



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CÂMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SAMUEL SOUSA DA SILVA

**DETECÇÃO DE ROMPIMENTO DE CONDUTORES EM SISTEMA ELÉTRICO DE
POTÊNCIA ATRAVÉS DA TENSÃO DE SEQUÊNCIA NEGATIVA COM ESTAÇÃO
DE CARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Palmas -TO

2025

Samuel Sousa da Silva

**Detecção de Rompimento de Condutores em Sistema Elétrico de
Potência Através da Tensão de Sequência Negativa com Estação
de Carga de Veículos Elétricos**

Trabalho de conclusão de Curso II foi avaliada e Apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus universitário de Palmas, curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof.Dr. Jadiel Caparrós da Silva

Palmas - TO

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- S586d Silva, Samuel Sousa da.
Detecção de Rompimento de Condutores em Sistema Elétrico de Potência Através da Tensão de Sequência Negativa com Estação de Carga de Veículos Elétricos. / Samuel Sousa da Silva. – Palmas, TO, 2025.
60 f.
Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2025.
Orientador: Jádriel Caparrós da Silva
1. Distúrbios de Tensão. 2. Rompimento de Condutor. 3. Sistema Teste de 5 Barramentos. 4. Tensão de Sequência Negativa. I. Título
CDD 621.3
-

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.


Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Samuel Sousa da Silva


**Detecção de Rompimento de Condutores em Sistema Elétrico de
Potência Através da Tensão de Sequência Negativa com Estação
de Carga de Veículos Elétricos**

Data de aprovação: 02/07/2025


Trabalho de conclusão de Curso II foi avaliada e Apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus universitário de Palmas, curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Documento assinado digitalmente
 **JADIEL CAPARRÓS DA SILVA**
Data: 03/07/2025 02:51:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jadiel Caparrós da Silva
Universidade Federal do Tocantins

Documento assinado digitalmente
 **MURILO DE AVILA DILLI**
Data: 02/07/2025 14:21:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Especialista. Murilo De Ávila Dilli
Universidade Federal do Tocantins

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO MANUEL RIVERA SANHUEZA**
Data: 02/07/2025 15:43:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sergio Manuel Rivera Sanhueza
Universidade Federal do Tocantins

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso II tem como objetivo analisar o comportamento de Rompimento de Condutores (RC) em sistemas elétricos de potência, com foco na utilização da Tensão de Sequência Negativa (TSN) como indicador, considerando a presença de pontos de carregamento de veículos elétricos. A Identificação precoce de falhas desse tipo é essencial para evitar situações de falta de alta impedância que ocorre em RC e o mesmo entram em contato com o solo, asfalto ou vegetação, que representam riscos à segurança e à continuidade do fornecimento de energia elétrica. Para isso, são realizadas análises comparativas entre distúrbios comuns em sistemas elétricos como chaveamento de capacitores, chaveamento de cargas distribuídas e distúrbios de tensão do tipo *sag*, *sag* com *harmônicos*, *swell*, *swell* com *harmônicos*, *outage*, *oscilações transitórias*, *fluctuation*, *flicker* e *harmônicos* e os efeitos provocados por rompimento de condutor. As simulações foram realizadas no *software* ATP/EMTP em um sistema teste com cinco barramentos. Os resultados demonstram que a adição de um segundo medidor de TSN aumentou significativamente a eficiência na identificação de rompimentos, alcançando até 100% de distinção em certos cenários. Além disso, sistemas com cargas alocadas no final dos barramentos apresentaram desempenho superior, especialmente em eventos de chaveamento, quando comparados ao sistema original. Conclui-se, portanto, que o método proposto é eficaz em configurações modificadas do sistema, reforçando a importância da alocação estratégica de medidores e cargas para a melhoria da detecção do rompimento de condutores.

Palavras-chaves: Distúrbios de Tensão; Rompimento de Condutor; Sistema Teste de 5 Barramentos; Tensão de Sequência Negativa; Veículos Elétricos.

ABSTRACT

This Final Undergraduate Project II aims to analyze the behavior of Conductor Breaks (CB) in electric power systems, focusing on the use of Negative Sequence Voltage (NSV) as an indicator, considering the presence of electric vehicle charging points. Early identification of such faults is essential to prevent high-impedance faults that occur when the conductor break comes into contact with the ground, asphalt, or vegetation, posing risks to safety and the continuity of electricity supply. For this purpose, comparative analyses are carried out between common disturbances in power systems such as capacitor switching, distributed load switching, and voltage disturbances like *sag*, *sag with harmonics*, *swell*, *swell with harmonics*, *outage*, *transient oscillations*, *fluctuation*, *flicker*, and *harmonics* and the effects caused by conductor breakage. Simulations were conducted using the ATP/EMTP software in a test system with five buses. The results show that the addition of a second NSV meter significantly improved the efficiency in identifying conductor breaks, reaching up to 100% distinction in certain scenarios. Furthermore, systems with loads placed at the end of the buses showed superior performance, especially during switching events, compared to the original system. It is therefore concluded that the proposed method is effective in modified system configurations, reinforcing the importance of strategically allocating meters and loads to improve the detection of Conductor Breaks.

Key-words: Voltage Disturbances; Conductor Breakage; 5-Bus Test System; Negative Sequence Voltage; Electric Vehicles;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – <i>MODELS</i> no ATPDraw™ contendo distúrbios de tensão.....	20
Figura 2 - Distúrbio de Tensão (DT).	22
Figura 3– Chave e resistores alocados em cada barramento.	26
Figura 4 – Parâmetros de chave inserida na fase A.....	27
Figura 5 – Sistema teste de 5 barramentos	28
Figura 6 - Localização dos chaveamentos no sistema de 5 barramentos.....	28
Figura 7 - Estrutura em blocos para modelagem da bateria e de seus componentes.	29
Figura 8 - Decomposição de um sistema trifásico desbalanceado.....	32
Figura 9 - Metodologia de simulação	34
Figura 10 - Fluxograma da lógica utilizada no sistema teste de 5 barramentos.....	36
Figura 11 - Sistema teste original de 5 barramentos.	38
Figura 12 - Sistema teste modificado de 5 barramentos.	41
Figura 13 - Localização das chaves SWDL no sistema teste de 5 barramentos.....	57
Figura 14 - Localização da chave SWBC no sistema teste de 5 barramentos.....	57

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Modelagem matemática de distúrbios de tensão.....	21
Tabela 2 - Alocação dos <i>PMUs</i> através do GAMS para o sistema de 5.	36
Tabela 3 - Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso I do sistema teste de 5 barramentos.	39
Tabela 4 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso I do sistema teste de 5 barramentos.	40
Tabela 5 - Eficiência do sistema geral do caso I do sistema teste de 5 barramentos.	40
Tabela 6 - Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso II do sistema teste de 5 barramentos.	42
Tabela 7 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso II do sistema teste de 5 barramentos.	42
Tabela 8 - Eficiência do sistema geral do caso II do sistema teste de 5 barramentos.	43
Tabela 9 - Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso III do sistema teste de 5 barramentos.	43
Tabela 10 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso III do sistema teste de 5 barramentos.	44
Tabela 11 - Eficiência do sistema geral do caso III do sistema teste de 5 barramentos.	44
Tabela 12 - Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso IV do sistema teste de 5 barramentos.	45
Tabela 13 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso IV do sistema teste de 5 barramentos.	46
Tabela 14 - Eficiência do sistema geral do caso IV do sistema teste de 5 barramentos.	46
Tabela 15 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso V do sistema teste de 5 barramentos.	47

Tabela 16 - Eficiência do sistema geral do caso V do sistema teste de 5 barramentos.	48
Tabela 17 - Resultados encontrados por caso do sistema teste de 5 barramentos. .	48
Tabela 18 - Valor da TSN no RC do sistema teste original de 5 barramentos.	58
Tabela 19 - Valor da TSN no RC do sistema teste modificado de 5 barramentos.	58
Tabela 20 - Valor da TSN nos DTs do sistema teste original de 5 barramentos.	59
Tabela 21 - Valor da TSN nos DTs do sistema teste modificado de 5 barramentos. .	59
Tabela 22 - Valor da TSN nos chaveamentos do sistema teste original de 5 barramentos.....	60
Tabela 23 - Valor da TSN nos chaveamentos do sistema teste modificado de 5 barramentos.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>BESS</i>	<i>Battery Energy Storage System</i> (Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias)
DT	Distúrbio de Tensão
FAI	Falta de Alta Impedância
<i>FPGA</i>	<i>Field programmable gate array</i> (Matriz de portas programáveis em campo)
<i>GAMS</i>	<i>General Algebraic Modeling System</i> (Sistema Geral de Modelagem Algébrica)
<i>KNN</i>	<i>K/Nearest Neighbours</i> (K/Vizinhos mais próximos)
MÁX	Máximo
MIN	Mínimo
<i>PMU</i>	<i>Phasor Measurement Unit</i> (Unidade de Medição Fasorial)
RC	Rompimento de Condutores
RNA	Redes Neurais Artificiais
SEP	Sistema Elétrico de Potência
<i>SNR</i>	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Relação Sinal – Ruído)
std	Desvio Padrão
<i>STFT</i>	<i>Short Time Fourier Transform</i> (Transformada de Fourier de Curto Prazo)
SWBC	<i>Capacitor Bank Switching</i> (Chaveamento de Banco de Capacitor)
SWDL	<i>Distributed Load Switching</i> (Chaveamento de Carga Distribuída)
TSN	Tensão de sequência Negativa
UFT	Universidade Federal do Tocantins
VE	Veículo Elétricos
<i>VHDL</i>	<i>VHSIC Hardware Description Language</i> (Linguagem de descrição de hardware VHSIC)
<i>pu</i>	<i>Por Unidade</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Considerações Iniciais	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo geral	11
1.2.2 Objetivo específicos	12
1.3 Justificativa	12
1.4 Estrutura do trabalho	12
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	14
2.1 Rompimento de condutores	14
2.2 Método de detecção de rompimento de condutores	15
2.3 Método de detecção de rompimento de condutores através da tensão de sequência negativa	16
2.4 Método de detecção de rompimento de condutores com pontos de carga de veículos elétricos	18
3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO	20
3.1 Distúrbios de tensão	20
3.1.1 <i>Sag</i>	22
3.1.2 <i>Sag com harmônico</i>	22
3.1.3 <i>Swell</i>	23
3.1.5 <i>Flicker</i>	23
3.1.6 <i>Flutuation</i>	24
3.1.7 <i>Harmônico</i>	24
3.1.9 <i>Oscilação transitória</i>	25
3.2 Chaveamentos	25
3.2.1 Chaveamento de carga distribuída (SWDL)	25

