9795       | 17.22          |
| Livramento2              | 0.9624       | 13.68          | MACAMBARA / SANTO ANGELO      | 0.9213       | 6.21           |
| Uruguaiana 5             | 0.9681       | -10.98         | MISSOES / SAO BORJA2          | 0.8896       | -3.35          |
| U. Uruguaiana            | 0.9694       | -10.77         | MACAMBARA / SAO BORJA2        | 0.9185       | -7.64          |
| Alegrete 2               | 0.9623       | -7.51          | U.URUGUAIANA / MACAMBARA      | 1.0019       | -6.76          |
| Maçambará                | 0.9756       | -11.18         | ALEGRETE2 / MACAMBARA         | 0.9964       | -9.04          |
| São Borja                | 0.9747       | -11.13         | ALEGRETE2 / U.URUGUAIANA      | 0.9892       | -8.89          |
| Missões                  | 1            | -6.66          | URUGUAIANA5 / U.URUGUAIANA    | 0.9757       | -11.16         |
|                          |              |                | ALEGRETE2 / URUGUAIANA5       | 0.9763       | -11.00         |
|                          |              |                | ALEGRETE2 / S.VICENTE SUL     | 0.9698       | -9.37          |
|                          |              |                | ALEGRETE2 / LIVRAMENTO 2      | 0.9687       | -10.87         |
|                          |              |                | CERRO CHATO / LIVRAMENTO 2    | 0.9681       | -9.29          |
|                          |              |                | BAGE2 / LIVRAMENTO 2          | 0.9689       | -6.95          |
|                          |              |                | PRE.MEDICI / BAGE2            | 0.9491       | 3.05           |
|                          |              |                | PRE.MEDICI / SANTA CRUZI      | 0.9688       | -9.19          |

Fonte: A autora, 2020



Tabela 15: Dados gerais das análises durante uma falta ABCG com a termoeletrica fora de operação

| ABCG_90_SPM | DFIG                 |                  |                   |                   | PMSG                  |                  |                   |                   |
|-------------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|             | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |
| 0,59231     | 0,59969              | 1,03183          | 1,31094           | 1,48631           | 0,65697               | 1,37481          | 1,20376           | 1,03760           |
| 0,83853     | 0,82521              | 1,01791          | 1,03794           | 1,33816           | 0,82587               | 1,08861          | 1,21852           | 1,04211           |
| 0,88132     | 0,89308              | 1,01260          | 1,02570           | 1,35292           | 0,86389               | 1,05278          | 1,19535           | 1,04495           |
| 0,87248     | 0,87999              | 1,01462          | 1,02848           | 1,39841           | 0,85435               | 1,05848          | 1,20083           | 1,04408           |
| 0,83645     | 0,82954              | 1,01789          | 1,02517           | 1,40112           | 0,82387               | 1,08872          | 1,21823           | 1,04135           |
| 0,83645     | 0,82954              | 1,01789          | 1,02517           | 1,40112           | 0,82387               | 1,08872          | 1,21823           | 1,04135           |
| 0,71762     | 0,70584              | 1,02968          | 1,12329           | 1,41071           | 0,73751               | 1,22829          | 1,23008           | 1,04920           |
| 0,88557     | 0,89316              | 1,01243          | 1,02249           | 1,41605           | 0,86522               | 1,05331          | 1,19695           | 1,04748           |
| 0,95436     | 0,96982              | 1,00909          | 0,99697           | 1,49555           | 0,91047               | 1,02722          | 1,14131           | 1,04393           |
| 0,91195     | 0,91745              | 1,01581          | 1,06896           | 1,69615           | 0,87902               | 1,04470          | 1,17355           | 1,05012           |
| 0,75783     | 0,73802              | 1,01891          | 1,07897           | 1,40343           | 0,78089               | 1,17876          | 1,21752           | 1,04402           |
| 0,81411     | 0,78394              | 1,01718          | 1,03736           | 1,34508           | 0,81223               | 1,12131          | 1,22682           | 1,04467           |
| 0,69341     | 0,67271              | 1,02115          | 1,16272           | 1,35108           | 0,73766               | 1,25667          | 1,19924           | 1,03888           |
| 0,69672     | 0,66074              | 1,01795          | 1,14168           | 1,30592           | 0,73640               | 1,25415          | 1,23301           | 1,04290           |
| 0,49730     | 0,48688              | 1,03035          | 1,39585           | 1,32662           | 0,54942               | 1,47077          | 1,19914           | 1,03969           |
| 0,46724     | 0,45565              | 1,03194          | 1,41795           | 1,38581           | 0,51492               | 1,50311          | 1,23045           | 1,04438           |
| 0,29063     | 0,34958              | 1,04202          | 1,59722           | 1,51861           | 0,32541               | 1,66704          | 1,19911           | 1,05761           |
| 0,28657     | 0,35464              | 1,04177          | 1,63699           | 1,52648           | 0,31865               | 1,67048          | 1,20168           | 1,04671           |
| 0,37483     | 0,39538              | 1,03873          | 1,57185           | 1,37626           | 0,41461               | 1,59403          | 1,22174           | 1,04498           |
| 0,43165     | 0,43777              | 1,03699          | 1,44709           | 1,30350           | 0,47492               | 1,54284          | 1,21205           | 1,04102           |
| 0,35562     | 0,40595              | 1,03728          | 1,57742           | 1,54609           | 0,39072               | 1,61497          | 1,21731           | 1,04743           |
| 0,13573     | 0,12206              | 1,06006          | 2,22979           | 2,50496           | 0,01235               | 1,89398          | 1,23006           | 1,05068           |
| 0,20997     | 0,04878              | 1,07205          | 2,54635           | 3,40798           | 0,09829               | 1,91817          | 1,22220           | 1,05769           |
| 0,01360     | 0,27623              | 1,05098          | 1,87931           | 2,01800           | 0,00002               | 1,85439          | 1,17790           | 1,04391           |
| 0,44663     | 0,47611              | 1,03676          | 1,48611           | 1,68091           | 0,49846               | 1,52681          | 1,20054           | 1,03871           |
| 0,62211     | 0,61613              | 1,02798          | 1,23889           | 1,29589           | 0,67823               | 1,34431          | 1,20919           | 1,03993           |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 16: Dados gerais das análises durante uma falta ABG com a termoeétrica fora de operação

