

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Roberson Adriel Bergmann Ledebuhr

**DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO
COM GERAÇÃO EÓLICA CONECTADO AO SISTEMA
INTERLIGADO NACIONAL**

Santa Maria, RS
2023

Roberson Adriel Bergmann Ledebuhr

**DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO
COM GERAÇÃO EÓLICA CONECTADO AO SISTEMA
INTERLIGADO NACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Marchesan

Santa Maria, RS
2023

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - código de financiamento 001

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Ledebuhr, Roberson Adriel Bergmann
DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO
COM GERAÇÃO EÓLICA CONECTADO AO SISTEMA INTERLIGADO
NACIONAL / Roberson Adriel Bergmann Ledebuhr.- 2023.
90 p.; 30 cm

Orientador: Gustavo Marchesan
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2023

1. Detecção de ilhamento 2. Geração Eólica 3.
Proteção 4. Registros de Tensão 5. Eixos direto e zero I.
Marchesan, Gustavo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, ROBERSON ADRIEL BERGMANN LEDEBUHR, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Roberson Adriel Bergmann Ledebuhr

**DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM
GERAÇÃO EÓLICA CONECTADO AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 30 de Junho de 2023.

Prof. Dr. Gustavo Marchesan (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes (UFSM)

Prof. Dr. Enoque Dutra Garcia (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS.
2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, inicialmente, ao meu orientador, Gustavo Marchesan, por me dar a oportunidade de absorver conhecimento por ele repassados durante o período do mestrado, sempre demonstrando dedicação, compreensão e muito apoio nessa jornada.

Aos professores Guendy e Adriano, que me repassaram conhecimentos que foram essenciais no tema dos meus estudos. Aos outros professores, que tive a oportunidade de adquirir conhecimento, são representados na Figura deles.

A minha família, que sempre me incentivou aos estudos, entendendo os períodos despendidos, onde por vezes não estava presente, em especial, à minha sobrinha Kauane, pelo apoio e exemplo de dedicação para enfrentar também essa jornada.

Aos colegas de trabalho, que me auxiliaram em discussões sobre o tema, representados pelo Me. Roberto, Luiz e Luciano.

Aos amigos que fiz durante essa jornada, Caison, Fabiano, Larissa e a todos os outros que estão representados neles. À Cíntia, que encontrei muito em congressos, à Fernanda, que foi uma grande incentivadora nesta jornada e à Marina na ajuda mútua nos trabalhos e artigos publicados.

Também aos amigos e professores do Grupo de Estudos Avançados em Engenharia de Energia (GrEEen) da Universidade Federal do Pampa, UNIPAMPA Bagé, onde tive a oportunidade de atuar como pesquisador. Em especial ao Caique, companheiro para publicar artigo e capítulo de livro.

Em especial, ao Professor Dr. Enoque, a pessoa que viu que eu teria potencial para enfrentar essa jornada, me indicando os caminhos e servindo de exemplo.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) e ao Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos (LAPES).

Agradeço também o apoio da Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES/PROEX).

RESUMO

DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM GERAÇÃO EÓLICA CONECTADO AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

AUTOR: Roberson Adriel Bergmann Ledebuhr

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gustavo Marchesan

Com o aumento das fontes de energias renováveis na atualidade, ocorrem alguns eventos indesejáveis, tais como o ilhamento destas fontes. Este trabalho apresenta as ocorrências em um parque eólico X, onde se verificou por duas vezes o ilhamento. Em uma das ocorrências, o ilhamento do parque ocorreu em conjunto com a cidade de conexão, ficando o parque alimentando a cidade por um determinado tempo. Na segunda ocorrência de ilhamento, os serviços auxiliares do aerogerador B e da subestação coletora serviram de carga para o aerogerador A. Nos dois casos houve variações de tensão, no entanto, sem violar os limites ajustados na proteção. As outras proteções da subestação também não alcançaram valores para evitar o ilhamento. Foi realizado um levantamento de fórmulas e das proteções existentes a fim de verificar a possibilidade de utilização como um método de detecção. Utilizando a ferramenta Simulink do Matlab®, foi analisado o comportamento de sistema padrão, utilizando por base a transformada de Park, com relação a curtos-circuitos e ilhamentos, chegando em uma dinâmica destas ocorrências. Com a análise destas ocorrências reais e teóricas e mediante modelagem no simulador *Control center* da Typhoon®, testaram-se as configurações encontradas no referido parque para replicar os eventos envolvidos. Através da análise dos resultados e das proteções anti-ilhamento existentes, foi proposto uma proteção por meio de medições de níveis de tensão em eixo direto e zero, através da transformada de Park, e consequente desligamento das máquinas. Foram realizados testes posteriores desta proteção onde foram simulados diversos cenários no *Control center* da Typhoon®, conforme analisado nas oscilografias das ocorrências reais para verificar a atuação da proteção proposta.

Palavras-chave: Detecção de ilhamento. Geração Eólica. Proteção. Registros de tensão. Eixos direto e zero.

ABSTRACT

DETECTION OF ISLANDING IN TRANSMISSION SYSTEMS WITH WIND GENERATION CONNECTED TO THE NATIONAL INTERCONNECTED SYSTEM

AUTHOR: Roberson Adriel Bergmann Ledebuhr

ADVISOR: Dr. Gustavo Marchesan

With the increase in renewable energy sources today, some undesirable events occur, one that we can mention is the islanding of these sources. Considering this type of occurrence in wind farm X, where it was verified twice at different times and with different characteristics of load, generation, and final configuration after islanding. One of the occurrences was with the islanding of the park along with the connection city, at this moment the park continued to supply the city for a certain time. In the second occurrence of islanding, the auxiliary services of wind turbine B and the collector substation served as a load for wind turbine A. In both cases, there was under-voltage or over-voltage, however, with values within the limits set for this protection. The other protections of the substation also did not reach values to avoid islanding. A survey of the methods and existing protections and under study was carried out in order to verify the possibility of use in the occurred event. Using the Simulink tool from Matlab®, the behavior of the standard system was analyzed, using Park's transform as a basis, in relation to short circuits and islanding, reaching a dynamics of these occurrences. With the analysis of these real and theoretical occurrences and through modeling in the Typhoon® Control center simulator, the settings found in the said park were tested to replicate the involved events. Through the analysis of the results and the existing anti-islanding protections, a protection was proposed through measurements of voltage levels in the direct axis and zero, through Park's transform, and consequent shutdown of the machines. Subsequent tests of this protection were carried out where various scenarios were simulated in the Typhoon® Control center, as analyzed in the oscillographs of real occurrences to verify the operation of the proposed protection.

Keywords: Islanding Detection. Wind Power Generation. Protection. Voltage Record. Direct and Zero Axes.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Potencial Eólico Rio Grande do Sul	16
FIGURA 2 – Esquemático do parque eólico	19
FIGURA 3 – Tensão da SE B e corrente na LT.....	21
FIGURA 4 – Corrente LT, TF e G1 durante curto-circuito na LT.....	22
FIGURA 5 – Oscilografia da reenergização	22
FIGURA 6 – Tensão da Barra da SE B e Corrente da LT	24
FIGURA 7 – Corrente TF1 e grupo de aerogeradores G1.....	24
FIGURA 8 – Tensão na barra da SE B em pu	25
FIGURA 9 – Proteções de tensão dos aerogeradores	26
FIGURA 10 – Tensão nos aerogeradores do fabricante 1	26
FIGURA 11 – Métodos de detecção de ilhamentos	31
FIGURA 12 – Métodos passivos de detecção de ilhamentos	31
FIGURA 13 – Gráfico da transformação do sistema trifásico abc para o dq0	36
FIGURA 14 – Transformada Clarke eixos abc para $\alpha\beta$	38
FIGURA 15 – Eixos abc para $\alpha\beta$ em falta monofásica	38
FIGURA 16 – Transformada Park eixos abc para dq	39
FIGURA 17 – Blocos abc para dq	39
FIGURA 18 – Interligação entre parques e SE.....	42
FIGURA 19 - Conexão entre a SE e os sistemas interligados.....	43
FIGURA 20 – Painel de sistema supervisorio da simulação.....	43
FIGURA 21 – Medições de tensão em falta e ilhamentos simulados.....	44
FIGURA 22 – Medições de corrente em falta e ilhamentos simulados.....	45
FIGURA 23 – Medições de tensão com alteração de carga após o ilhamento.....	45
FIGURA 24 – Medições de tensão com balanço entre carga e geração.....	46
FIGURA 25 – Sistema de 5 barras.....	47
FIGURA 26 – Falta na linha e medições na barra do sistema adaptado.....	48
FIGURA 27 – Configuração do bloco conversão sistema abc para dq0.....	49
FIGURA 28 – Transformada de Park da tensão durante curto-circuito monofásico....	49

FIGURA 29 – Simulação curto-circuito monofásico no Control center	50
FIGURA 30 – Transformada Park no curto-circuito bifásico	51
FIGURA 31 – Transformada Park no curto-circuito bifásico à terra.....	51
FIGURA 32 – Transformada Park no curto-circuito trifásico	52
FIGURA 33 – Transformada Park no curto-circuito trifásico à terra.....	52
FIGURA 34 – Diagrama de blocos do PLL no Control center	55
FIGURA 35 - Tensões de eixo d do parque eólico e do sistema interligado.....	56
FIGURA 36 – Tensões de eixo 0 do parque eólico e do sistema interligado.....	57
FIGURA 37 - Algoritmo proposto para detecção de ilhamento.....	58
FIGURA 38 – Tensões de eixo d do parque eólico	59
FIGURA 39 - Tensões de eixo d do SIN	59
FIGURA 40 - Tensões de eixo 0 do parque eólico e do SIN	60
FIGURA 41 – Programação das partidas das proteções	61
FIGURA 42 - Bloco de fasor monofásico	61
FIGURA 43 - Tensão durante curto-circuito monofásico	64
FIGURA 44 – Tensão de eixo d em falta monofásica	64
FIGURA 45 – Tensão de eixo 0 em falta monofásica	65
FIGURA 46 - Tensão durante curto-circuito bifásico	65
FIGURA 47 – Tensão de eixo d em falta bifásica	66
FIGURA 48 – Tensão de eixo 0 em falta bifásica.....	66
FIGURA 49 - Tensão durante curto-circuito bifásico à terra.....	67
FIGURA 50 – Tensão de eixo d em falta bifásica à terra	67
FIGURA 51 – Tensão de eixo 0 em falta bifásica à terra.....	68
FIGURA 52 – Tensão durante curto-circuito trifásico	68
FIGURA 53 – Tensão de eixo d em falta trifásica	69
FIGURA 54 – Tensão de eixo 0 em falta trifásica	69
FIGURA 55 – Tensão durante curto-circuito trifásico à terra.....	70
FIGURA 56 – Tensão de eixo d em falta trifásica à terra.....	70
FIGURA 57 – Tensão de eixo 0 em falta trifásica à terra.....	71

FIGURA 58 – Corrente em falta trifásica	71
FIGURA 59 – Corrente em falta trifásica à terra.....	72
FIGURA 60 – Potência na carga em todos os tipos de falta.....	72
FIGURA 61 – Tensão durante o ilhamento.....	73
FIGURA 62 – Tensão de eixo d no ilhamento.....	73
FIGURA 63 – Tensão de eixo 0 no ilhamento.....	74
FIGURA 64 – Falta monofásica à terra seguida de ilhamento	75
FIGURA 65 – Tempo para detecção e partida da proteção	76
FIGURA 66 – Tempo para <i>trip</i> depois da partida	76
FIGURA 67 – Tempo para bloqueio da falta por eixo zero	77
FIGURA 68 – Falta bifásica à terra seguida de ilhamento.....	78
FIGURA 69 – Falta bifásica pura seguida de ilhamento	79
FIGURA 70 – Falta trifásica seguida de ilhamento.....	80
FIGURA 71 – Falta trifásica à terra seguida de ilhamento.....	81
FIGURA 72 – Ilhamento durante falta bifásica.....	82
FIGURA 73 – Sequência de faltas seguidas de ilhamento	83
FIGURA 74 – Sequência de faltas com ilhamento durante a falta.....	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Proteções configuradas nos aerogeradores.....	20
TABELA 2 – Parâmetros dos aerogeradores modelados.....	41
TABELA 3 – Testes de desempenho das proteções.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AFD</i>	<i>Active Frequency Drift</i> - Desvio Ativo de Frequência
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>APS</i>	<i>Automatic Phase-Shift</i> - Desvio Automático de Fase
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – Eletrobras
DI	Desligamento Involuntário
THD	Distorção harmônica total
<i>DFIG</i>	<i>Double-Fed Induction Generator</i> - gerador de indução com rotor bobinado
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ECE	Esquemas de Controle de Emergência
GD	Geração Distribuída
kV	Quilovolt
Hz	Hertz
LT	Linha de Transmissão
MVA	Megavoltampère
MW	Megawatt
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<i>PLL</i>	<i>Phase Locked Loop</i>
PMU	Unidade de medição fasorial
PU	Por Unidade
<i>PLCC</i>	<i>Power Line Carrier Communication</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
<i>ROCOF</i>	<i>Rate of Change of Frequency</i> - Taxa de variação de frequência
<i>V Shift</i>	Salto Vetorial
<i>SFS</i>	<i>Sandia Frequency Shift</i>
SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia CEPEL
GPS	Sistema de posicionamento Global
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
<i>SMS</i>	<i>Slip Mode Frequency Shift</i> - Deslocamento de frequência
OF/UF	Sobre/Subfrequência

OV/UV	Sobre/Subtensão
SE	Subestação
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
TF	Transformador
TP	Transformador de potencial
ZND	Zona de Não Detecção

LISTA DE SÍMBOLOS

abc	Sistema elétrico trifásico com sequência de fases abc
$kd, kq, k0$	Constantes proporcionais eixos dq0
$Link DC$	Ligação de Corrente Contínua
V_A	Tensão da fase A
V_B	Tensão da fase B
V_C	Tensão da fase C
V_d	Tensão de eixo direto
X_d	Resultante de eixo direto
x_{da}	Resultante eixo direto fase A
x_{db}	Resultante eixo direto fase B
x_{dc}	Resultante eixo direto fase C
A	Eixo alfa transformada de Clarke
B	Eixo Beta transformada de Clarke
Ωt	Ângulo do vetor da tensão
θ_k	Ângulo entre eixo de fase (abc) e eixo direto (dq0)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2 MOTIVAÇÃO.....	17
1.2.1 Considerações Gerais.....	17
1.2.2 Análise dos ilhamentos no sistema real.....	18
1.3 OBJETIVOS.....	28
1.3.1 Objetivo Geral.....	28
1.3.2 Objetivos Específicos.....	28
1.4 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	28
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	29
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	30
2.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTOS.....	30
2.2.1 Esquemas locais passivos de detecção.....	31
2.2.2 Esquemas locais ativos de detecção.....	32
2.2.3 Esquemas locais híbridos de detecção.....	33
2.2.4 Esquemas remotos de detecção.....	33
2.3 TRANSFORMADA DE PARK.....	35
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
3. SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	41
3.1 Configuração do parque eólico no software <i>Control center</i> da Typhoon Hill®.....	41
3.1.1 Curto-circuito seguido de ilhamento e reconexão do sistema.....	43
3.2 DINÂMICA DE UM CURTO-CIRCUITO NA LINHA.....	47
3.2.1 Curto-circuito monofásico.....	49
3.2.2 Curto-circuito bifásico.....	50
3.2.3 Curto-circuito trifásico.....	51
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
4. MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO PROPOSTO.....	54
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	54
4.2 MÉTODO DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO UTILIZANDO COMPONENTES DE EIXO DIRETO E ZERO DA TENSÃO.....	54

4.2.1 PLL para sistemas trifásicos.....	55
4.2.2 Medições realizadas com o PLL.....	56
4.2.3 Algoritmo proposto para proteção.....	57
4.2.4 Sinais de partida da proteção.....	60
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	63
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	63
5.2 SISTEMA TESTE.....	63
5.3 CURTO-CIRCUITO E ILHAMENTO.....	63
5.3.1 Curto-circuito Monofásico.....	63
5.3.2 Curtos-circuitos bifásicos.....	65
5.3.3 Curtos-circuitos trifásicos.....	68
5.3.4 Ilhamento.....	72
5.4 CURTOS-CIRCUITOS SEGUIDOS DE ILHAMENTO.....	74
5.4.1 Curto-circuito monofásico seguido de ilhamento.....	74
5.4.2 Curtos-circuitos bifásicos seguido de ilhamento.....	77
5.4.3 Curtos-circuitos trifásico seguido de ilhamento.....	79
5.4.4 Ilhamento durante os curtos-circuitos.....	81
5.4.5 Desempenho da proteção proposta.....	82
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
6. CONCLUSÕES.....	86
6.1 TRABALHOS PUBLICADOS NESTA ÁREA DE PESQUISA.....	86
6.1.1 Artigo em congressos.....	86
REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

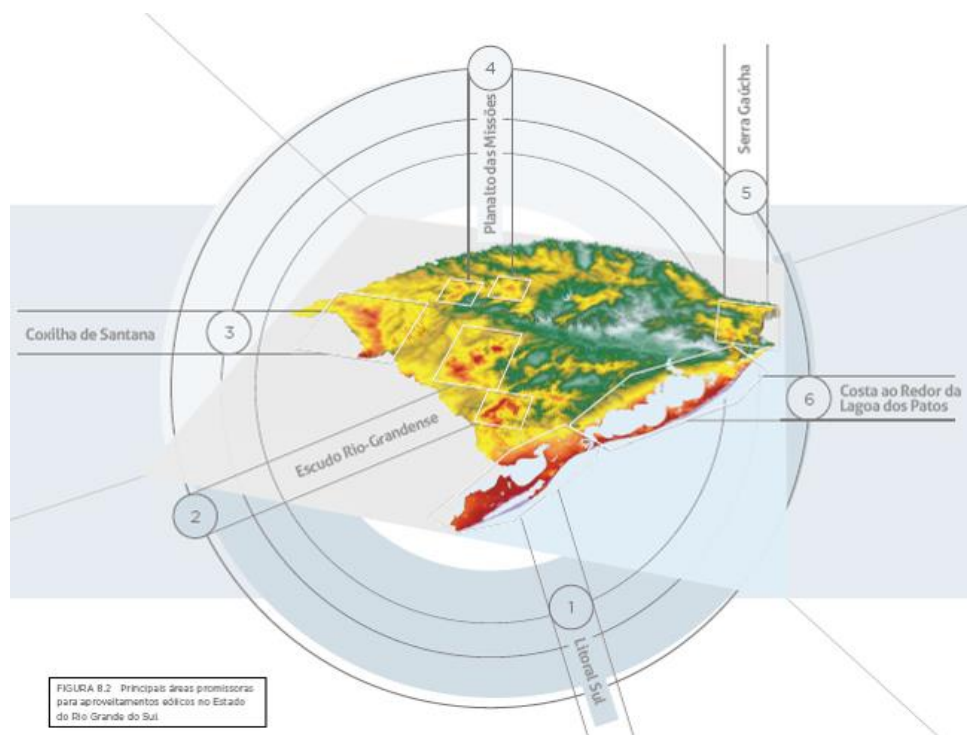
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), apesar da retração no consumo de energia elétrica devido à pandemia da COVID-19, existe a previsão da retomada do crescimento do consumo dos últimos anos, que no Brasil foi de 1,3% em 2019 (EPE, 2019).

Aliando esse crescimento, a dificuldade de encontrar novos locais para instalação de usinas hidrelétricas, juntamente com o elevado custo financeiro e ambiental da geração térmica, serviu de incentivo para busca de energias alternativas. No intuito de diversificar o sistema elétrico nacional, essas necessidades encontram na geração eólica uma excelente fonte de energia limpa e de menor custo, com a possibilidade de instalação na maioria do território nacional (REIS, 2011).

No entanto, analisando, por exemplo, o mapa eólico do Rio Grande do Sul, conforme Figura 1, é possível observar que o estado apresenta os maiores potenciais nas regiões do litoral e da campanha.

Figura 1 – Potencial Eólico Rio Grande do Sul



Fonte: Schubert (2014)

Já a região metropolitana de Porto Alegre, apesar de possuir as maiores cargas, apresenta baixo potencial eólico. Da mesma forma como no caso da hidroeletricidade, as regiões com

maior potencial energético geralmente não estão inseridas no centro de carga, necessitando de longas linhas de transmissão, as quais estão sujeitas a falhas e ao ilhamento não intencional.

A operação de qualquer geração de forma ilhada não é uma condição desejada, sendo restringida nos procedimentos operacionais do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) a situações especiais.

Por outro lado, a geração eólica, assim como a fotovoltaica, não deve operar em modo ilhado. Logo, necessita que o sistema de proteção detecte e desconecte a geração da carga em casos de ilhamento não intencional.

1.2 MOTIVAÇÃO

1.2.1 Considerações gerais

Geração composta unicamente de aerogeradores, não são próprios para o funcionamento ilhado. Sem a conexão com a rede, a variação do vento e das cargas, tendem a causar a alteração da tensão e frequência da rede isolada, desta forma, a proteção deve detectar e desligar em casos de ilhamento.

Em casos de separação entre sistemas, onde um deles tem prevalência de fontes eólicas, pode causar alterações de tensão e frequência que prejudica a qualidade de energia e pode sensibilizar as proteções. No entanto, de forma geral o ilhamento de um parque eólico não é relatado na literatura ou difundido sobre ocorrências, porém, apesar de apresentar baixa incidência, não é desejado.

A legislação considera como micro ou minigeração a GD com fontes até o máximo de 5 Megawatt (MW), nestes casos o PRODIST módulo 3 informa a necessidade de proteção anti-ilhamento. Quando existem diversos geradores conectados em um ponto é considerado como uma central geradora, sendo importante considerar que até 30 MW ela é considerada uma pequena central de energia elétrica.

Os casos de parques eólicos, por questões de isenções fiscais, são geralmente ofertados e implantados como lotes de até 30 MW, porém, mais de um parque eólico tende a ser conectado em uma SE coletora, conectado diretamente na rede básica. Por esse tipo de configuração, os sistemas de proteção utilizados são os de uma subestação de rede básica, de forma que não é previsto proteção específica para anti-ilhamento. As proteções configuradas nos aerogeradores, que podem contribuir para essa detecção, são sobrefrequência/ subfrequência (OF/UF) e sobretensão / subtensão (OV/UV).

No entanto, a detecção é importante, seja para realizar o desligamento do parque ou para

atuar no controle, evitando desligamento de áreas maiores. Os fatos relatados podem servir para subsidiar a alteração regulatória sobre a exigência dessa função de proteção.

Conforme Mahat, Chen e Bak-Jensen(2011), as operações ilhadas de sistemas elétricos podem ocasionar problemas, tais como:

- Alteração do nível de curto-circuito e problemas de aterramento;
- Degradação da qualidade da energia elétrica por meio da violação dos limites definidos pelo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2017);
- Instabilidades de tensão e frequência.

Assim, regulamentos técnicos e as normas, como a IEEE 1547 (2018), recomendam a desconexão em casos de ilhamento da geração distribuída (GD) em até 2 segundos (s) após a ocorrência.

Quando conectados à rede, a operação das turbinas eólicas opera para gerar a máxima potência que está disponível no vento. No entanto, quando o sistema eólico é isolado, esse tende a instabilidade, pois geralmente existem diferenças entre a demanda e geração, desligando assim os aerogeradores pelas proteções próprias.

Existem alguns casos em que existe o balanço entre potência gerada e demanda de carga, nestes casos o ilhamento não intencional é de difícil detecção. No entanto, assim como nos demais casos, é necessário a atuação de uma proteção que detecte essa situação e desligue os aerogeradores.

1.2.2 Análise dos ilhamentos no sistema real

1.2.2.1 Configuração do parque eólico

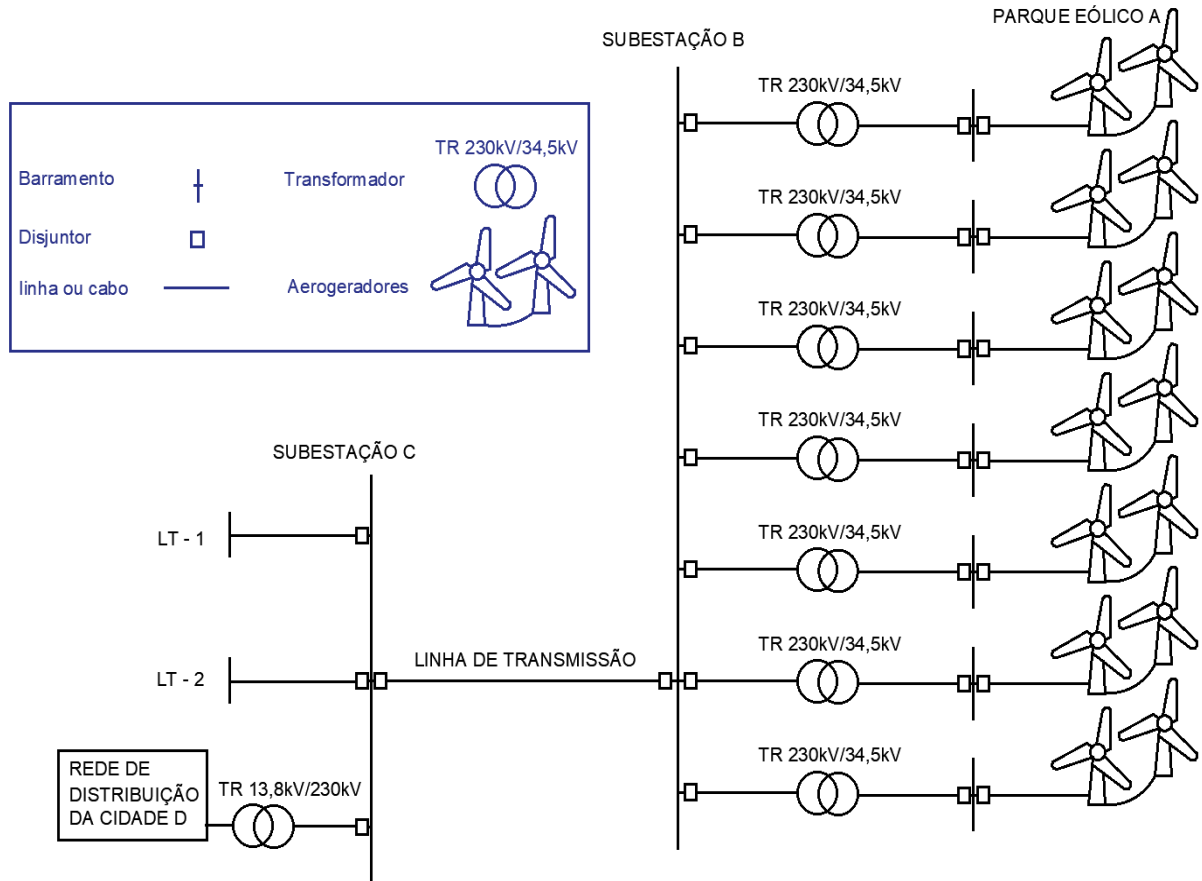
A Figura 2 demonstra a configuração do parque eólico conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e objeto de estudo nesta dissertação.

O diagrama é composto por:

- Um parque eólico A, com linhas coletoras de 34,5 kilovolt (kV), onde estão conectados em média 5 aerogeradores com potência nominal unitária de 2 Megavoltampère (MVA);
- Uma Subestação (SE) B onde estão conectados 7 transformadores, sendo cada um conectado a 3 linhas coletoras do parque eólico A totalizando assim 30 MVA de geração pico por transformador;
- Uma SE C que é interligada com a SE B através de uma linha de transmissão (LT) de 230 kV. Nela existem LTs interligando com outras SEs do SIN e conexão de cargas através das

linhas de distribuição da cidade denominada D.

Figura 2 – Esquemático do parque eólico



Fonte: O autor (2023)

1.2.2.2 Configuração das proteções

Na SE coletora existem proteções de linha de transmissão, de barra, dos transformadores, assim como das linhas coletoras. Os aerogeradores têm proteções próprias de cada fabricante, sendo que, neste estudo de caso, existem três distintos, chamados de fabricantes 1, 2 e 3.

A proteção anti-ilhamento que está configurada na SE B faz uso de um relé de subtensão ajustado em 0,4 pu (por unidade) com temporização de 5 s.

Os esquemas de proteção dos aerogeradores são apresentados na Tabela 1, os quais utilizam as proteções de OV/UV e OF/UF.

Tabela 1. Proteções configuradas nos aerogeradores

Subestação	Unidade	Tempo (s)
Sobretensão (pu)	1,20	5
Sobretensão (pu)	1,15	12
Subtensão (pu)	0,4	5
Fabricante 1	Unidade	Tempo (s)
Sobretensão (pu)	1,20	0,50
Subtensão (pu)	0,8	5
Subfrequência (Hz)	56,5	0,1
Sobrefrequência (Hz)	63	0,1
Fabricante 2	Unidade	Tempo (s)
Sobretensão (pu)	1,20	0,05
Subtensão (pu)	0,9	5
Subfrequência (Hz)	56,5	0,1
Sobrefrequência (Hz)	63	0,1
Fabricante 3	Unidade	Tempo (s)
Sobretensão (pu)	1,1	5
Subtensão (pu)	0,9	5
Subfrequência (Hz)	56,5	0
Sobrefrequência (Hz)	63	0
Subfrequência (Hz)	58,5	10
Sobrefrequência (Hz)	61,5	10

1.2.2.3 Ilhamento Parque Eólico A e a Cidade D

O parque eólico conta com duas linhas que interligam a SE C ao SIN. No momento da perturbação na LT1, a LT2 estava desligada para manutenção. Assim, ocorreu ilhamento não intencional das cargas locais (9 MW da cidade D conectados à SE C) e a SE B (com 2 transformadores e o parque eólico). No momento da perturbação a velocidade do vento era baixa e as 30 máquinas estavam gerando, aproximadamente, 9 MW.

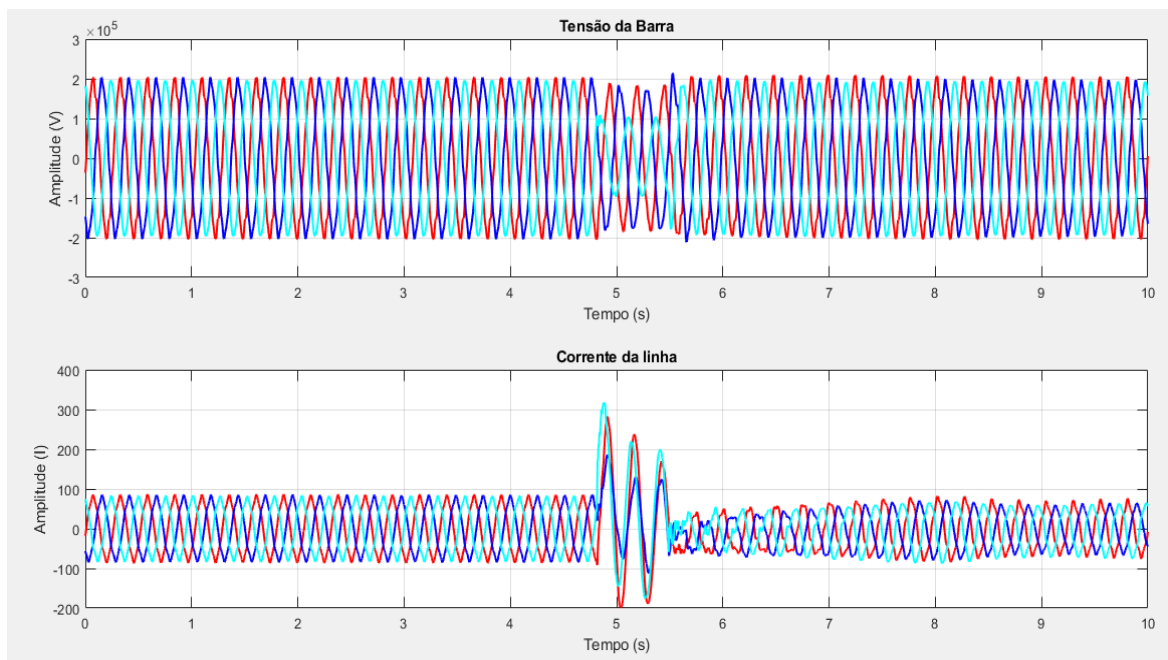
Com base nas condições de equilíbrio de potência, relatadas anteriormente, os relés não

foram sensibilizados e a proteção não foi capaz de detectar a operação ilhada. As cargas e os aerogeradores ficaram operando na ZND das proteções. A linha de transmissão que interliga as SEs B e C ficou operando com capacidade mínima, colaborando no consumo de potência reativa dos geradores eólicos. Essa condição permaneceu por aproximadamente 40s até que a linha de transmissão afetada pela perturbação fosse religada manualmente pela concessionária atuante.