3.2.2 Chaveamento de banco de capacitor (SWBC).....	26
3.3 Rompimento de condutores	26
3.4 Sistema teste de 5 barramentos	27
3.5 Modelagem do sistema com bateria	29
4. METODOLOGIA	32
4.1 Tensão de sequência negativa	32
4.2 Octave	33
4.3 Gams studio.....	35
4.4 Sistema teste de 5 barramentos	36
5. RESULTADOS	38
5.1 Sistema teste de 5 barramentos	38
5.1.1 Caso I: Sistema teste sem modificação e medidor alocado na subestação (1)	38
5.1.2 Caso II: Sistema teste modificado com medidor alocado na subestação.....	41
5.1.3 Caso III: Sistema teste sem modificação e medidor alocado na barra 5	43
5.1.4 Caso IV: Sistema teste com modificação e medidor alocado no barramento 5	45
5.1.5 Caso V: Sistema teste com modificação e medidor alocado no barramento 5 e subestação (1).....	46
5.1.6 Resultados obtidos para cada caso do sistema de 5 barramentos	48
6. CONCLUSÃO	50
ANEXO A: LOCALIZAÇÃO DAS CHAVES NO SISTEMA DE 5 BARRAMENTOS.	57
ANEXO B: VALORES DA TSN NO SISTEMA TESTE (ORIGINAL E MODIFICADO) DE 5 BARRAMENTOS	58

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são encarregados de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica aos consumidores. A sistematização envolve a conexão de usinas geradoras, linhas de transmissão, subestações e redes de distribuição até consumidores finais. O SEP realiza atribuição de importância na garantia do fornecimento de maneira confiável e contante de energia elétrica para atender às necessidades da sociedade, sendo de maior importância para o desenvolvimento tanto econômico como tecnológico.

Em sua dissertação, Duarte (2020), afirma que os SEP têm papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico de qualquer país. Sua principal função é fornecer energia elétrica aos consumidores, atendendo tanto consumidores residenciais quanto de grandes indústrias e comerciais. Para isso, esses sistemas precisam ser bem desenvolvidos e confiáveis, garantindo um fornecimento de forma contínua e de qualidade, de acordo com os padrões estabelecidos pelas normas do setor elétrico. A eletricidade disponível para consumo é gerada por meio da conversão de fontes primárias de energia em energia elétrica, trabalhando desde a geração de energia, transmissão e distribuição de energia elétrica até os pontos de carga elétrica.

Segundo Grimaldi et al., (2020), condutores rompidos no sistema de distribuição de energia, assim como seu contato com superfícies de alta impedância, geralmente não ativam a sensibilidade dos sistemas de proteção convencionais, esses eventos são conhecidos como Falhas de Alta Impedância (FAI). As concessionárias reconhecem que esse tipo de falha pode resultar em graves consequências, como danos materiais e imateriais significativos, incluindo multas, penalidades administrativas, além de acidentes fatais envolvendo choques elétricos. A gravidade dessas falhas torna essencial o desenvolvimento de métodos eficazes de detecção e mitigação de possíveis incidentes. Portanto, as FAIs se destacam por dificilmente ser detectada pelos sistemas de proteção convencionais baseados em sobrecorrente.

O impacto dos pontos de carga de Veículos Elétricos (VE) nas redes de distribuição de energia é um tema cada vez mais relevante, onde o aumento na

demanda de energia elétrica gerada pelo carregamento dos VEs pode causar impactos de grande relevância no sistema de distribuição de energia elétrica, exigindo assim, uma expansão da capacidade de geração, distribuição e modificação na coordenação das cargas para evitar sobrecargas no sistema. Podendo ocasionar sobrecarga dos equipamentos, e conseqüentemente, diminuindo a sua vida útil. Além disso, o aumento constante na demanda de energia elétrica pode causar quedas de tensão, interrupções no fornecimento de energia, desbalanceamento das fases, subdimensionamento de condutores e aumento na necessidade de sistemas de monitoramento e controle da rede (BERRA, 2023).

Hong et al., (2021) falhas em condutores abertos têm causado problemas socioeconômicos, devido a incêndios provocados pela geração de arco e ao aumento do risco de choque elétrico em pessoas. Uma falha de condutor aberto ocorre quando há uma abertura não intencional de um condutor monofásico ou bifásico energizado. Após essa falha, o condutor pode ou não entrar em contato com o solo ou outros meios, apresentando características como geração de arcos e manutenção de uma falha de alta impedância. Por essas razões, as empresas de energia enfrentam grandes desafios para detectar, identificar e gerenciar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um algoritmo baseado na tensão de sequência negativa para detectar rompimentos de condutores em sistemas de distribuição, considerando a influência de estações de carga de veículos elétricos.

De acordo com estudo realizado por Dilli (2021), a presença de carga nas barras finais das linhas pode melhorar análise para a detecção de RC. Com esse objetivo, optou-se por incluir baterias nesses pontos, buscando representar um cenário mais próximo da realidade e avaliar se sua presença auxiliaria na identificação do RC. Com isso, foi possível coletar os dados que serão analisadas e apresentadas nas próximas seções.

1.2.2 Objetivo específicos

1. Primeiramente, utilizar o *software* ATP/EMTP para a modelagem e características de tensão, e do sistema de distribuição teste, bem como a modelagem do modelo que fornecerá as particularidades de tensão de RC e outros tipos de distúrbios.
2. Implementar um algoritmo baseado na TSN calculada a cada ciclo (γ) aplicado à detecção e distinção do RC em comparação com os outros de situações, utilizando *software* livre OCTAVE (EATON et al., 2020).
3. Se faz necessário a identificação da melhor localização dos medidores, para isso, será utilizada o *software* *General Algebraic Modeling System* (GAMS), o mesmo vai ser de utilidade com a inserção dos pontos de carga de veículos elétricos.

1.3 Justificativa

A princípio o estudo tem como motivação analisar o rompimento de condutores em sistema trifásicos através da tensão de sequência negativa (TSN), com ponto de carga de veículos elétricos conectado à rede de distribuição. Com isso, pode ser feita análise detalhada de como funciona os distúrbios em relação aos rompimentos de condutores a eficiência da tensão negativa para a detecção do rompimento, além disso, foi feita comparações com outros tipos de distúrbios mais frequentes no sistema de potência. Através disso, ter investigação mais detalhada e eficiente que envolve todo o SEP.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho em questão está dividido em seis capítulos, o primeiro capítulo apresenta toda a parte teórica de introdução, é também, objetivos gerais e específicos. Com isso, o leitor terá noção e fundamento do estudo a ser apresentado em diante.

Seguindo a linhagem de sequência, o segundo capítulo traz referências de artigos, dissertações e embasamento teórico sobre rompimentos de condutores, componentes simétricos, além desses, sistema com carregamento de veículos elétricos, com referências e fundamentação teórica.

Terceiro capítulo, apresenta simulações em barramento, distúrbios de tensão e chaveamentos.

O quarto capítulo, tem como finalidade apresentar a metodologia de como distinguir o distúrbio de rompimento de condutor para distúrbios mais frequentes no sistema de distribuição com estação de carga de veículos.

O quinto capítulo, irá trazer todos os resultados preliminar da modelagem de estação de carregamento de carros elétricos no sistema de 5 barramentos.

No sexto capítulo, são compartilhadas as conclusões que surgiram a partir de tudo o que foi analisado e desenvolvido ao longo desta pesquisa.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

As concessionárias de energia têm grandes desafios em seu sistema quando se fala em rompimento de condutores, pois com a ruptura de cabos pode ocorrer a FAI que possui características de baixa corrente, dificultando assim, a identificação da separação dos cabos nas proteções de média tensão. Por este motivo, faz-se necessário um método eficaz que seja capaz de identificar o RC antes que ocorra a FAI, visto que é importante e necessário fornecer energia distribuída a carga com qualidade e eficiência. Através deste conceito, este capítulo abordará definições sobre rompimento de condutores, TSN, pontos de carregamento de veículos elétricos (EV) no SEP, através de estudos com referências bibliográficas.

2.1 Rompimento de condutores

Em sistemas de distribuição (SD), diversos fatores contribuem para a ocorrência de anomalias e rompimentos de condutores. Entre os mais recorrentes estão quedas de árvores sobre redes aéreas, que causam danos mecânicos diretos. A pressão exercida por postes que tombam também é uma causa frequente de falhas. Além disso, o aquecimento dos condutores devido a sobrecargas pode comprometer sua integridade, desgastes de material, são condições que influenciam diretamente no RC, aumentando o risco de acidente e interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Santos (2021) destaca que o rompimento de condutores energizados em sistemas de distribuição, especialmente quando há contato com superfícies de alta impedância como o solo, representa um risco significativo à vida e pode provocar incêndios. Além disso, reforça que os tradicionais equipamentos de proteção por sobrecorrente geralmente não detectam essas falhas, devido a corrente envolvida ser muito baixa.

Diversos desafios relacionados à distribuição primária dificultam o fornecimento de energia elétrica com qualidade e continuidade. O rompimento de condutores é um desses problemas, e os métodos atualmente empregados para sua identificação ainda apresentam limitações em eficiência. Uma alternativa para enfrentar essa questão é utilizar o sinal de tensão da rede no lado da carga, pois sua magnitude sofre uma

queda significativa imediatamente após a ruptura do condutor em sistemas radiais (DECOL; CLAUDINO; CUTAS, 2023).

Em sua dissertação, Carvalho (2019), explica que a FAI ocorre quando o alimentador primário energizado entra em contato com uma superfície de baixa condutividade, resultando em correntes de baixa intensidade que geralmente não são bloqueadas por sistemas de proteção convencionais, que operam com base na detecção de sobrecorrentes. Esse tipo de falha representa um alto risco de incêndio e eletrocussão, que podem levar à morte. Para as distribuidoras de energia, a ocorrência de uma FAI pode causar interrupções no abastecimento de energia para os clientes localizados no montante do ponto da falha, além de gerar consequências legais, especialmente em casos de fatalidade.

Stein (2019), diz que, devido à baixa amplitude de corrente faz com as FAIs se tornem difíceis de serem detectadas e eliminadas. Portanto, como as correntes se apresentam abaixo da corrente nominal de carga dos alimentadores, os dispositivos de seletividade de proteção como relés e elo fusível de sobrecorrente que são parametrizados para ativarem quando há corrente superior a nominal, acabam que não sensibilizados.