| ABG_90_SPM | DFIG                 |                  |                   |                   |                       | PMSG             |                   |                   |  |  |
|------------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|--|--|
|            | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |  |  |
| 0,79146    | 0,77258              | 1,21617          | 2,13978           | 0,78339           | 1,15877               | 1,20444          | 1,03801           |                   |  |  |
| 0,91433    | 0,92116              | 1,05271          | 1,67196           | 0,88644           | 1,04337               | 1,16131          | 1,04353           |                   |  |  |
| 0,94246    | 0,95574              | 1,03095          | 1,55991           | 0,91065           | 1,03258               | 1,15131          | 1,04617           |                   |  |  |
| 0,94005    | 0,94370              | 1,03603          | 1,65781           | 0,89865           | 1,03523               | 1,14956          | 1,04830           |                   |  |  |
| 0,91820    | 0,91075              | 1,08006          | 1,70272           | 0,87887           | 1,04664               | 1,16321          | 1,04326           |                   |  |  |
| 0,91820    | 0,91075              | 1,08006          | 1,70272           | 0,87887           | 1,04664               | 1,16321          | 1,04326           |                   |  |  |
| 0,85647    | 0,83983              | 1,16678          | 1,95952           | 0,83153           | 1,08444               | 1,20576          | 1,04287           |                   |  |  |
| 0,94095    | 0,94389              | 1,03353          | 1,58686           | 0,90344           | 1,03520               | 1,16064          | 1,04288           |                   |  |  |
| 0,95959    | 0,97681              | 0,99733          | 1,57373           | 0,91868           | 1,02596               | 1,12749          | 1,04512           |                   |  |  |
| 0,91546    | 0,92251              | 1,05882          | 1,67802           | 0,88612           | 1,04392               | 1,18145          | 1,04344           |                   |  |  |
| 0,86636    | 0,86669              | 1,12315          | 1,79799           | 0,85828           | 1,06449               | 1,21689          | 1,04696           |                   |  |  |
| 0,89399    | 0,90203              | 1,08110          | 1,67111           | 0,87211           | 1,05006               | 1,18782          | 1,04348           |                   |  |  |
| 0,81230    | 0,82013              | 1,15889          | 1,93845           | 0,82684           | 1,09654               | 1,21056          | 1,03877           |                   |  |  |
| 0,80945    | 0,81638              | 1,15459          | 1,91687           | 0,82413           | 1,09951               | 1,21616          | 1,03950           |                   |  |  |
| 0,68176    | 0,70499              | 1,23363          | 2,09325           | 0,74115           | 1,22462               | 1,19322          | 1,04100           |                   |  |  |
| 0,66653    | 0,68773              | 1,24853          | 2,11900           | 0,73315           | 1,24124               | 1,20225          | 1,04294           |                   |  |  |
| 0,60036    | 0,62133              | 1,33678          | 2,41012           | 0,66910           | 1,33336               | 1,19991          | 1,03790           |                   |  |  |
| 0,60851    | 0,61742              | 1,39338          | 2,36538           | 0,67887           | 1,32943               | 1,21056          | 1,04732           |                   |  |  |
| 0,63719    | 0,64870              | 1,35975          | 2,30092           | 0,69943           | 1,28878               | 1,22842          | 1,04083           |                   |  |  |
| 0,66189    | 0,67288              | 1,26070          | 2,20826           | 0,71326           | 1,26303               | 1,21505          | 1,03853           |                   |  |  |
| 0,64658    | 0,64721              | 1,34410          | 2,36219           | 0,70162           | 1,30173               | 1,20692          | 1,04029           |                   |  |  |
| 0,24133    | 0,47631              | 1,77586          | 2,99308           | 0,47147           | 1,55411               | 1,19706          | 1,04075           |                   |  |  |
| 0,15806    | 0,41595              | 1,94444          | 3,30814           | 0,37199           | 1,65265               | 1,17918          | 1,05151           |                   |  |  |
| 0,56845    | 0,56697              | 1,52239          | 2,66139           | 0,60947           | 1,42417               | 1,21012          | 1,03533           |                   |  |  |
| 0,69291    | 0,68838              | 1,26023          | 2,32702           | 0,71887           | 1,25990               | 1,19966          | 1,03898           |                   |  |  |
| 0,79137    | 0,78752              | 1,19290          | 2,04027           | 0,78990           | 1,14381               | 1,20014          | 1,04384           |                   |  |  |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 17: Dados gerais das análises durante uma falta ABC com a termoeétrica fora de operação