A Figura 3 demonstra os sinais da tensão da barra da SE B e a corrente na linha de transmissão entre as SE's B e C. A oscilografia mostra que a tensão reduz, no entanto, não alcança o valor ajustado no relé de proteção (0,4 pu).

O tempo desta ocorrência é de aproximadamente 44 milissegundos (ms), indicando que a linha sob falta veio a abrir corretamente. Porém, pela condição sistêmica do momento, de equilíbrio entre a geração e a carga, a geração eólica ficou alimentando a carga da cidade D.

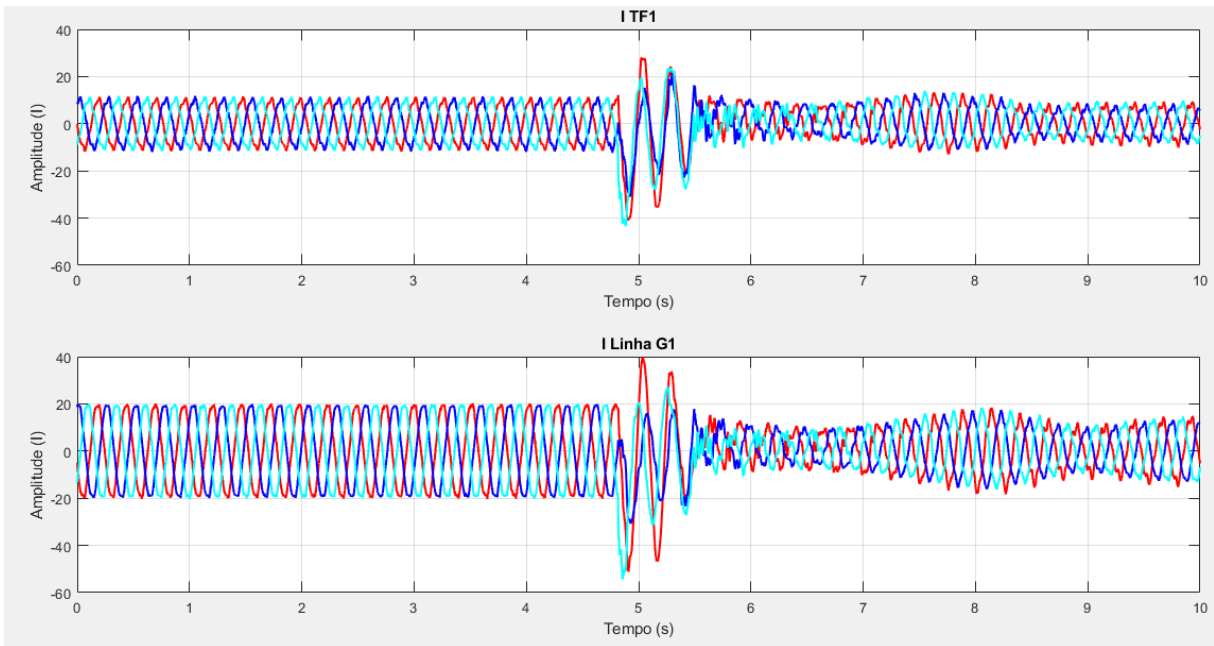
Figura 3 – Tensão da SE B e corrente na LT



Fonte: O autor (2023)

A Figura 4 mostra as correntes em um dos transformadores, designado de TF1 (I TF1) e em uma das linhas com 5 aerogeradores conectados, designada de G1 (I Linha G1). É possível notar que após a falta o sistema, composto pelo parque A, as SEs B e C e a cidade D, continuou energizada indevidamente.

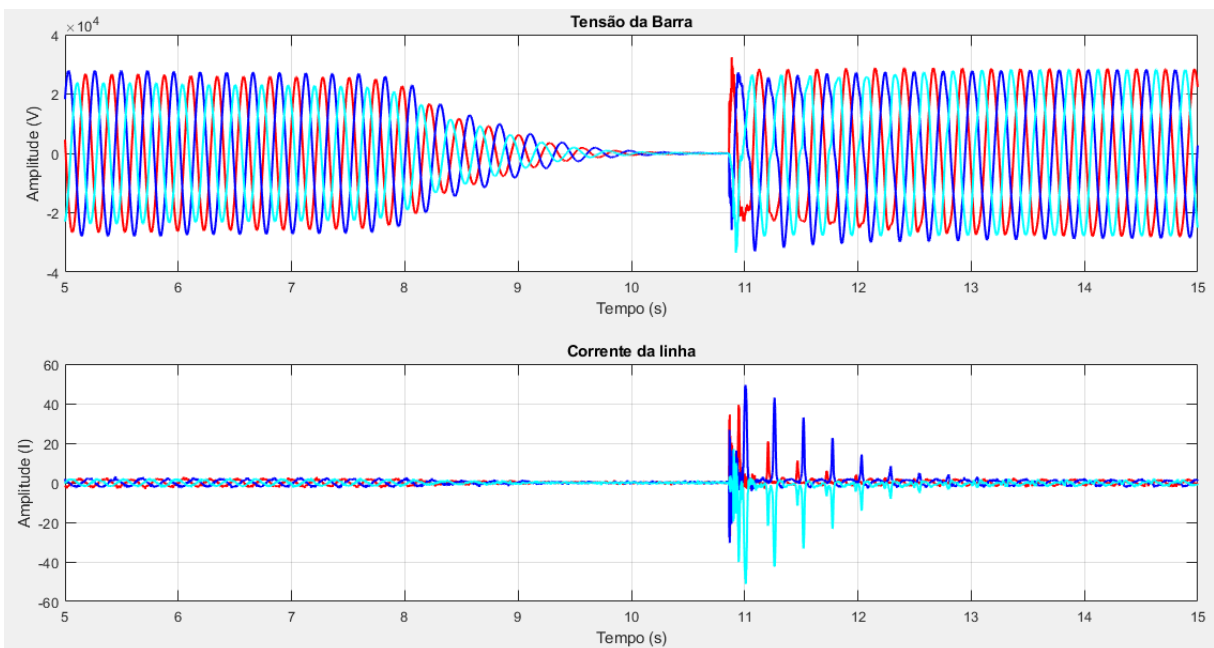
Figura 4 – Corrente TF1 e G1 durante curto-circuito na LT



Fonte: O autor (2023)

A Figura 5 mostra as oscilografias após o religamento da linha, conectando novamente o sistema isolado ao SIN. Note que na reconexão ao sistema, os sinais de tensão tendem a zero até o momento do sincronismo entre os dois sistemas, normalizando assim a região afetada.

Figura 5 – Oscilografia da reenergização



Fonte: O autor (2023)

Como os parâmetros medidos no sistema estavam dentro dos padrões de sincronismo

(relé 25), foi possível o fechamento do DJ que isolou a falta mesmo com o sistema ilhado. Em uma reconexão sincronizada o transitório deve ser mínimo, o que não ocorreu nesse evento. Isto indica que uma reconexão do sistema ilhado pode ser extremamente prejudicial ao sistema ilhado, ao SIN e aos aerogeradores, confirmando a necessidade de um esquema de proteção anti-ilhamento.

1.2.2.4 Ilhamento Parque Eólico A alimentando serviço auxiliar dos outros aerogeradores e da SE

Posteriormente, no mesmo parque eólico, ocorreu o desligamento da LT que interliga a SE B e a SE C, decorrente de um curto-circuito bifásico (fases A e B) nessa LT, causado por descarga atmosférica.

Houve atuação correta da proteção diferencial de linha em ambos os terminais, e da proteção de distância de fase, zona 1, no terminal da SE C, nas proteções principal e alternada. Não houve atuação do esquema de religamento automático da linha devido ao tipo de defeito (bifásico, para um religamento em modo monopolar).

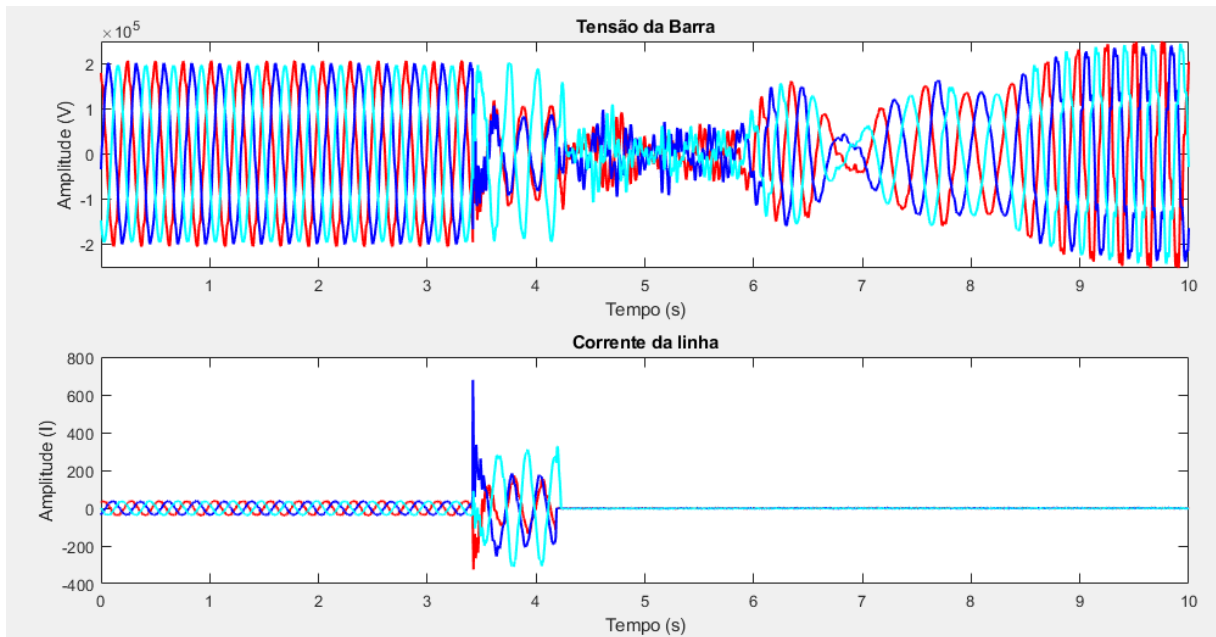
Após a abertura da linha, houve sobretensão na barra de 230 kV da SE B, devido a alguns dos conjuntos de aerogeradores conectados à SE ficarem operando em modo isolado ao SIN.

A Figura 6 apresenta a oscilografia da barra da SE B e a corrente na linha de conexão entre as SEs B e C e a figura 7 apresenta as correntes do Transformador1 (I TF1) e as correntes da linha com um conjunto de aerogeradores denominado de G1 (I G1).

A Figura 6 mostra que a tensão na SE B cai no momento da ocorrência e a corrente da linha tem uma elevação, indicando uma falta, que foi corretamente detectada pela proteção, ocasionando a abertura correta do DJ. Por sua vez, essa abertura é verificada pela interrupção da corrente no circuito no segundo gráfico.

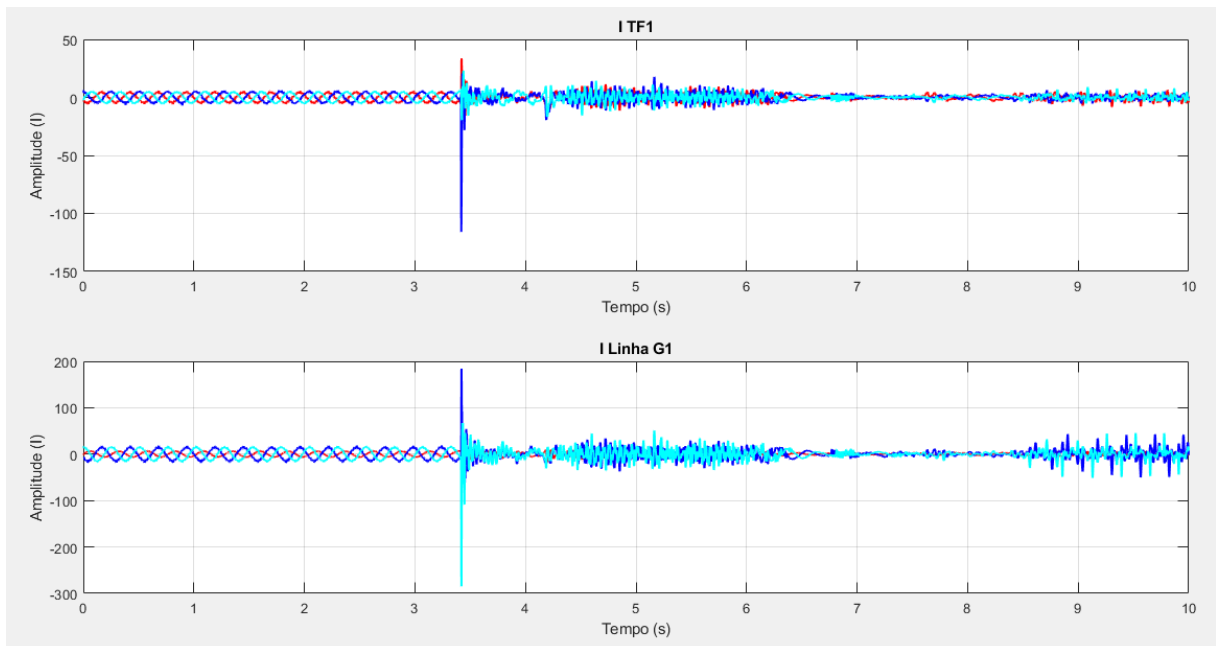
Note que apesar da subtensão momentânea durante a falta até a abertura da linha, a tensão retorna aos valores próximos aos nominais. As correntes dos transformadores e das linhas dos aerogeradores apresentaram comportamento semelhante, indicando que começou a operação ilhada.

Figura 6 – Tensão da Barra da SE B e Corrente da LT



Fonte: O autor (2023)

Figura 7 – Corrente TF1 e grupo de aerogeradores G1



Fonte: O autor (2023)

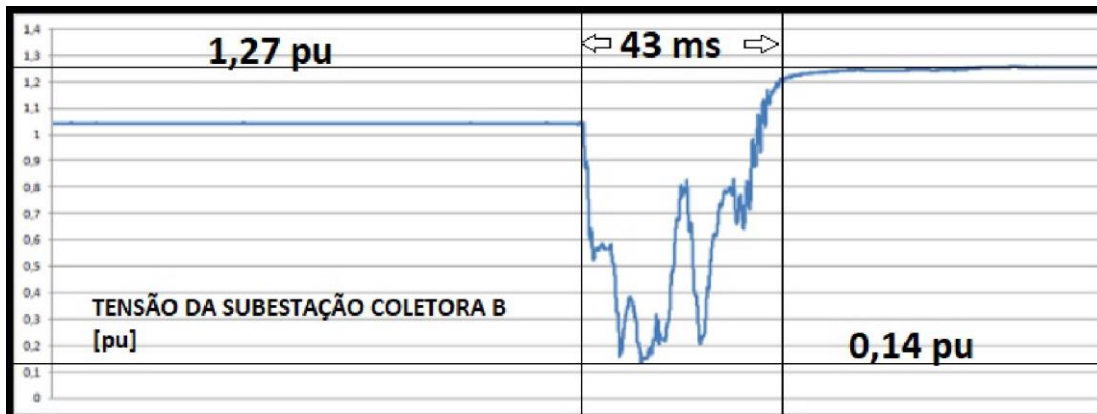
A medição da corrente verificada no parque eólico, com 180 MVA, representa aproximadamente 10% da capacidade, onde teria uma corrente na ordem de 360 A por fase.

Aliado a isso, uma parte dos aerogeradores desligou pelo ajuste das suas proteções, esta condição possibilitou que a geração reduzida, de alguns aerogeradores restantes que não desligaram, devido a terem proteção com ajustes menos restritivos, alimentasse os serviços

auxiliares dos aerogeradores fora de serviço.

A Figura 8 apresenta o valor em pu da tensão da SE B, é possível perceber que a tensão atingiu um valor aproximado de 1,27pu. No entanto, na data da ocorrência não estavam configuradas proteção de sobretensão na barra da SE B ou nos transformadores. Nos aerogeradores estavam configurados os relés de tensão e frequência, com ajustes distintos entre eles. Nesta ocorrência os aerogeradores dos fabricantes 1 e 3 participaram da operação ilhada não desejada. Por outro lado, os aerogeradores do fabricante 2 não contribuíram como geração ou como carga.

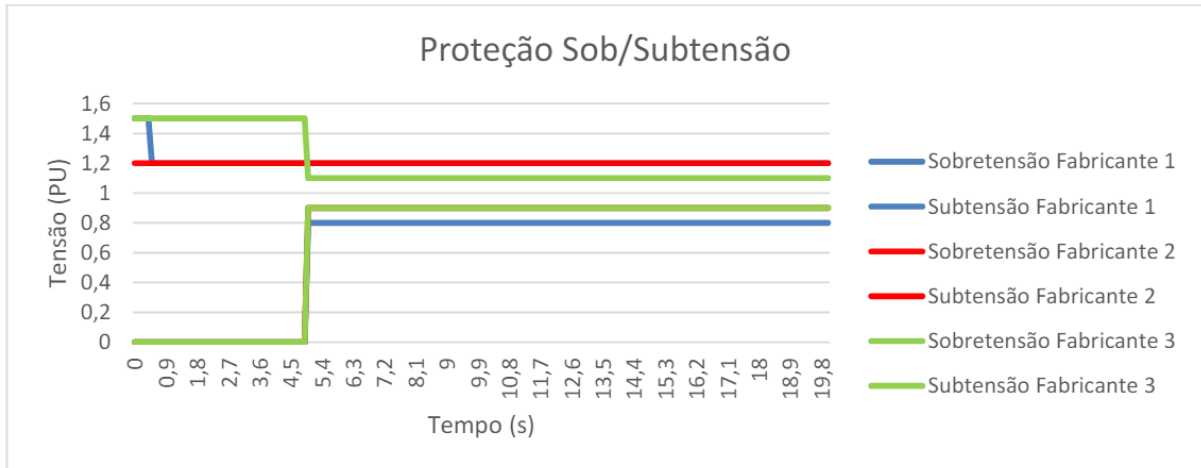
Figura 8 – Tensão na barra da SE B em pu



Fonte: O autor (2023)

Na Figura 9 são apresentados os gráficos das proteções de tensão dos 3 fabricantes. Note que: I) para sobretensões os aerogeradores do fabricante 1 estão configurados com um valor de sobretensão maior, o que fez com que estes se mantivessem ligados; II) o aerogerador do fabricante 1 é "full converter", composto por gerador síncrono de ímã permanente com conversor de energia de plena capacidade, desta forma manteve o perfil de potência gerada, o que contribuiu para o ilhamento; III) os aerogeradores do fabricante 3 tem o menor valor de ajuste para sobretensão, portanto foram desligados, servindo de carga. As configurações e condições sistêmicas do momento em que houve a ocorrência favoreceram a um equilíbrio geração (aerogeradores do fabricante 1) *versus* carga (aerogeradores do fabricante 3), o que implicou no ilhamento não intencional.

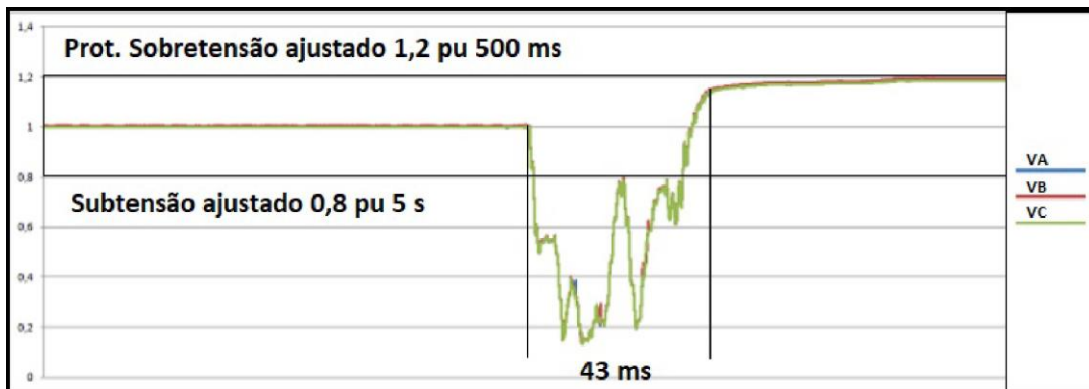
Figura 9 – Proteções de tensão dos aerogeradores



Fonte: O autor (2023)

A Figura 10 mostra a tensão, em pu, dos aerogeradores do fabricante 1. Por meio da Figura é possível notar que a tensão não alcançou o valor ajustado. Indicando que não houve falha na atuação da proteção parametrizada e sim uma condição sistêmica que ocasionou o ilhamento não intencional.

Figura 10 – Tensão nos aerogeradores do fabricante 1



Fonte: O autor (2023)

Observa-se que pelas condições sistêmicas, assim como no primeiro evento, ocorreram equilíbrios entre geração e carga, mantendo os valores de tensão e frequência dentro dos padrões de funcionamento normal, implicando em não atuação das proteções, ou seja, operando em uma ZND.

Posteriormente foi acrescentada a função de sobretensão nos transformadores da SE B, com valores de 1,15 pu em 12 s como primeiro estágio e 1,20 pu em 5 s para o segundo estágio de proteção, no intuito de evitar ilhamento como o relatado.

Diversos estudos já foram realizados sobre o tema, que serviram de base para essa dissertação. No artigo de El-Khattam e colaboradores (2011) é feito um comparativo entre as proteções anti-ilhamento em um sistema de distribuição onde está inserido um parque eólico.

Algumas proteções utilizadas já estão amplamente conceituadas como subtensão (27), sobretensão (59), subfrequência (81) e sobrefrequência (81), enquanto outras ainda são objetos de muitos estudos, como proteções utilizando análise de harmônicas (KAREGAR e SHATAEE, 2008), taxa de variação de frequência ((do inglês, *Rate of Change of Frequency*, ROCOF) e salto vetorial (*V Shift*) (AGHDAM e KAREGAR, 2011). Ademais, existem estudos com proposições de proteções novas com transformada Wavelet (MORCI, DIDUCH e CHANG, 2010), algoritmos específicos (AGHDAM e KARGAR, 2012), além de estudos que utilizam de unidades de medição fasorial (do inglês, *Phasor Measurement Unit*, PMU) (GUO e LAVERTY, 2013) para detectar o ilhamento remotamente em uma central de operação.

A detecção de ilhamentos não intencionais é assunto de ampla pesquisa em todos os tipos de sistema elétrico, desta forma, vários estudos foram objetos de publicações. Pedersen e colaboradores (2000) realizaram um experimento para analisar as consequências nos parâmetros de tensão (V) e corrente (I) durante um ilhamento não intencional em um parque eólico, foi realizado uma abertura programada e verificado um salto de fase, seguido de mudanças de nível de tensão, frequência e o aparecimento de harmônicos significativos.

Vários métodos de detecção foram propostos, entre eles pode-se citar o trabalho proposto por Karegar e Shataee (2008) para detecção de ilhamento através da análise THD, de parques eólicos com geradores assíncronos.

Já o artigo de Aghdam e Karegar (2011) propõe a utilização de relés ROCOF para detecção de ilhamento do aerogerador eólico com gerador de indução auto-excitado.

Enquanto El-Khattam e colaboradores (2011) utilizaram três relés comerciais para analisar a possibilidade de detecção do ilhamento de um aerogerador de ímã permanente (do inglês, *Permanent Magnet Synchronous Generator*, PSMG), as funções testadas foram sobre e subtensão (OV/UV), *Vector Shift*, sobre e subfrequência (OF/UF) e ROCOF. Nas simulações foi possível observar que mesmo que os tempos de detecção foram satisfatórios, alguns casos simulados não são detectados, gerando zonas de não detecção.

Em artigo de Zhang e Ooi (2015) há a proposta de um sistema de controle para operar um parque eólico baseado em aerogeradores com gerador de indução com rotor bobinado (DFIG). O método busca o ilhamento temporário após a desconexão de forma não intencional do parque. Esta proposta baseia-se na inserção de um sinal para controlar o ângulo de passo da

pá, dessa forma controlando a potência de geração para equalizar com a carga.

Esta seção discorreu sobre dois casos de ilhamento não intencional de um parque eólico, conectado ao sistema elétrico nacional. Durante a análise ficou evidente que no momento da falta que gerou o ilhamento ocorreu o balanço entre a carga e a geração bem como pouca variação desses parâmetros.

Considerando a necessidade de condições específicas, que não são comuns, assim como na carência de análises semelhantes a esta na literatura, supõe-se que esses ilhamentos teriam uma frequência baixa de ocorrências. No entanto, em um mesmo parque verificou-se duas ocorrências similares. Assim existe a possibilidade de que eventos semelhantes fiquem limitados à análise pelas empresas envolvidas, não sendo amplamente utilizados.

A possibilidade de ocorrer a não detecção e suas consequências justificam estudos para evitar suas graves consequências.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral, propõe-se procedimento metodológico para adoção de proteção adicional para detecção de ilhamento não intencional de aerogeradores.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Reproduzir eventos reais em softwares de simulação e verificar o desempenho do método proposto;
- Testar e comprovar a correta atuação da proteção proposta;
- Comparar o desempenho com proteções já estudadas e com dados reais das ocorrências analisadas.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Como contribuição desta dissertação pode-se citar:

- A análise de ocorrências de ilhamento não intencional de parque eólico conectado ao sistema elétrico de potência (SEP), o que é pouco discutido.
- Proporcionar debate sobre alteração das normas referente a proteção em parques eólicos conectados ao sistema elétrico.

- Proposta de método para detecção do ilhamento não intencional de parque eólico, com diminuição de zonas de não detecção (ZND).

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação apresenta a seguinte estrutura: o Capítulo 1 apresenta a introdução ao problema do ilhamento não intencional e suas consequências. As motivações estão colocadas também nesse capítulo, assim como, os objetivos e as contribuições que essa dissertação possa promover. Foi analisada uma ocorrência real do problema, sendo a principal motivação, complementado com trabalhos relacionados ao tema, destacando os pontos positivos e negativos de cada estratégia.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica referente aos métodos de detecção de ilhamento e uma explanação referente a transformada de Park, principal conceito utilizado para os estudos.

No terceiro capítulo são apresentados a simulação do sistema teste proposto, e uma análise referente a dinâmica de um curto-circuito em uma linha, com referência aos resultados da transformada de Park.

O quarto capítulo descreve a proposta de método para detecção dos ilhamento.

O capítulo quinto é formado pela apresentação dos resultados das simulações e pela comparação entre o sistema real e o sistema simulado. Dentro deste capítulo estão descritos a atuação em cada tipo de falta e um teste de desempenho desta proteção.

As conclusões do trabalho e sugestões de futuras pesquisas estão apresentadas no sexto capítulo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Em sistemas elétricos de potência a operação se dá de forma interconectada, proporcionando maior segurança e resiliência em casos de faltas ou perturbações, garantindo que as grandezas elétricas de tensão, corrente e frequência sejam pouco afetadas.

Os casos ilhamento de parte do sistema, pode ser classificado de duas formas, intencional ou não intencional.

Na operação ilhada intencional pode-se citar sistemas em regiões remotas, assim como em situações em que é necessário o ilhamento de parte do sistema por atuação dos Esquemas de Controle de Emergência (ECE), evitando perda de estabilidade.

Considera-se operação ilhada não intencional quando parte de um sistema permanece energizado indevidamente após a abertura de proteção ou comando manual. Devido à falta de controle das variáveis elétricas na ilha formada, este fenômeno pode ter graves implicações principalmente na qualidade de energia entregue ao consumidor.

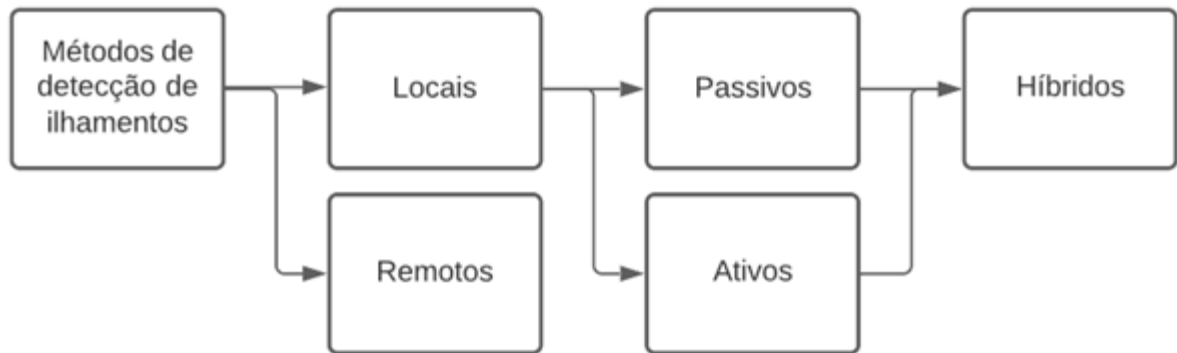
2.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTOS

Existem diversas técnicas para detecção de ilhamentos, sendo que se pode separar em locais, onde a detecção ocorre diretamente no ponto de conexão da geração, e os métodos remotos, onde existe a dependência de uma comunicação.

Quando se trata de métodos locais, ainda temos a subdivisão em métodos passivos, onde são medidas as variáveis do sistema e realizada a detecção, e métodos ativos, onde são introduzidas alterações nas variáveis do sistema, eliminando ou diminuindo as zonas de não detecção (ZND), mas prejudicando a qualidade da energia.

Ainda podem ser citados os métodos híbridos que melhoram a qualidade em relação aos ativos puros, no entanto, possuem algumas dificuldades de implantação. A Figura 11 demonstra essa divisão citada, demonstrando também que os métodos híbridos têm etapa ativa e etapa passiva, formando assim o método híbrido.

Figura 11 – Métodos de detecção de ilhamentos.

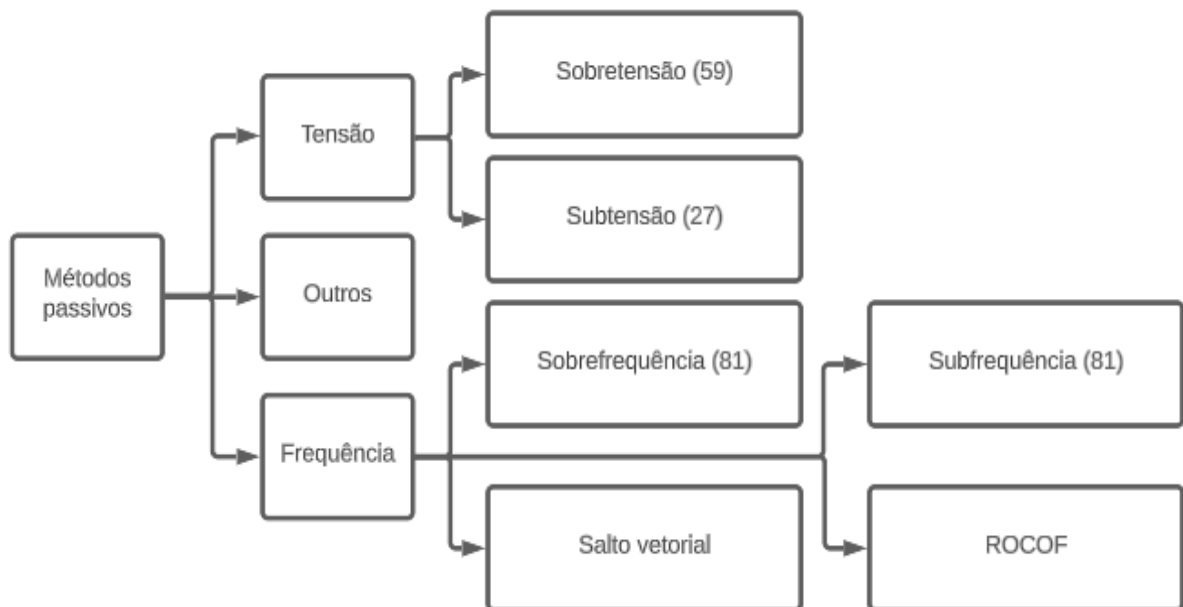


Fonte: O autor (2023)

2.2.1 Esquemas locais passivos de detecção

Conforme demonstrado na Figura 12, os esquemas passivos podem ser divididos pelas variáveis medidas como tensão, frequência e harmônicas. Posteriormente, dentro dessa divisão são apresentadas subdivisões, com relação aos limites altos verificados de sobretensão e sobrefrequência, assim como os níveis baixos de subtensão e subfrequência ou relacionado a *V Shifts*, ou ROCOF.