2.2 Método de detecção de rompimento de condutores

Com a observação e análise sobre as dificuldades de identificação de RC, devido principalmente a corrente de baixa intensidade, logo, gerando instabilidade no sistema, danos ao patrimônio, e também, provocando perigo a comunidade em geral, incluindo outros fatores, então, houve impulso de estudos e pesquisas com propósitos de poder mitigar esse problema. Portanto, existem temas e estudos relacionados ao tema em questão que serão abordados a seguir.

Cynamon et al., (2023) apresenta um estudo de um método de detecção de rompimento de condutores em rede de média tensão através da extração de características da corrente residual da subestação através da *STFT (Short Time Fourier Transform)*, e classificação via *KNN (K/Nearest Neighbours)*. Com isso, é trabalhado em dois cenários, o primeiro onde o método é implementado com janela de três ciclos de 60 Hz para a extração do harmônico, além disso, o janelamento da STFT alterada para 2 ms, com intenção de extrair variações que seja da frequência

que tem passagem por zero da corrente, onde que, surgem as variações de frequência que está relacionada a extração de características da corrente. Sendo assim, obtendo a medição de entrada para o algoritmo para o processamento do sinal adotado, posteriormente a classificação desses sinais, onde representa um evento de FAI como um cabo energizado tocando ao solo.

Batista et al., (2022) em seu trabalho apresenta uma possibilidade para a detecção de FAIs, usando o mecanismo FPGA (Matriz de portas programáveis em campo), além disso, para analisar o comportamento das grandezas elétricas diante de uma falha elétrica em rede de distribuição elétrica primária que foram modeladas utilizando o *software* MATLAB/Simulink. A modelagem foi realizada utilizando algoritmo em linguagem VHDL (Linguagem de descrição de *hardware* VHSIC) com intenção de detecção da falta, que ocorre o monitoramento da corrente fasorial por meio da transformada discreta de Fourier, sendo também, o valor de RMS (raiz quadrada) da corrente de sequência zero, onde o código de detecção de falta de alta impedância e inserido ao sistema modelado em Simulink para fazer o monitoramento em tempo real e comando de um dispositivo de proteção. Os resultados foram satisfatórios em seu estudo, pois foi capaz de detectar as faltas, fazendo a indicação da fase cessada e acionando o comando de proteção de forma eficaz.

2.3 Método de detecção de rompimento de condutores através da tensão de sequência negativa

O método de detecção de rompimento de condutor através de sequência negativa é realidade atualmente, podendo ser implementado, estudado e melhorado. Com isso, existem estudos e teses sobre o assunto, que serão abordados a seguir como reforço ao tema do TCC apresentada.

Oliveira (2013), aborda a detecção de ruptura de condutor em relé 51Q através da tensão de sequência negativa com FAI em falta de fase terra. Portanto, o algoritmo de processamento digital de sinais adotado, trabalha com a detecção de FAIs em regime permanente, com isso, foram criados blocos determinados de DSP para avaliações de corrente de sequência negativa chamados de Tcs com relação de transformação de corrente que está associada ao relé que terá a função de mandar informações ao disjuntor para o acionamento ou não, sendo assim, sempre que passa

uma falta de alta impedância pelo relé, logo, é acionado o disjuntor de proteção de forma eficaz.

De acordo com Conzatti (2020), tensão de sequência negativa surge quando há desequilíbrio entre as fases de um sistema elétrico trifásico, geralmente causado por cargas assimétricas, falhas ou manobras na rede. Esse tipo de componente representa uma rotação oposta ao sistema balanceado e é particularmente danoso a máquinas rotativas, como motores e geradores, pois induz correntes adicionais que elevam o aquecimento e reduzem sua vida útil. Além disso, afeta a qualidade da energia e pode comprometer o desempenho de equipamentos sensíveis. Em sistemas com geração distribuída, o controle da sequência negativa é essencial para evitar distúrbios e garantir a estabilidade.

Stein (2019), trabalha com valores de correntes amostrados em subestações de energia, que possui um detector de corrente transitórias, com isso, trabalhará na identificação da fase *buildup*, que é uma particularidade específicas de formas de onda das correntes elétricas na ocorrência de falta ocasionada por ruptura de condutores. As simulações foram feitas em EMTP-ATP para a aquisição dos sinais de corrente utilizando modelos de simulação de FAIs. Uma característica observada na análise do rompimento de condutores é a queda na amplitude da corrente durante o evento, o que serve como um indicador importante para sua detecção. Essa abordagem foi comparada com a metodologia baseada na análise da corrente de sequência negativa, que apresentou resultados satisfatórios na classificação dos rompimentos de condutores. Porém, o mesmo não adota TSN como foco em sua análise de detecção de RC, e sim comparações.

Dilli et al., (2021) o apresenta um estudo que foi conduzido em sistema de distribuição para analisar a tensão de sequência negativa como método de distinção do RC em relação a eventos como chaveamento, distúrbios e RC. As análises foram feitas em sistemas teste de 5 barramentos, 33 e 34 barramentos. Com isso, as investigações se passaram pelas três fases de tensões V_a , V_b e V_c , coletando os dados para análise de estudo.

2.4 Método de detecção de rompimento de condutores com pontos de carga de veículos elétricos

Com avanços de VE na sociedade, e conseqüentemente, acréscimo de pontos de carregamento VE instalados nas redes de distribuição, se faz necessário estudos e análises de possíveis impactos introduzidos ao sistema elétrico como sobrecarga, desligamentos da rede, qualidade de energia, entre outros fatores, com isso, trazendo soluções eficazes para solucionar problemas em caso de existência. Portanto, segue abaixo referências relacionadas ao tema, com pontos importantes, causas e soluções.

Pinto (2017), apresenta em seu estudo a investigação de impactos causados pela carga de veículos elétricos em rede de média tensão, baseado em violação de tensão mínima, sobrecarga dos condutores, sobrecarga de transformadores de distribuição e elevação de perdas elétricas no sistema. Portanto, o estudo passa por avaliação periodicamente através de simulações de fluxo de carga série temporal em um alimentador real, onde é possível ter noção da quantidade de penetração de pontos de carga veicular baseado em consumidores classificados em rede secundária. Com isso, tem como principal fundamento a elevação de tensão na saída da subestação para diminuir o impacto dos carregadores na tensão de rede, além disso, fazer ajuste de um regulador de tensão da rede para que possa compensar a queda de tensão na rede devido os pontos de carga. Tudo isso, a partir das análises de fluxo de potência e inserção de carga na rede.

Teixeira (2021), aponta os impactos da conexão de cargas de VEs conectados à rede elétrica, interferência na qualidade de energia em distribuição. Sendo assim, a análise é feita em recargas lentas e rápidas, partindo de eletropostos tanto público quanto privado, além disso, o estudo é feito em redes monofásicas, bifásicas e trifásicas. Portanto, para análise detalhada, foram feitas medidas em magnitude de tensão, desequilíbrio de tensão, é também, frequência da rede em pontos de carga. Através das medições é possível analisar os impactos causados na rede, e assim, fornecer dados à concessionária de energia, com isso, o problema pode ser resolvido com gerenciamento de carga, planejamento e operação de rede trabalhando com o equilíbrio de tensão.

Carvalho (2020), apresenta em sua dissertação um modelo de detecção e localização de FAI em sistema de distribuição com ponto de carga de veículos

elétricos, através de redes neurais e artificiais (RNA). Portanto, foram realizadas avaliações do impacto de VEs em processos de detecção e localização, com o objetivo de implementar uma proteção adaptativa usando RNA. Para isso, utilizaram-se veículos elétricos e seus postos de recarga, variando-se as curvas de carregamento diário. Com isso, considerando o veículo elétrico tanto em condições de carregamento, quanto em injeção de potência em rede de distribuição, a coleta do desenvolvimento de dados de fluxo de potência injetados na rede, e também, de curto-circuito, desenvolveu-se utilizando o *software* openDSS.

3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

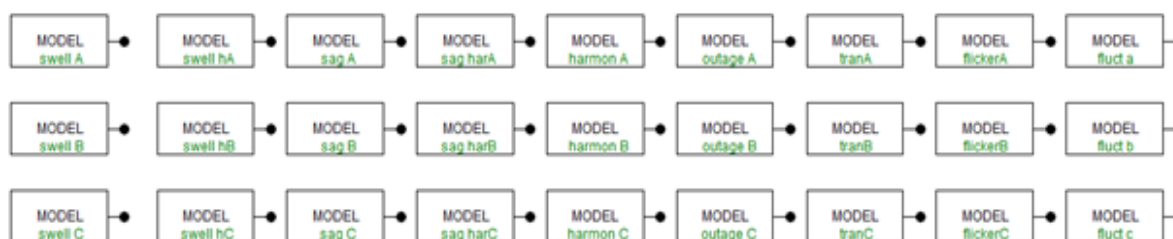
No estudo apresentado a seguir, traz simulações e modelagem através do *software* ATPDraw™ com finalidade de estudar sobre distúrbios de tensão, rompimento de condutores e chaveamentos de capacitores, chaveamento de cargas distribuídas, além disso, simulação em sistema teste.

3.1 Distúrbios de tensão

Os distúrbios de tensão (DT), tem como característica as variações de tensão elétrica fornecida pelo sistema elétrico, que podem acarretar no mal funcionamento e até mesmo danos, além disso, o distúrbio pode acarretar quedas prolongadas de energia, flutuações no nível de tensão elétrica, sobrecargas na rede elétrica, interrupções, elevações e afundamento, a sua duração pode ser instantânea, momentânea ou temporária.

Santos (2023), destaca a importância dos distúrbios de tensão, que podem gerar diversas consequências e prejuízos para os sistemas elétricos, como danos aos equipamentos e impactos indiretos no fornecimento de energia, entre outros. Por essa razão, é essencial realizar estudos e simulações para prevenir esses acontecimentos. Segundo Abdel-Galil et al., (2004) esses distúrbios podem ser representados por meio de equações e parâmetros, que estão representados pela Tabela 1, e também utilizando instrumento fornecido pelo *software* ATPDraw™ denominada de *MODEL*, que está demonstrada na Figura 1, permitindo fazer simulações de distúrbios de tensão através de modelagem matemática apresentadas na Tabela 1.