| ABC_90.SPM | DFIG                 |                  |                   |                   | PMSG                  |                  |                   |                   |
|------------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|            | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |
| 0,59148    | 0,59846              | 1,02637          | 1,29754           | 1,48111           | 0,65351               | 1,37581          | 1,21335           | 1,03749           |
| 0,83756    | 0,82369              | 1,01593          | 1,03764           | 1,34936           | 0,82830               | 1,09023          | 1,21322           | 1,04731           |
| 0,88473    | 0,89621              | 1,01387          | 1,01997           | 1,40549           | 0,85896               | 1,05461          | 1,21610           | 1,04618           |
| 0,87522    | 0,88138              | 1,01359          | 1,03453           | 1,41788           | 0,85334               | 1,05784          | 1,19855           | 1,04815           |
| 0,83132    | 0,83050              | 1,01810          | 1,03371           | 1,40472           | 0,82252               | 1,08704          | 1,22316           | 1,04779           |
| 0,83132    | 0,83050              | 1,01810          | 1,03371           | 1,40472           | 0,82252               | 1,08704          | 1,22316           | 1,04779           |
| 0,71724    | 0,70849              | 1,03007          | 1,12040           | 1,50559           | 0,73613               | 1,22693          | 1,23867           | 1,04049           |
| 0,88816    | 0,89197              | 1,01096          | 1,02096           | 1,42381           | 0,86240               | 1,05342          | 1,21155           | 1,04058           |
| 0,94919    | 0,97418              | 1,00984          | 0,99574           | 1,53170           | 0,91231               | 1,02598          | 1,14388           | 1,04547           |
| 0,91452    | 0,93104              | 1,01440          | 1,06898           | 1,62238           | 0,88387               | 1,04093          | 1,16844           | 1,04828           |
| 0,75945    | 0,73911              | 1,01710          | 1,06561           | 1,35634           | 0,77708               | 1,17715          | 1,21421           | 1,04602           |
| 0,81085    | 0,78392              | 1,01746          | 1,03539           | 1,35507           | 0,81104               | 1,11955          | 1,22659           | 1,04078           |
| 0,69317    | 0,67133              | 1,01984          | 1,15529           | 1,40864           | 0,73317               | 1,25678          | 1,23739           | 1,04486           |
| 0,69534    | 0,66106              | 1,01861          | 1,14485           | 1,30606           | 0,73580               | 1,25257          | 1,21224           | 1,03670           |
| 0,49959    | 0,48726              | 1,03071          | 1,40176           | 1,30519           | 0,55057               | 1,46983          | 1,21539           | 1,04748           |
| 0,46840    | 0,45716              | 1,03511          | 1,41852           | 1,32880           | 0,51658               | 1,50241          | 1,21449           | 1,04332           |
| 0,29273    | 0,34833              | 1,04260          | 1,58889           | 1,49317           | 0,32266               | 1,66575          | 1,20578           | 1,04719           |
| 0,28893    | 0,35453              | 1,04292          | 1,63395           | 1,47487           | 0,31725               | 1,66978          | 1,18405           | 1,04408           |
| 0,37336    | 0,39725              | 1,03703          | 1,55607           | 1,37380           | 0,41118               | 1,59369          | 1,21736           | 1,04216           |
| 0,43206    | 0,43978              | 1,03659          | 1,44141           | 1,33663           | 0,47481               | 1,54160          | 1,20522           | 1,04391           |
| 0,35827    | 0,40546              | 1,03896          | 1,56906           | 1,49611           | 0,39385               | 1,61365          | 1,22374           | 1,04770           |
| 0,13680    | 0,12270              | 1,06070          | 2,23314           | 2,55755           | 0,01364               | 1,89325          | 1,22902           | 1,04890           |
| 0,20963    | 0,04885              | 1,07397          | 2,53768           | 3,47995           | 0,09505               | 1,91680          | 1,21481           | 1,05497           |
| 0,02602    | 0,27666              | 1,05097          | 1,86808           | 1,92237           | 0,00001               | 1,86232          | 1,21248           | 1,05370           |
| 0,45114    | 0,47878              | 1,03748          | 1,47435           | 1,59198           | 0,50098               | 1,52835          | 1,20526           | 1,04918           |
| 0,62073    | 0,61698              | 1,03034          | 1,24179           | 1,34391           | 0,67809               | 1,34190          | 1,20200           | 1,03619           |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 18: Dados gerais das análises durante uma falta AB com a termoeétrica fora de operação

| AB_90_SPM | DFIG                 |                  |                   |                   | PMSG                  |                  |                   |                   |
|-----------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|           | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |
| 0,83008   | 0,81021              | 1,03391          | 1,27887           | 2,33871           | 0,80482               | 1,12351          | 1,20826           | 1,04654           |
| 0,92683   | 0,93604              | 1,01738          | 1,06657           | 1,68036           | 0,89727               | 1,03782          | 1,15818           | 1,04299           |
| 0,95590   | 0,96438              | 1,01461          | 1,03544           | 1,63724           | 0,90946               | 1,03008          | 1,13837           | 1,04647           |
| 0,94984   | 0,95616              | 1,01402          | 1,05070           | 1,63830           | 0,90829               | 1,03127          | 1,13865           | 1,04892           |
| 0,93698   | 0,93095              | 1,01830          | 1,09838           | 1,77610           | 0,88656               | 1,04010          | 1,17296           | 1,04256           |
| 0,93698   | 0,93095              | 1,01830          | 1,09838           | 1,77610           | 0,88656               | 1,04010          | 1,17296           | 1,04256           |
| 0,88875   | 0,87304              | 1,02912          | 1,20445           | 2,18541           | 0,84821               | 1,06689          | 1,20568           | 1,04741           |
| 0,95313   | 0,95339              | 1,01632          | 1,04440           | 1,68762           | 0,90529               | 1,03162          | 1,14968           | 1,04518           |
| 0,96505   | 0,98344              | 1,01196          | 1,00751           | 1,53437           | 0,92296               | 1,02395          | 1,12702           | 1,04739           |
| 0,92528   | 0,93553              | 1,01789          | 1,07961           | 1,70485           | 0,89500               | 1,03928          | 1,15878           | 1,04563           |
| 0,88337   | 0,89055              | 1,02346          | 1,14621           | 1,92034           | 0,86157               | 1,05685          | 1,19782           | 1,04477           |
| 0,90852   | 0,91872              | 1,01887          | 1,08131           | 1,77994           | 0,87824               | 1,04382          | 1,18446           | 1,05048           |
| 0,84106   | 0,84962              | 1,02713          | 1,17335           | 2,04596           | 0,84365               | 1,07548          | 1,21842           | 1,04688           |
| 0,83770   | 0,85227              | 1,02760          | 1,18045           | 2,02595           | 0,84204               | 1,07486          | 1,21673           | 1,04423           |
| 0,74487   | 0,75499              | 1,03458          | 1,28584           | 2,26972           | 0,77848               | 1,17376          | 1,20931           | 1,04416           |
| 0,72860   | 0,73904              | 1,03930          | 1,30257           | 2,36131           | 0,77324               | 1,19417          | 1,20627           | 1,04006           |
| 0,68056   | 0,68199              | 1,04484          | 1,45205           | 2,60814           | 0,72154               | 1,26938          | 1,19720           | 1,03573           |
| 0,68283   | 0,68091              | 1,04292          | 1,48641           | 2,60927           | 0,72047               | 1,27274          | 1,18652           | 1,03718           |
| 0,70174   | 0,70068              | 1,03970          | 1,45957           | 2,49819           | 0,74120               | 1,23905          | 1,20085           | 1,03901           |
| 0,72902   | 0,72549              | 1,04021          | 1,33777           | 2,35855           | 0,76188               | 1,21197          | 1,18591           | 1,03906           |
| 0,72498   | 0,70753              | 1,03996          | 1,45548           | 2,52556           | 0,74268               | 1,24178          | 1,19028           | 1,04054           |
| 0,37450   | 0,54208              | 1,06075          | 1,94507           | 3,23588           | 0,57534               | 1,45070          | 1,19504           | 1,04126           |
| 0,35178   | 0,50685              | 1,07065          | 2,21145           | 3,62483           | 0,50067               | 1,52160          | 1,18519           | 1,04053           |
| 0,65575   | 0,65091              | 1,05055          | 1,70135           | 2,92015           | 0,67601               | 1,33890          | 1,20800           | 1,04064           |
| 0,76388   | 0,74170              | 1,03871          | 1,34828           | 2,44084           | 0,75855               | 1,20605          | 1,20188           | 1,03877           |
| 0,83101   | 0,82039              | 1,03082          | 1,23201           | 2,21090           | 0,81316               | 1,11232          | 1,20365           | 1,04373           |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 19: Dados gerais das análises durante uma falta AG com a termoeletrônica fora de operação