Figura 12 – Métodos passivos de detecção de ilhamentos.



Fonte: O autor (2023)

2.2.1.1 Tensão (V)

Devido à diferença entre a carga e a geração em um caso de ilhamento, uma das grandezas elétricas do sistema elétrico que tende a variar é a tensão. Assim, essa variável é utilizada na detecção de ilhamentos não desejados por meios de funções de subtensão e sobretensão. No entanto, apesar de ser de fácil aplicação, não implicando em custos elevados, é passível de ZND, em casos de balanço entre carga e geração e apresenta desligamentos indevidos (DI) em casos de curto-circuito.

2.2.1.2 Frequência

Outra grandeza que é influenciada, durante ilhamentos não desejados, pela diferença entre a carga e a geração é a frequência. Desta forma, pode ser verificado casos de sobre/subfrequências (OF/UF). Na verificação da frequência também pode-se citar medições na ROCOF ou *V Shifts* no ângulo da tensão.

Assim como em outros métodos passivos, as ZND e os DI estão presentes nessas técnicas de detecção. A simplicidade em aplicar e custos se equiparam com as outras técnicas passivas.

2.2.1.3 Outros métodos passivos

Existem estudos de outros métodos passivos, como variação de potência ativa, reativa e harmônicos, devido à necessidade de diminuir as ZND e os DI. Essa é uma área de conhecimento continuamente estudada, e os métodos passivos têm normalmente custos e simplicidades de implantação melhores que outros métodos.

2.2.2 Esquemas locais ativos de detecção

Os métodos ativos buscam introduzir uma perturbação ao sistema, e monitorar suas variáveis. Dentre essas técnicas pode ser citado métodos que forçam um desvio de frequência, a medição de impedância por injeção de harmônicas e o deslocamento de tensão.

Essas técnicas resolvem boa parte das ZND, no entanto, como desvantagem pode-se citar o fato que causam deterioração na qualidade da energia e apresentam alguns problemas e dificuldades para implantação. Na sequência serão citadas algumas técnicas.

2.2.2.1 Desvio de Frequência

Os métodos que utilizam essa técnica forçam um desvio na frequência por meio de um inversor que injeta corrente no sistema, desta forma, a variação de frequência para o caso de ilhamento irá rapidamente aparecer. É importante ressaltar que durante a operação conectada quem regula a frequência é a rede.

Existem diversos estudos para aplicação desta técnica, sendo que essa tem algumas variantes como SMS (do inglês, *Slip-mode Frequency Shift*), APS (do inglês, *Automatic Phase-Shift*) e AFD (do inglês, *Active Frequency Drift*) e SFS (do inglês, *Sandia Frequency Shift*), (BOWER e ROPP, 2002; JOHN *et al.*, 2004; SANCHIS *et al.*, 2005).

2.2.2.2 Medição de impedância

Conceitualmente a impedância do sistema tende a ser menor quando o sistema está interligado, e durante o ilhamento ocorre o aumento dessa impedância, sendo possível assim verificar o ilhamento, pela medição deste parâmetro.

As técnicas para realizar essa medição podem ser através da injeção de correntes sub harmônicas (TEDDE e SMEDLEY, 2014), a inserção de um indutor em paralelo com o gerador (KHAMIS, *et al.*, 2013) ou a inserção de altas frequências para realizar essa medição.

2.2.3 Esquemas locais híbridos de detecção

Para os casos dos métodos híbridos estudados pode-se citar SFS + ROCOF (KHODAPARASTAN *et al.*, 2015), alteração da potência em função da variação da tensão (MAHAT *et al.*, 2009) e conexão de impedância (CHANG, 2010). Esses métodos resolvem alguns problemas como a deterioração da qualidade de energia, mas implicam em ajustes e condições específicas.

2.2.4 Esquemas remotos de detecção

Com a comunicação entre as subestações e as melhorias computacionais foi possível desenvolver técnicas remotas de detecção e abertura dos disjuntores para evitar o ilhamento não desejado, entre elas, transferência direta de disparo, técnicas baseadas no sistema PLCC (no inglês, *Power Line Carrier Communication*), técnicas baseadas em sistemas supervisórios e técnicas baseadas em PMUs.

2.2.4.1 Transferência direta de disparo

Esta é uma técnica amplamente utilizada em proteções do sistema elétrico, onde a abertura de um disjuntor (DJ) envia o sinal para que o outro DJ da linha também abra, deixando assim de alimentar o curto-circuito que fez o primeiro DJ abrir.

Levando esse conceito para a detecção do ilhamento, é monitorado o sinal de alguns DJs do sistema, e uma lógica determina se a abertura de determinados DJs configura o ilhamento, enviando assim o *trip* na geração.

Essa técnica é simples, mas mudanças da topologia do sistema, a inserção de outras gerações, criam dificuldades para reajustar esse tipo de proteção.

2.2.4.2 Técnicas Baseadas no Sistema PLCC

PLCC refere-se a uma comunicação onde o meio de transmissão é a própria linha, sendo uma comunicação utilizada em esquemas de teleproteção antigos, apesar de ainda ser utilizada em algumas subestações atualmente. Nesta técnica a detecção é feita através do envio de um sinal de forma contínua na rede, por um transmissor, esse sinal é recebido em cada gerador distribuído ou subestação (SE) coletora, e em casos de ilhamento, esse receptor para de captar o sinal, o que caracteriza o ilhamento (XU *et al.*, 2007).

Essa técnica apresenta alguns problemas para implantação, pois necessita de capacitores de acoplamento nos pontos de transmissão e recepção, o que gera um valor elevado. Existem casos de atenuação de sinal, necessitando assim de repetidores, além da possibilidade de desligamento indevido em casos de falha na comunicação.

Porém, esse pode ser considerado confiável, pois tem a utilização de apenas um transmissor e o mesmo não é afetado por alterações na topologia da rede, facilitando assim a sua implementação.

2.2.4.3 Técnicas Baseadas em sistemas supervisórios

Inicialmente as SEs se utilizavam de supervisão e controles locais, sendo necessária a operação local de cada SE, com a melhoria nos processos de comunicação, e com os sistemas supervisórios como o SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) ou o SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia) da CEPEL (Centro de Pesquisa de energia elétrica – Eletrobras), os dados da SE podem ser verificados remotamente.

Com os dados em uma central é possível determinar se a abertura de algum conjunto de

DJs pode causar o ilhamento indesejado e desta forma enviar o sinal para desligamento dos geradores. Conforme Yin, Chang e Diduch (2004), estas técnicas não são muito utilizadas em redes de distribuição devido a custos e complexidade dos sistemas.

2.2.4.4 Técnicas Baseadas em PMUs

As PMUs são equipamentos que

[...] tem como objetivo a leitura dos valores de amplitude das tensões e das correntes de fase, e dos respectivos ângulos – denominados como sincrofasores de tensão e corrente, para fins de análise de distúrbios no sistema, principalmente os relacionados com transitórios eletromecânicos, bem como para suporte ao processo de tomada de decisão em tempo real. (PROCEDIMENTOS DE REDE - Submódulo 11.8 Sistema de Medição de Sincrofasores, 2020).

Com a quantidade de dados e o sincronismo realizados por GPS entre esses dados, é possível desenvolver diversas técnicas para detecção de ilhamentos não intencionais, utilizando cada um destes sinais medidos, na literatura existem diversos estudos relacionados a esta técnica.

Esta técnica tem como vantagem não ter ZND ou DI, mas como desvantagem pode-se citar custos envolvidos e o fato de estar sujeito a falhas de comunicação. De forma que, é importante a utilização de técnicas convencionais em caso de falha desta comunicação.

2.3 TRANSFORMADA DE PARK

Máquinas rotativas trifásicas apresentam os enrolamentos distribuídos no estator, a fim de facilitar estudos dos fenômenos destas máquinas com a utilização de equações derivadas, é necessário transformar os eixos trifásicos em dois eixos perpendiculares.

Historicamente as primeiras projeções das variáveis trifásicas em dois eixos perpendiculares tiveram seu desenvolvimento em máquinas síncronas de pólos salientes. Estas projeções, mostraram a criação de fluxo magnético diferente no entreferro que atua como enrolamento de campo e uma permeabilidade magnética diferente ligada perpendicularmente a esse fluxo, resultando em diferentes reatâncias síncronas.

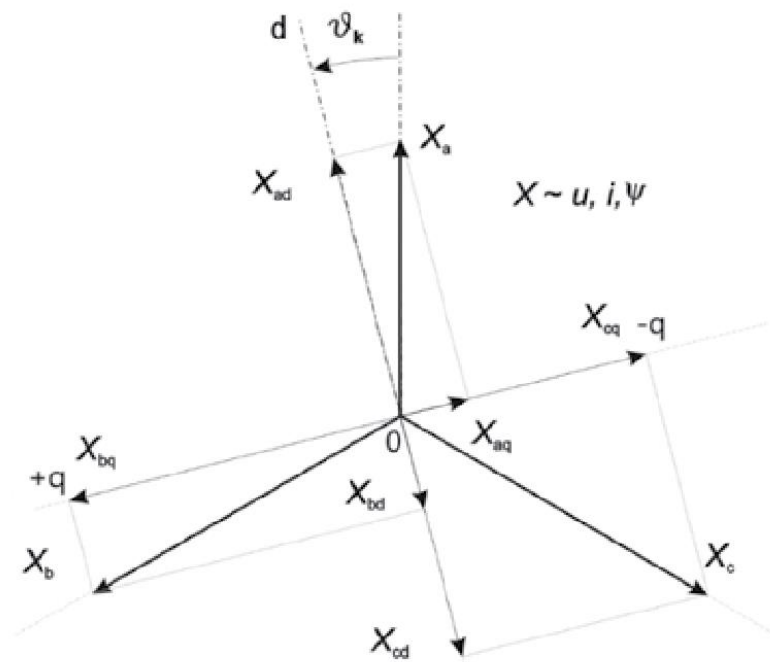
Os resultados indicaram que esta projeção tem grande aplicabilidade, inclusive em estudos de transientes que se baseiam em máquinas elétricas em sua teoria geral.

Essa conversão dos valores de fase se dá para um sistema fictício onde os parâmetros também são fictícios, ou seja, não são valores reais, mas auxiliam a tornar os estudos de

resolução mais fácil. Elas reduzem o número de equações, no entanto, após encontrar a solução é necessária a transformada inversa para retornar com os valores reais.

Na Figura 13 está indicado uma forma de representar graficamente a transformação abc no sistema dq. Neste arranjo, foram utilizadas as posições dos eixos conforme (PARK., 1928), em literaturas atuais podem ser encontrados diferentes posições dos eixos direto (d), quadratura (q) e zero (0).

Figura 13 – Gráfico da transformação do sistema trifásico abc para o dq0



Fonte: Hrabovcová *et al.* (2020)

Originalmente em sua abordagem, considerando que o sistema seja simétrico, ocorre um deslocamento do eixo d em relação ao eixo da fase, esse deslocamento tem um ângulo ϑ_k . O eixo de quadratura é definido em 90° a partir do eixo d. Destes estudos originaram a equação 1 que deriva da transformação abc em dq0, assim como a transformada inversa, equações chamadas na atualidade de transformada PARK.

$$xd = xda + xdb + xdc, (1)$$

Onde:

$$\begin{aligned} xda &= xa \cos(\vartheta_k) \\ xdb &= xb \cos(\vartheta_k - 120^\circ) \\ xdc &= xc \cos(\vartheta_k + 120^\circ) \end{aligned}$$

De forma semelhante, é determinado o eixo q, somando os valores instantâneos das variáveis de fase encontramos o eixo 0, isso resulta nas equações 2, 3 e 4. Foram incluídas as constantes proporcionais k_d , k_q e k_0 para generalizar a equação, e a partir dessa encontramos a matriz da equação 5.

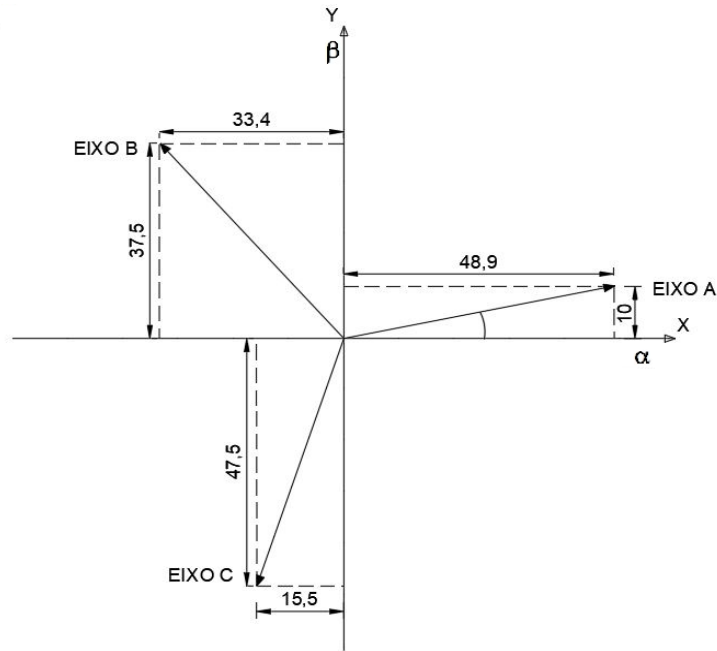
$$x_d = k_d \left(x_a \cos(\vartheta_k) + x_b \cos \cos \left(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3} \right) + x_c \cos \cos \left(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3} \right) \right), \quad (2)$$

$$x_q = k_q \left(x_a \sin \sin (\vartheta_k) + x_b \sin \sin \left(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3} \right) + x_c \sin \sin \left(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3} \right) \right), \quad (3)$$

$$x_0 = k_0(x_a + x_b + x_c), \quad (4)$$

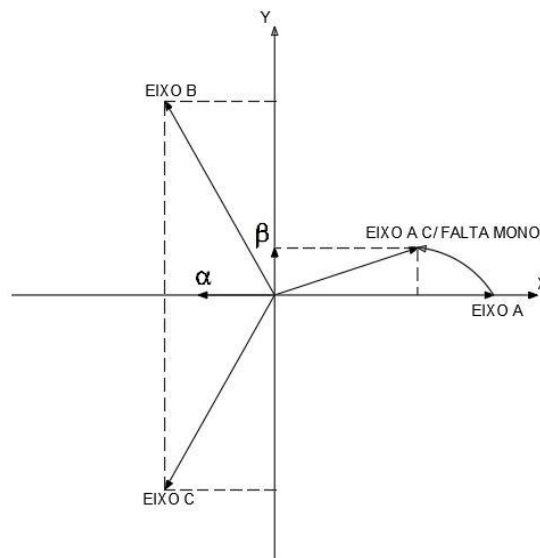
$$\begin{vmatrix} k_d \cos \cos(\vartheta_k) & k_d \cos \cos \left(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3} \right) & k_d \cos \cos \left(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -k_d \sin \sin(\vartheta_k) & -k_d \sin \sin \left(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3} \right) & \\ -k_d \sin \sin \left(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3} \right) & k_0 & k_0 & k_0 \end{vmatrix} = k_d k_q k_0 \frac{3\sqrt{3}}{2} \cos \cos \left(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (5)$$

A fim de facilitar o entendimento, analisando o gráfico da transformada de Clarke, conforme Figura 14, onde os eixos abc são rebatidos para os eixos alpha (α) e beta (β). Se considerarmos um sistema equilibrado, ao rebater os vetores trifásicos para os eixos α e realizar a soma vetorial, é possível perceber que o resultado deste eixo será zero, o mesmo se observa no eixo β .

Figura 14 – Transformada Clarke eixos abc para $\alpha\beta$ 

Fonte: O autor (2023)

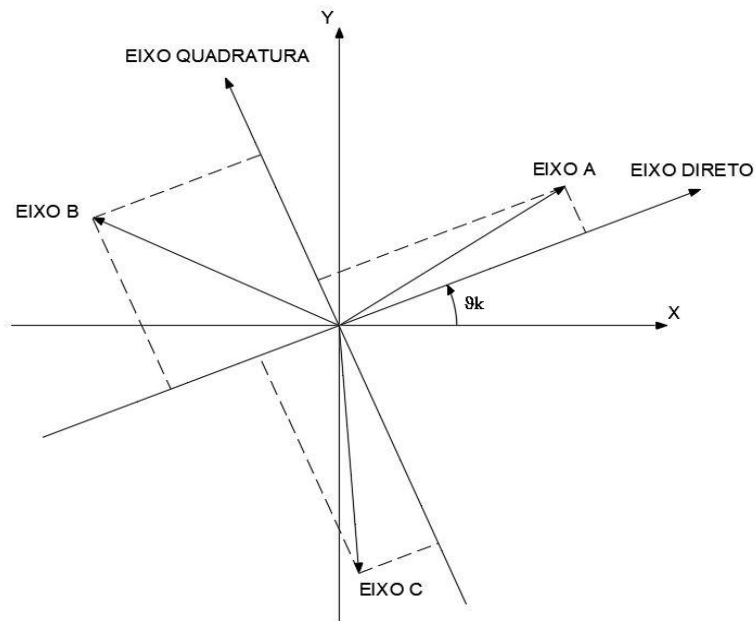
Considerando um curto-circuito monofásico, é possível presumir que, como a tensão de fase em que o curto-circuito é aplicado tem a tendência de ir para zero e alterar o ângulo, o rebatimento deixa de ser nulo tanto nos eixos α e β , o que pode ser verificado na Figura 15. O eixo 0 também pode ter alteração.

Figura 15 – Eixos abc para $\alpha\beta$ em falta monofásica

Fonte: O autor (2023)

Na transformada de Park é incluído o ângulo θ_k entre o eixo d e o eixo x, desta forma a transformada de Clarke fica deslocada do eixo x, sendo que, o eixo d segue a mesma rotação do sistema abc. Essa representação da transformada de Park pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 – Transformada Park eixos abc para dq



Fonte: O autor (2023)

No software da Typhoon se verifica que ocorrem as transformadas de Clarke e Park em cascata, de eixos abc para os eixos α e β e posteriormente para d e q, conforme Figura 17. O eixo 0 é obtido na transformada Clarke.

Figura 17 – Blocos abc para dq



Fonte: Typhoon.

De forma que, é utilizado a matriz de abc para $\alpha\beta$, da fórmula 6, posteriormente é utilizada a matriz de $\alpha\beta$ para dq, da fórmula 7.

$$[\alpha \ \beta \ 0] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} [A \ B \ C] \quad (6)$$

$$[d \ q] = [\cos \cos \omega t \ \sin \sin \omega t \ \omega t \ \cos \cos \omega t] [\alpha \ \beta] \quad (7)$$

Desta sequência é retirado as fórmulas 8 e 9 que serão utilizadas para os estudos, onde, para alinhamento 0 o valor de $k1 = -\sin(\omega t)$ e $k2 = \cos(\omega t)$.

$$d = \alpha k2 - \beta k1 \quad (8)$$

$$q = \alpha k1 + \beta k2 \quad (9)$$

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo discorreu sobre algumas técnicas de detecção de ilhamento. As remotas, apresentam uma qualidade boa de detecção, resolvendo os problemas de ZND e DIs, no entanto, apresentam custos mais elevados e a necessidade de um bom sistema de comunicação.

As técnicas locais podem ser passivas, ativas ou híbridas, onde se verifica que as técnicas passivas são as de maior facilidade de implantação, não apresentando perda na qualidade da energia na sua aplicação, mas são as técnicas com maiores ZND e DIs. Já as técnicas locais ativas resolvem os problemas das ZND e DIs, mas trazem custos e uma perda na qualidade da energia, devido à introdução de variáveis que não estavam presentes no sistema, como harmônicos, frequências ou impedâncias para medição. No entanto as técnicas híbridas são técnicas que aliam os métodos passivos e ativos locais, para minimizar os problemas de cada uma das técnicas.

Considerando a utilização nos estudos, foi explanado neste capítulo, breve fundamentação teórica sobre as transformadas de Park e Clarke, introduzindo o assunto que será debatido posteriormente.

3 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

3.1 CONFIGURAÇÃO DO PARQUE EÓLICO NO SOFTWARE *CONTROL CENTER* DA TYPHOON HILL®

O software *Control center* foi utilizado para realizar as simulações do parque eólico analisado, buscando replicar os resultados encontrados nas ocorrências citadas.

No software encontramos um modelo de parque eólico composto por 3 turbinas de 2 MVA, que é implementado através de um inversor trifásico, de dois níveis, sendo o controle com malha de corrente. O aerogerador tem alguns parâmetros principais na Tabela 2, onde pode-se citar além da potência a tensão nominal de 690 V e a eficiência de 80%.

Tabela 2 – Parâmetros dos aerogeradores modelados

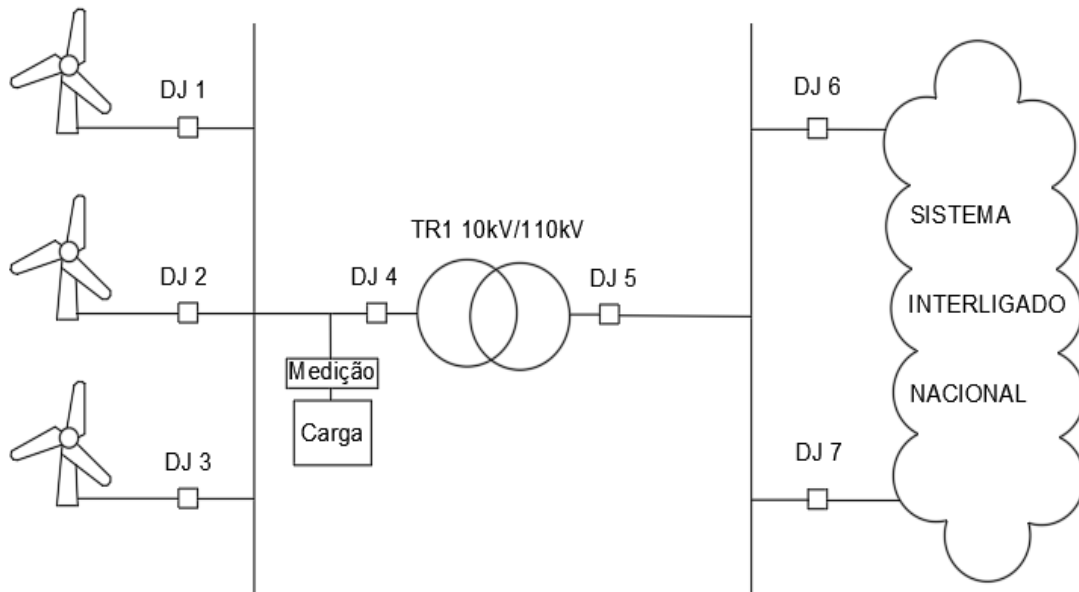
Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão Nominal	690	V
Potência Nominal	2	MVA
Frequência Nominal	50	Hz
Frequência de chaveamento	10k	Hz
Tensão DC Nominal	1000	V
eficiência da turbina	80	%

Para simular o parque, foram conectados três conjuntos de aerogeradores por meio de cabos subterrâneos, assim como, entre os parques e a SE coletora. Um transformador elevador é utilizado para ajustar o nível de tensão para conexão com outras SEs.

Foram configurados 3 parques eólicos com total de 6 MVA cada, gerando em 690 V e elevando para 10 kV para transmitir até a subestação coletora, nessa subestação, a tensão é elevada para 110 kV, essa está conectado ao sistema interligado nacional em dois pontos distintos

Foi conectado uma carga junto ao transformador elevador, onde é simulado o serviço auxiliar da SE e a carga da cidade que ficou ilhada. Nessa carga da SE existem equipamentos de medição, conforme demonstra a Figura 18. As medições neste ponto serão utilizadas para realizar os testes da proteção.

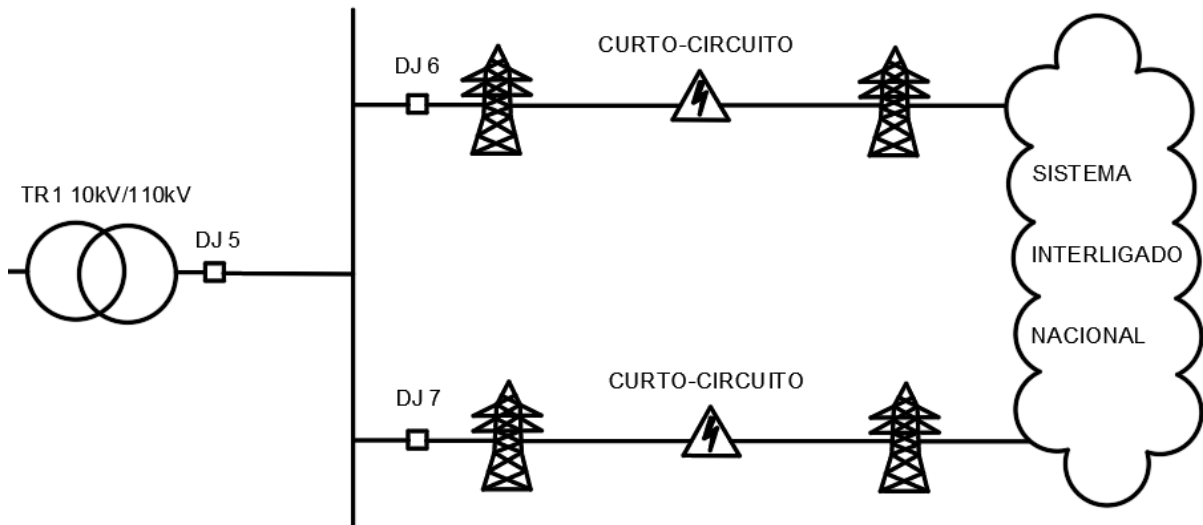
Figura 18 – Interligação entre parques e SE



Fonte: O autor (2023)

A configuração dos DJs, da SE, é do tipo barra principal e transferência (PT), mas para simulação foi utilizada uma configuração simplificada. Priorizando a simulação das ocorrências de curtos-circuitos e de ilhamentos, além de conectar a SE dá cidade em mais de um ponto de conexão ao SIN. A configuração adotada busca fornecer diversas possibilidades de testes pelo tipo de falta e instante de ilhamentos simulados. O formato utilizado possibilita desligar individualmente cada um dos sistemas. Com o desligamento do DJ 5, conforme Figura 18, é possível isolar o parque, esse será um dos principais testes a ser aplicado. A Figura 19 mostra a interligação do parque com os sistemas interligados.

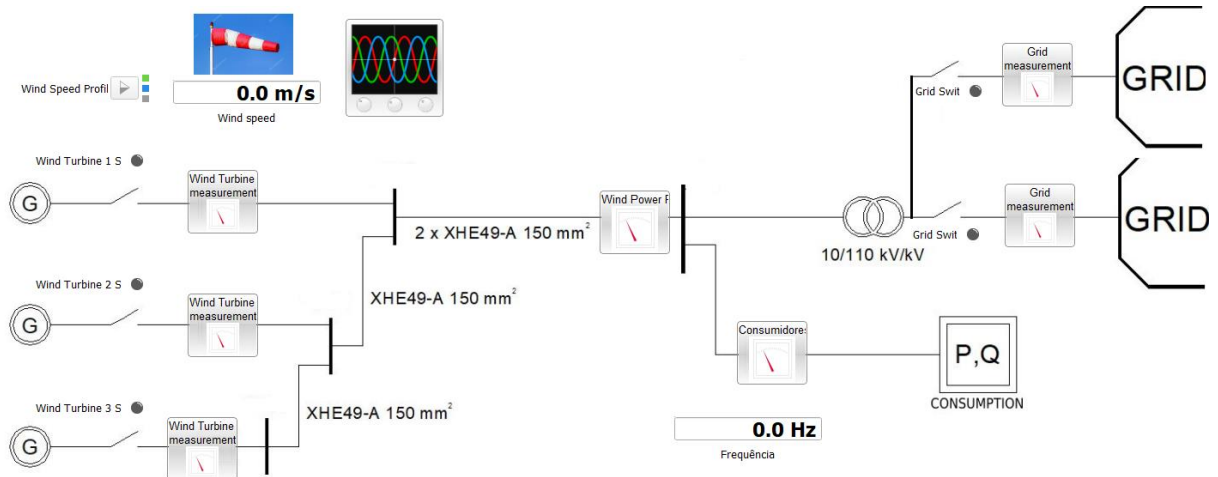
Figura 19 – Conexão entre a SE e os sistemas interligados



Fonte: O autor (2023)

A Figura 20 apresenta o supervisório do sistema simulado, neste existem comandos que podem ser automatizados para realizar os testes de curto-circuito e ilhamento.

Figura 20 – Painel de sistema supervisório da simulação



Fonte: O autor (2023)

3.1.1 Curto-circuito seguido de ilhamento e reconexão do sistema

A comprovação da efetiva atuação da proposta de proteção só é válida se o comportamento do sistema simulado é compatível com o sistema real, para isso é necessário a comparação dos resultados obtidos pela simulação com os reais.

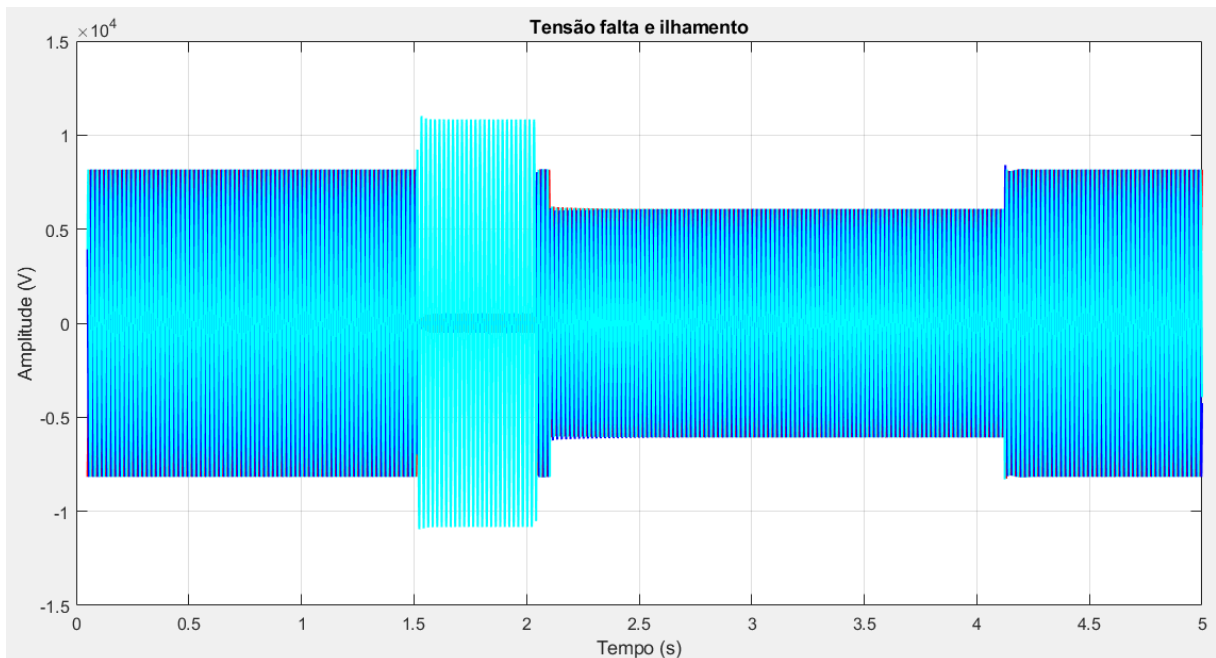
Nos estudos foram realizadas diversas medições de tensão e corrente. Os dados

encontrados nas simulações serão comparados com as oscilografias reais, verificando o comportamento do sistema simulado.

Considerando o foco nos eventos da falta e do ilhamento, a simulação da abertura do DJ de interligação da cidade ao SIN foi por tempo e não pela proteção que atuaria durante as faltas.