Figura 1 – *MODELS* no ATPDraw™ contendo distúrbios de tensão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

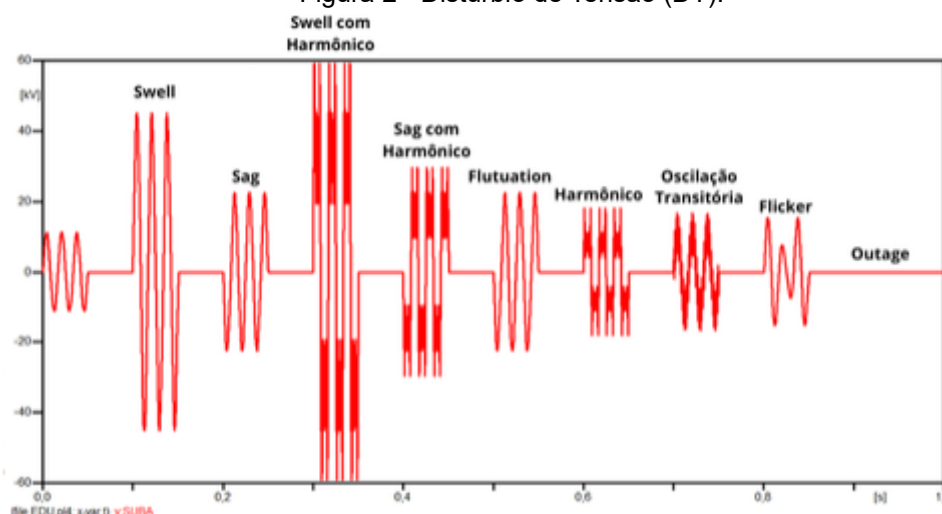
Tabela 1 - Modelagem matemática de distúrbios de tensão.

Evento	Parâmetros	Equação
<i>Swell</i>	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A (1 + \alpha(u(t_2) - u(t_1))) \sin(\omega t)$
<i>Sag</i>	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A (1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1))) \sin(\omega t)$
Harmônicos	$0.05 \leq \alpha_3 \leq 0.15, 0.05 \leq \alpha_5 \leq 0.15,$ $0.05 \leq \alpha_7 \leq 0.15, \sum \alpha_i^2 = 1$	$v(t) = A (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) +$ $\alpha_5 \sin(5\omega t) + \alpha_7 \sin(7\omega t))$
<i>Outage</i>	$0.9 \leq \alpha \leq 1, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A (1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1)))$
<i>Sag</i> com harmônicos	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T, 0.05$ $\leq \alpha_3 \leq 0.15, 0.05 \leq \alpha_5 \leq 0.15$	$v(t) = A (1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1))) (\sin(\omega t)$ $+ \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t))...$
<i>Swell</i> com harmônicos	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T, 0.05$ $\leq \alpha_3 \leq 0.15, 0.05 \leq \alpha_5 \leq 0.15$	$v(t) = A (1 + \alpha(u(t_2) - u(t_1))) (\sin(\omega t)$ $+ \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t))...$
Oscilação Transitória	$0.1 \leq \alpha \leq 0.3$	$v(t) = A (\sin(\omega t) + \alpha \sin(1600\pi t))$
<i>Flicker</i>	$0.1 \leq \alpha \leq 0.2, 5 \leq \beta \leq 20$	$v(t) = A (1 + \alpha \sin(\beta \omega t)) \sin(\omega t)$
<i>Fluctuation</i>	$0.05 \leq \gamma \leq 0.1, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A \sin(\omega t) (1 - \gamma (u(t_2) - u(t_1)))$

Fonte: Adaptado de ABDEL-GALIL, 2004.

Para compreender as causas e consequências dos distúrbios de tensão (DT) na rede elétrica, é importante investigar motivos de ocorrências desses eventos. Com isso, possibilita aplicação de medidas mais eficazes para melhorar qualidade do fornecimento de energia, contribuindo para operação do sistema elétrico mais segura e eficiente. Nesse contexto, serão analisados nove tipos de distúrbios: *Sag*, *Sag* com Harmônico, *Swell*, *Swell* com Harmônico, *Outage*, Harmônico, Oscilação Transitória, *Flicker* e *Flutuation*, todos representados na Figura 2.

Figura 2 - Distúrbio de Tensão (DT).



Elaborado pelo Autor.

3.1.1 Sag

De acordo com a norma IEEE 1159-2018, os distúrbios de tensão do tipo *sag* consistem em uma redução de curta duração na tensão eficaz, variando entre 10% e 90% da tensão nominal, com tempo de ocorrência entre meio ciclo e um minuto. Esses eventos podem ser causados por curtos-circuitos, partidas de grandes motores ou energização de cargas pesadas, e costumam comprometer o funcionamento adequado de dispositivos sensíveis, como relés e sistemas de controle industrial (IEEE, 2018).

Segundo Filho (2002), a qualidade da forma de onda da tensão de rede está diretamente relacionada a qualidade de energia. Portanto, as principais causas de anormalidade de funcionamento de cargas alimentadas pelo sistema elétrico atualmente são de ocorrências de distúrbios na rede que provocam quedas de tensão *sags* que está associada a circulação de curto-circuito através das impedâncias de linha e transformadores.

3.1.2 Sag com harmônico

Segundo a norma IEEE 1159-2018, os *sags* correspondem à redução da tensão eficaz por um curto período, enquanto os *harmônicos* são componentes de

frequências múltiplas que causam distorção na forma de onda. Quando esses dois fenômenos acontecem ao mesmo tempo, os problemas na rede elétrica podem se agravar, afetando o funcionamento de equipamentos e sistemas sensíveis. Essa combinação pode causar desde falhas em aparelhos eletrônicos até interrupções em processos industriais automatizados (IEEE, 2018).

3.1.3 *Swell*

Com base na norma IEEE 1159-2019, o *swell* é um tipo de distúrbio que acontece quando a tensão da rede elétrica sobe além do valor normal por um curto período de tempo, geralmente entre 110% e 180% da tensão nominal. Esse aumento pode durar de frações de segundo até cerca de um minuto e costuma ser causado por desligamentos repentinos de cargas grandes ou por correções no sistema elétrico, como o uso de bancos de capacitores. Mesmo sendo rápido, o *swell* pode danificar equipamentos eletrônicos sensíveis, causar aquecimento excessivo e reduzir a vida útil de diversos componentes (IEEE, 2019).

3.1.4 *Swell com harmônico*

A ocorrência simultânea de *swell* e distorção harmônica representa uma condição crítica para a qualidade da energia elétrica. A combinação entre o distúrbio *swell* e a presença de *harmônicos* torna o cenário elétrico ainda mais severo. Quando esses dois fenômenos ocorrem juntos, os efeitos negativos sobre a rede e os equipamentos se intensificam, pois a elevação da tensão aumenta o impacto das distorções harmônicas, gerando riscos como aquecimento excessivo, mau funcionamento de dispositivos sensíveis, além de desgaste de componentes. Essa condição compromete a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico (IEEE, 2014; IEEE, 2019).

3.1.5 *Flicker*

O *flicker* é caracterizado por variações rápidas e repetitivas na amplitude da tensão, que causam flutuações visíveis no brilho das lâmpadas, resultando em desconforto visual para os usuários. Conforme a norma IEEE 1159-2019, essas

variações geralmente são originadas por cargas que operam de maneira intermitente, como fornos de arco elétrico e soldas, e podem afetar diretamente o funcionamento de equipamentos sensíveis em ambientes industriais e comerciais (IEEE,2019).

3.1.6 *Flutuation*

Segundo a norma IEC 61000-4-15, a flutuação de tensão é um tipo de distúrbio caracterizado por variações rápidas e repetitivas na magnitude da tensão elétrica, que ocorrem em torno do valor nominal da rede. Essas flutuações normalmente surgem devido à operação intermitente de cargas que ligam e desligam rapidamente, como motores, fornos elétricos e soldadores. O monitoramento e controle dessas flutuações são essenciais para garantir a qualidade da energia elétrica e o conforto dos usuários, além de proteger equipamentos sensíveis de possíveis danos (IEC, 2010).

3.1.7 *Harmônico*

Lourenço (2019), mostra que os distúrbios *harmônicos* podem surgir a partir de instalações residenciais, as principais cargas que geram *harmônicos* são as máquinas estão retificadoras, os conversores, fornos de arco e outros dispositivos. Essas distorções provocadas por essas cargas podem causar a redução de vida útil de diversos equipamentos conectados ao mesmo barramento, com consequências para redução do fator de potência, o aquecimento de condutores, alterações na impedância da linha, o aquecimento de condutores e aumento da corrente e acionamento indevido de proteções, entre outros.

3.1.8 *Outage*

Segundo Arruda (2015), as interrupções *outage* ocorrem como interrupções rápidas, quando a tensão constante da fonte ou a corrente de carga diminui para menos de 0,1 pu, por um período entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Essas interrupções resultam em falhas no sistema de energia, defeitos em equipamentos ou mau funcionamento de dispositivos de controle. A duração das interrupções é a principal medida, pois a magnitude da tensão permanece sempre abaixo de 10% do valor nominal. Algumas interrupções são precedidas por afundamentos, especialmente quando ocorrem as interrupções por falhas no sistema.

3.1.9 Oscilação transitória

Uma *oscilação transitória* é caracterizado por uma mudança rápida e brusca nas condições estáveis da tensão, apresentando variações que alternam entre polaridades positiva e negativa em um intervalo de tempo muito curto. Esses transitórios são classificados com base no seu espectro de frequências, na duração do evento e na amplitude da tensão envolvida. As principais origens desse tipo de fenômeno incluem o chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, o corte de correntes indutivas, a energização de linhas elétricas, a eliminação de faltas no sistema, entre outras causas (BOLLEN, 1999).

3.2 Chaveamentos

Em sistemas de distribuição elétrica podem ocorrer, em certos momentos, chaveamentos, que são ocasionadas por algum tipo de surto na rede elétrica. Como esse trabalho tem o propósito de distinguir os distúrbios inseridos na rede em relação ao RC, então, será abordado dois tipos de chaveamento, o primeiro deles chaveamento de carga distribuída, e chaveamento de banco de capacitor, que estão representados no Anexo A. Todas as simulações dos chaveamentos foram realizadas de acordo com Pereira et al., 2023.

3.2.1 Chaveamento de carga distribuída (SWDL)

Santos (2000), aborda que o chaveamento de carga distribuída (do inglês *Switching Distributed Load* – SWDL), é responsável por uma parte dos distúrbios nos sistemas elétricos, que se apresenta principalmente durante a energização de transformadores, partida de motores de indução, restabelecimento de alimentadores após longos períodos de desligamento, assimetrias de tensões, chaveamento de capacitores e ruptura de condutores.