| AG_90_SPM | DFIG                 |                  |                   |                   | PMSG                  |                  |                   |                   |
|-----------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|           | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |
| 0,86356   | 0,94837              | 1,01772          | 1,09295           | 1,54547           | 0,88472               | 1,04135          | 1,17391           | 1,04223           |
| 0,94116   | 1,00136              | 1,01066          | 1,00116           | 1,44302           | 0,92361               | 1,02035          | 1,11962           | 1,04162           |
| 0,95962   | 1,00896              | 1,01013          | 1,00423           | 1,48418           | 0,93541               | 1,01622          | 1,11677           | 1,04614           |
| 0,95738   | 1,00226              | 1,00868          | 1,00193           | 1,44678           | 0,92959               | 1,01725          | 1,11623           | 1,04474           |
| 0,93799   | 0,99261              | 1,01229          | 1,01830           | 1,51180           | 0,92352               | 1,02227          | 1,11594           | 1,04903           |
| 0,93799   | 0,99261              | 1,01229          | 1,01830           | 1,51180           | 0,92352               | 1,02227          | 1,11594           | 1,04903           |
| 0,90110   | 0,96988              | 1,01327          | 1,04958           | 1,53439           | 0,90626               | 1,03064          | 1,14314           | 1,04479           |
| 0,95163   | 1,00340              | 1,00994          | 0,99990           | 1,48824           | 0,93375               | 1,01738          | 1,10688           | 1,04577           |
| 0,97133   | 1,01649              | 1,00860          | 0,98231           | 1,43135           | 0,93548               | 1,01333          | 1,11272           | 1,05037           |
| 0,94399   | 1,00131              | 1,01074          | 1,01743           | 1,41123           | 0,92449               | 1,01971          | 1,11909           | 1,04394           |
| 0,91774   | 0,97932              | 1,01146          | 1,04379           | 1,45321           | 0,91467               | 1,02576          | 1,14443           | 1,04427           |
| 0,93159   | 0,99016              | 1,01028          | 1,02348           | 1,43058           | 0,92141               | 1,02226          | 1,14300           | 1,04186           |
| 0,88933   | 0,96565              | 1,01621          | 1,06592           | 1,46440           | 0,90870               | 1,03266          | 1,13628           | 1,04310           |
| 0,87739   | 0,96172              | 1,01658          | 1,06976           | 1,48828           | 0,89915               | 1,03426          | 1,15689           | 1,04815           |
| 0,80218   | 0,92001              | 1,02006          | 1,13220           | 1,61619           | 0,85596               | 1,05280          | 1,19039           | 1,04695           |
| 0,78723   | 0,92074              | 1,02139          | 1,14652           | 1,65337           | 0,84811               | 1,05307          | 1,19927           | 1,05106           |
| 0,74577   | 0,90404              | 1,02477          | 1,18178           | 1,79839           | 0,82190               | 1,06739          | 1,20638           | 1,04720           |
| 0,76057   | 0,91615              | 1,02526          | 1,17616           | 1,81529           | 0,82355               | 1,06485          | 1,22067           | 1,04650           |
| 0,77271   | 0,92013              | 1,02386          | 1,16891           | 1,79205           | 0,83187               | 1,05969          | 1,22300           | 1,04467           |
| 0,78303   | 0,91833              | 1,02181          | 1,15267           | 1,66372           | 0,83707               | 1,05788          | 1,20505           | 1,04695           |
| 0,77839   | 0,90954              | 1,02223          | 1,17194           | 1,70319           | 0,84364               | 1,06069          | 1,22631           | 1,04751           |
| 0,63807   | 0,83161              | 1,03620          | 1,31108           | 2,14406           | 0,75558               | 1,16611          | 1,19627           | 1,04262           |
| 0,59139   | 0,78914              | 1,04113          | 1,42850           | 2,31168           | 0,70575               | 1,24131          | 1,21269           | 1,04009           |
| 0,71048   | 0,86592              | 1,03117          | 1,23192           | 1,94804           | 0,79720               | 1,11079          | 1,19843           | 1,04209           |
| 0,79420   | 0,91743              | 1,02318          | 1,16917           | 1,72616           | 0,84429               | 1,05841          | 1,20331           | 1,04644           |
| 0,86167   | 0,95860              | 1,01598          | 1,09023           | 1,58398           | 0,88869               | 1,03972          | 1,17922           | 1,04930           |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 20: Dados gerais das análises durante uma falta ABCG com a termoeletrica em operação