A Figura 21 e 22 apresentam as medições na carga que representa a cidade que ficou ilhada, onde, ná pré-falta, o sistema está em funcionamento normal, no instante de 1,5 s, ocorre um curto-circuito monofásico à terra por 0,5 s, quando a falta é extinta. Após 50 ms da extinção da falta o DJ 5 é aberto isolando assim o sistema, que permanece por 2 s, após é fechado o DJ para normalizar o sistema.

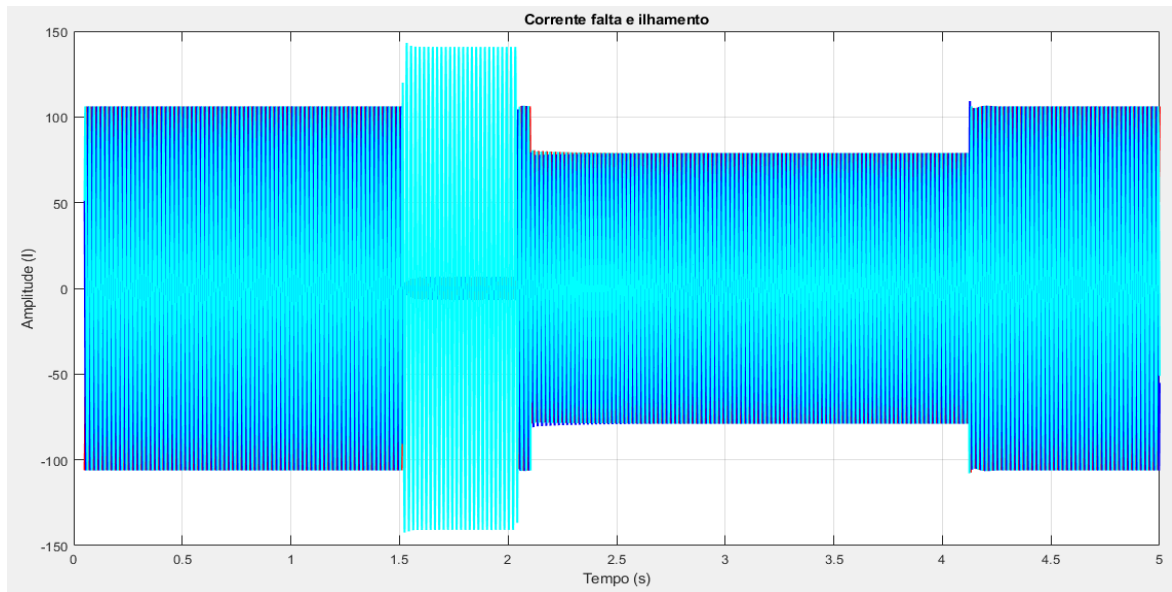
Figura 21 – Medições de tensão em falta e ilhamentos simulados



Fonte: O autor (2023)

Na Figura 21, é possível verificar que, durante a falta, a tensão das fases que não estão em curto-circuito se eleva (VB e VC) e a fase envolvida tem seu valor reduzido (VA). Durante o ilhamento, a depender da carga e da geração naquele instante, a tensão e as correntes vão se adaptar a potência necessária para suprir a carga, de forma que se pode ter subtensão ou sobretensão no sistema. Neste se observou que ocorreu subtensão, devido à carga dos consumidores estarem maior que a potência gerada.

Figura 22 – Medições de corrente em falta e ilhamentos simulados

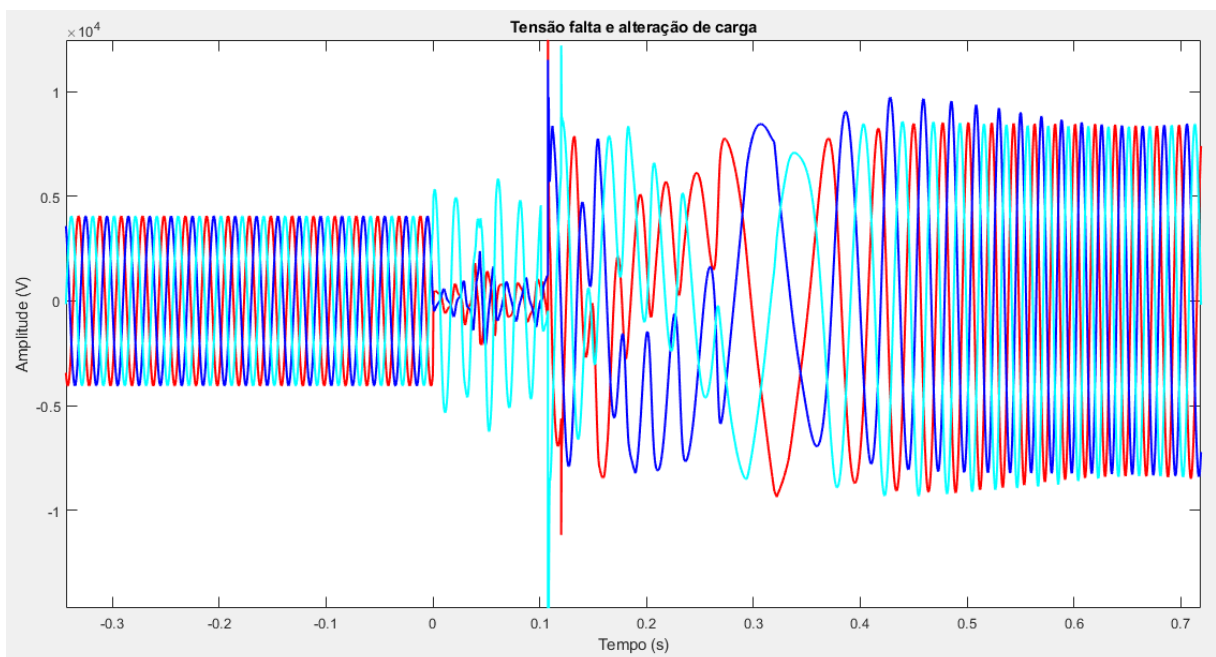


Fonte: O autor (2023)

As oscilações geradas por retirada abrupta de carga durante um ilhamento, apresentam alterações nos valores de tensão, corrente e frequência, no entanto, alterações estas vistas também durante a ocorrência do curto-circuito.

A Figura 23 demonstra esse fenômeno, no instante zero ocorre um curto-circuito monofásico por 100 ms, onde ocorre o ilhamento.

Figura 23 – Medições de tensão com alteração de carga após o ilhamento.



Fonte: O autor (2023)

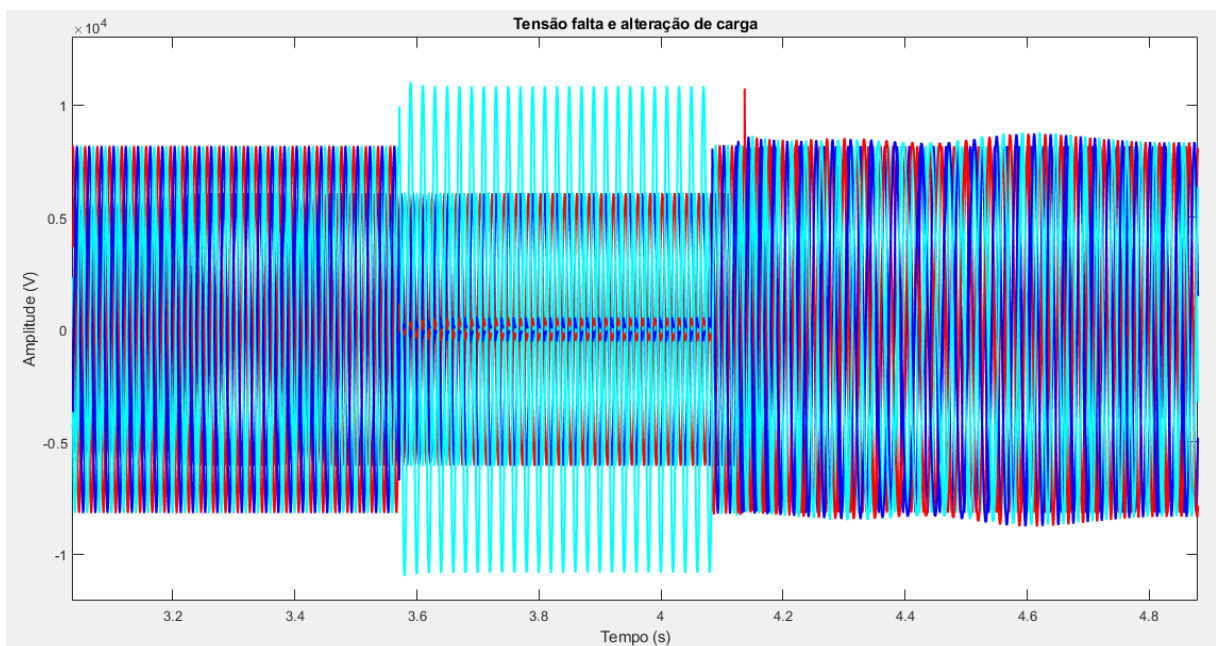
Evidencia-se que 10ms após, isto é, no tempo 110ms é retirado uma carga Y. Neste instante, é possível verificar que o sistema demora a estabilizar, o que acontece aproximadamente 300 ms após o ilhamento, com a variação de carga.

Essas alterações da tensão, corrente e frequência, durante faltas ou variações de potência, por corte de carga durante o ilhamento, são detectadas pelas proteções convencionais de uma SE, como, por exemplo, OV/UV. No entanto, proteções de ilhamento tradicionais, como OF/UF ou ROCOF, podem atuar incorretamente devido às variações durante a falta.

O ilhamento apresentado na seção anterior permaneceu indetectado devido ao balanço entre carga e geração. Busca-se demonstrar nas simulações situações em que não haja sub ou sobretensão que viria a sensibilizar uma proteção, desta forma, foram realizados testes mantendo equidade entre carga e geração. Nessa condição os parâmetros de rede demonstraram, conforme Figura 24, ficar próximo aos nominais, não sensibilizando nenhuma proteção e favorecendo assim a ocorrência do ilhamento não intencional.

Foi simulado uma falta bifásica para terra em 3,8 s, após aproximadamente 0,5 s a falta é extinta e 50 ms depois é realizado o ilhamento. Ajustando a carga, é possível obter valores de tensão bem próximos ao funcionamento normal. Desta forma, a simulação é colocada em uma condição onde existe a possibilidade de estar na ZND das proteções.

Figura 24 – Medições de tensão com balanço entre carga e geração



Fonte: O autor (2023)

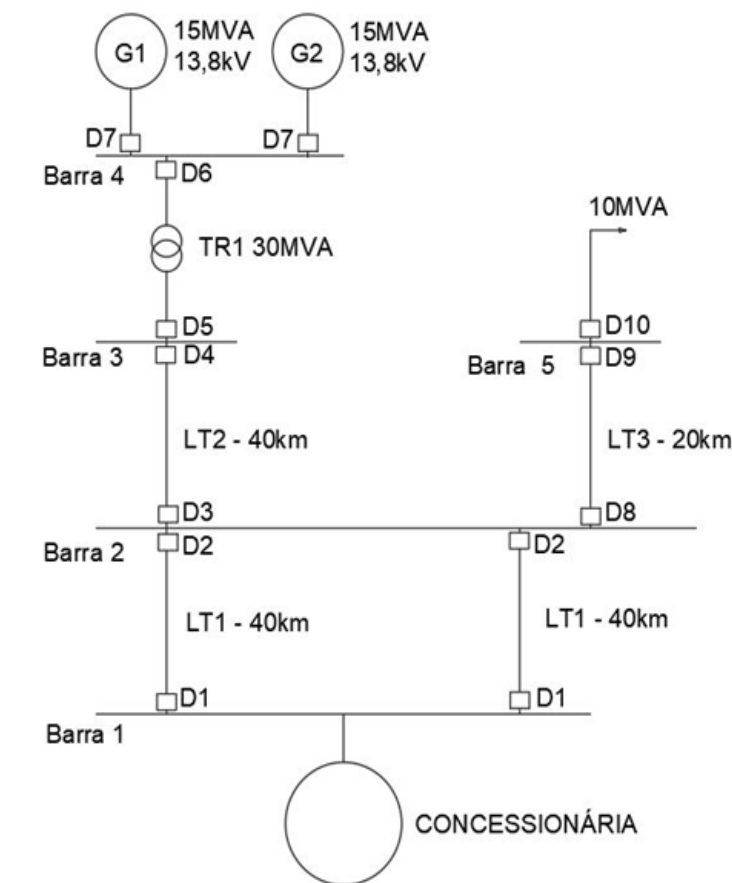
Nestas condições, as proteções padrão da SE ou de detecção de ilhamento podem não atuar, replicando assim, o que foi verificado durante a análise dos eventos citados a seção x. Diante do que foi verificado durante os testes, é possível considerar os eventos simulados compatíveis com os eventos analisados.

3.2 DINÂMICA DE UM CURTO-CIRCUITO NA LINHA

Com o intuito de verificar, os resultados da transformada de Park, nas ocorrências de curtos-circuitos e ilhamentos de um sistema elétrico, foi utilizado a ferramenta SIMULINK do MATLAB®.

Foi adaptado o sistema de 5 barras conforme Figura 25.

Figura 25 – Sistema de 5 barras



Fonte: Adaptado de MAMEDE (2011).

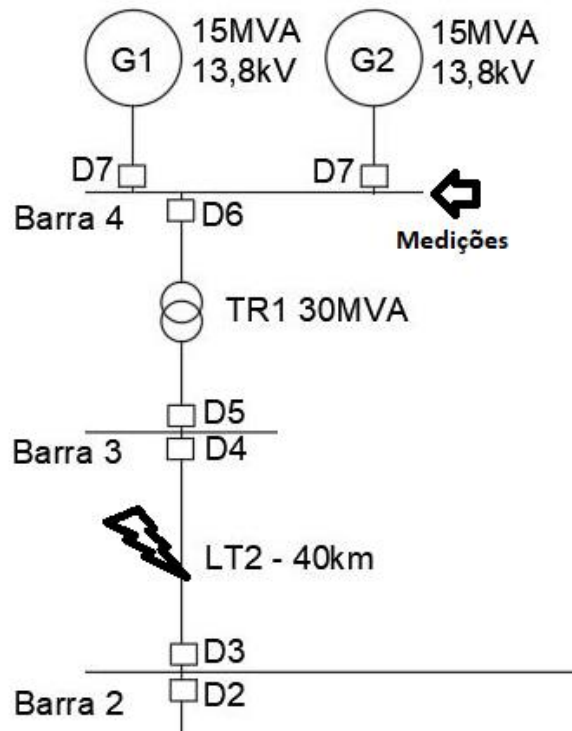
Sobre isso, Mamede (2011) aponta que:

O sistema a ser estudado, de acordo com o Anexo I, é composto por cinco subestações

de 69 kV. Duas das barras pertencem a uma usina geradora de energia composta por duas máquinas de 15 MVA-13,8 kV cada. Na subestação da usina é utilizado um transformador elevador de 30 MVA-69/13,80 kV. A barra 5 possui uma carga não motriz com valor máximo de 10 MVA. (Mamede, 2011).

Conforme demonstrado na Figura 26, foi incluída uma falta na linha de interligação entre as barras 2 e 3. As medições foram realizadas na barra 4, onde se encontram as GDs.

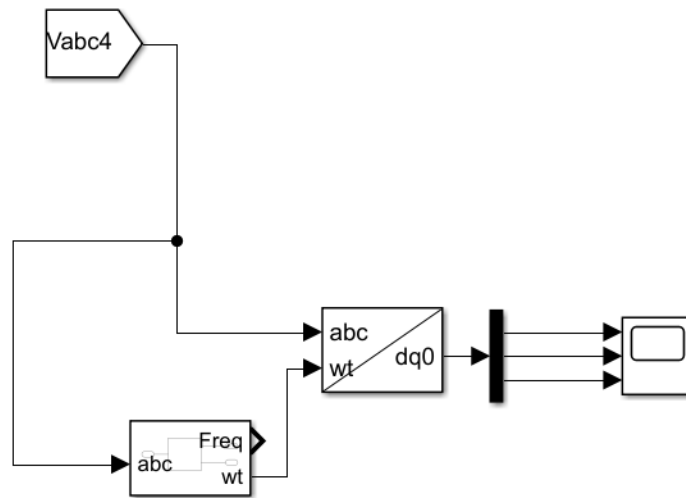
Figura 26 – Falta na linha e medições na barra do sistema adaptado



Fonte: O autor (2023)

Para verificar os resultados da transformada de Park foram utilizados os blocos do *simulink* na Figura 27. Os dois blocos recebem a informação de tensão proveniente da barra 4 conforme citado acima. Desta medição é verificado o ângulo ωt no primeiro bloco que é inserido com a informação de tensão, para realização do cálculo, no segundo bloco, com o resultado sendo apresentado nas oscilografias.

Figura 27 – Configuração do bloco conversão sistema abc para dq0

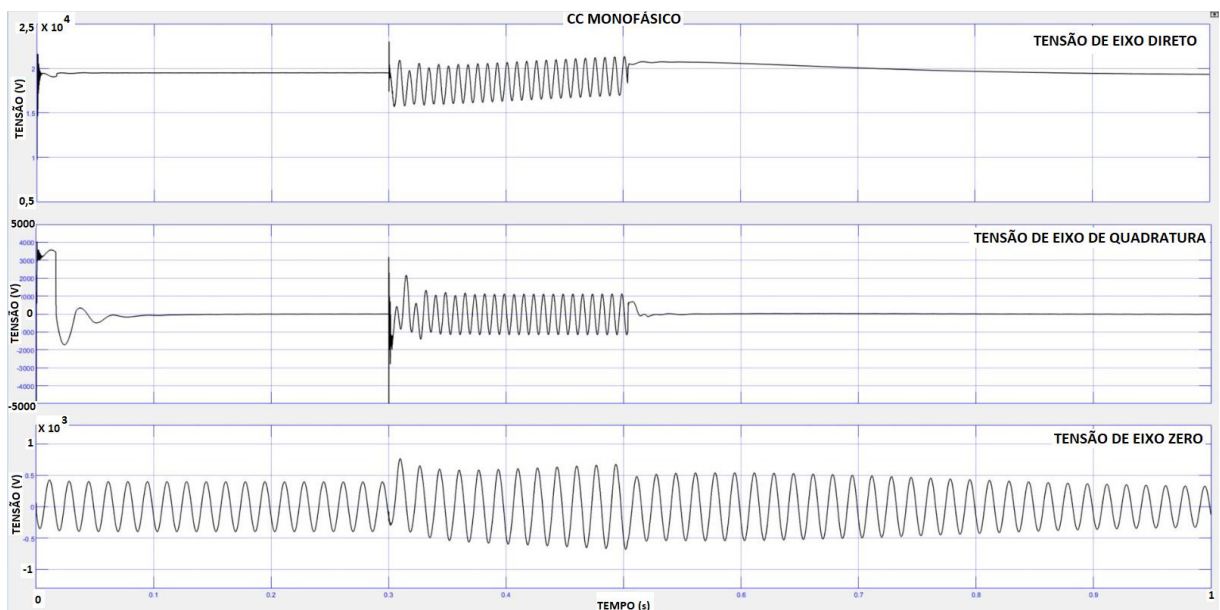


Fonte: O autor (2023)

3.2.1 Curto-circuito monofásico

Aplicando o curto-circuito monofásico se pressupõe conforme a teoria que os valores dos eixos irão apresentar variação, realizando a simulação no MATLAB® dessa condição de falta, pode ser verificado esse comportamento, conforme Figura 28.

Figura 28 – Transformada de Park da tensão durante curto-circuito monofásico



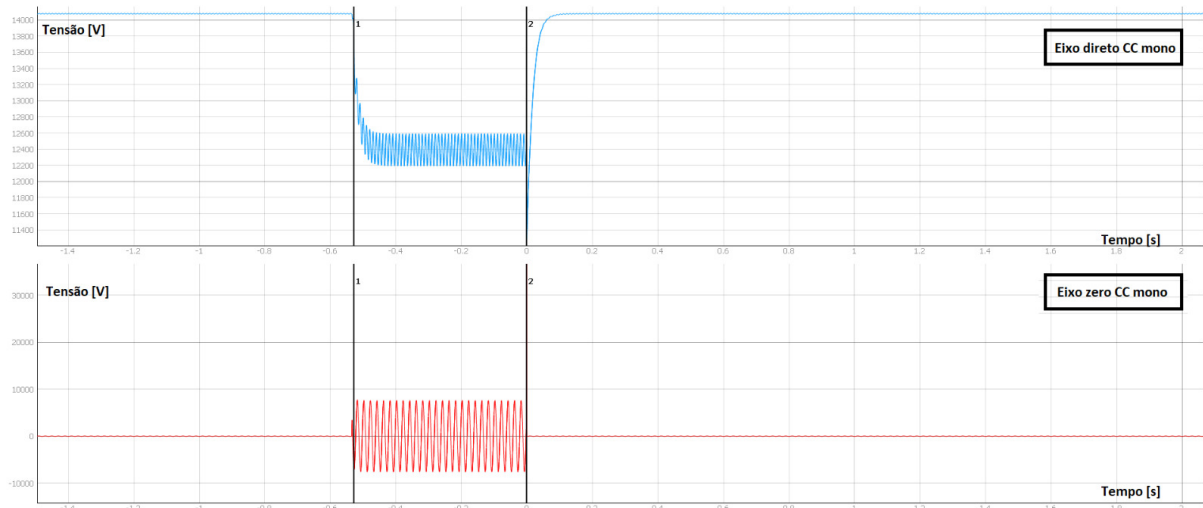
Fonte: O autor (2023)

Observa-se que o eixo d (primeiro gráfico) apresenta um valor de aproximadamente

20kV estável no início da simulação, e apresentam oscilação durante o curto-circuito. O eixo q (segundo gráfico) conforme previsto também apresenta variação, no entanto, o foco do estudo não se dará neste eixo. No eixo 0, que tem importância grande para a metodologia proposta, se verifica a alteração nos seus valores (terceiro gráfico).

Realizando a simulação no *Control center* da Typhoon HIL® encontramos o mesmo tipo de comportamento, na Figura 29 é apresentado os componentes de eixo d e 0, no cursor 1 é incluído a falta e retirada no cursor 2. Na simulação do *Control center* a fonte é eólica e na realizada no MATLAB® é fonte hidráulica e térmica.

Figura 29 – Simulação curto-circuito monofásico no *Control center*



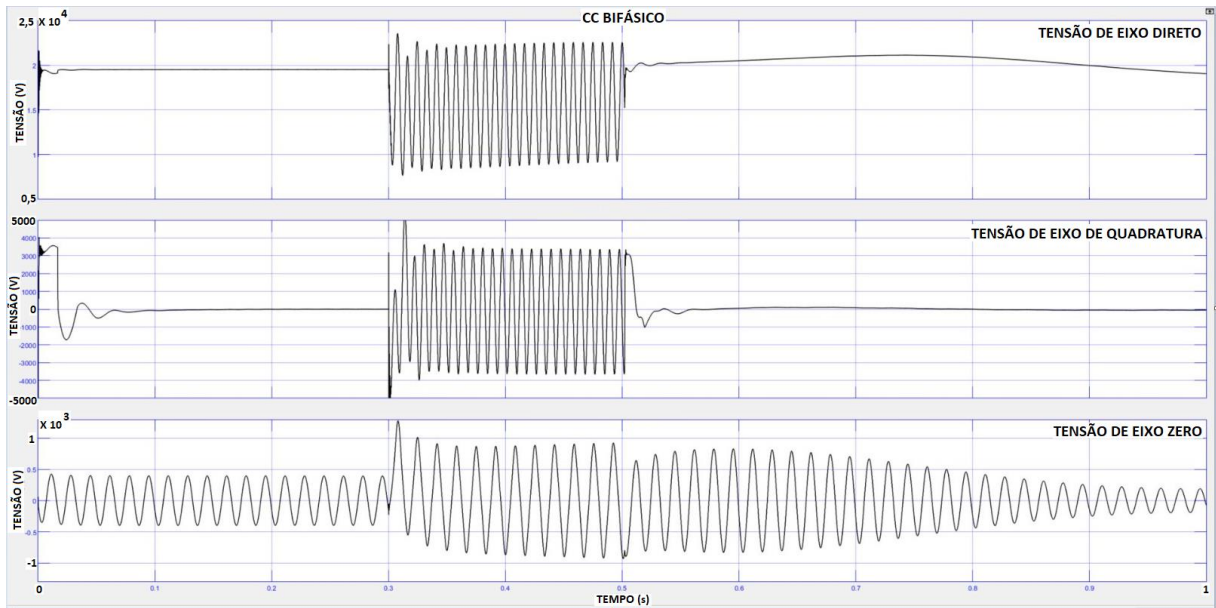
Fonte: O autor (2023)

A simulação no Typhoon de outros tipos de curto-circuito não será realizada nesse tópico, mas sim em tópico posterior.

3.2.2 Curto-circuito bifásico

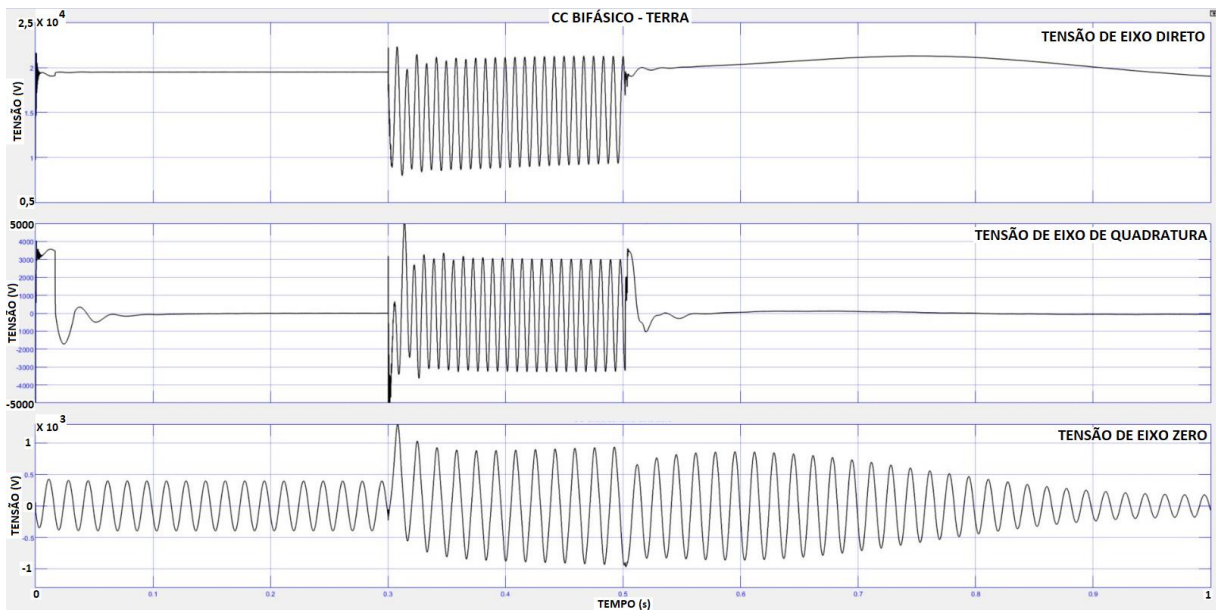
Quando consideramos a análise de um curto-circuito bifásico, existe a redução de dois vetores de fases, assim como no curto-circuito monofásico, os vetores resultantes da transformada de Park tendem a ter uma alteração. A Figura 30 apresenta o resultado da simulação com um curto-circuito bifásico. A Figura 31 apresenta o resultado de um curto-circuito bifásico à terra. Percebe-se em ambos os casos a oscilação das tensões nos 3 eixos.

Figura 30 – Transformada Park no curto-circuito bifásico



Fonte: O autor (2023)

Figura 31 – Transformada Park no curto-circuito bifásico à terra



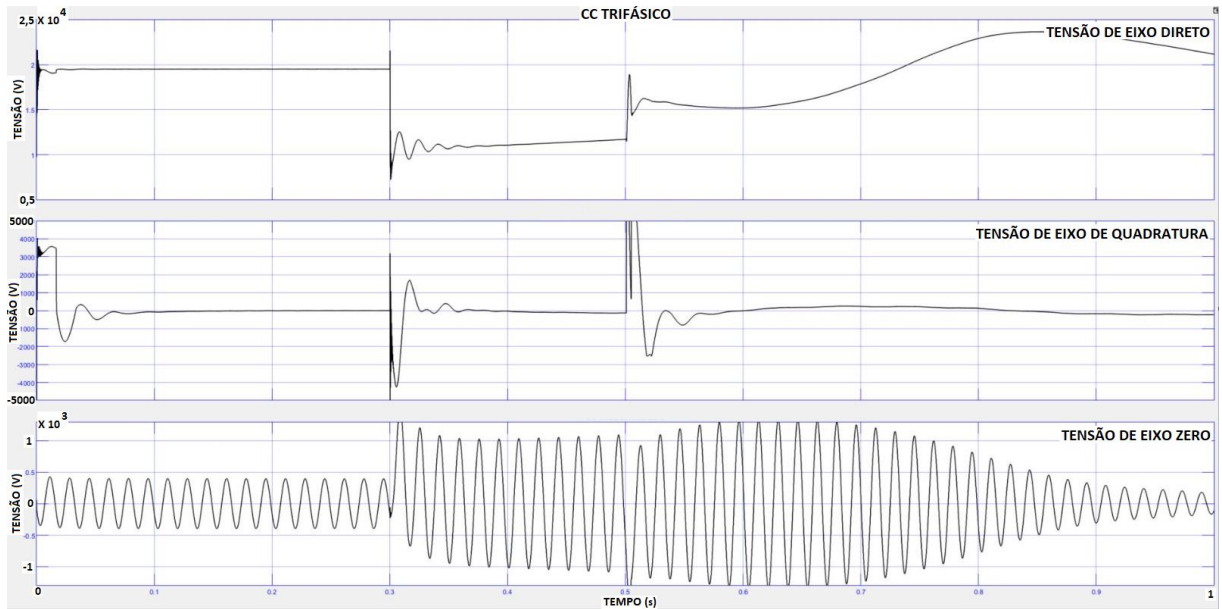
Fonte: O autor (2023)

3.2.3 Curto-circuito trifásico

Em um curto-circuito trifásico as três tensões tendem, de forma equilibrada, a ir para zero. Essa redução dos valores leva o eixo d a se manter equilibrado, no entanto, com o valor em pu menor se comparado com o medido em situação normal. O eixo de quadratura, com a redução equilibrada das tensões, irá permanecer próximo de zero.

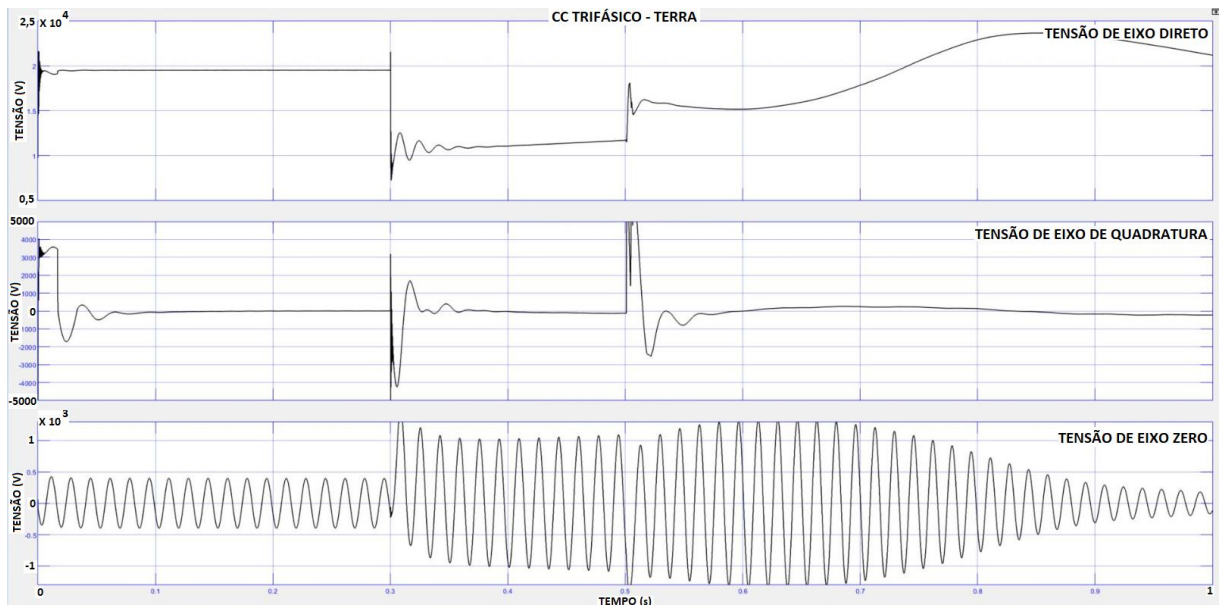
A Figura 32 representa esses três eixos simulados na falta trifásica. É possível verificar o degrau causado no eixo d, permanecendo contínuo durante a falta. O comportamento dos eixos de q e 0 também é mostrado nas Figuras.