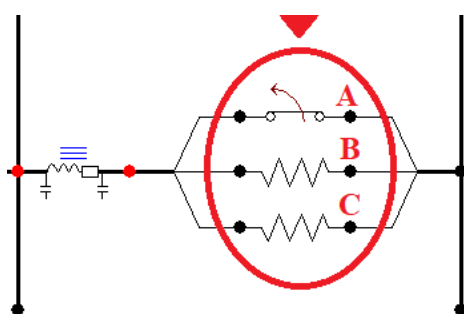
3.2.2 Chaveamento de banco de capacitor (SWBC)

Em Lopes (2020), é mostrado que a energização de bancos de capacitores pode aumentar a taxa de falsos positivos em métodos de detecção de FAIs, pois esse transitório gera variações no conteúdo de frequência dos sinais, dificultando a distinção entre um evento de chaveamento. Silva (2016) mostrou que as FAI podem passar despercebidas pelos dispositivos de proteção, sendo interpretadas como chaveamentos de bancos de capacitores no sistema. Esse problema tem intensidade principalmente em redes de distribuição rural, onde os alimentadores trafegam em grandes distâncias e longos trechos desabitados.

3.3 Rompimento de condutores

Na simulação para rompimento de condutor, no *software* ATPDraw™, foram inseridas chaves monofásicas nas fases A, onde é possível obter parâmetros da mesma. Na parte programática, foram adicionados resistores com valor baixo de $1 \times 10^{-5} \Omega$ nas fases B e C, para que não possa haver distorção nos resultados da simulação. Considerando a abertura da chave antes mesmo de iniciar a simulação, ficou estabelecido que a abertura seria no tempo 1,010297 que representa o ângulo de incidência de ruptura em 90° , como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3– Chave e resistores alocados em cada barramento.



Fonte: DILLI, 2021.

Figura 4 – Parâmetros de chave inserida na fase A.

Component: TSWITCH

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-cl	s	-1	From	A	X0002
T-op	s	1.010297	To	A	X0003
Imar	Amps	1000			
3-ph	0/1	0			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output 0 - No Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: DILLI, 2021.

3.4 Sistema teste de 5 barramentos

De acordo com Dilli e Nascimento (2021), este sistema teste representado na Figura 5, é composto por cinco barramentos trifásicos, sendo um barramento de subestação e quatro barramentos de circuitos. Ele opera com uma tensão base de 11,5 kV e possui uma carga ativa total de 15,3 kW com carga reativa de 8,8 KVAR. Através do *software* ATPdraw™, foi possível fazer simulação e modelagem do sistema trifásico com alocação de pontos de carregamento veicular no barramento, com intuito de distinguir as características reais de cada distúrbios e chaveamentos de carga distribuída, e chaveamento de banco de capacitores. Com isso, será feita simulações em cada fases, sendo fase A, B e C.

Figura 5 – Sistema teste de 5 barramentos

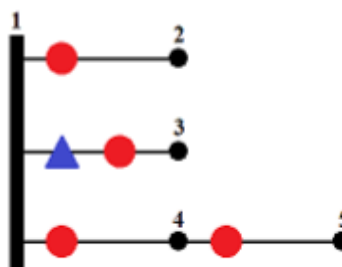


Fonte: DILLI, 2021.

No sistema de 5 barramentos, foram necessários fazer modificações incluindo os distúrbios de tensão (DT), foi adicionado os chaveamentos de carga distribuída (SWDL) com intuito de obter carga no barramento, como também o chaveamento de capacitor (SWBC) que está alocado na barra 3 do sistema, assim como a inclusão de carregamento de VE no final das barras. Figura 6 ilustra onde essas chaves estão distribuídas no sistema, também disponíveis no Anexo A. Resultado com os chaveamentos alocados no sistema poderá ser discutido nas próximas seções.

Figura 6 - Localização dos chaveamentos no sistema de 5 barramentos.

- Chaveamento de Carga Distribuída (SWDL)
- ▲ Chaveamento de Capacitor (SWBC)



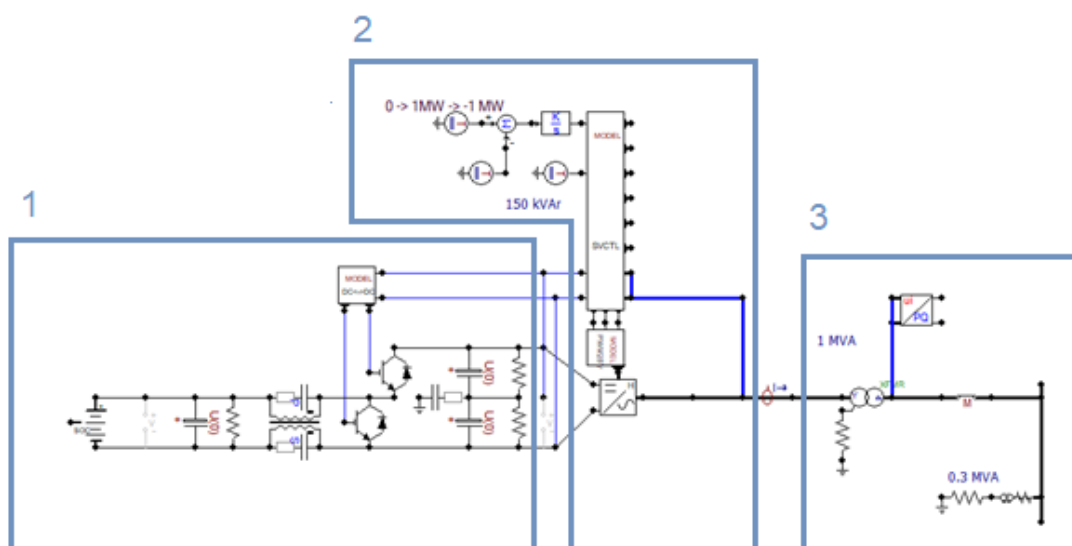
Fonte: DILLI, 2021.

3.5 Modelagem do sistema com bateria

O sistema de baterias utilizado para a simulação e desenvolvimento deste trabalho baseia-se no modelo disponibilizado do *software* ATPDraw™, versão 7.3. A escolha desse sistema deve-se às suas características compatíveis com aplicações em sistemas de recarga de veículos elétricos. Diante disso, torna-se fundamental compreender seus componentes, parâmetros e funcionamento, de modo a possibilitar a análise do seu comportamento quando interligado ao sistema de distribuição.

Nesta subseção, será abordada de forma detalhada os componentes que fazem parte do sistema de baterias, além de, suas finalidades e atribuições. A Figura 7 apresenta o modelo da bateria, onde a sua estrutura foi dividida em três blocos, que serão explicados nas próximas subseções.

Figura 7 - Estrutura em blocos para modelagem da bateria e de seus componentes.



Fonte: ATPDraw™, 2021.

No bloco 1, encontra-se a bateria com íons de lítio (Li-Ion) utilizada neste estudo, modelada em ATPDraw™ como parte de um sistema de armazenamento de energia em baterias (*BESS*) trifásico com capacidade de 1 MVA e operando a uma tensão contínua de 500 Vcc conectado à rede de distribuição elétrica de 13,8 kV. Esse tipo de modelagem permite a análise detalhada do desempenho da bateria em diferentes condições de carga, apesar dessa bateria desempenhar as duas funções de carga e descarga, será utilizado apenas a função de carga. Na situação do carregamento de

veículos elétricos, essa representação estabelece uma base para avaliar a interação entre a bateria do veículo e a rede elétrica, por meio de conversores bidirecionais. Em seguida, se encontra o transformador monofásico, com funções de evitar distúrbio elétricos no sistema, é também, fazer análise de regimes transitórios, garantindo assim eficiência no sistema. Além disso, é possível identificar capacitores que possui função de filtragem para entregar energia fornecida da bateria ao sistema de forma controlada.

Logo em seguida é possível identificar o conversor bidirecional, de acordo com Souza (2025), os conversores tem um papel essencial nos sistemas com baterias, pois consegue funcionar nos dois sentidos: ele pode extrair energia da bateria e elevar sua tensão (modo *boost*) para alimentar outros equipamentos, ou então reduzir a tensão do barramento (modo *buck*) para recarregar a bateria, essa possibilidade tem significância em aplicações modernas, como veículos elétricos, microrredes e sistemas fotovoltaicos.

Referente a segunda seção de blocos, será possível encontrar o controle de potência ativa e reativa, que tem como função a injeção de potência ativa e reativa ao inversor. Segundo Alves (2017), o ajuste de energia fornecido ou absorvido, possibilita suporte à rede por meio da regulação de tensão e do controle do fator de potência, contribuindo para um fluxo de energia mais eficiente e estável na rede de distribuição elétrica. Na sequência, é utilizada a modulação por largura de pulso (PWM) em dois níveis, que se conecta diretamente ao inversor. Esse conjunto tem a função de regular tanto a potência ativa quanto a reativa, trabalhando junto com o controlador de potência. Além disso, também é responsável por moldar a forma de onda de energia na saída do inversor.

O inversor bidirecional em ponte H, presente no sistema de bateria (*BESS*), tem a importante função de transformar a energia em corrente contínua (CC), que vem da bateria, em corrente alternada (CA), de forma que ela possa ser utilizada pela rede elétrica. Essa conversão garante que a energia esteja dentro dos padrões exigidos, como frequência, tensão e forma de onda. Além disso, o inversor permite que o sistema injete energia ativa e reativa na rede, e também, realize a recarga da bateria, conforme a necessidade de operação.

Por último, o bloco 3 é composto por três componentes, onde cada um tem suas funções específicas no sistema. Portanto, tem-se um medidor de potência trifásica na

barra de 13,8 kV. De acordo com Pereira (2020), o medidor de potência trifásica garante a medição de energia consumida e injetada na rede elétrica. Com isso, faz a medição de tensão e corrente, e também, medição de potência ativa e reativa, logo pode-se monitorar o fluxo de potência entre os sistemas *BESS* e a rede, fundamental para analisar eventos de carga e descarga da bateria.

No sistema, está inserido um transformador híbrido (*Hybrid Transformer – XFMR*). Segundo Bronzeado et al., (2017), o modelo “híbrido” de transformadores é um dos mais utilizados em simulações de transitórios, principalmente por ser topologicamente fiel ao comportamento real dos equipamentos, o mesmo representa bem os transformadores trifásicos com dois ou três enrolamentos, assim como autotransformadores com conexões em estrela ou delta, oferecendo bons resultados em estudos desse tipo. Por fim, apresenta-se uma carga de 0.3 MVA com finalidade de avaliar o despenho da rede sobre carga, em situações como distúrbios na rede, chaveamentos, afundamento ou curto-circuitos, a carga contribui para analisar tensões e corrente no sistema.