| ABCG_90.CPM | DFIG                 |                  |                   |                   |                       | PMSG             |                   |                   |                       |                  |                   |                   |
|-------------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|             | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |
| 0,73083     | 0,70438              | 1,01852          | 1,02942           | 1,38543           | 0,75155               | 1,21878          | 1,23315           | 1,03747           | 0,75155               | 1,21878          | 1,23315           | 1,03747           |
| 0,90021     | 0,89386              | 1,01190          | 1,01085           | 1,38912           | 0,87625               | 1,05276          | 1,22195           | 1,04564           | 0,87625               | 1,05276          | 1,22195           | 1,04564           |
| 0,93869     | 0,95297              | 1,00784          | 0,99123           | 1,41109           | 0,89931               | 1,03415          | 1,16273           | 1,04371           | 0,89931               | 1,03415          | 1,16273           | 1,04371           |
| 0,93512     | 0,94923              | 1,00731          | 0,98728           | 1,41962           | 0,89250               | 1,03794          | 1,15056           | 1,04652           | 0,89250               | 1,03794          | 1,15056           | 1,04652           |
| 0,90482     | 0,98509              | 1,00756          | 0,97305           | 1,41565           | 0,91524               | 1,02395          | 1,14578           | 1,04069           | 0,91524               | 1,02395          | 1,14578           | 1,04069           |
| 0,96370     | 0,98767              | 1,00734          | 0,97314           | 1,37038           | 0,92055               | 1,02304          | 1,12770           | 1,04425           | 0,92055               | 1,02304          | 1,12770           | 1,04425           |
| 0,98045     | 1,01018              | 1,00716          | 0,97275           | 1,39876           | 0,93194               | 1,01639          | 1,11780           | 1,04112           | 0,93194               | 1,01639          | 1,11780           | 1,04112           |
| 0,98186     | 1,00808              | 1,00818          | 0,96817           | 1,44101           | 0,93247               | 1,01741          | 1,12297           | 1,04632           | 0,93247               | 1,01741          | 1,12297           | 1,04632           |
| 0,97587     | 1,00127              | 1,00963          | 0,98005           | 1,47842           | 0,92291               | 1,01953          | 1,12053           | 1,04370           | 0,92291               | 1,01953          | 1,12053           | 1,04370           |
| 0,94331     | 0,96212              | 1,01171          | 1,02233           | 1,60184           | 0,90482               | 1,03045          | 1,14548           | 1,04436           | 0,90482               | 1,03045          | 1,14548           | 1,04436           |
| 0,85570     | 0,82626              | 1,01125          | 1,02348           | 1,38305           | 0,83804               | 1,07982          | 1,22383           | 1,04603           | 0,83804               | 1,07982          | 1,22383           | 1,04603           |
| 0,88556     | 0,86958              | 1,00964          | 1,00675           | 1,37818           | 0,86336               | 1,06056          | 1,22819           | 1,04988           | 0,86336               | 1,06056          | 1,22819           | 1,04988           |
| 0,80866     | 0,76742              | 1,01304          | 1,03059           | 1,37086           | 0,80357               | 1,12775          | 1,22410           | 1,03899           | 0,80357               | 1,12775          | 1,22410           | 1,03899           |
| 0,81172     | 0,76976              | 1,01127          | 1,03227           | 1,35765           | 0,80673               | 1,12327          | 1,23178           | 1,03611           | 0,80673               | 1,12327          | 1,23178           | 1,03611           |
| 0,67688     | 0,63920              | 1,01516          | 1,02114           | 1,30315           | 0,72180               | 1,27641          | 1,20736           | 1,03137           | 0,72180               | 1,27641          | 1,20736           | 1,03137           |
| 0,64703     | 0,60017              | 1,02482          | 1,03821           | 1,32354           | 0,70590               | 1,31192          | 1,23337           | 1,03467           | 0,70590               | 1,31192          | 1,23337           | 1,03467           |
| 0,53969     | 0,50134              | 1,03067          | 1,16278           | 1,32980           | 0,59552               | 1,43302          | 1,25328           | 1,04803           | 0,59552               | 1,43302          | 1,25328           | 1,04803           |
| 0,52776     | 0,50308              | 1,03400          | 1,18748           | 1,31264           | 0,58608               | 1,44329          | 1,22261           | 1,04000           | 0,58608               | 1,44329          | 1,22261           | 1,04000           |
| 0,58479     | 0,54527              | 1,03043          | 1,09867           | 1,37427           | 0,64212               | 1,38717          | 1,20701           | 1,04340           | 0,64212               | 1,38717          | 1,20701           | 1,04340           |
| 0,61639     | 0,57516              | 1,02489          | 1,02464           | 1,32431           | 0,67615               | 1,35152          | 1,24452           | 1,03729           | 0,67615               | 1,35152          | 1,24452           | 1,03729           |
| 0,57289     | 0,55626              | 1,02498          | 1,06597           | 1,35058           | 0,62625               | 1,39693          | 1,23433           | 1,03925           | 0,62625               | 1,39693          | 1,23433           | 1,03925           |
| 0,04627     | 0,24391              | 1,05202          | 1,82768           | 2,36043           | 0,00002               | 1,85443          | 1,21945           | 1,05443           | 0,00002               | 1,85443          | 1,21945           | 1,05443           |
| 0,20469     | 0,05001              | 1,07445          | 2,44036           | 3,89473           | 0,09546               | 1,91784          | 1,21916           | 1,05777           | 0,09546               | 1,91784          | 1,21916           | 1,05777           |
| 0,03058     | 0,27046              | 1,05470          | 1,78169           | 2,87308           | 0,00002               | 1,87869          | 1,22820           | 1,05314           | 0,00002               | 1,87869          | 1,22820           | 1,05314           |
| 0,42914     | 0,48065              | 1,04561          | 1,37750           | 2,48083           | 0,47952               | 1,56494          | 1,21041           | 1,04130           | 0,47952               | 1,56494          | 1,21041           | 1,04130           |
| 0,95916     | 0,98458              | 1,00696          | 0,97796           | 1,45829           | 0,91390               | 1,02568          | 1,13892           | 1,04281           | 0,91390               | 1,02568          | 1,13892           | 1,04281           |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 21: Dados gerais das análises durante uma falta ABG com a termoeletrônica em operação