Figura 32 – Transformada Park no curto-circuito trifásico



Fonte: Autor

Figura 33 – Transformada Park no curto-circuito trifásico à terra



Fonte: O autor (2023)

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi descrita a simulação, de um parque eólico. Foi possível replicar o comportamento encontrado nas perturbações reais e assim estudados para proposta de uma proteção anti-ilhamento.

Para embasar o estudo, foi realizado uma introdução na dinâmica de um curto-circuito em linha de transmissão, analisando o que ocorre nas tensões para cada tipo de curto-circuito por meio da transformada de Park. No MATLAB® foram simuladas as ocorrências de curto-circuito e realizadas as medições dos eixos d , q e 0 de um sistema trifásico, comprovando a fundamentação.

4 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO PROPOSTO

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Parques eólicos conectados a uma SE coletora conectada ao SIN têm as suas proteções configuradas que seguem o padrão de uma SE de rede básica. Mini e microgeração normalmente são conectadas a uma rede de distribuição, nestes casos, as faltas e ilhamentos tem características diferentes das ocorrências na rede básica.

Técnicas remotas, como exemplo a utilização de PMU, é uma possibilidade para detecção de ilhamentos não intencionais. No entanto, alguns inconvenientes de implantação dessas técnicas remotas, como a dependência de comunicação entre as SEs de empresas proprietárias diferentes, dificultam essa implementação.

Técnicas ativas apresentam problemas de implantação, visto que geradores de grande potência poderiam prejudicar a qualidade de energia da rede. Além disso, seria necessário a inserção e modificação dos circuitos e componentes de cada um dos aerogeradores.

Assim, considera-se que uma proteção local e passiva é uma opção de maior viabilidade técnica. Diante disto, buscou-se um método que pudesse ser utilizado diretamente na SE coletora, para detecção do ilhamento não desejado.

4.2 MÉTODO DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO UTILIZANDO COMPONENTES DE EIXO DIRETO E ZERO DA TENSÃO

Analisando os componentes de eixo d e 0 simuladas no Matlab, é possível verificar as suas características durante a falta. Com as variações, fica perceptível que em faltas monofásicas e bifásicas existirá diferenças entre as fases e isso será refletido nos eixos da transformada de Park, as faltas trifásicas têm características específicas que devem ser tratadas.

Os geradores eólicos foram concebidos para operar seguindo os parâmetros da rede. Assim, durante o ilhamento eles não conseguem manter a simetria das fases, gerando desbalanços. Conforme a teoria analisada da transformada de Park, os desbalanços de tensão serão refletidos nos cálculos da transformada.

Neste capítulo, será demonstrado a utilização desta transformada na detecção de curto-circuito e ilhamentos e feita a proposta de uma proteção para detecção de ilhamentos não intencionais.

Os testes realizados e os conceitos teóricos indicam que as perturbações da falta e do ilhamento serão perceptíveis pelo eixo d , e podem ser diferenciados pela variação de eixo 0 . Assim, será diferenciado os tipos de ocorrência, bloqueando a proteção durante a falta e atuando

durante o ilhamento não intencional.

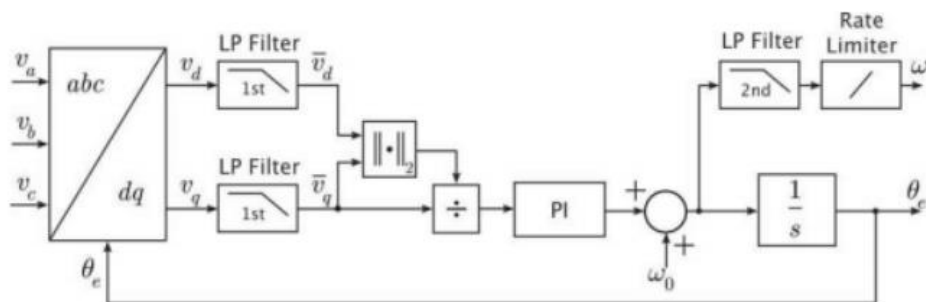
4.2.1 PLL para sistemas trifásicos

Para verificar os resultados da transformada de Park necessitamos de um bloco na simulação para realizar estes cálculos, optou-se pela utilização do PLL (em inglês, *Phase Locked Loop*). O PLL busca tornar o eixo q igual a zero, de forma que, o vetor do eixo d fique sobre o vetor espacial da tensão, assim o valor da tensão do eixo d se torna constante.

Ele utiliza um conversor das sequências abc para dq0, através da transformada de Park, desta forma será utilizado para realizar as medições propostas.

O PLL tem ampla utilização para rastrear tensões e correntes da rede fornecendo sinais de sincronização principalmente em circuitos inversores, na Figura 34 é apresentado o diagrama de blocos conceitual do PLL.

Figura 34 – Diagrama de blocos do PLL no *Control center*.



Fonte: Auxilio do Typhoon HIL®

Do bloco PLL, pode ser realizado a extração de alguns sinais de um sistema trifásico, destes sinais pode-se citar:

- d = componente de eixo direto;
- q = componente de eixo de quadratura;
- 0 = componente de eixo zero;
- f/ω = frequência do sistema trifásico (Hz ou rad/s);
- ωt = Ângulo do sistema trifásico;
- $\sin(\omega t)$ = função trigonométrica seno aplicada ao ângulo do sistema;
- pico = valor de pico da transformação dq que é dado pela equação 10.

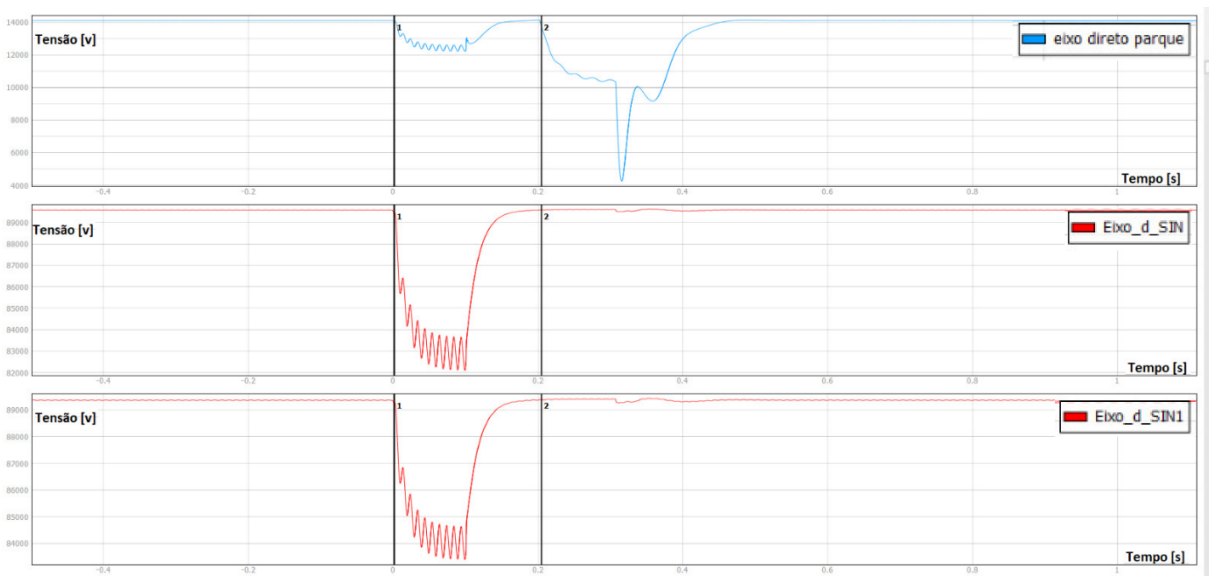
$$Peak = \sqrt{(d^2 + q^2)} \quad (10)$$

4.2.2 Medições realizadas com o PLL

Em SEs de energia elétrica são utilizados transformadores de potencial (TP's) para realizar as medições, de forma semelhante será aplicado na simulação e a ligação utilizada será em estrela aterrada. Com os sinais das 3 fases inseridos no bloco PLL, foi simulado curto-circuito nas linhas do sistema e também ilhamentos não intencionais.

Na Figura 35 é demonstrado as medições de tensão de eixo d, sendo utilizados 3 pontos de medição, uma no parque eólico e duas no SIN nos pontos de conexão dos DJ 6 e 7 as linhas que ligam ao SIN, na Figura 19. Em 0 ms acontece o curto-circuito (cursor 1) mantido por 100 ms, nesse instante a falta é retirada. No tempo 200 ms, após a falta, ocorre o ilhamento (cursor 2) o qual é mantido por 100 ms.

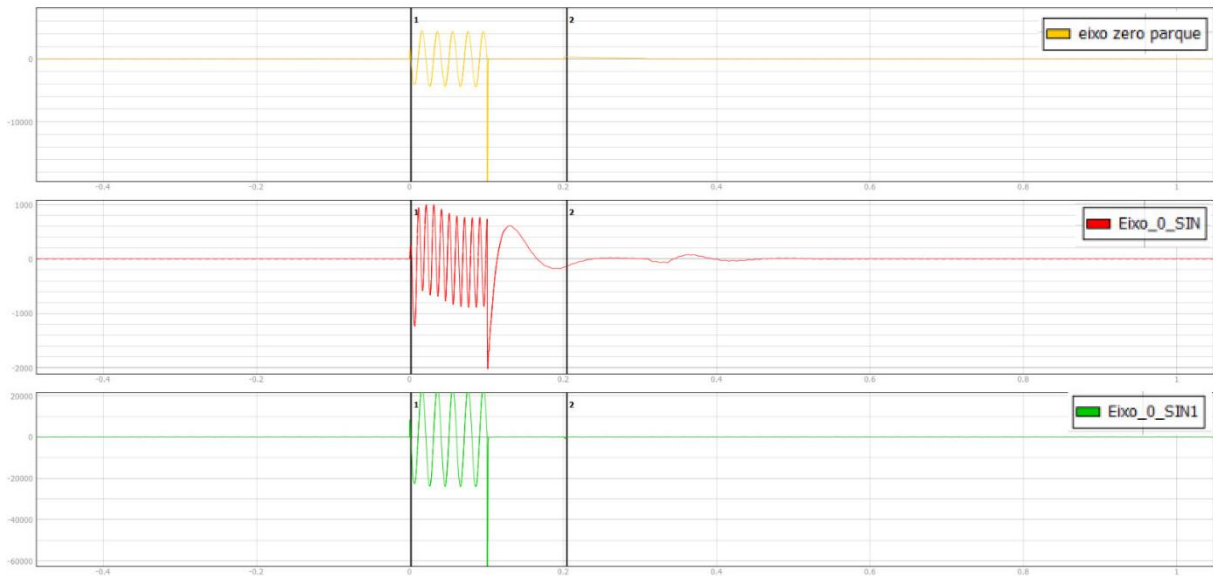
Figura 35 – Tensões de eixo d do parque eólico e do sistema interligado



Fonte: O autor (2023)

A Figura 36 apresenta o eixo 0 dos pontos citados, o cursor 1 representa o instante da falta no instante da partida da oscilografia, o cursor 2 representa o ilhamento em 200 ms.

Figura 36 – Tensões de eixo 0 do parque eólico e do sistema interligado



Fonte: O autor (2023)

Uma característica observada, na teoria da transformada de Park e verificada nas medições iniciais com o PLL, é que o curto-circuito e o ilhamento é percebido por uma variação no eixo d. Outra característica é que no eixo 0, a variação é percebida somente durante faltas.

Essas características observadas no eixo d e 0, serão utilizados para detecção das ocorrências, diferenciando as faltas de ilhamentos através do eixo 0, onde será aproveitado no bloqueio da proteção durante a falta.

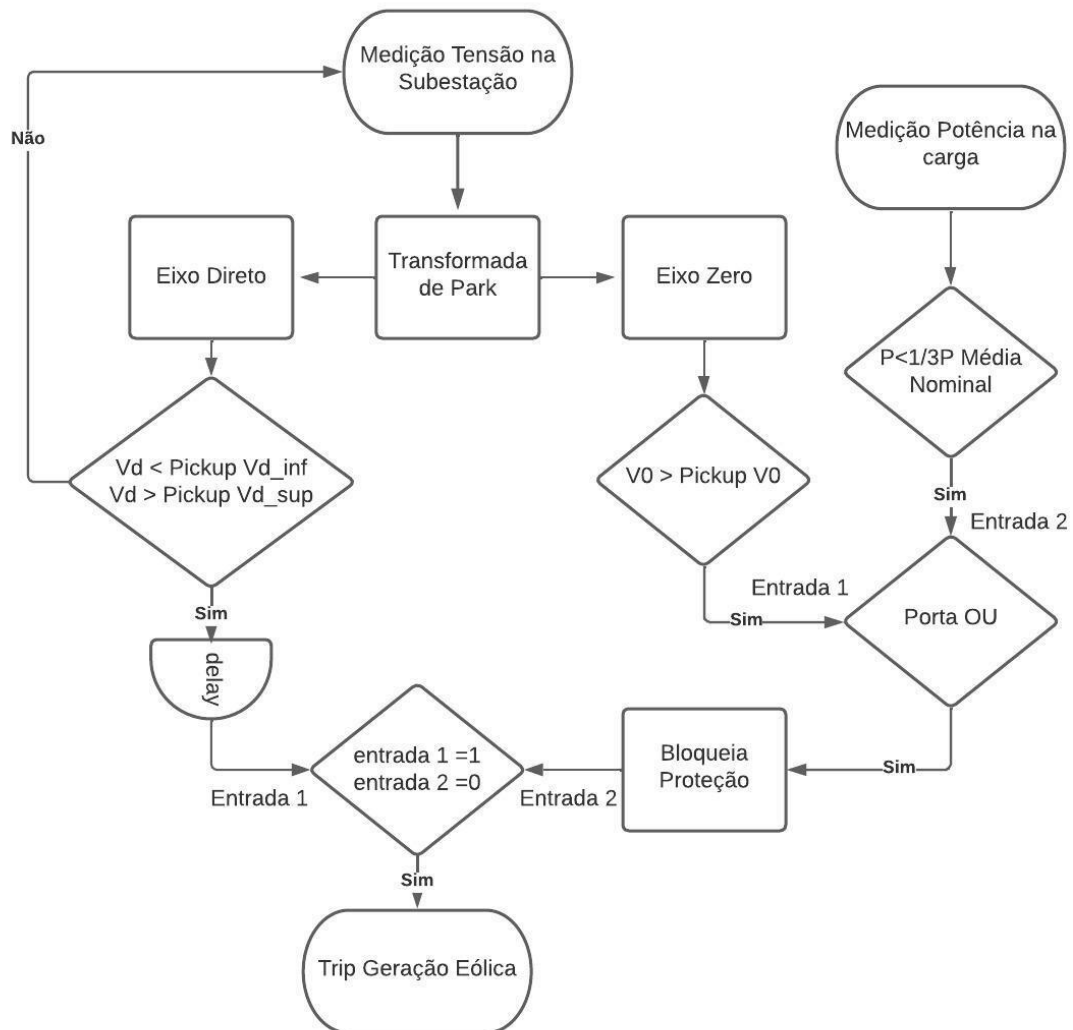
4.2.3 Algoritmo proposto para proteção

Nessa dissertação, a utilização da transformada de Park será proposta para detecção de transitórios do sistema de potência como curto-circuito e ilhamentos, sendo que ela será utilizada para diferenciar esses dois casos.

A Figura 37 apresenta o algoritmo proposto para detecção do ilhamento. É verificado se existe variação da tensão do eixo direto no parque eólico. Se o desvio for maior que o pickup definido, irá ocorrer a partida da proteção, caso seja verificado variação no eixo zero, acima do limite determinado, a proteção é bloqueada indicando que não é um ilhamento.

Caso haja a partida da proteção, ocorre a atuação da proteção após uma temporização T, assim, é enviado o sinal de *trip* para a desconexão dos aerogeradores do parque, indicando a ocorrência do ilhamento.

Figura 37 – Algoritmo proposto para detecção de ilhamento.

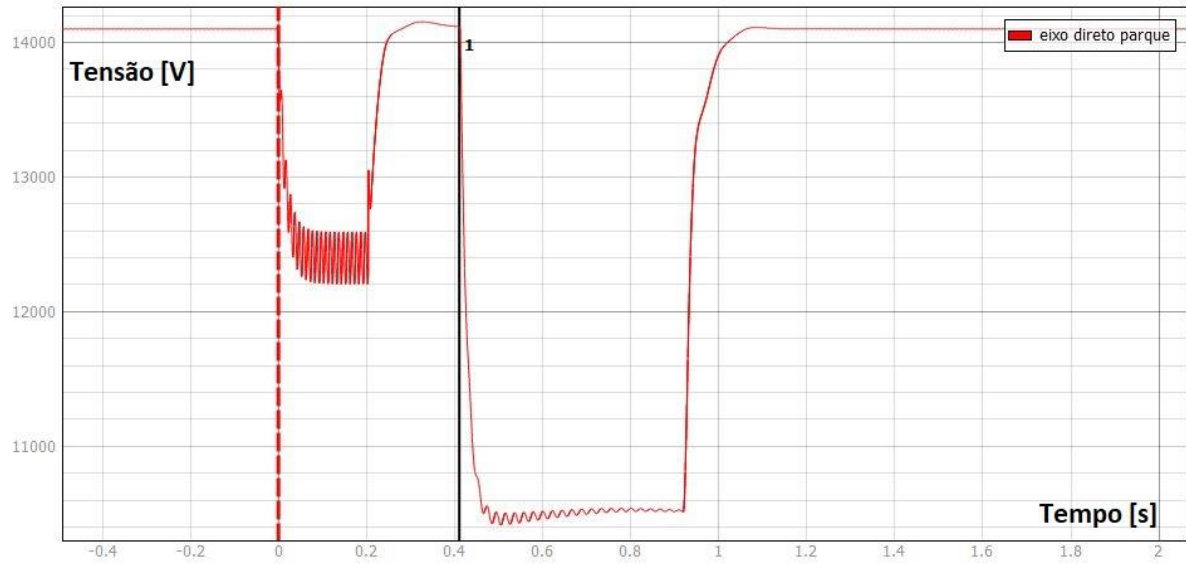


Fonte: O autor (2023)

O resultado da transformada de park está exemplificado nas Figuras 38, 39 e 40, onde foi simulado um ilhamento após um curto-circuito monofásico.

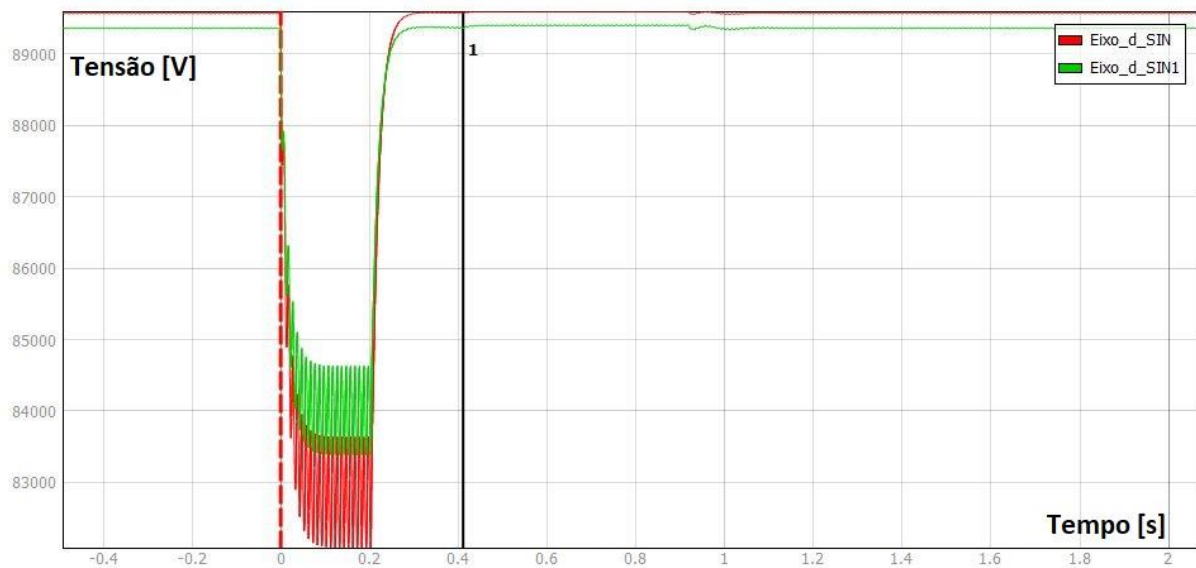
Nas medições da Figura 38, realizadas no parque eólico, é possível verificar a alteração da tensão de eixo direto durante a falta (eixo vermelho) e durante o ilhamento (eixo 1). Na Figura 39 é apresentada as medições das tensões de eixo direto no SIN em pontos de conexão dos DJ 6 e 7 as linhas que ligam ao SIN, na Figura 19, onde temos a alteração na medição durante a falta. A Figura 40 mostra as medições no eixo 0, onde observasse alterações durante a falta, mas não durante o ilhamento.

Figura 38 – Tensões de eixo direto no parque eólico.



Fonte: O autor (2023)

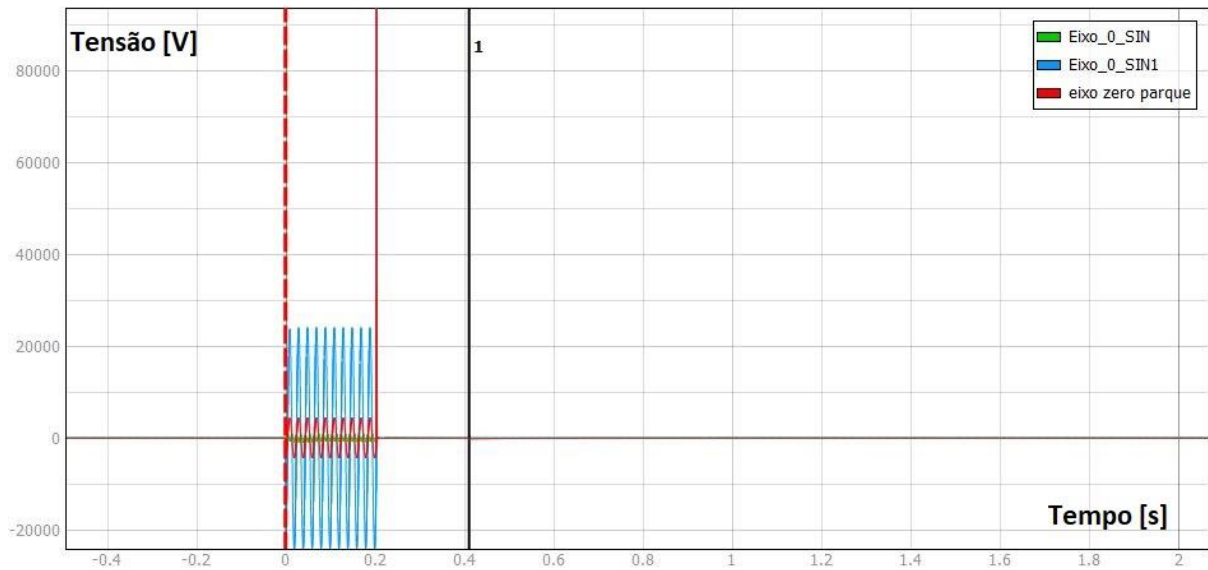
Figura 39 – Tensões de eixo d do SIN.



Fonte: O autor (2023)

Observa-se que durante o curto-circuito o resultado da transformada apresenta variação no eixo 0, mas não durante o ilhamento. Esta propriedade permite inibir o disparo durante o curto-circuito e realizar o disparo nos casos de ilhamento.

Figura 40 – Tensões de eixo 0 do parque eólico e do SIN.



Fonte: O autor (2023)

4.2.4 Sinais de partida da proteção

Na Figura 38 é demonstrado um teste, onde se verifica que os sinais de eixo d tem alteração tanto na falta como no ilhamento, dessa forma pode ser utilizado para detectar a falta e o ilhamento, no entanto, é necessário diferenciar as duas situações.

É possível verificar na Figura 40 que durante uma falta, a tensão do eixo zero eixo 0 apresenta uma alteração, o que não ocorre nos casos de ilhamento. Essas características são utilizadas para bloquear a proteção do ilhamento durante a falta.

Através da definição de um *pickup* é possível determinar o instante da ocorrência de cada uma das situações. Na Figura 41 é apresentada uma programação simplificada que pode ser utilizada para partida da proteção.

Para esse caso uma variação para baixo ou para cima no eixo d (v_d) ultrapassando os valores definidos em “ V_d_sup ” e “ v_d_inf ” ocorre a partida da proteção, esse sinal aguarda o tempo de *delay*, definido como 100ms, nesse instante altera para valor da saída P para “1”. O eixo 0 é monitorado pela variável “ v_0 ”, se ultrapassar o valor definido em “ v_0_sup ”, leva a saída “B” para nível um, bloqueando a proteção, se não ocorrer o bloqueio, se entende que existe ilhamento, que resulta no *trip* do parque eólico.

Figura 41 – Programação das partidas das proteções

```

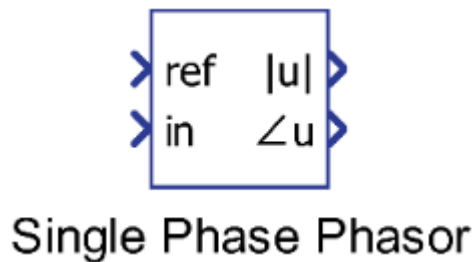
1 # vd = tensão eixo direto Park
2 # vd_inf = pickup vd inferior
3 # vd_sup = pickup vd superior
4 # v0 = tensão eixo zero Park
5 # V0_sup = pickup v0
6 # PM = Potência medida da carga
7 # p13 = 1/3 da potência média nominal
8 # P = partida proteção
9 # B = bloqueio proteção
10 # T = Trip
11 T=0 # Trip desatuado
12 if (vd<vd_inf) or (vd>vd_sup) {
13 | delay 100
14 | P=1 # Partida da proteção por 100 ms
15 }
16 else { x=0 }
17 if (v0 > v0_sup) or (PM < P13) {
18 | B=1 # Bloqueio da proteção
19 }
20 else { B=0 }
21 x=P+B
22 if (x>1){
23 | | T=1 # disparo da proteção
24 }
25 else { T=0 } # reinicia o ciclo

```

Fonte: O autor (2023)

Considerando que o resultado do eixo 0 é uma função seno, foi realizado o tratamento com o bloco “*Single phase phasor*”, apresentado na Figura 42, onde é comparado a senoide da entrada “in” com uma senoide padrão na entrada “ref”, resultando na saída, módulo e ângulo dessa senoide de entrada.

Figura 42 – Bloco de fasor monofásico.



Fonte: Ajuda do typhoon.

Com o tratamento do sinal foi utilizado o módulo do fasor para comparar com o *pickup* do eixo 0, dessa forma, com o resultado é possível a diferenciação das situações de falta dos com o sistema em operação normal.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a proposta de uma metodologia que utiliza a transformada de

Park, para detecção de um ilhamento não intencional de um parque eólico conectado ao SIN.

Foi apresentado o bloco PLL do *Control center*, explicando o porquê da sua utilização, nestas medições, para determinar os valores resultantes da transformada de Park.

Foram também realizadas medições para exemplificar o algoritmo. Na próxima seção, serão apresentados os resultados dos testes realizados.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A metodologia proposta teve sua implementação no software *Control center* da Typhon®, onde foram simuladas faltas e ilhamentos, equivalentes aos analisados em ocorrências reais. Será realizada uma análise de desempenho desta proteção em diversas situações como curto-circuito monofásico, bifásico e trifásico.

5.2 SISTEMA TESTE

O sistema teste já foi descrito no capítulo 3, durante os testes foram acrescentados medições e tratamento de sinais, para definir a melhor estratégia para desenvolver a proteção de forma mais efetiva.

O sistema teste é inspirado no sistema real, apesar dos parâmetros não serem exatamente iguais, sem prejuízo para o estudo, pois o foco é uma proteção para qualquer sistema.

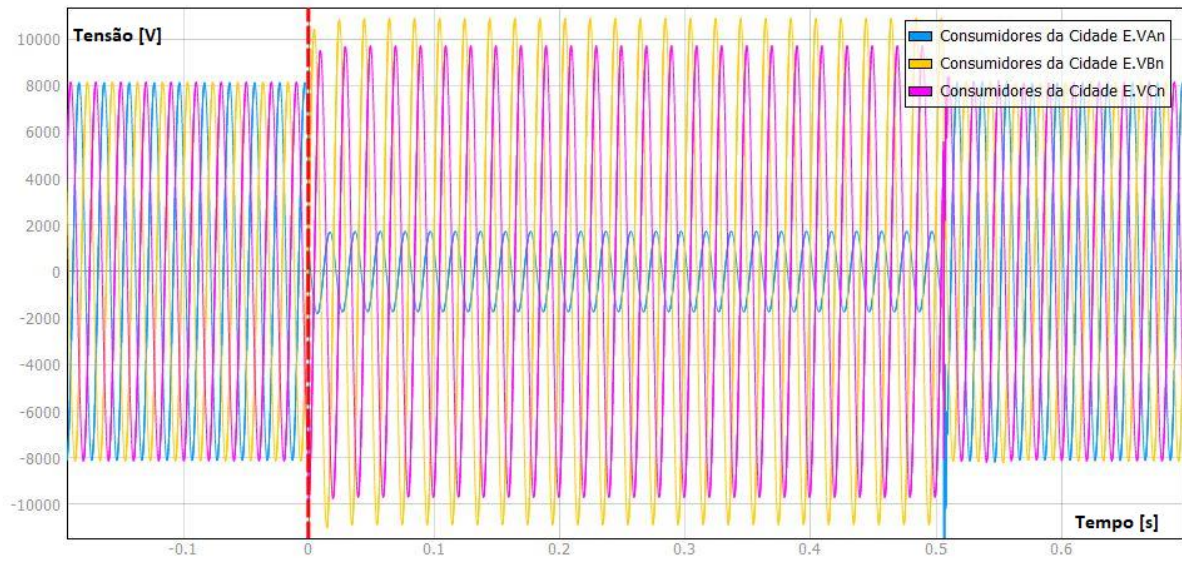
5.3 CURTO-CIRCUITO E ILHAMENTO

Em um primeiro momento as faltas na linha foram configuradas com uma duração de 500 ms. Foram testados curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásico à terra, trifásicos e ilhamento. Testes realizados para determinar os parâmetros dos curtos-circuitos e ilhamentos, buscando uma forma de diferenciar os dois. Os testes nesta etapa foram realizados no software, *Control center* da Typhoon®.

5.3.1 Curto-circuito Monofásico

O curto-circuito monofásico tem a característica de elevar a corrente na fase afetada, reduzindo o módulo da tensão nessa fase e com uma leve elevação nas outras fases. Dessa forma apresenta uma alteração significativa nos eixos d e 0, a Figura 43 demonstra a tensão de um curto-circuito da fase A para terra.