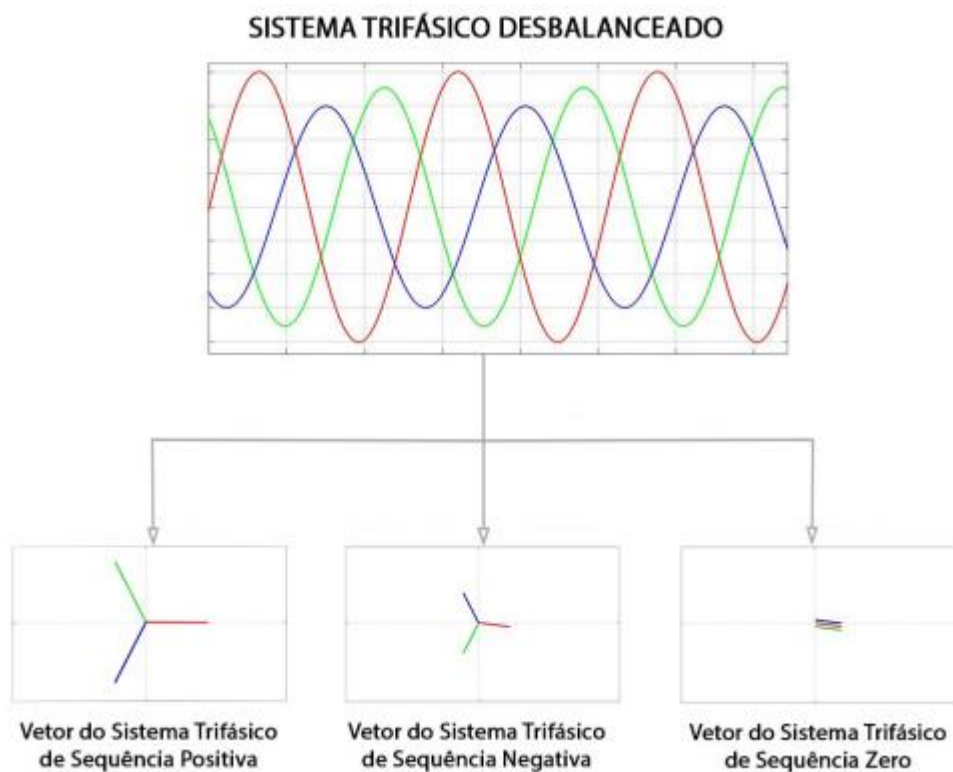
4. METODOLOGIA

Neste capítulo será abordado a metodologia aplicada no trabalho, com apresentação do *software* OCTAVE e GAMS, além disso, cálculos e conceitos a respeito da TSN.

4.1 Tensão de sequência negativa

Segundo Machado (2008), em sistemas trifásicos existem três componentes simétricas: sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. Com os valores de sequência positiva presentes em trifásicas equilibradas, já sequência negativa representando a quantidade de desequilíbrio existente no sistema de potência, a sequência zero, está associada em situações com desequilíbrio de falta fase terra.

Figura 8 - Decomposição de um sistema trifásico desbalanceado.



Fonte: DILLI, 2021.

De acordo com Stevenson (1986), os sistemas trifásicos desequilibrados podem ser decompostos em três sistemas trifásicos equilibrados. O cálculo do desequilíbrio de tensão é feito pela relação entre a tensão de sequência negativa e positiva. Conforme as diretrizes do IEEE (2019), é previsto um limite de 3% para desequilíbrios em sistemas de distribuição trifásicos. O fator de desequilíbrio é calculado com base na proporção RMS entre fases, e, neste estudo, o foco foi direcionado para a tensão de sequência negativa.

De acordo com Fortescue (1918), é possível determinar os valores da tensão de sequência positiva (V_{pos}), da tensão de sequência negativa (V_{neg}) e da tensão de sequência zero (V_{zero}), como pode ser observado na equação (1):

$$\begin{bmatrix} V_{zero}(\gamma) \\ V_{pos}(\gamma) \\ V_{neg}(\gamma) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(\gamma) \\ V_b(\gamma) \\ V_c(\gamma) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sendo, $\alpha = 1 \angle 120^\circ$, e $\alpha^2 = 1 \angle 240^\circ$

A partir da equação (1), é possível decompor os três fasores assimétricos em suas componentes simétricas (sequências zero, positiva e negativa). Para os objetivos deste estudo, o foco foi direcionado à análise da TSN, de modo que a equação (1) foi dividida, e a equação (2) apresenta apenas TSN.

$$V_{neg}(\gamma) = \frac{V_a(\gamma) + \alpha^2 V_b(\gamma) + \alpha V_c(\gamma)}{3} \quad (2)$$

Dessa forma, utilizou-se a componente de sequência negativa dos sinais de tensão das fases a (V_a), b (V_b) e c (V_c), para fornecer um método de análise que avalia a capacidade da TSN de identificar e diferenciar o RC de outros eventos no SD, utilizando o mínimo de medidores possíveis no sistema.

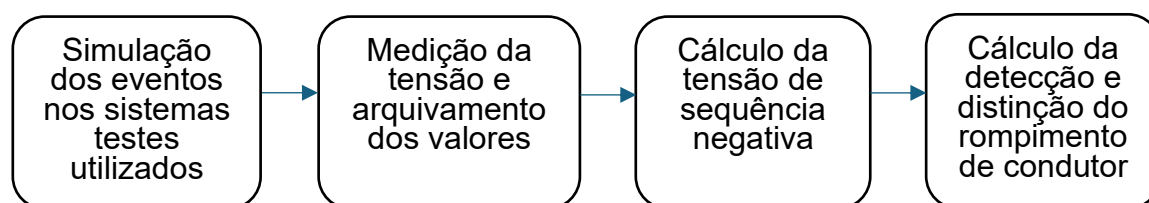
4.2 Octave

Em sua definição Pastorio *et al.*, (2021) diz que Octave traz disponibilidade de funções básicas prontas que permite a criação de variáveis para uso em *scripts* e

cálculos. Uma ferramenta de grande utilidade é o visualizador de variáveis, que permite ao usuário acessar de forma rápida e acessível as variáveis declaradas e seus valores na memória. No mesmo ambiente, o editor de variáveis possibilita a alteração e reorganização direta desses valores, facilitando a criação e edição de arranjos e matrizes. Além disso, o *software* Octave possui várias variáveis dispostas predefinidas que trazem suporte para os cálculos numéricos em simulação. *EATON* (2012), mostra que Octave é uma linguagem de grande precisão, projetada principalmente para computações numéricas. Ela oferece recursos para a solução numérica de problemas lineares e não lineares, além de possibilitar diversos experimentos numéricos, ela também fornece capacidades gráficas extensivas para visualização e também, manipulação de dados.

Após a coleta dos dados de tensão, os valores de relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio - SNR*) foram processados e calculados utilizando o *software* OCTAVE. Em cada simulação, ruídos brancos gaussianos foram adicionados aos sinais de tensão trifásicos, com SNR nos níveis de 20, 40 e 50 dB. Segundo Dilli (2021), os valores de SNR em sistema de distribuição trabalha com valores entre 48 dB e 70 dB de ruídos. Este estudo avaliou a eficácia de uma abordagem para mitigação de ruídos baseada na SNR. O sinal foi filtrado por um filtro Butterworth de segunda ordem com frequência de corte em 180 Hz. Os sinais trifásicos foram divididos em janelas de um ciclo, com 128 amostras por ciclo, e os fasores foram analisados utilizando a Transformada Rápida de Fourier para calcular fasor. A Figura 9 mostra um fluxograma do processo metodológico descrito.

Figura 9 - Metodologia de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar os valores da tensão de sequência negativa no período pós-falta, foi possível distingui-los dos demais tipos de eventos avaliados em cada sistema de

teste, como, por exemplo, os distúrbios de tensão (DT): *Sag*, *Sag* com harmônico, *Swell*, *Swell* com harmônico, *Outage*, Oscilação Transitória, *Flutuation*, *Flicker* e Harmônico. Além desses, tem os chaveamentos de carga distribuída (SWDL), e chaveamento de banco de capacitores (SWBC).

4.3 Gams studio

O *software* GAMS Studio® foi desenvolvido com o objetivo de minimizar o número de medidores no sistema, adaptando o código Gcode 8.4 da biblioteca GAMS para alcançar a máxima análise com a menor quantidade de medidores de tensão. Para isso, são utilizadas variáveis binárias α_i , que indicam se os estados dos barramentos são observáveis (1) ou não (0). O problema de otimização será então (SOUROUDI, 2017):

$$\max_{x_i, \alpha_i} OF = \sum_{i \in \Omega_B} \alpha_i \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \Omega_B} x_i \leq N_{PMU} \quad (4)$$

$$x_i + \sum_{j \in \Omega_{ij}^l} x_j \geq \alpha_i \quad (5)$$

$$1 \leq \alpha_i \quad (6)$$

De forma descritiva, tem-se que i, j são índices de barramento da rede elétrica, x_i é uma variável binária que indica se tem Unidade de Medição Fasorial (*PMU*) com a presença de (1) ou não (0) em pontos específicos, Ω_B é o conjunto de todos os pontos inseridos na rede, α_i é uma variável inteira com valor mínimo definido como 1 para tornar toda a rede de observação. N_{PMU} representa as medições disponíveis. Desta forma, o *software* GAMS realiza a otimização da função objetivo (Equação 3), com possíveis limitações exigidas através das equações 4, 5 e 6.

4.4 Sistema teste de 5 barramentos

Utilizando o *software* GAMS e ajustando o código Gcode 8.4 para o sistema de 5 barramentos, com isso, terá a indicação de alocação e distribuição ideal dos dispositivos de medição *PMU* que estão inseridos na Tabela 2.