| ABG_90_CPM | DFIG                 |                  |                   |                   | PMSG                  |                  |                   |                   |
|------------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|            | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |
| 0,84941    | 0,84612              | 1,02297          | 1,15966           | 1,87668           | 0,82849               | 1,08021          | 1,22715           | 1,04584           |
| 0,94344    | 0,96709              | 1,01136          | 1,00975           | 1,56691           | 0,91423               | 1,03145          | 1,14723           | 1,04740           |
| 0,97269    | 0,99168              | 1,01193          | 0,98949           | 1,56395           | 0,92456               | 1,02263          | 1,12929           | 1,04161           |
| 0,96848    | 0,99122              | 1,01068          | 0,99620           | 1,52825           | 0,92058               | 1,02333          | 1,13123           | 1,04466           |
| 0,98545    | 1,00792              | 1,00976          | 0,97336           | 1,48900           | 0,92932               | 1,01604          | 1,11618           | 1,03986           |
| 0,98381    | 1,01174              | 1,00894          | 0,96709           | 1,49707           | 0,93361               | 1,01633          | 1,11544           | 1,04640           |
| 0,99368    | 1,02522              | 1,00832          | 0,96153           | 1,50549           | 0,93882               | 1,01162          | 1,10745           | 1,04505           |
| 0,99051    | 1,01854              | 1,00990          | 0,97214           | 1,50438           | 0,93858               | 1,01417          | 1,10644           | 1,04395           |
| 0,97761    | 1,00702              | 1,00927          | 0,98636           | 1,49754           | 0,92541               | 1,01870          | 1,10669           | 1,04715           |
| 0,94545    | 0,96392              | 1,01329          | 1,02375           | 1,60287           | 0,90541               | 1,03113          | 1,13722           | 1,04412           |
| 0,90564    | 0,92204              | 1,01602          | 1,06846           | 1,63403           | 0,88501               | 1,04529          | 1,18254           | 1,04391           |
| 0,92936    | 0,95099              | 1,01438          | 1,03269           | 1,59675           | 0,89711               | 1,03471          | 1,15349           | 1,04359           |
| 0,87157    | 0,89556              | 1,02037          | 1,10958           | 1,70873           | 0,86433               | 1,05675          | 1,19759           | 1,04637           |
| 0,86855    | 0,88944              | 1,01971          | 1,10577           | 1,67577           | 0,85772               | 1,05720          | 1,21191           | 1,04297           |
| 0,77262    | 0,79241              | 1,02627          | 1,21625           | 1,90412           | 0,80738               | 1,11509          | 1,21105           | 1,04146           |
| 0,75548    | 0,77549              | 1,02895          | 1,22886           | 2,00991           | 0,80046               | 1,12761          | 1,22242           | 1,03445           |
| 0,70010    | 0,71464              | 1,03478          | 1,27077           | 2,07454           | 0,75574               | 1,20084          | 1,21858           | 1,03850           |
| 0,70462    | 0,71184              | 1,03480          | 1,27983           | 2,15111           | 0,76013               | 1,19989          | 1,23836           | 1,04015           |
| 0,72967    | 0,74901              | 1,03424          | 1,27537           | 2,19156           | 0,78447               | 1,17082          | 1,20906           | 1,04035           |
| 0,75072    | 0,76381              | 1,02992          | 1,25779           | 2,05077           | 0,78298               | 1,15038          | 1,22221           | 1,03813           |
| 0,73790    | 0,73508              | 1,03462          | 1,25069           | 2,16137           | 0,77278               | 1,17740          | 1,20840           | 1,04110           |
| 0,46790    | 0,54408              | 1,04730          | 1,60251           | 2,85106           | 0,59510               | 1,43707          | 1,20248           | 1,05183           |
| 0,21541    | 0,44491              | 1,06547          | 2,18888           | 3,78460           | 0,40161               | 1,62055          | 1,17287           | 1,04740           |
| 0,65214    | 0,60478              | 1,05687          | 1,72315           | 3,24237           | 0,61821               | 1,40987          | 1,19199           | 1,04182           |
| 0,76988    | 0,71258              | 1,04356          | 1,44801           | 2,84566           | 0,71178               | 1,26972          | 1,21615           | 1,03554           |
| 0,98680    | 1,00739              | 1,01040          | 0,97782           | 1,50390           | 0,93196               | 1,01721          | 1,12157           | 1,04243           |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 22: Dados gerais das análises durante uma falta ABC com a termoeletrica em operação