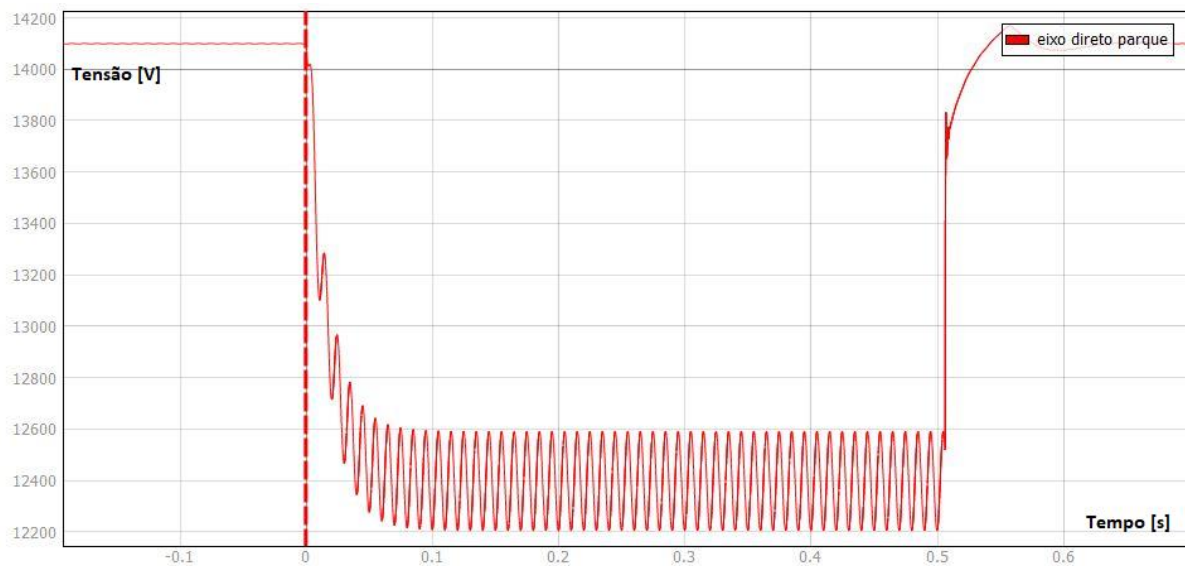
Figura 43 – Tensão durante curto-circuito monofásico.



Fonte: O autor (2023)

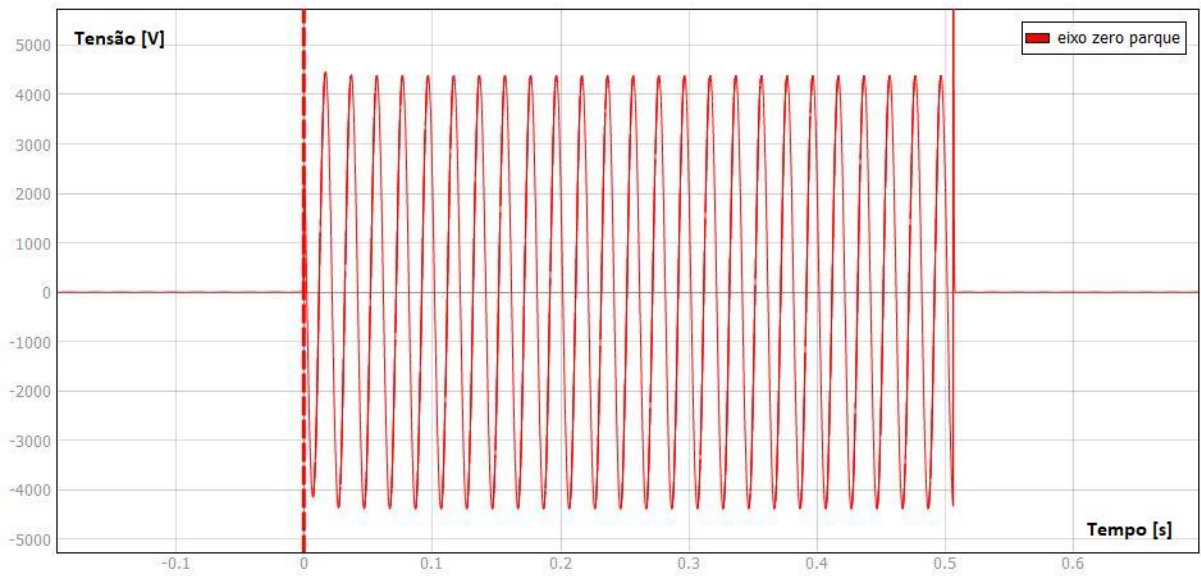
A Figura 44 demonstra a variação ocorrida na tensão de eixo direto e a Figura 45 a variação da tensão do eixo 0, compatíveis com os fundamentos e a simulação no MATLAB®.

Figura 44 – Tensão de eixo d em falta monofásica.



Fonte: O autor (2023)

Figura 45 – Tensão de eixo 0 em falta monofásica.

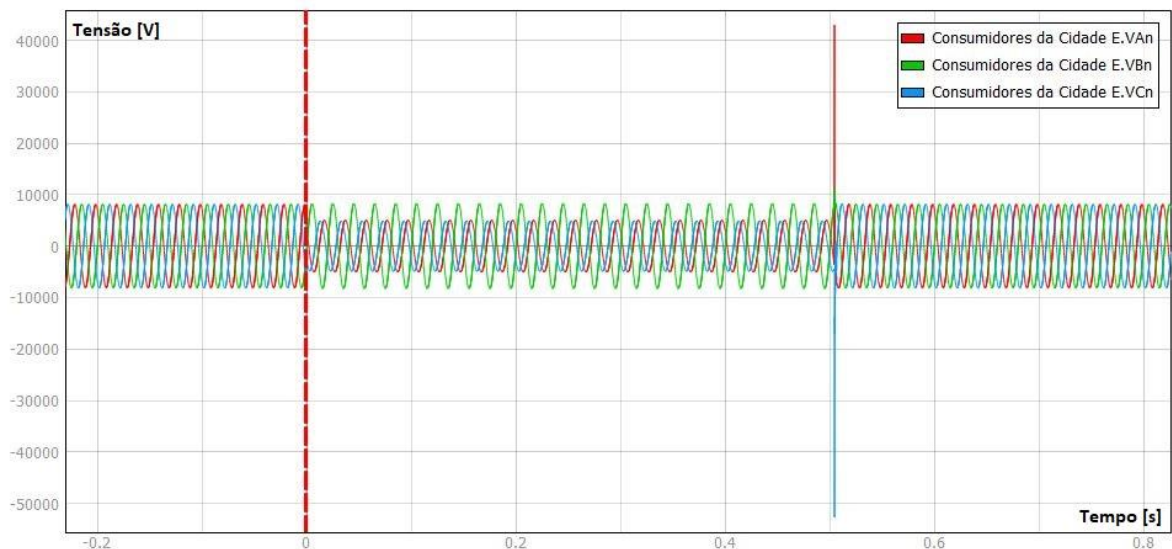


Fonte: O autor (2023)

5.3.2 Curtos-circuitos bifásicos

Assim como as faltas monofásicas, os curtos-circuitos bifásicos têm as características de tensão semelhantes, diferenciando pela redução em duas fases e a possibilidade de elevação da tensão da fase que não participou da falta. A Figura 46, demonstra uma falta nas fases A e C com a redução do valor da tensão nessas fases. Como essa é uma falta entre fases e a terra não está envolvida, nota-se que a fase B não é elevada durante a ocorrência.

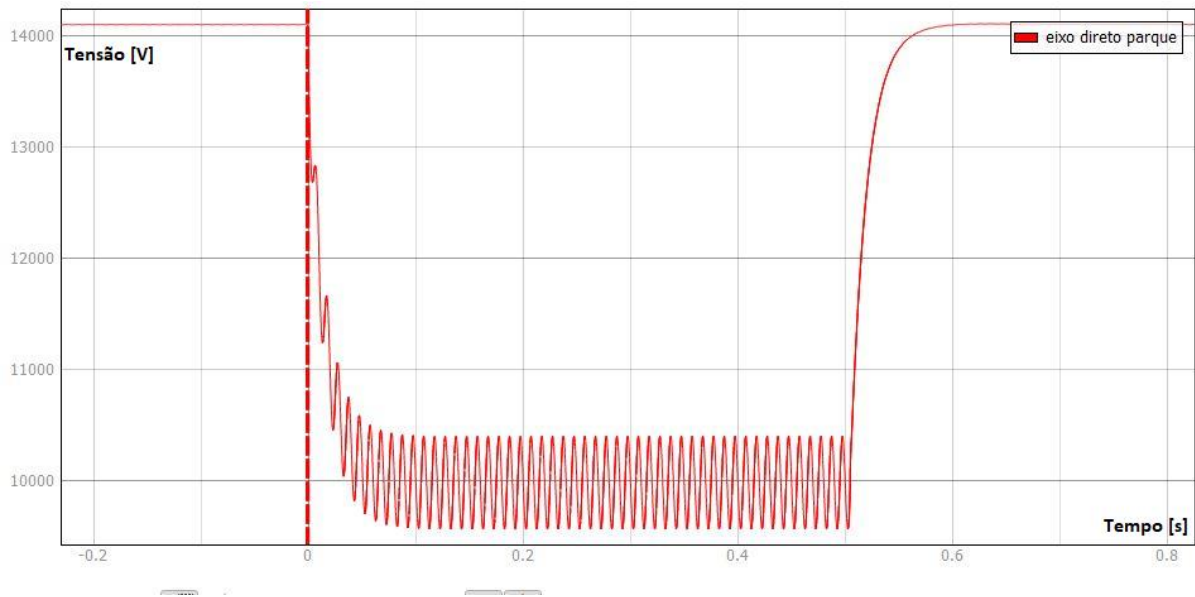
Figura 46 – Tensão durante curto-circuito bifásico.



Fonte: O autor (2023)

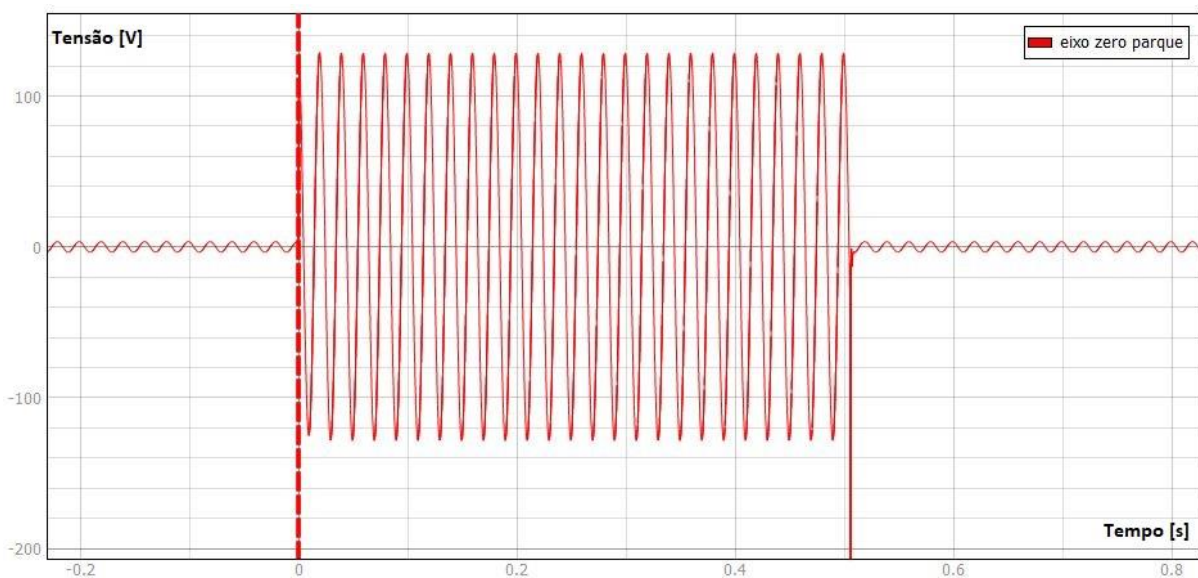
Os resultados se assemelham com um dos casos da análise da ocorrência real, onde ocorre um curto-circuito bifásico e posteriormente o ilhamento não intencional do parque. Na Figura 47, verifica-se a alteração dos valores de eixo direto e na 48 a alteração do eixo 0 no momento do curto-circuito.

Figura 47 – Tensão de eixo d em falta bifásica.



Fonte: O autor (2023)

Figura 48 – Tensão de eixo 0 em falta bifásica.

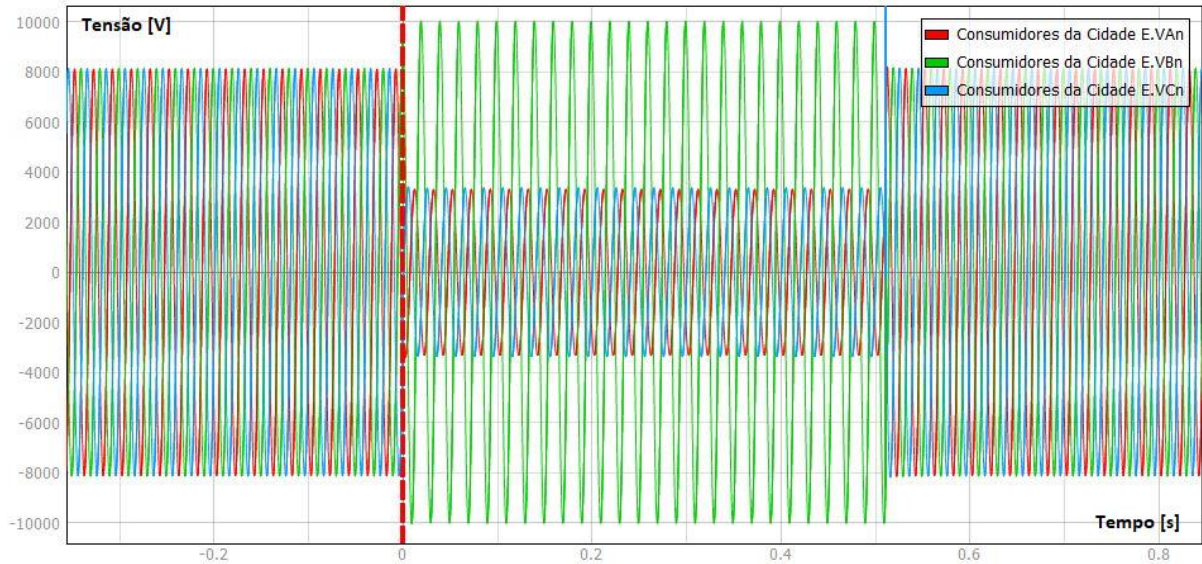


Fonte: O autor (2023)

Considerando uma falta bifásica a terra é possível notar na Figura 49, onde é apresentado

a tensão durante a falta, que difere da bifásica, pois a fase não envolvida tem uma leve elevação de tensão.

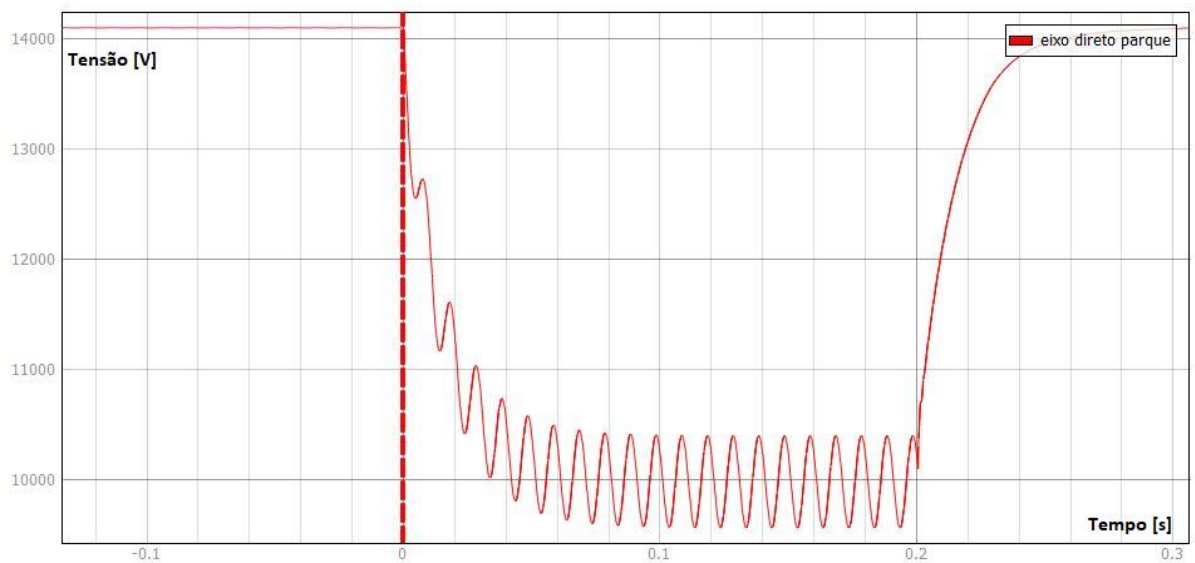
Figura 49 – Tensão durante curto-circuito bifásico à terra.



Fonte: O autor (2023)

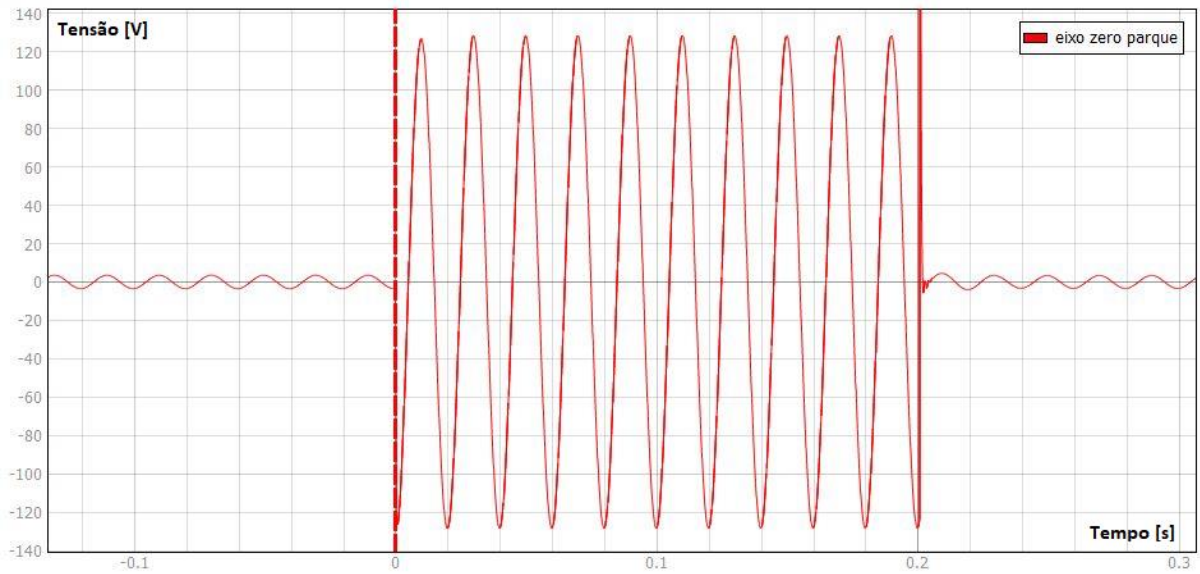
Na Figura 50, verifica-se a alteração dos valores da tensão de eixo direto e na 51 a alteração do eixo 0 durante o curto-circuito.

Figura 50 – Tensão de eixo d em falta bifásica à terra.



Fonte: O autor (2023)

Figura 51 – Tensão de eixo 0 em falta bifásica à terra.

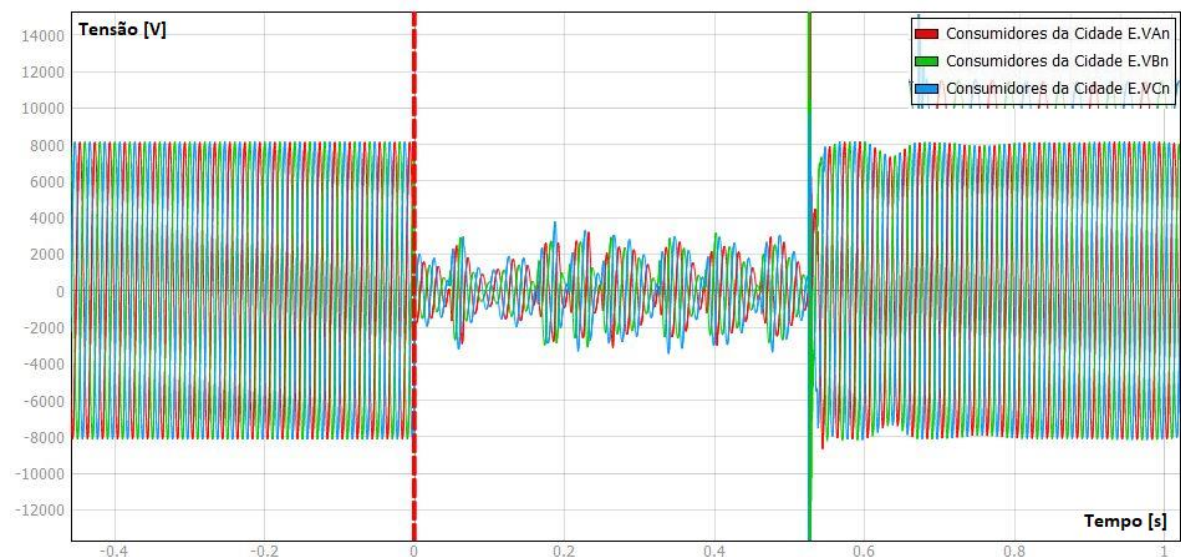


Fonte: O autor (2023)

5.3.3 Curtos-circuitos trifásicos

Curtos-circuitos trifásicos possuem a característica de reduzir a tensão de forma equivalente entre as fases, isso é verificado na Figura 52.

Figura 52 – Tensão durante curto-circuito trifásico.

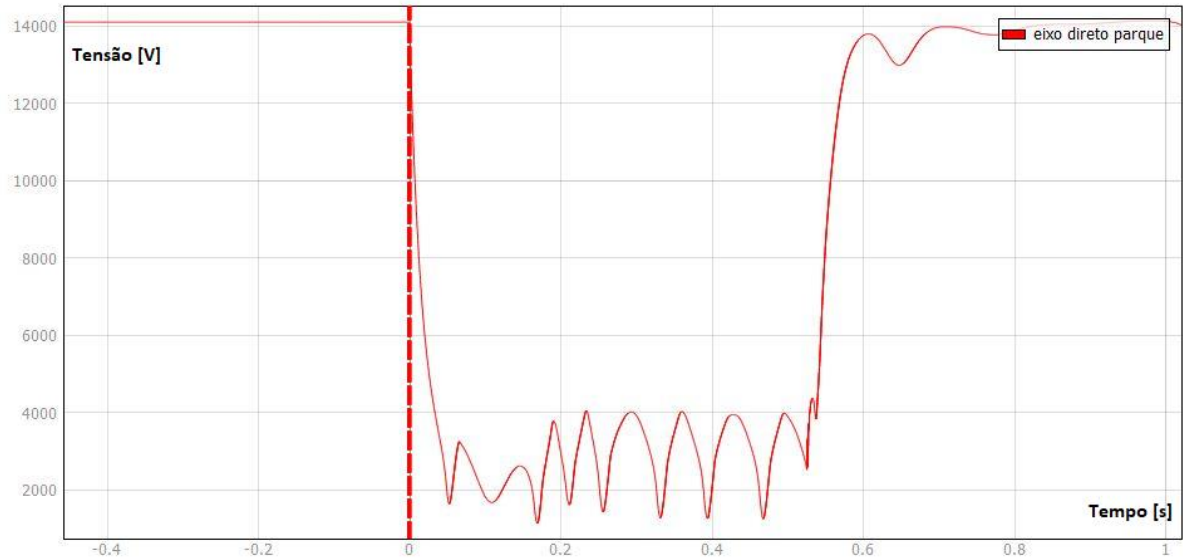


Fonte: O autor (2023)

As alterações no eixo d estão presentes, conforme verificado na Figura 53. Para esta falta o eixo 0 apresenta variação, conforme Figura 54, indicando a possibilidade de bloqueio

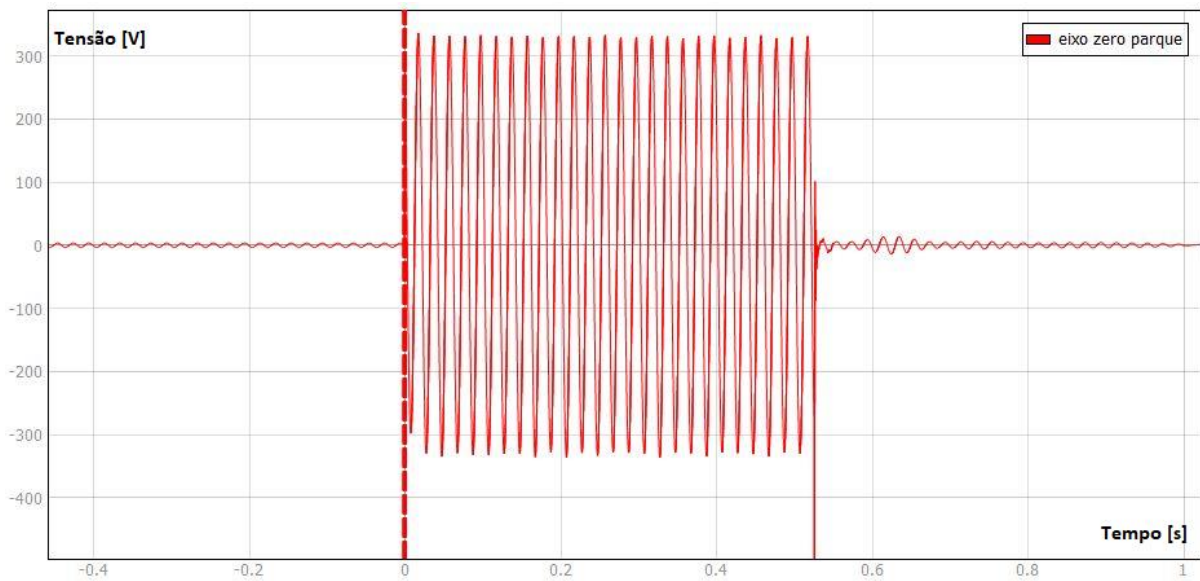
desse tipo de falta.

Figura 53 – Tensão de eixo d em falta trifásica.



Fonte: O autor (2023)

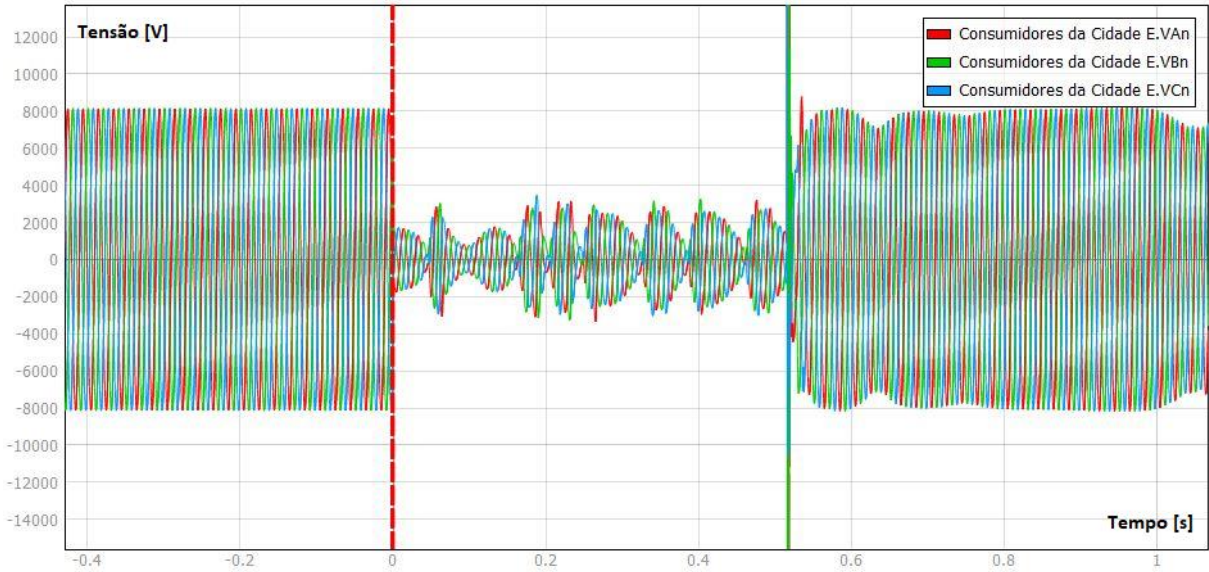
Figura 54 – Tensão de eixo 0 em falta trifásica.



Fonte: O autor (2023)

Considerando curtos-circuitos trifásico à terra, ocorre a redução da tensão de forma equivalente entre as fases, verificado na Figura 55.

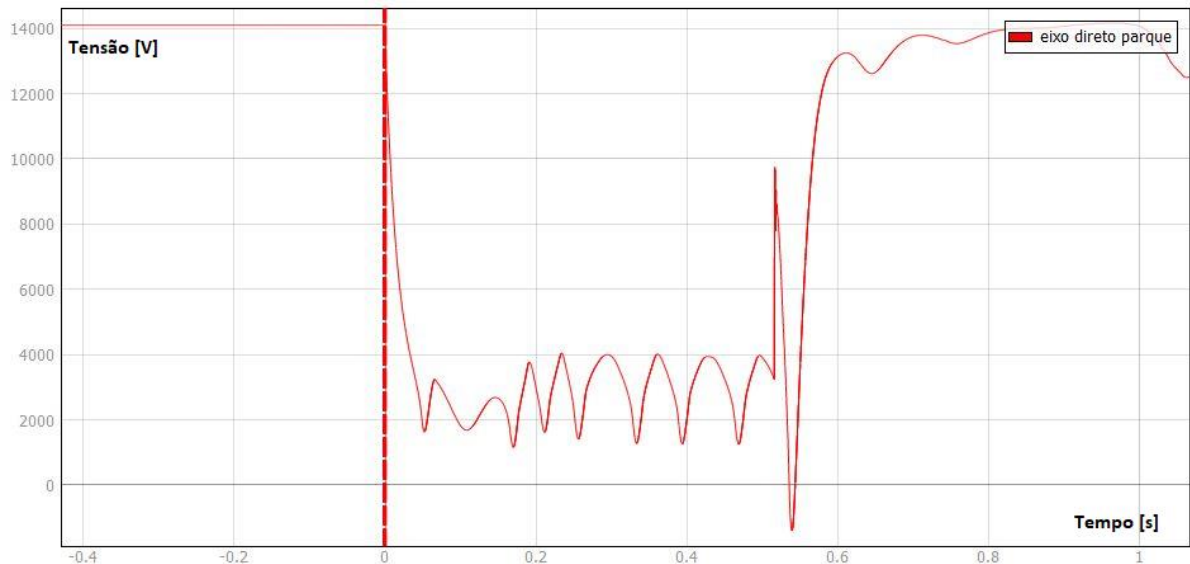
Figura 55 – Tensão durante curto-circuito trifásico à terra.



Fonte: O autor (2023)

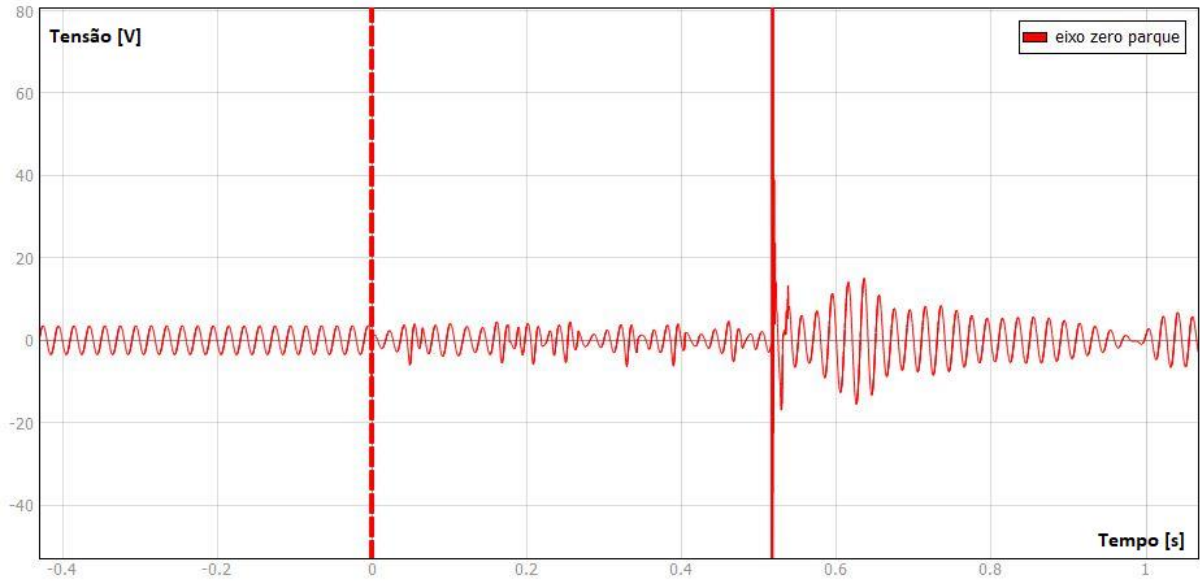
As alterações no eixo direto estão presentes, conforme verificado na Figura 56. No entanto, o eixo 0 não apresenta variação, se mantendo nulo durante a falta, conforme Figura 57. Com essa característica a variação no eixo 0 fica comprometida para bloqueio na detecção deste tipo de falta.