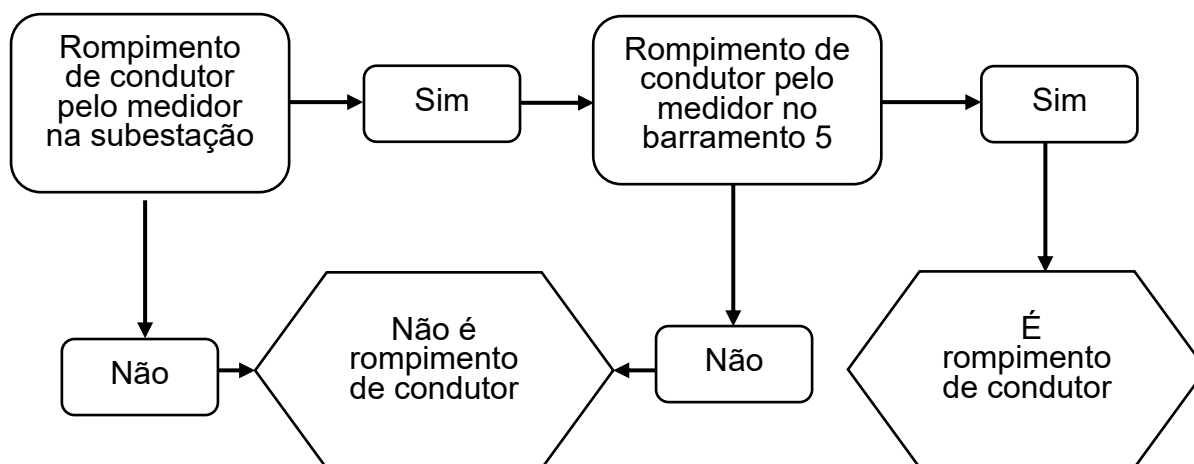
Tabela 2 - Alocação dos *PMUs* através do GAMS para o sistema de 5.

Barramentos	NPMU	
	1	2
1	1	
2		
3		
4		
5		1
Total de Barramentos observados	4	5

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a análise da Tabela 2, o Gcode 8.4 indicou o uso de 2 *PMUs* para uma observação completa dos 5 barramentos no sistema de teste. Assim, após testes, foram instalados medidores na subestação (barramento 1) e no barramento 5. A Figura 10 apresenta um fluxograma ilustrando a lógica utilizada para diferenciar e detectar o RC em relação aos outros tipos de DT.

Figura 10 - Fluxograma da lógica utilizada no sistema teste de 5 barramentos



Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar através da Figura 10, que o RC será detectado apenas quando ambos os medidores estiverem fazendo a detecção da falha no sistema. Os resultados desta detecção no sistema de 5 barramentos serão apresentados nos próximos capítulos com estudo de cada caso consequentes:

- Caso I: Sistema teste sem modificação com medidor inserido na subestação;
- Caso II: Sistema teste com modificação, medidor inserido no barramento Subestação;
- Caso III: Sistema teste sem modificação com medidor inserido no barramento 5;
- Caso IV: Sistema teste com modificação, medidor incluído no barramento 5;
- Caso V: Sistema teste modificado e com um medidor alocado na subestação (1) e um medidor alocado no barramento 5;

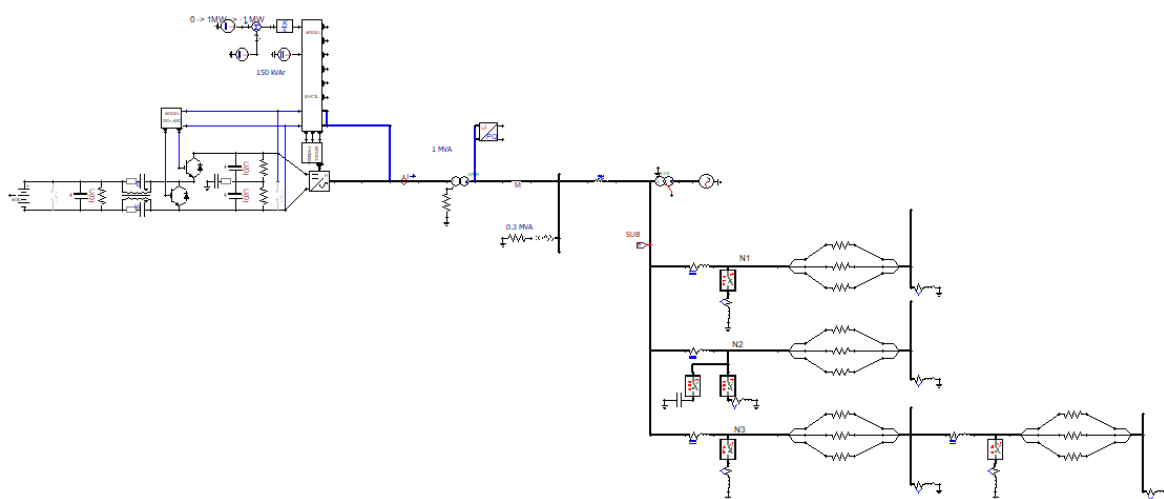
5. RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar o desempenho da metodologia sugerida, esta seção apresenta os resultados obtidos para o sistema teste composto por 5 barramentos. As análises realizadas são consideradas com a utilização da TSN em cada uma das situações abordadas na seção anterior.

5.1 Sistema teste de 5 barramentos

A Figura 11, representa o sistema de bateria alocado ao sistema de 5 barramentos, o modelo será representado como modelo original, sem modificações. Portanto, o sistema conta com chaveamentos, distúrbios de tensão e RC.

Figura 11 - Sistema teste original de 5 barramentos.



Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.1 Caso I: Sistema teste sem modificação e medidor alocado na subestação (1)

Inicialmente, com o medidor posicionado na subestação do sistema original, realizou-se a simulação do (RC) nos quatro barramentos restantes. Os valores obtidos foram: tensão mínima de 779,95 V, máxima de 794,63 V e média de 794,63 V. Os valores mínimo e máximo foram estabelecidos como os limites característicos do RC, ou seja, qualquer evento cujas tensões estejam dentro desse intervalo será

reconhecido como um RC. Observou-se que o comportamento nos quatro barramentos apresentou valores semelhantes.

Com esses limites definidos, foram então simulados os demais tipos de distúrbios de tensão, incluindo os chaveamentos do sistema, com valores extremos (máximos e mínimos), que estão apresentados na Tabela 3, e também pode ser analisado em detalhes no Anexo B.

Tabela 3 - Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso I do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Mínimo (V)	Máximo (V)
RC	779,95	794,63
DT	812,98	920,56
SWBC	739,45	794,63
SWDL	779,95	794,63

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos valores das TSN, é possível identificar quais eventos estão situados dentro da faixa delimitada pelos valores mínimo e máximo do RC. Esses eventos acabam sendo incorretamente classificados como RC, o que compromete a precisão na diferenciação entre o RC e os demais distúrbios simulados. A eficiência desse processo de distinção é avaliada por meio da Equação 7.

$$E(\%) = \frac{(TOTAL - ERROS)}{TOTAL} \times 100(\%) \quad (7)$$

O valor indicado como *TOTAL* corresponde ao número total de eventos avaliados. Já os *ERROS* referem-se aos eventos cujos valores ficaram dentro da faixa delimitada pelos limites mínimo e máximo do RC, o que implicaria em uma classificação equivocada como RC.

Dessa forma, a habilidade de distinguir o RC em relação aos demais eventos podem ser avaliada por meio da Tabela 4, que leva em consideração a aplicação de uma Relação Sinal-Ruído (SNR) de 20 dB aos sinais das três fases.

Tabela 4 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso I do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	0	100%
SWBC	2	2	0,00%
SWDL	8	8	0,00%
TOTAL	19	10	47,36%

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Tabela 4, observa-se que certos eventos simulados foram erroneamente classificados como um RC. Isso aconteceu, por exemplo, no instante de abertura do chaveamento SWDL, quando o valor mínimo registrado de 779,95 V e o máximo atingiu 794,63 V. Como esse valor máximo se manteve dentro da faixa definida entre os limites inferior e superior característicos de um rompimento, o sistema interpretou equivocadamente o evento como sendo um RC. Houve erro de análise também no chaveamento SWBC que não obteve nenhuma porcentagem de distinção de rompimento. Com a identificação funcionando corretamente em todos os casos de rompimento nos barramentos, foi possível alcançar a eficiência geral do sistema, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Eficiência do sistema geral do caso I do sistema teste de 5 barramentos.

N° de casos	23
Erros	10
Eficiência	56,52%

Fonte: Elaborado pelo autor.

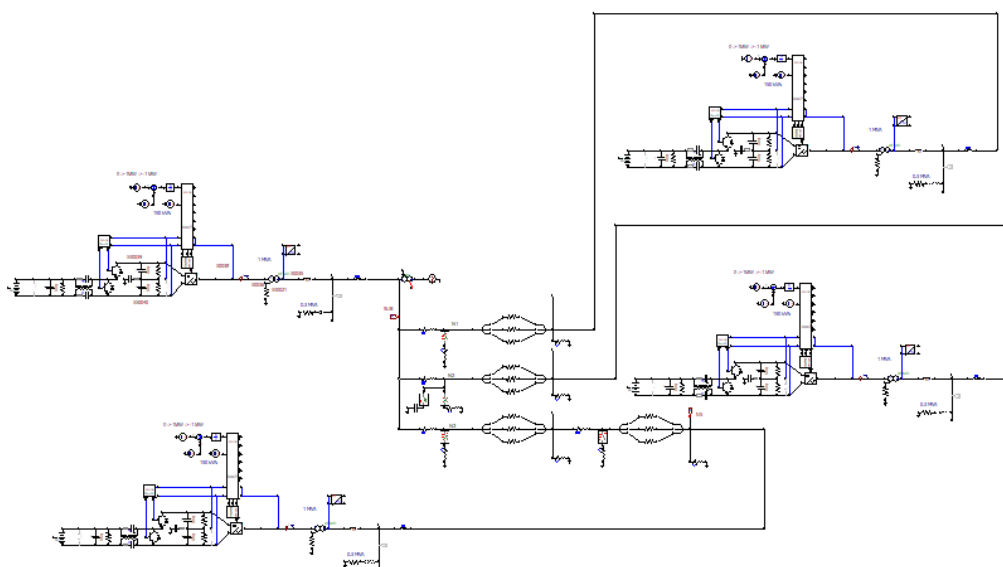
Como a eficiência obtida nas simulações iniciais foi considerada baixa, tornou-se necessário inserir cargas nas extremidades dos barramentos. Com isso, optou-se pela inclusão de baterias nesses pontos, com o intuito de representar um cenário mais próximo da realidade e verificar se sua presença poderia contribuir para a identificação

do RC. A partir dessa modificação, foi possível coletar novos dados, que serão analisados e discutidos nas subseções a seguir.