| ABC-90.CPM | DFIG                 |                  |                   |                   | PMSG                  |                  |                   |                   |
|------------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|            | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |
| 0,73423    | 0,70686              | 1,01781          | 1,01959           | 1,41727           | 0,75254               | 1,21725          | 1,23081           | 1,03472           |
| 0,90165    | 0,89516              | 1,01047          | 1,00780           | 1,41616           | 0,86926               | 1,05256          | 1,22810           | 1,04091           |
| 0,94227    | 0,95077              | 1,00833          | 0,99064           | 1,45417           | 0,89869               | 1,03580          | 1,13469           | 1,04963           |
| 0,93436    | 0,94878              | 1,00702          | 0,98950           | 1,41616           | 0,89604               | 1,03730          | 1,15607           | 1,04537           |
| 0,90409    | 0,89839              | 1,00830          | 0,97777           | 1,44690           | 0,91875               | 1,02398          | 1,12832           | 1,04493           |
| 0,96409    | 0,98939              | 1,00830          | 0,97777           | 1,44690           | 0,91875               | 1,02398          | 1,12832           | 1,04493           |
| 0,98230    | 1,01244              | 1,00601          | 0,96439           | 1,41616           | 0,93127               | 1,01559          | 1,10525           | 1,04074           |
| 0,98222    | 1,00860              | 1,00854          | 0,96539           | 1,45937           | 0,92961               | 1,01679          | 1,10265           | 1,04549           |
| 0,97617    | 1,00287              | 1,00981          | 0,99266           | 1,49656           | 0,92999               | 1,01917          | 1,11551           | 1,04280           |
| 0,94711    | 0,97017              | 1,01407          | 1,01577           | 1,55532           | 0,90711               | 1,02891          | 1,13568           | 1,04500           |
| 0,85297    | 0,83022              | 1,01209          | 1,02759           | 1,41616           | 0,83568               | 1,07896          | 1,22568           | 1,04596           |
| 0,88665    | 0,86574              | 1,01118          | 1,00047           | 1,41616           | 0,86218               | 1,06079          | 1,21839           | 1,04896           |
| 0,80578    | 0,76827              | 1,01196          | 1,03075           | 1,41616           | 0,80777               | 1,13050          | 1,24156           | 1,04357           |
| 0,81112    | 0,77017              | 1,01212          | 1,03435           | 1,41616           | 0,81155               | 1,12291          | 1,22069           | 1,04571           |
| 0,67436    | 0,63658              | 1,01416          | 1,03237           | 1,41616           | 0,72475               | 1,27788          | 1,23011           | 1,03176           |
| 0,64547    | 0,59991              | 1,02700          | 1,04129           | 1,41616           | 0,70049               | 1,31309          | 1,23621           | 1,04144           |
| 0,53936    | 0,50014              | 1,02966          | 1,16878           | 1,41616           | 0,59676               | 1,43252          | 1,20189           | 1,03668           |
| 0,52776    | 0,50161              | 1,03291          | 1,17996           | 1,41616           | 0,58605               | 1,44440          | 1,22889           | 1,03679           |
| 0,58102    | 0,54409              | 1,03129          | 1,09170           | 1,41616           | 0,64273               | 1,38729          | 1,21992           | 1,04297           |
| 0,61499    | 0,57654              | 1,02488          | 1,02676           | 1,41616           | 0,67414               | 1,35257          | 1,22971           | 1,03504           |
| 0,57082    | 0,55664              | 1,02662          | 1,05984           | 1,41616           | 0,63104               | 1,39783          | 1,23287           | 1,03887           |
| 0,04363    | 0,24241              | 1,04881          | 1,82223           | 2,35043           | 0,00001               | 1,85389          | 1,23478           | 1,04601           |
| 0,20748    | 0,04954              | 1,07738          | 2,42792           | 3,89907           | 0,09813               | 1,91886          | 1,19165           | 1,04971           |
| 0,03714    | 0,27074              | 1,05487          | 1,78124           | 2,88068           | 0,00001               | 1,87660          | 1,21836           | 1,04366           |
| 0,43194    | 0,48054              | 1,04372          | 1,36704           | 2,41706           | 0,48021               | 1,56615          | 1,19791           | 1,05485           |
| 0,95900    | 0,98367              | 1,00773          | 0,97373           | 1,42877           | 0,91429               | 1,02647          | 1,13408           | 1,04624           |

Fonte: A autora, 2020



Tabela 23: Dados gerais das análises durante uma falta AB com a termoeétrica em operação

| AB_90_CPM | DFIG                 |                  |                   |                   | PMSG                  |                  |                   |                   |
|-----------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|           | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |
| 0,87315   | 0,87412              | 1,02755          | 1,17227           | 2,04391           | 0,85243               | 1,06619          | 1,22288           | 1,04993           |
| 0,94676   | 0,97652              | 1,01556          | 1,03229           | 1,63785           | 0,91523               | 1,02811          | 1,12143           | 1,04567           |
| 0,97742   | 1,00048              | 1,01148          | 0,99139           | 1,54729           | 0,92649               | 1,02104          | 1,13070           | 1,04337           |
| 0,97390   | 0,99531              | 1,01138          | 0,99675           | 1,56677           | 0,92230               | 1,02095          | 1,12087           | 1,04243           |
| 0,99080   | 1,01414              | 1,01191          | 0,96991           | 1,54138           | 0,93599               | 1,01605          | 1,11160           | 1,04564           |
| 0,99080   | 1,01414              | 1,01191          | 0,96991           | 1,54138           | 0,93599               | 1,01605          | 1,11160           | 1,04564           |
| 0,99886   | 1,02839              | 1,00929          | 0,96231           | 1,43657           | 0,93739               | 1,01100          | 1,09509           | 1,04194           |
| 0,99362   | 1,02151              | 1,01038          | 0,96634           | 1,51625           | 0,93904               | 1,01343          | 1,08659           | 1,04014           |
| 0,97998   | 1,00792              | 1,00939          | 0,98446           | 1,49694           | 0,92951               | 1,01673          | 1,11599           | 1,04675           |
| 0,95025   | 0,97762              | 1,01338          | 1,03535           | 1,63035           | 0,91526               | 1,02825          | 1,13751           | 1,04406           |
| 0,91605   | 0,93785              | 1,01769          | 1,08389           | 1,71026           | 0,89235               | 1,04032          | 1,15268           | 1,04675           |
| 0,93604   | 0,96357              | 1,01555          | 1,03845           | 1,67396           | 0,90150               | 1,03181          | 1,15460           | 1,04575           |
| 0,88753   | 0,91002              | 1,02090          | 1,11305           | 1,79028           | 0,87090               | 1,05108          | 1,19420           | 1,04672           |
| 0,88566   | 0,91379              | 1,02095          | 1,11671           | 1,88168           | 0,87615               | 1,04873          | 1,18956           | 1,04355           |
| 0,81199   | 0,83013              | 1,03010          | 1,23736           | 2,05168           | 0,83447               | 1,08824          | 1,18879           | 1,04781           |
| 0,79778   | 0,81865              | 1,03267          | 1,25392           | 2,16180           | 0,82558               | 1,10228          | 1,22074           | 1,04803           |
| 0,75176   | 0,77032              | 1,03879          | 1,31557           | 2,31330           | 0,79337               | 1,15750          | 1,20405           | 1,05097           |
| 0,75440   | 0,75927              | 1,03957          | 1,31080           | 2,34037           | 0,79209               | 1,16284          | 1,21228           | 1,04276           |
| 0,77406   | 0,78579              | 1,03475          | 1,29020           | 2,27098           | 0,80588               | 1,13648          | 1,21010           | 1,04477           |
| 0,79499   | 0,80937              | 1,03752          | 1,28047           | 2,23617           | 0,82115               | 1,11818          | 1,20410           | 1,03886           |
| 0,78062   | 0,77998              | 1,03661          | 1,29133           | 2,24869           | 0,80213               | 1,13828          | 1,21183           | 1,04350           |
| 0,55031   | 0,62176              | 1,05856          | 1,72962           | 3,07619           | 0,66798               | 1,35920          | 1,18549           | 1,04773           |
| 0,38703   | 0,52052              | 1,07574          | 2,37641           | 3,91909           | 0,51293               | 1,51119          | 1,19444           | 1,03718           |
| 0,72889   | 0,67009              | 1,05764          | 1,85948           | 3,32756           | 0,67512               | 1,33817          | 1,19085           | 1,03289           |
| 0,84590   | 0,77235              | 1,05010          | 1,54102           | 3,00759           | 0,75228               | 1,21247          | 1,18514           | 1,03414           |
| 0,99377   | 1,01106              | 1,01166          | 0,96468           | 1,53943           | 0,92973               | 1,01582          | 1,11739           | 1,04390           |