Figura 56 – Tensão de eixo d em falta trifásica à terra.



Fonte: O autor (2023)

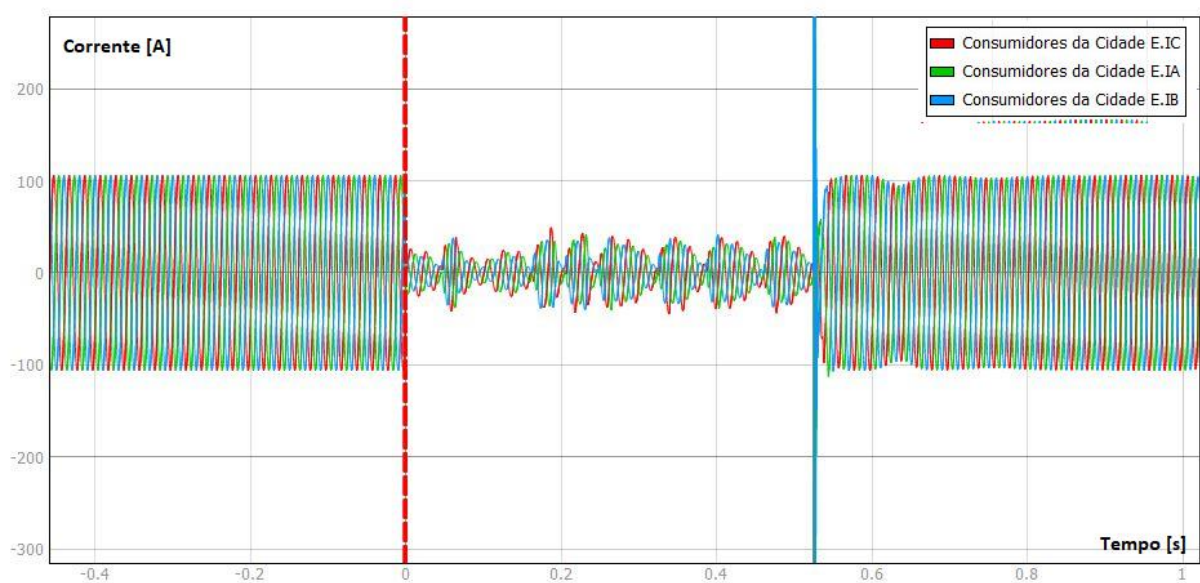
Figura 57 – Tensão de eixo 0 em falta trifásica à terra.



Fonte: O autor (2023)

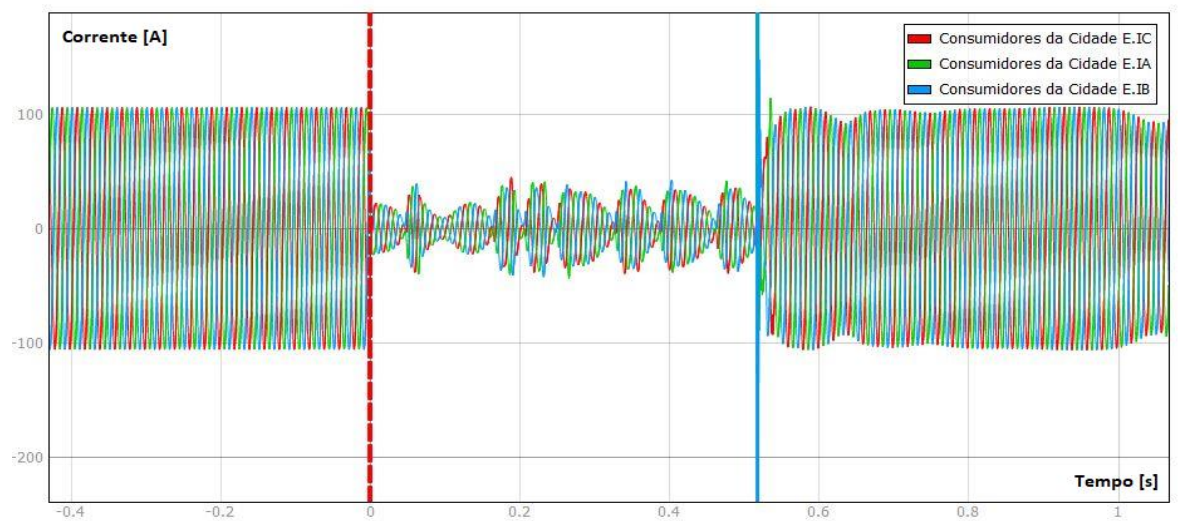
Realizando medições de corrente no consumidor, conforme Figuras 58 (curto-circuito Trifásico) e 59 (curto-circuito Trifásico à terra), observa-se que a corrente diminui nas duas situações. Como a carga é do tipo impedância constante e a tensão diminui, conseqüentemente, na carga a corrente irá diminuir, possibilitando assim utilizar a demanda para realizar o bloqueio da proteção.

Figura 58 – Corrente em falta trifásica.



Fonte: O autor (2023)

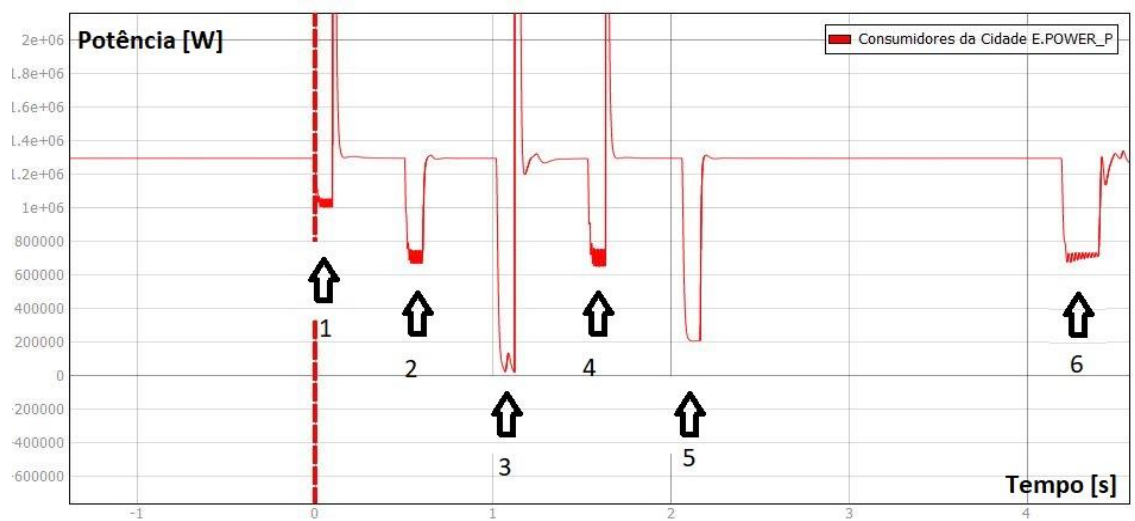
Figura 59 – Corrente em falta trifásica- terra.



Fonte: O autor (2023)

Para verificar essa possibilidade, foi realizado um teste com a medição de potência no consumidor. Onde, no instante de tempo representado pelo ponto 1 da Figura 60 é inserido uma falta monofásica, no ponto 2 uma bifásica à terra, 3 falta trifásica à terra, 4 bifásica, 5 trifásica e 6 um ilhamento. Observa-se que as faltas trifásicas têm uma redução maior em relação às outras ocorrências, indicando a possibilidade da utilização dessa característica para bloqueio na falta trifásica. A depender da distância das faltas em relação à medição, esse parâmetro pode bloquear para outros tipos de falta, o que não é considerado um problema.

Figura 60 – Potência na carga em todos os tipos de falta.

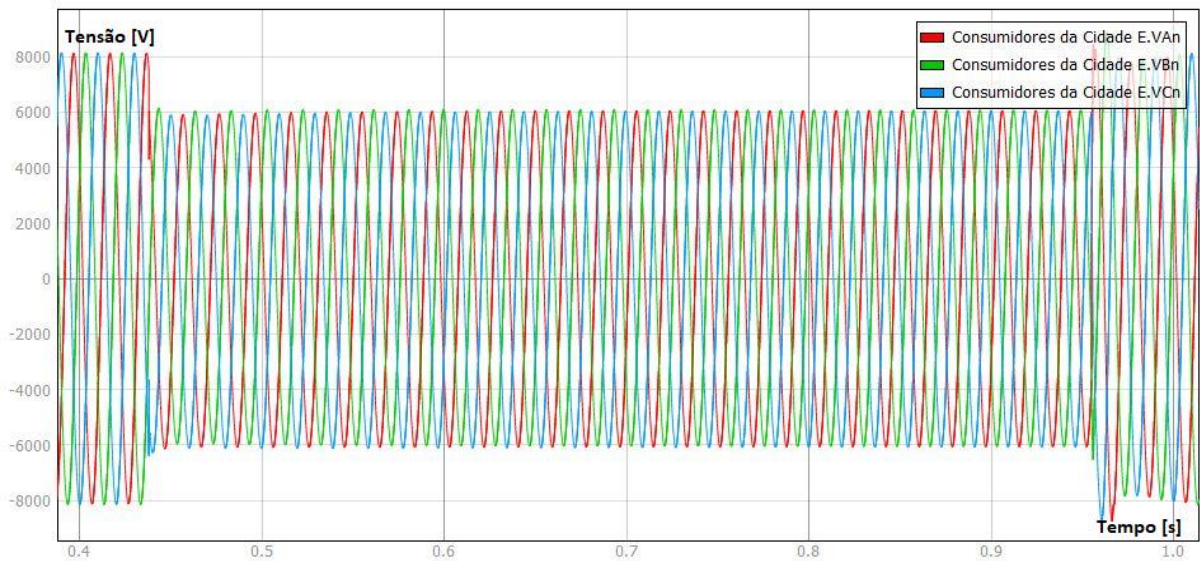


Fonte: O autor (2023)

5.3.4 Ilhamento

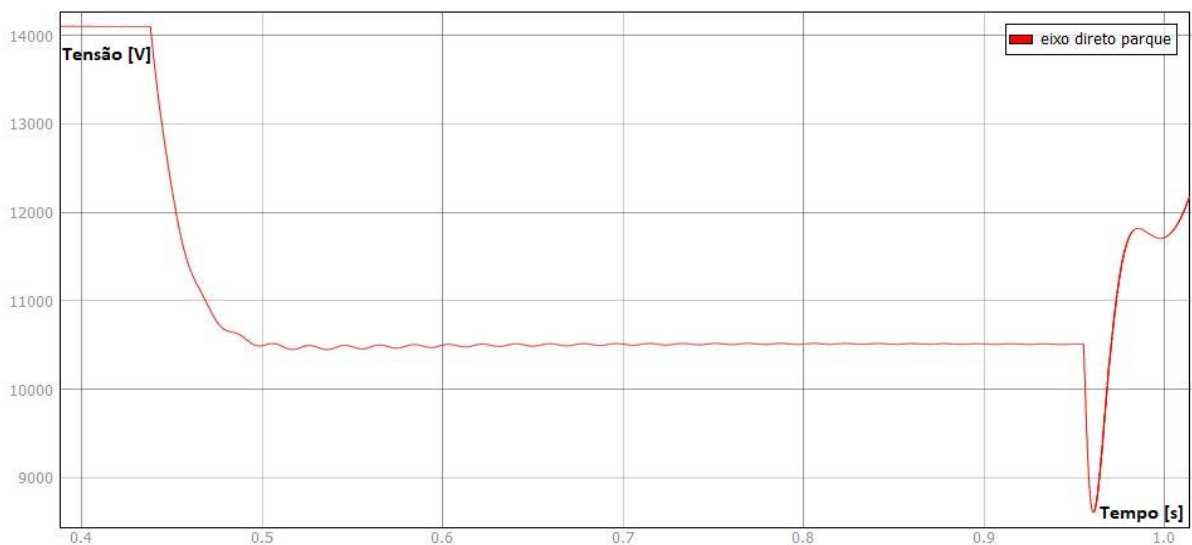
Durante o Ilhamento ocorre naturalmente uma alteração nos níveis de tensão, esse fator se deve às cargas, alimentadas pelo sistema eólico, não serem equilibradas entre as fases e também com o sistema. Dessa forma ocorre o reflexo desse desequilíbrio na transformada de Park, na Figura 61 é possível verificar essa variação de tensão durante o ilhamento e na Figura 62 os reflexos na transformada de Park no eixo d e 63 no eixo 0.

Figura 61 – Tensão durante o ilhamento



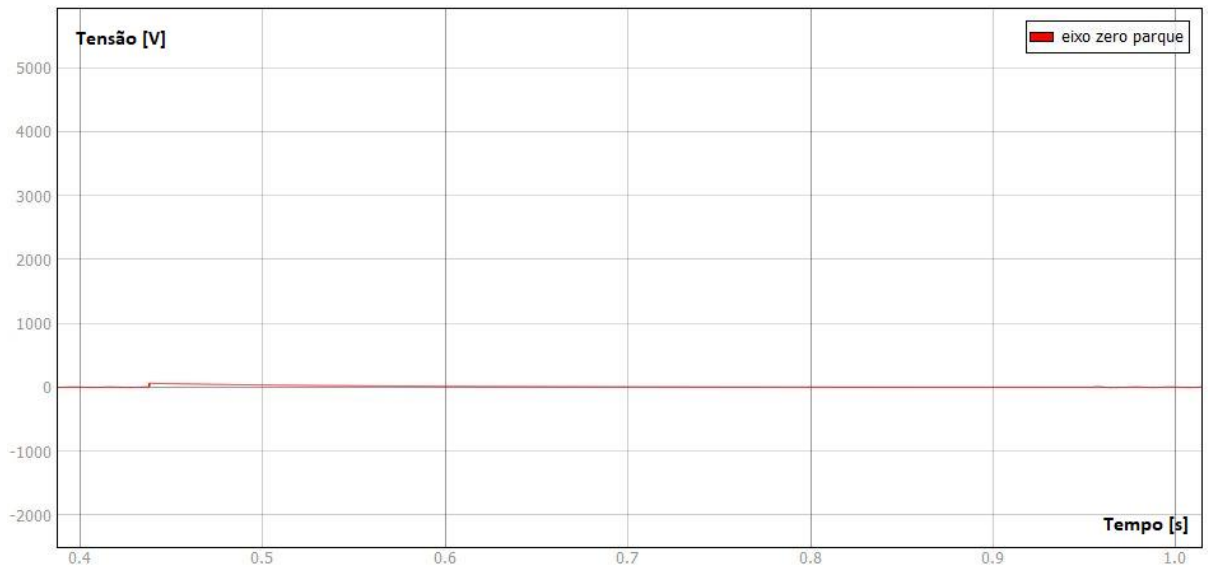
Fonte: O autor (2023)

Figura 62 – Tensão de eixo d no ilhamento



Fonte: O autor (2023)

Figura 63 – Tensão de eixo 0 noilhamento



Fonte: O autor (2023)

Nesta simulação a carga está ligeiramente maior que a geração, desta forma a tensão tende a diminuir.

5.4 CURTOS-CIRCUITOS SEGUIDOS DE ILHAMENTO

Com o tratamento do sinal e a definição dos ajustes da proteção propostas, foram realizados os testes com todos os tipos de curto-circuito, seguido de ilhamento.

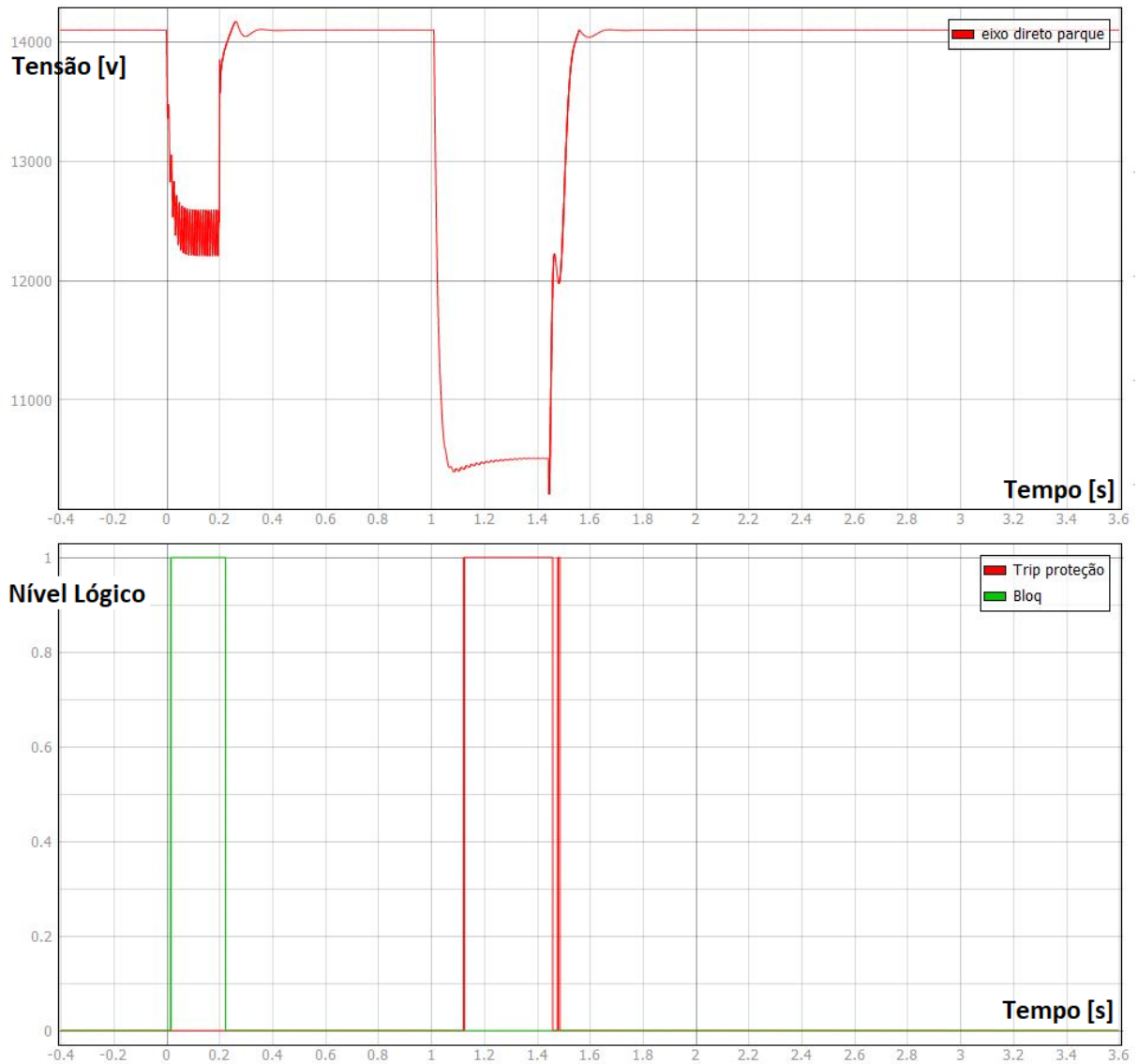
Considerando que durante operação normal do sistema teste a tensão de eixo d é de 14 kV, foi definido 12 kV como atuação da proteção, o eixo zero para bloqueio ficou em 100 V.

O bloqueio por potência foi ajustado em um terço da potência nominal da carga da cidade. O valor da carga deve ser determinado preferencialmente em período de carga leve, no teste, 400 KVA, o tempo entre partida e *trip* foi definido em 100 ms.

5.4.1 Curto-circuito monofásico seguido de ilhamento.

Na Figura 64, foi feita uma falta monofásica para terra, que é uma das mais comuns no sistema elétrico. Observa-se que no momento do curto-circuito, em zero segundos, só muda de nível o sinal de bloqueio, o sinal de *trip* é visualizado durante o ilhamento que ocorre 400 ms após a retirada da falta.

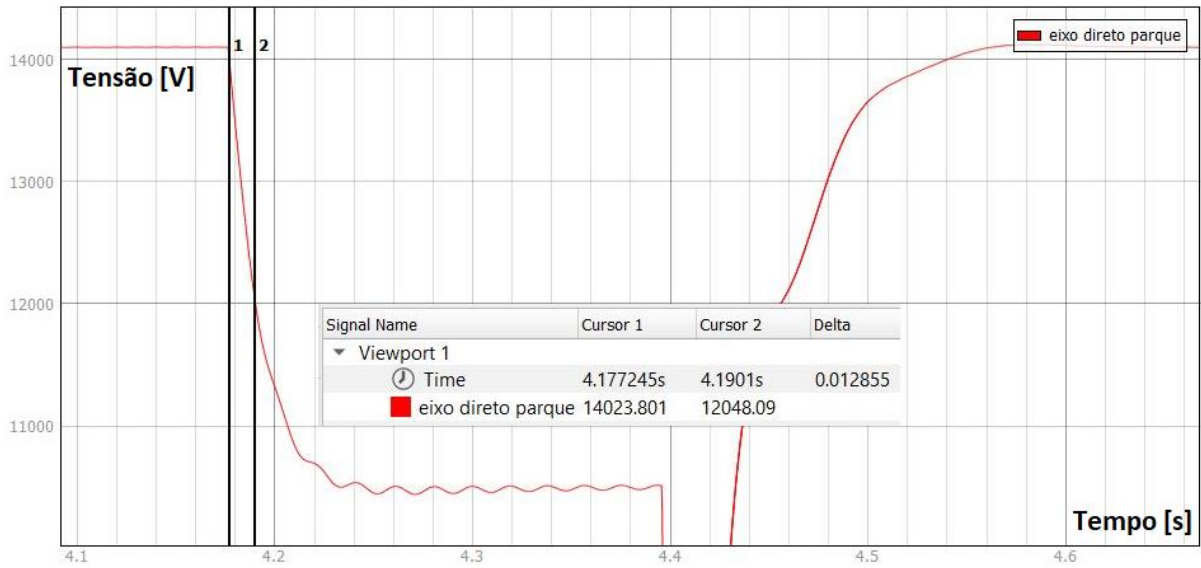
Figura 64 – Falta monofásica à terra seguida de ilhamento.



Fonte: O autor (2023)

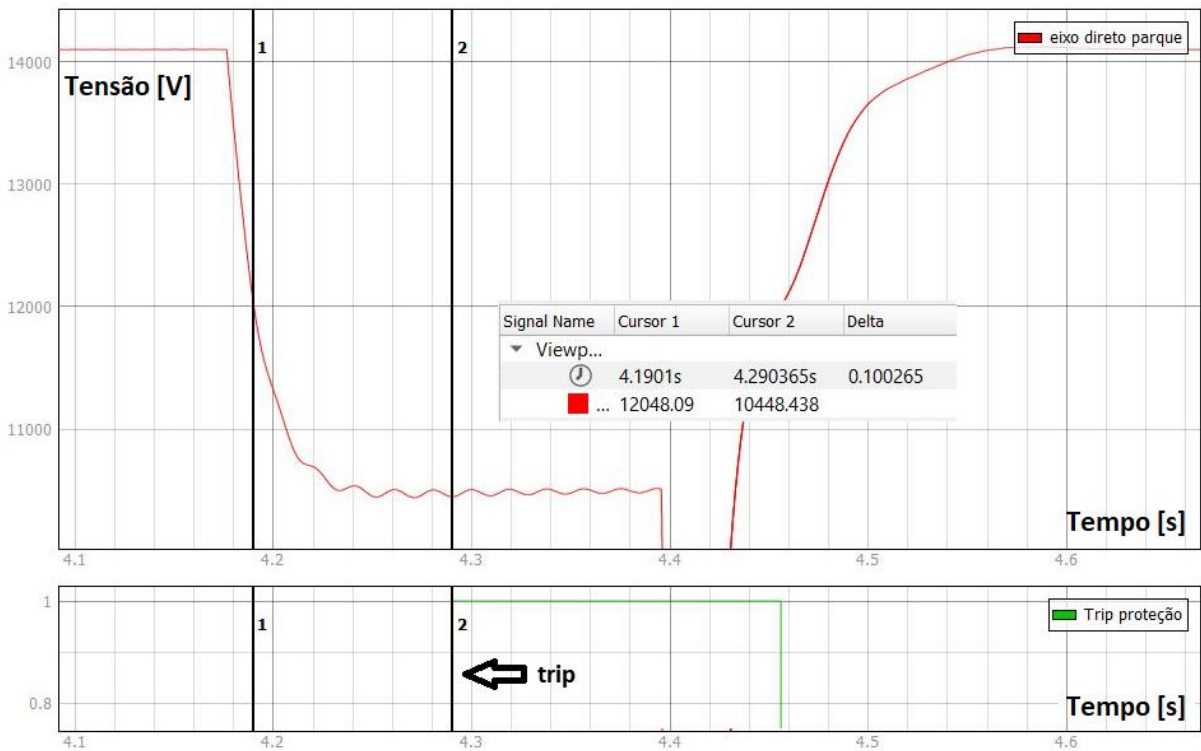
O tempo entre a falta (cursor 1) e a detecção (cursor 2), conforme Figura 65, é de aproximadamente 12 ms neste momento ocorre a partida da proteção. Na Figura 66 é possível ver que após a temporização de 100 ms da detecção (cursor 1), ocorre o *trip* (cursor 2).

Figura 65 – Tempo para detecção e partida da proteção.



Fonte: O autor (2023)

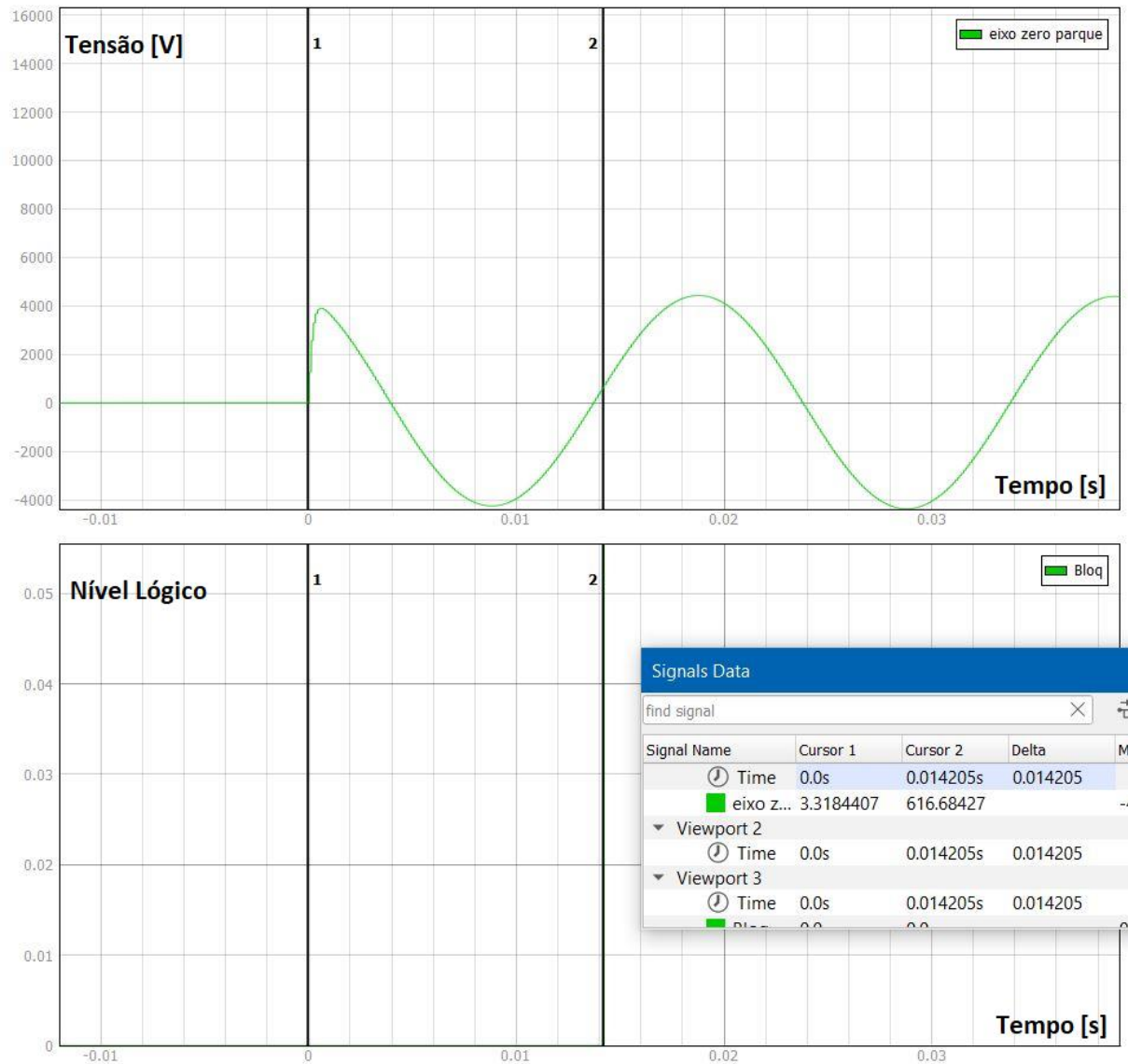
Figura 66 – Tempo para trip depois da partida.



Fonte: O autor (2023)

O tempo para bloqueio pelo eixo zero é de aproximadamente 14 ms, como é possível observar na Figura 67, o que indica menos de um ciclo para o bloqueio.

Figura 67 – Tempo para bloqueio da falta por eixo zero.

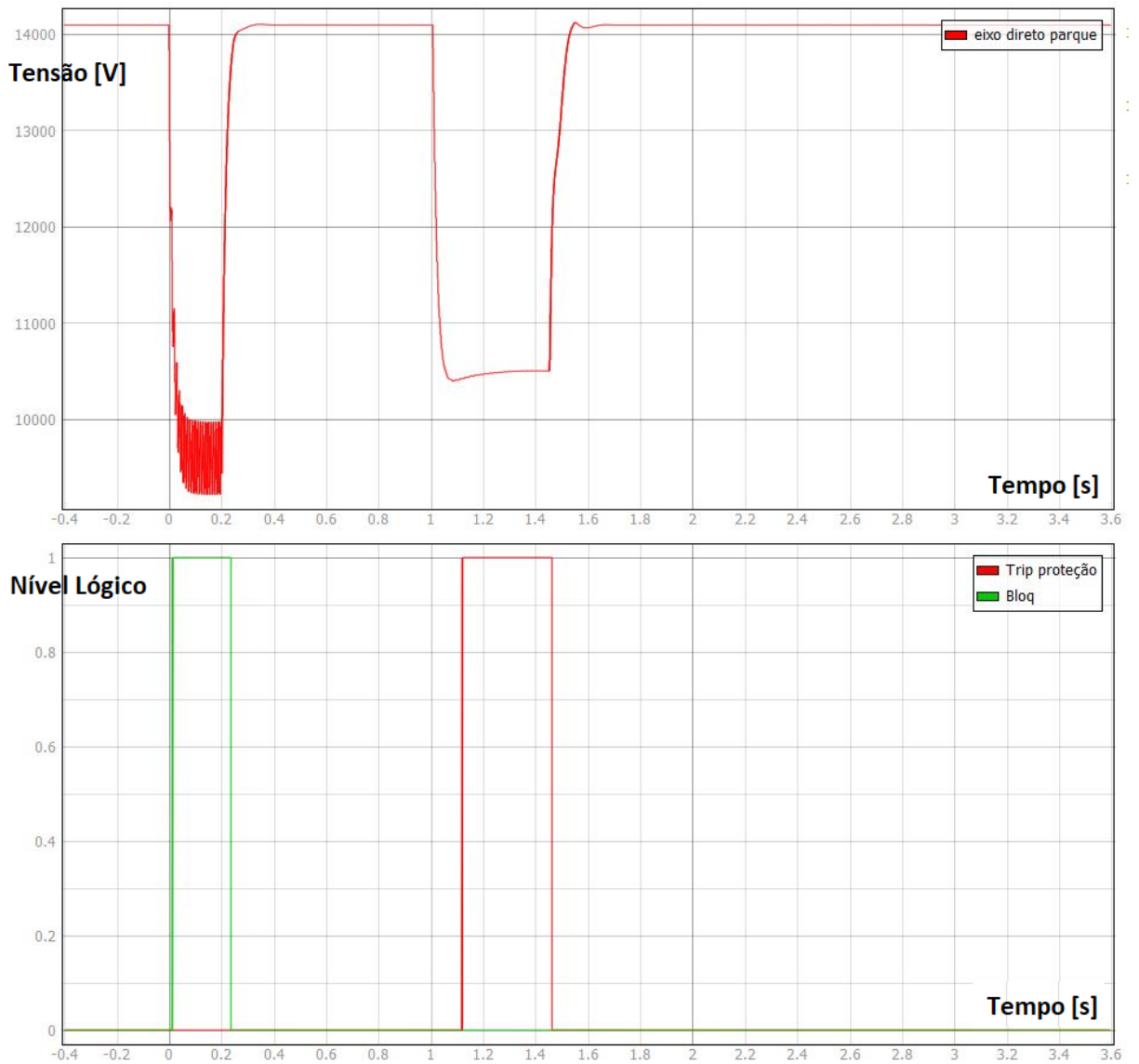


Fonte: O autor (2023)

5.4.2 Curtos-circuitos bifásicos seguido de ilhamento

A Figura 68 apresenta os resultados de um curto-circuito bifásico para terra seguido de um ilhamento.

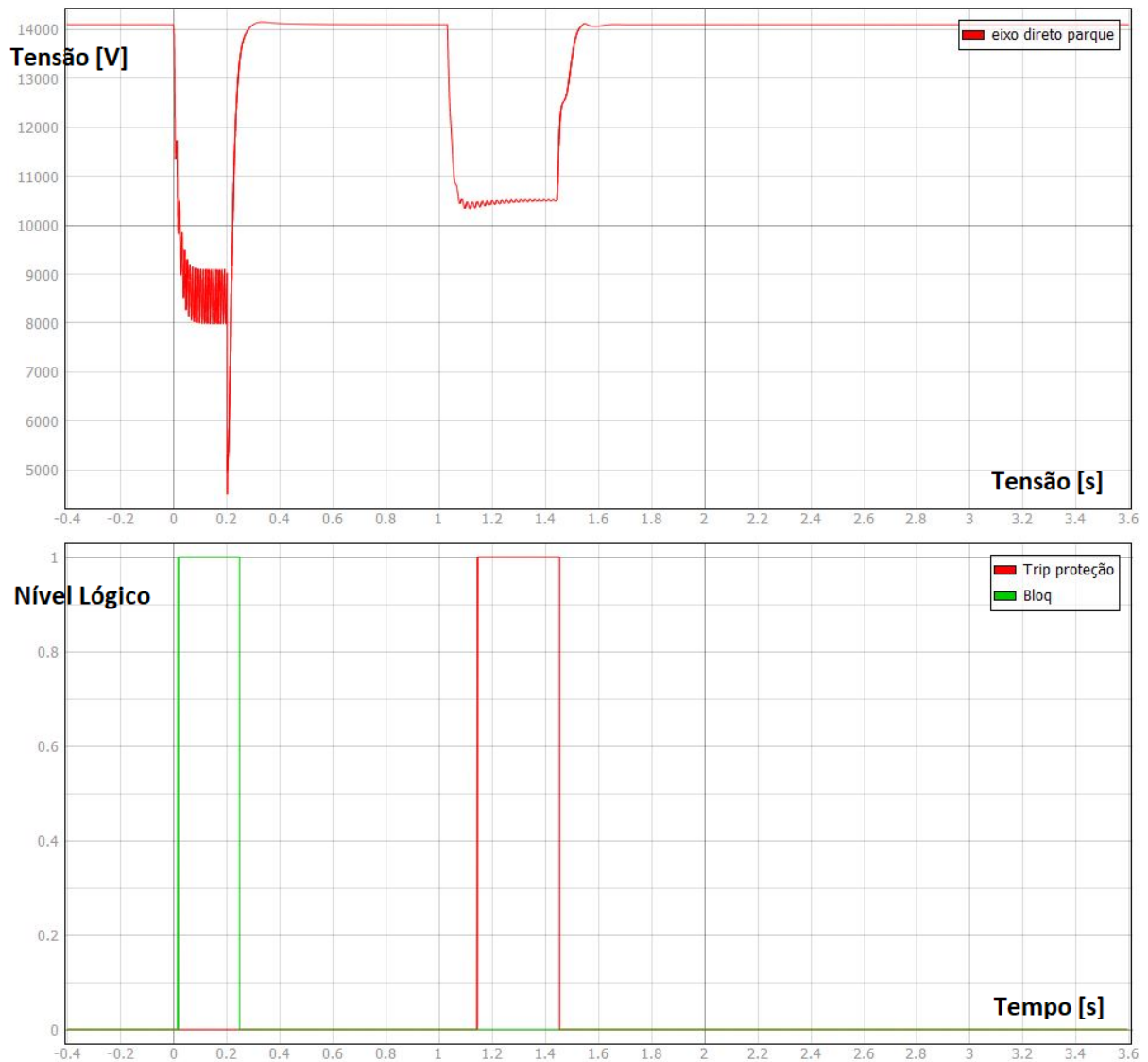
Figura 68 – Falta bifásica à terra seguida de ilhamento.



Fonte: O autor (2023)

Considerando uma falta bifásica onde só estão envolvidas as fases, a detecção é apresentada na Figura 69.

Figura 69 – Falta bifásica seguida de ilhamento.

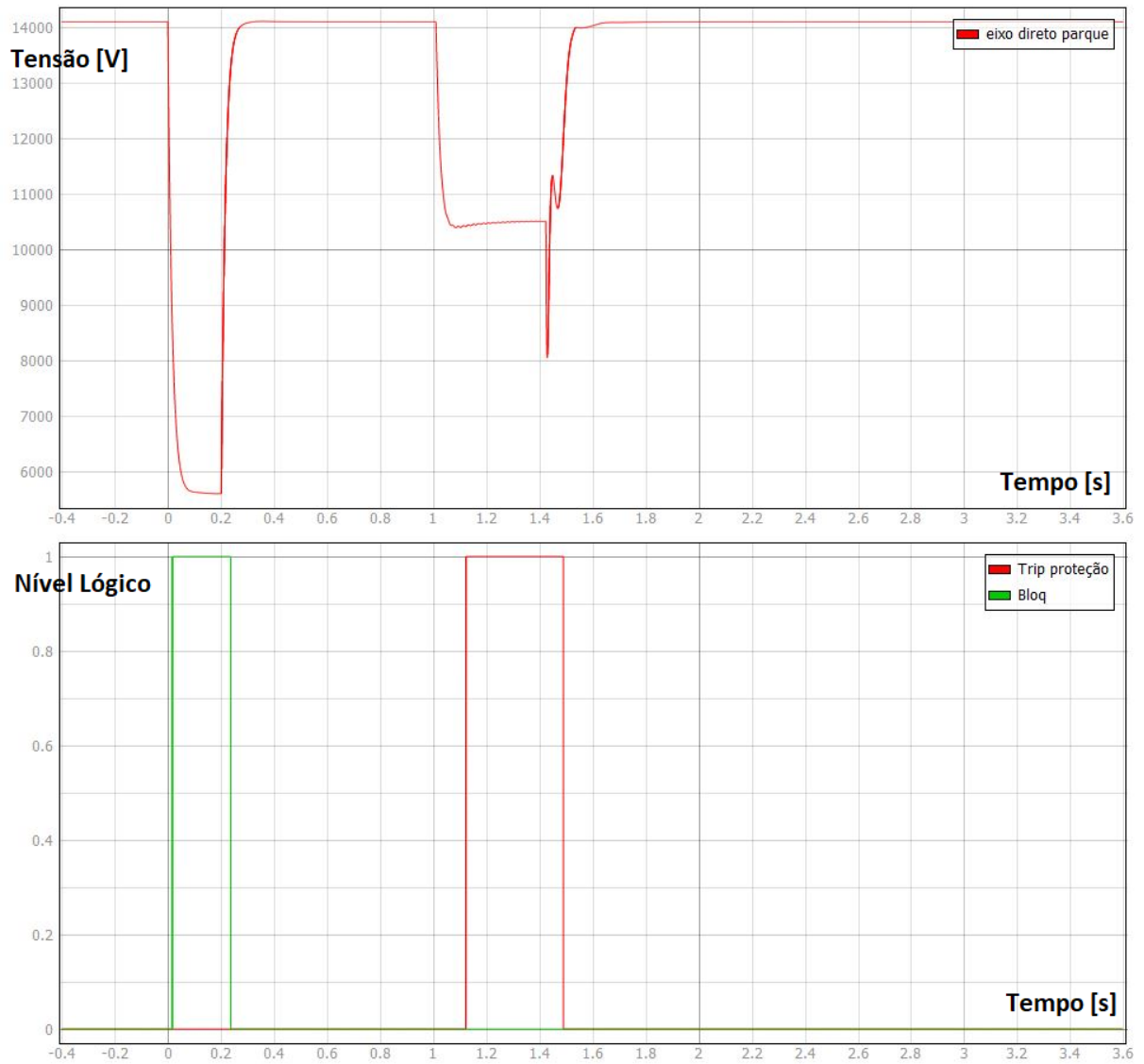


Fonte: O autor (2023)

5.4.3 Curtos-circuitos trifásico seguido de ilhamento

Na falta trifásica sem a presença da terra existe variação no eixo zero perceptível com a possibilidade de bloqueio da proteção pelo eixo zero, esse resultado encontramos na Figura 70.

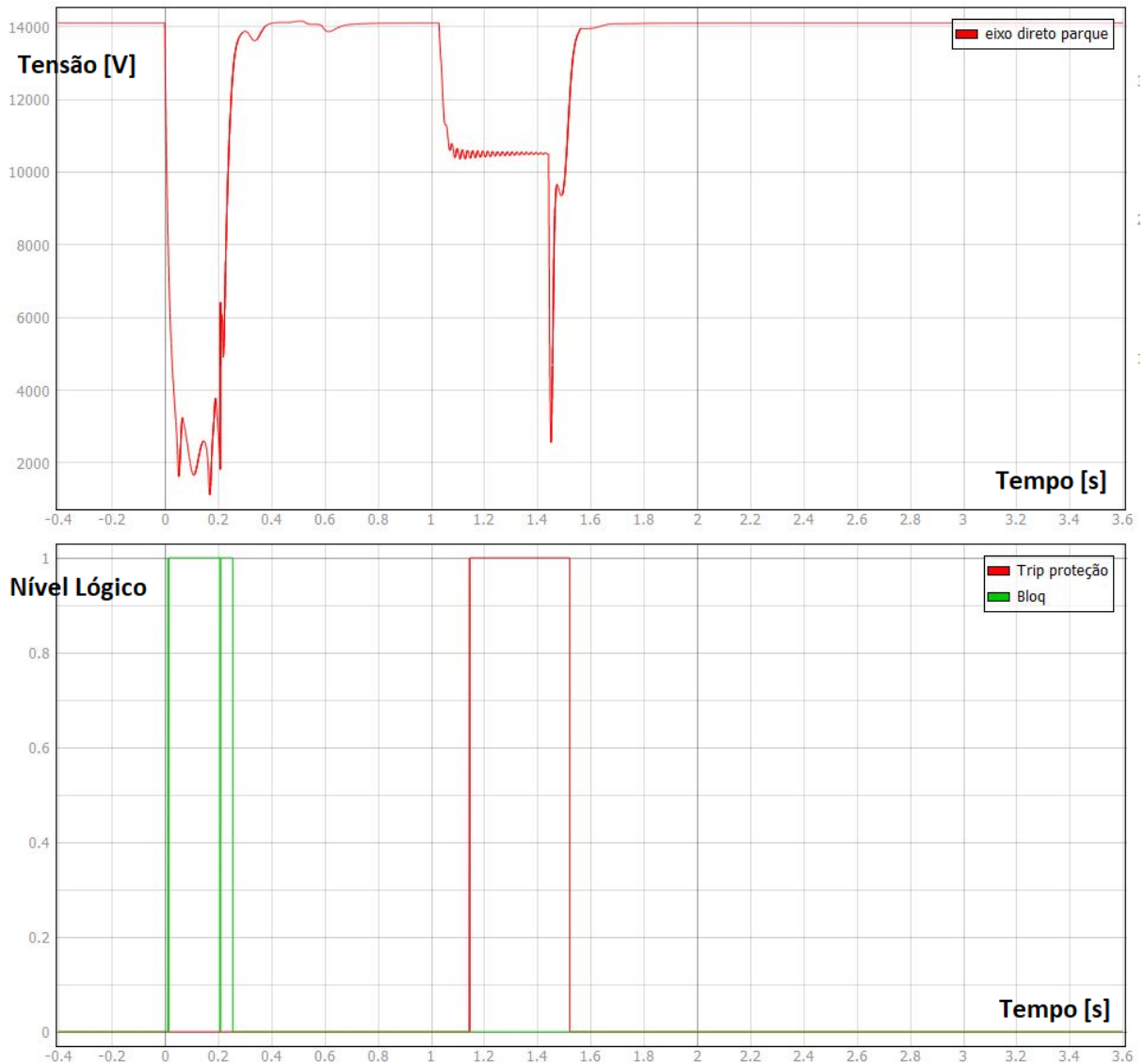
Figura 70 – Falta trifásica seguida de ilhamento



Fonte: O autor (2023)

No entanto, na falta trifásica à terra não existe variação no eixo zero o que inviabiliza o bloqueio pelas tensões desse eixo, dessa forma, como foi citado utilizando a variação da demanda de potência da carga foi possível bloquear esse tipo de falta conforme a Figura 71.

Figura 71 – Falta trifásica à terra seguida de ilhamento



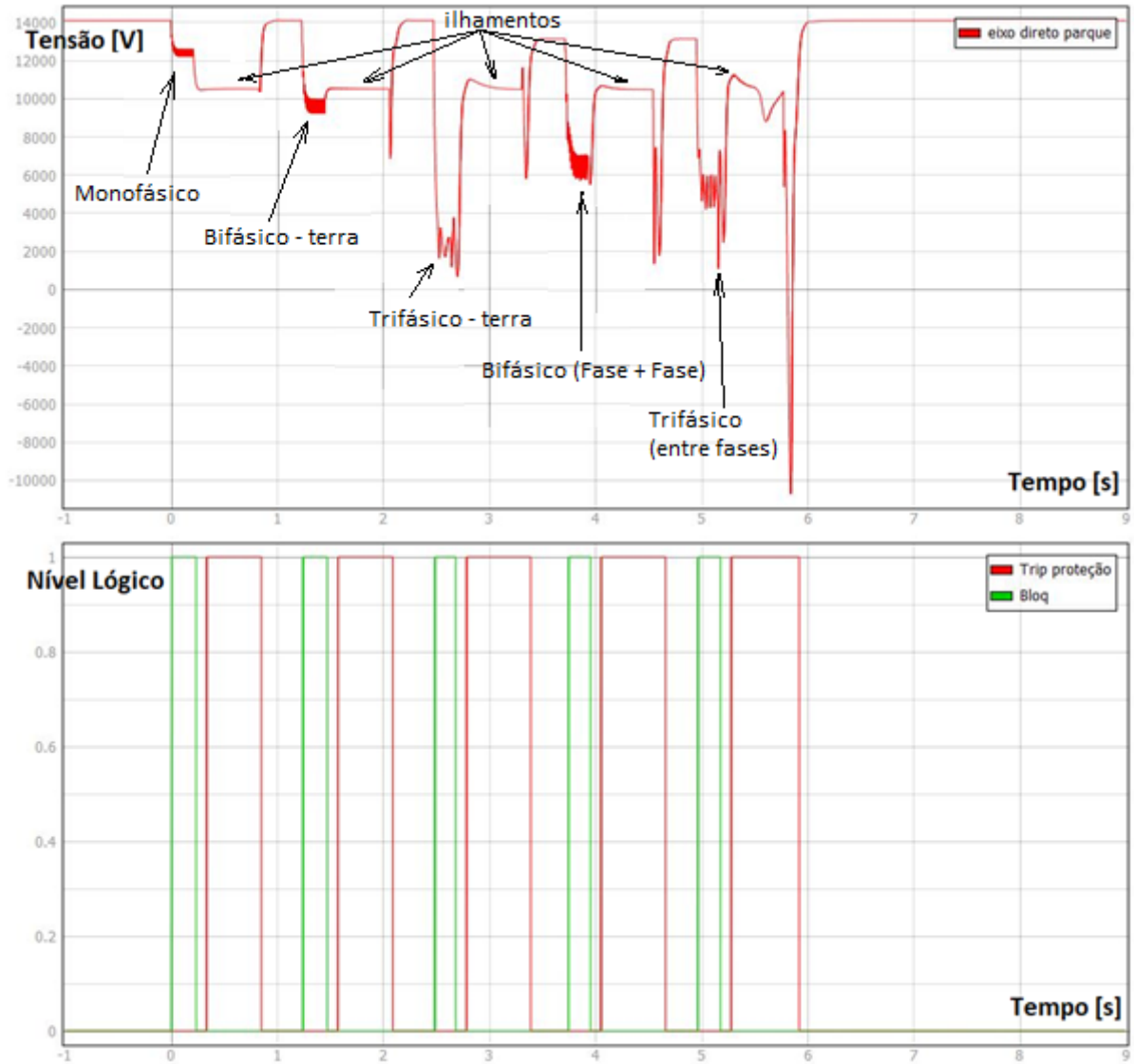
Fonte: O autor (2023)

5.4.4 Ilhamento durante os curtos-circuitos

Realizando testes com o ilhamento ocorrendo durante uma falta, e assim permanecendo ilhado mesmo com a extinção da falta, os resultados continuam satisfatórios para configurar a proteção que bloqueia na falta e atue no momento do ilhamento.

A Figura 72 apresenta uma sequência de faltas e os sinais de bloqueio e proteção, verifica-se o efetivo bloqueio durante a falta e a atuação da proteção assim que ocorre o ilhamento.

Figura 72 – Ilhamento durante falta bifásica

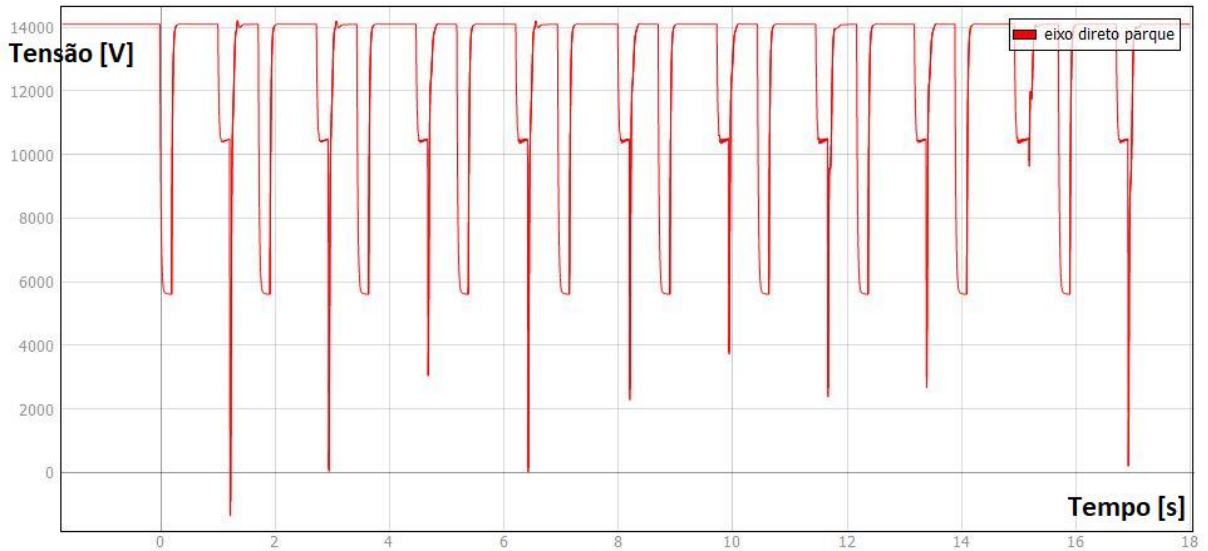


Fonte: O autor (2023)

5.4.5 Desempenho da proteção proposta.

Realizando uma sequência de testes onde foi configurado falta com 200 ms, tempo de espera de 800 ms, seguido de ilhamento de 200 ms, em uma sequência de 10 eventos seguidos com 500 ms de intervalo, esse teste está apresentado na Figura 73.

Figura 73 – Sequência de faltas seguidas de ilhamento.

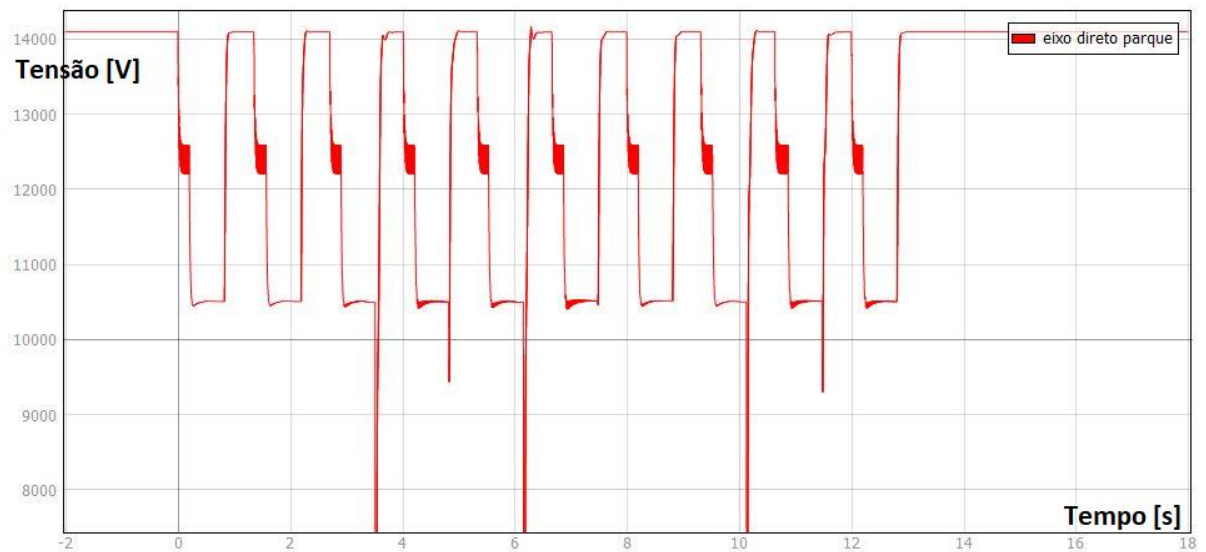


Fonte: O autor (2023)

Na Figura 74 é apresentado a tensão de eixo direto durante uma sequência com faltas de 400 ms de duração. Os ilhamentos ocorrem com 200 ms após o início da falta, ou seja, durante a falta, o ilhamento permanece por 600 ms.

Também com 10 eventos intercalados em 500 ms. Os testes foram repetidos 10 vezes para cada tipo de falta e os resultados se encontram na tabela 03.

Figura 74 – Sequência de faltas com ilhamento durante a falta.



Fonte: O autor (2023)

Tabela 3. Testes de desempenho das proteções.

Falta monofásica seguido deilhamento			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	97	0	21
Falta bifásica à terra seguido deilhamento			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	100	0	0
Falta trifásica à terra seguido deilhamento			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	100	0	0
Falta bifásica pura seguido deilhamento			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	100	0	0
Falta trifásica pura seguido deilhamento			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	100	0	0
Falta monofásica com ilhamento durante a falta			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	100	0	0

Falta bifásica à terra com ilhamento durante a falta			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	100	0	0

Falta trifásica à terra com ilhamento durante a falta			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	100	0	0

Falta bifásica com ilhamento durante a falta			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	100	0	0

Falta trifásica com ilhamento durante a falta			
Testes	Detecção	Detecção indevida	Bloqueio indevido temporário
100	100	0	0

Fonte: O autor (2023)

Com os testes verificou-se que o desempenho se mostrou satisfatório, com 0,003% de não atuações. Ocorreram 0,021% de bloqueios indevidos temporários, que atrasaram a atuação da detecção, considerando o tempo de partida da proteção de 12 ms, nas ocorrências com bloqueio indevido esse tempo aumenta em aproximadamente 15 ms, desta forma, os tempos de *trip* pela proteção vão variar entre 112 ms e 127 ms. Esse fato foi verificado apenas nas faltas monofásicas, no entanto, sem prejuízo das detecções.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos testes realizados no algoritmo de detecção de ilhamento proposto. Obteve-se um desempenho satisfatório, sem ocorrências de *trip* indevido. Verificaram-se alguns bloqueios indevidos, que resultaram em alguns casos de

não detecção.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou ilhamentos não intencionais reais de parques eólicos conectados ao SIN, e fez a proposta de uma proteção para detecção deste tipo de evento.

Inicialmente foram descritas as técnicas de detecção de ilhamento utilizadas e estudadas atualmente, bem como suas vantagens e desvantagens. Conclui-se que as técnicas passivas apresentam algumas vantagens para o caso em específico, como manter a qualidade de energia e necessitar de equipamentos adicionais apenas na subestação.

Foi apresentado dois casos reais de ocorrências no sistema, os quais foram analisados para servir de base para o desenvolvimento da proteção. Com o modelo a ser estudado, foi simulado e testado para verificar a compatibilidade com o sistema real.

Utilizou-se a transformada de Park para detecção das variações de tensão na rede, durante ocorrências do sistema, como Curto-circuito e ilhamento. Com os resultados dessa transformada verificou-se que no eixo direto existe variação em ambos os casos, o que não ocorre no caso do eixo 0. Assim, a tensão do eixo zero foi utilizada para realizar o bloqueio da proteção durante as faltas. Para os casos de falta trifásica, não pode ser utilizado o eixo 0 como bloqueio, de forma que, foi utilizado a potência da carga para bloquear nestes casos.

A técnica apresentada apresentou um ótimo desempenho, em especial, no bloqueio de curto-circuito, diminuindo assim os erros de atuação.

6.1 TRABALHOS PUBLICADOS NESTA ÁREA DE PESQUISA

6.1.1 Artigo em congressos

LEDEBUHR, R. A. B.: MARCHESAN, G.: CARDOSO JUNIOR, G.: DUTRA, E. G. . Análise de ocorrências de ilhamento não intencional em parque eólico conectado ao sistema elétrico de Potência. In: **IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2022, Santa Maria.

REFERÊNCIAS

- AGHDAM, T.S. ; KARGAR, H.K. A new islanding detection algorithm for wind turbine equipped by a self excited induction generator. In **2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution**, 1–3.
- AGHDAM, T.S.; KAREGAR, H.K. Settings of rocof relays for islanding detection of wind turbine. In **2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection**, volume 2, 1402–1405. doi: 10.1109/APAP.2011.6180734.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Módulo 11.8 – Sistema de Medição de Sincrofasores**. Brasília: ANEEL, 2020.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Módulo 8 – qualidade da energia elétrica e procedimentos de distribuição**. Brasília: ANEEL, 2017.
- BOWER, W.; ROPP, M. **Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility Interactive Inverter in Photovoltaic Systems**. Relatório, Albuquerque, 2002.
- CHANG, W. Y. C. W. Y. A hybrid islanding detection method for distributed synchronous generators. **The 2010 International Power Electronics Conference**. Anais... p.1326-1330, 2010.
- EL-KHATTAM, W. ; YAZDANI, A. ; SIDHU, T.S. ; AND SEETHAPATHY, R. Investigation of the local passive anti-islanding scheme in a distribution system embedding a pmsg-based wind farm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2011, 26(1), 42–52. doi:10.1109/TPWRD.2010.2061240.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **BEN: Balanço energético nacional 2022: Ano base 2019**. Brasília: EPE, 2020.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **BEN: Balanço energético nacional 2022: Ano base 2021**. Brasília: EPE, 2022.
- FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S.D. **Máquinas elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. São Paulo: Atlas, 2006.
- GUO, Y. ; LI, K. ; LAVERTY, D.M. A statistical process control approach for automatic anti-islanding detection using synchrophasors. In **2013 IEEE Power Energy Society General Meeting**, 1–5. doi:10.1109/PESMG.2013.6672698.
- HRABOVCOVÁ, V. ; RAFAJDUS, P. ; AND MAKYŠ, P. **Analysis of Electrical Machines**. Zilina : IntecOpen, 2020.
- IEEE. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. **IEEE Std 1547-2018** (Revision of IEEE Std 1547-2003), vol., no., pp.1-138, 6 April 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112.
- JOHN, V.; YE, Z.; KOLWALKAR, A. Investigation of Anti-Islanding Protection of Power Converter Based Distributed Generators Using Frequency Domain Analysis. **Power Electronics**, IEEE Transactions, 2004, on. 19. 1177 - 1183. 10.1109/TPEL.2004.833435.

KAREGAR, H. K. ; SHATAEE, A. Islanding detection of wind farms by THD, **2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies**, Nanjing, China, 2008, pp. 2793-2797, doi: 10.1109/DRPT.2008.4523885.

KHAMIS, A.; SHAREEF, H.; BIZKEVELCI, E.; KHATIB, T. ; A review of islanding detection techniques for renewable distributed generation systems, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 28, 2013, Pages 483-493, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.025>.

KHODAPARASTAN, M. ; VAHEDI, H. ; KHAZAELI, F. ; ORAEE, H. A novel hybrid islanding detection method for inverter-based dgs using sfs and rocof. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 5, p. 2162–2170, 2017.

MAHAT, P. ; CHEN, Z. ; BAK-JENSEN, B. A hybrid island detection technique using average rate of voltage change and real power shift. **IEEE Transactions on Power Delivery**. V. 24, n. 2 p. 764-771, 2009.

MAHAT, P. ; CHEN, Z. ; BAK-JENSEN, B. **Review on islanding operation of distribution system with distributed generation**. 1 – 8, 2011.. doi:10.1109/PES.2011.6039299.

MAHAT, P.; CHEN, Z.; BAK-JENSEN, B. Review of islanding detection methods for distributed generation. In: **2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2743–2748.

MAMEDE FILHO, J. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. São Paulo: LTC, 2011.

MORSI, W.G. ; DIDUCH, C.P. ; CHANG, L. A new islanding detection approach using wavelet packet transform for wind-based distributed generation. In **The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems**, 2010, 495–500. doi:10.1109/PEDG.2010.5545860.

PARK RH. Two-reaction theory of synchronous machines. Generalized method of analysis—Part I. **AIEE Transaction**. 1929

PEDERSEN, J.K. ; AKKE, M. ; POULSEN, N. ; PEDERSEN, K.O.H.. Analysis of wind farm islanding experiment. **Energy Conversion**, 2000. IEEE Transactions on. 15. 110 - 115. 10.1109/60.849125.

REIS, L. B. dos. **Geração de energia elétrica**. São Paulo: LTC, 2011.

SANCHIS GÚRPIDE, Pablo; MARROYO PALOMO, Luis; COLOMA, Javier. Design methodology for the frequency shift method of islanding prevention and analysis of its detection capability. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 2005; 13: 409–428, 2005.

SCHUBERT, Camargo. **Atlas eólico**: Rio grande do sul. Porto Alegre: ECE, 2014.

TEDDE, M. ; SMEDLEY, K. Anti-Islanding for Three-Phase One-Cycle Control Grid Tied Inverter, in **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 29, no. 7, pp. 3330-3345, July 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2278792.

XU, W. ; ZHANG, G. ; LI, C. ; WANG, W. ; WANG, G. ; KLIBER, J. A power line signaling based technique for anti-islanding protection of distributed generators - Part I: Scheme and

analysis, **IEEE Trans. Power Del.**, vol. 22, no. 3, pp. 1758-1766, Jul. 2007.

YIN, J. ; CHANG, L. ; DIDUCH, C. Recent developments in islanding detection for distributed power generation, 2004 **Large Engineering Systems Conference on Power Engineering** (IEEE Cat. No.04EX819), Halifax, NS, Canada, 2004, pp. 124-128, doi: 10.1109/LESCPE.2004.1356285.

ZHANG, J. Y.; OOI, B. T. Islanding operation for DFIG based wind farm, **2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 4172-4177, doi: 10.1109/ECCE.2015.7310249.