Fonte: A autora, 2020

Tabela 24: Dados gerais das análises durante uma falta AG com a termoeétrica em operação

| AG_90_CPM | DFIG                 |                  |                   |                   |                       | PMSG             |                   |                   |  |  |
|-----------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|--|--|
|           | Potência mínima (pu) | Vdc máximo (p.u) | LMSC máximo (p.u) | LGSC máximo (p.u) | Potência mínima (p.u) | Vdc máxima (p.u) | LGSC máxima (p.u) | LMSC máxima (p.u) |  |  |
| 0,90340   | 0,97453              | 1,01563          | 1,04537           | 1,49467           | 0,90177               | 1,03147          | 1,12527           | 1,04745           |  |  |
| 0,96915   | 1,02037              | 1,01017          | 0,99938           | 1,38912           | 0,92859               | 1,01462          | 1,09909           | 1,04973           |  |  |
| 0,98205   | 1,02939              | 1,00785          | 0,97941           | 1,43018           | 0,93909               | 1,01303          | 1,09483           | 1,04802           |  |  |
| 0,97901   | 1,02728              | 1,00864          | 0,99496           | 1,45430           | 0,93620               | 1,01313          | 1,11579           | 1,04580           |  |  |
| 0,99083   | 1,03102              | 1,00785          | 0,98079           | 1,40504           | 0,93819               | 1,00977          | 1,09286           | 1,04019           |  |  |
| 0,98863   | 1,03310              | 1,00784          | 0,96511           | 1,39570           | 0,94074               | 1,01015          | 1,10408           | 1,04355           |  |  |
| 1,00068   | 1,03832              | 1,00998          | 0,96605           | 1,39876           | 0,94383               | 1,00763          | 1,08581           | 1,04150           |  |  |
| 0,99328   | 1,03587              | 1,00818          | 0,96276           | 1,43376           | 0,94042               | 1,00913          | 1,09288           | 1,04342           |  |  |
| 0,98745   | 1,03226              | 1,00821          | 0,97258           | 1,43124           | 0,93928               | 1,01089          | 1,09589           | 1,04372           |  |  |
| 0,90941   | 1,02164              | 1,00887          | 0,98826           | 1,44780           | 0,93168               | 1,01482          | 1,11456           | 1,04387           |  |  |
| 0,94734   | 1,00472              | 1,01000          | 1,00102           | 1,43886           | 0,92445               | 1,02185          | 1,12906           | 1,04342           |  |  |
| 0,95683   | 1,01231              | 1,01158          | 0,99561           | 1,43326           | 0,93563               | 1,01661          | 1,11309           | 1,04641           |  |  |
| 0,92529   | 0,99333              | 1,01278          | 1,01949           | 1,42408           | 0,91859               | 1,02503          | 1,13657           | 1,04294           |  |  |
| 0,92146   | 0,98850              | 1,01292          | 1,02814           | 1,45851           | 0,91186               | 1,02558          | 1,12641           | 1,04220           |  |  |
| 0,85080   | 0,95135              | 1,01732          | 1,08384           | 1,55288           | 0,88359               | 1,03852          | 1,16058           | 1,05160           |  |  |
| 0,84344   | 0,95229              | 1,01557          | 1,08642           | 1,55909           | 0,87593               | 1,03989          | 1,18517           | 1,04990           |  |  |
| 0,80899   | 0,93881              | 1,02024          | 1,12440           | 1,59010           | 0,86214               | 1,04977          | 1,17715           | 1,04035           |  |  |
| 0,81216   | 0,94456              | 1,02163          | 1,11031           | 1,64980           | 0,85653               | 1,04842          | 1,17719           | 1,04366           |  |  |
| 0,82924   | 0,95143              | 1,01927          | 1,09026           | 1,66439           | 0,86761               | 1,04517          | 1,18428           | 1,05054           |  |  |
| 0,84165   | 0,95099              | 1,01897          | 1,09139           | 1,55030           | 0,87467               | 1,04222          | 1,17128           | 1,04324           |  |  |
| 0,83209   | 0,94216              | 1,01819          | 1,10733           | 1,54184           | 0,87631               | 1,04502          | 1,18220           | 1,04745           |  |  |
| 0,70522   | 0,87807              | 1,03087          | 1,25803           | 1,92480           | 0,79907               | 1,09718          | 1,20351           | 1,04490           |  |  |
| 0,63048   | 0,81635              | 1,04237          | 1,36171           | 2,28213           | 0,73449               | 1,19065          | 1,21269           | 1,04439           |  |  |
| 0,75946   | 0,87949              | 1,02726          | 1,22529           | 2,06289           | 0,82017               | 1,08189          | 1,20335           | 1,04231           |  |  |
| 0,81607   | 0,91115              | 1,02434          | 1,15434           | 1,87837           | 0,84961               | 1,05834          | 1,23285           | 1,04380           |  |  |
| 0,98994   | 1,03253              | 1,00826          | 0,96690           | 1,43651           | 0,94001               | 1,00945          | 1,09812           | 1,04190           |  |  |

Fonte: A autora, 2020