5.1.2 Caso II: Sistema teste modificado com medidor alocado na subestação

Na Figura 12 pode-se verificar o sistema teste de 5 barramentos com inclusão de baterias que representam cargas, no final dos barramentos, com intuito de analisar o sistema modificado. Essa modificação tem como objetivo tornar o cenário mais realista. Ao realizar análises do comportamento do sistema diante dos eventos simulados, a presença das cargas nas extremidades contribui para uma maior variação na TSN.

Figura 12 - Sistema teste modificado de 5 barramentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram realizadas simulações com o medidor instalado na subestação. Nessas simulações, analisaram-se eventos como distúrbios de tensão, chaveamentos de banco de capacitor e também, análise de RC nos outros quatro barramentos. A partir disso, foram obtidos os valores máximos e mínimos, que estão organizados na Tabela 6, e apresentados em Anexo B.

Como resultado, obteve-se uma tensão mínima de 764,30 V, uma máxima de 792,23 V. A partir desses dados, os valores mínimo e máximo foram definidos como faixa de referência para caracterização do RC. Assim, qualquer ocorrência de tensões que se encontrem dentro desse intervalo será identificada como um rompimento de condutor.

Tabela 6 - Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso II do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Mínimo (V)	Máximo (V)
RC	764,30	792,23
DT	800,43	864,32
SWBC	754,17	790,48
SWDL	740,22	780,54

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a Tabela 6 e comparando-a com a Tabela 3, verifica-se que não houveram distinção de valores significativo dos valores mínimos e máximos, principalmente em relação aos valores de RC. Porém, valores como distúrbio de tensão obtiveram valores menores. Análise completa pode ser analisada na Tabela 7.

Tabela 7 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso II do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	0	100%
SWBC	2	1	50%
SWDL	8	5	37,5%
TOTAL	19	6	68,42%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Tabela 7, observa-se que certos eventos simulados foram erroneamente classificados como um RC. Porém, obteve uma pequena melhora no chaveamento SWDL, no chaveamento SWBC se manteve a mesma porcentagem do

caso I. Além disso, os valores de distúrbios de tensão se mantiveram fora da faixa estabelecida em RC.

Através da Tabela 8 é possível identificar a eficiência geral do sistema, com valor de 73,91 %, que não representa uma melhora relativa em relação ao caso I. Porém, será analisado outros casos com intuito de análise de melhoria no sistema de 5 barramentos.

Tabela 8 - Eficiência do sistema geral do caso II do sistema teste de 5 barramentos.

N° de casos	23
Erros	6
Eficiência	73,91%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.3 Caso III: Sistema teste sem modificação e medidor alocado na barra 5

Pela seção da metodologia, viu-se que para o sistema teste de 5 barramentos, o *software* GAMS recomendou a alocação do medidor no barramento 5, então primeiramente, foi realizado as simulações dos eventos propostos com o medidor no barramento 5 e no sistema original, ou seja, aquele sem a divisão da carga e alocação da mesma nos barramentos. Assim, foi-se encontrado os valores máximos e mínimos, conforme visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso III do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Mínimo (V)	Máximo (V)
RC	772,02	786,41
DT	813,63	922,42
SWBC	732,38	786,41
SWDL	772,02	786,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, são estabelecidos os novos limites com os valores mínimo e máximo de RC, correspondentes a 772,02 V e 786,41 V, respectivamente. Com esses dados, torna-se possível calcular a eficiência na diferenciação do evento RC em

relação aos demais, conforme apresentado na Tabela 10. Já a Tabela 11 exibe a eficiência de modo geral do sistema para esse cenário.

Comparando os dados da Tabela 10 com os da Tabela 3, observa-se uma redução nos valores associados aos RCs. No entanto, para os demais eventos, os valores máximos registrados pelo medidor instalado no barramento 5 apresentaram um leve aumento em relação aos valores obtidos pelo medidor situado na subestação.

Tabela 10 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso III do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	0	100%
SWBC	2	2	0,00%
SWDL	8	8	0,00%
TOTAL	19	10	47,36%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise da Tabela 10, observa-se que, novamente, os eventos simulados de SWDL e SWBC foram incorretamente identificados como rompimento de condutor (RC). Um exemplo disso ocorreu no momento da abertura do chaveamento SWDL, quando os valores registrados variaram de 772,02 V a 786,50 V. Como o valor máximo se manteve dentro do intervalo definido para os limites de rompimento, o sistema classificando equivocadamente o evento como um RC.

Tabela 11 - Eficiência do sistema geral do caso III do sistema teste de 5 barramentos.

N° de casos	23
Erros	10
Eficiência	56,52%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O percentual de 56,52% não indica nenhuma melhoria, já que os resultados permaneceram iguais aos do Caso I, o que demonstra uma eficiência insatisfatória. Isso também pode ser confirmado na Tabela 8, que apresenta a eficiência geral do sistema.

5.1.4 Caso IV: Sistema teste com modificação e medidor alocado no barramento 5

Na Tabela 12 está exposto os valores para o sistema modificado com o medidor inserido no barramento 5. Onde é possível encontrar o valor mínimo e máximo do RC, que será o parâmetro de análise para os demais eventos.

Tabela 12 - Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso IV do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Mínimo (V)	Máximo (V)
RC	759,99	781,86
DT	783,11	841,92
SWBC	742,05	784,65
SWDL	765,02	810,86

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, fazendo análise dos resultados da Tabela 12 e comparando com a Tabela 9, pode-se verificar que não houve mudanças drásticas na maioria dos resultados, sendo maior com os distúrbios de tensão, existe também variações de TSN nos chaveamentos, essas variações farão que o sistema tenha um melhor desempenho e eficiência de distinção de RC em relação aos eventos simulados. Com isso, foi adquirido novos valores de tensões mínimas e máximas, respectivamente, encontradas para RC, com resultados de 759,99 V e 781,86 V.

Com os valores inseridos na Tabela 13, pode-se verificar os eventos simulados que representa 78,94% de distinção em relação ao RC. Nessa situação, foi possível distinguir 100% dos chaveamentos SWBC, e 50% do chaveamento SWDL, uma melhora em relação ao caso III, a porcentagem de distinção para distúrbios de tensão se mantiveram em 100%.

Tabela 13 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso IV do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	0	100%
SWBC	2	0	100%
SWDL	8	4	50%

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base na Tabela 14, observa-se uma taxa com 82,60% de eficiência considerada relativamente satisfatória, com apenas quatro erros no chaveamento SWDL.

Tabela 14 - Eficiência do sistema geral do caso IV do sistema teste de 5 barramentos.

N° de casos	23
Erros	4
Eficiência	82,60%

Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar dos resultados promissores apresentados na Tabela 14, ainda não foi alcançada uma distinção de eventos com 100% de precisão para um dado RC. Diante disso, aplicou-se o método proposto no fluxograma da Figura 10, os resultados são apresentados e discutidos na subseção seguinte.

5.1.5 Caso V: Sistema teste com modificação e medidor alocado no barramento 5 e subestação (1)

Este cenário foi configurado conforme o procedimento ilustrado na Figura 7, utilizando dois pontos de medição. O primeiro medidor foi instalado na subestação, registrando variações de tensão entre 764,30 V e 792,23 V. O segundo foi posicionado

no barramento 5, com leituras oscilando entre 759,99 V e 781,86 V. Com base nesses dados, aplicou-se a seguinte lógica:

- Quando os dois medidores identificam o RC ao mesmo tempo, é possível confirmar com segurança que se trata realmente de um RC;
- Se apenas um dos dois medidores identificar o RC, entende-se que não se trata de um RC de fato;
- Quando ambos os medidores não reconhecem um RC, confirma-se que realmente não se trata de um RC;

A partir dessa lógica, calculou-se a taxa de acerto na distinção dos rompimentos em comparação com os outros tipos de eventos. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 15, evidenciam a eficiência do sistema adaptado na identificação precisa dos RCs.

Tabela 15 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso V do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	0	100%
SWBC	2	0	100%
SWDL	8	0	100%
TOTAL	19	0	100%

Fonte: Elaborado pelo autor

Através dos dados da Tabela 15, foi possível obter êxito na distinção do RC em relação aos demais eventos, por mais que não obteve valores expressivos de variação da TSN (mesmo com a divisão de cargas alocadas nas extremidades de cada barramento), devido principalmente ao comportamento da bateria no sistema, mas que possibilitou fazer análises do sistema diante dos distúrbios e chaveamentos. Na Tabela 16 é possível analisar a eficiência geral do sistema.

Tabela 16 - Eficiência do sistema geral do caso V do sistema teste de 5 barramentos.

Nº de casos	23
Erros	0
Eficiência	100%

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.6 Resultados obtidos para cada caso do sistema de 5 barramentos

Na Tabela 17, é possível conferir um resumo dos resultados de cada caso analisado no sistema teste com cinco barramentos. As informações completas sobre os valores encontram-se no Anexo B.

Tabela 17 - Resultados encontrados por caso do sistema teste de 5 barramentos.

Casos	Tipo de sistema	Valor mínimo da TSN na subestação (V)	Valor mínimo da TSN no barramento 5 (V)	Porcentagem de distinção do RC	Eficiência geral do sistema
I	Original	779,95	-	47,36%	56,52%
II	Modificado	764,30	-	68,42%	73,91%
III	Original	-	772,02	47,36%	56,52%
IV	Modificado	-	759,99	78,94%	82,60%
V	Modificado	764,30	759,99	100%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, a Tabela 17 mostra que, ao adicionar um segundo medidor, a eficiência do sistema melhorou relativamente, indicando que o uso de mais medidores aumenta a capacidade de diferenciar e identificar os RCs em meio aos outros eventos.

Pode-se analisar também, que foi possível obter melhores resultados quando adicionado veículos elétricos no modo de carregamento que representa a carga. Com isso, cargas alocas no final dos barramentos obteve melhores resultados em chaveamentos em relação ao sistema considerado original. Portanto, dessa forma,

pode-se concluir que o método proposto neste trabalho tende a ser mais eficiente quando há modificações no sistema, especialmente com a instalação de cargas concentradas no final do barramento. Esse cenário se mostrou mais eficaz em comparação ao sistema sem essas cargas, que apresentou menor desempenho.

6. CONCLUSÃO

O aumento significativo do uso de veículos elétricos tem gerado maior demanda por energia elétrica nas redes de distribuição. Diante dessa situação, este trabalho apresenta um modelo voltado à identificação e diferenciação de RC diante de outros distúrbios que podem ocorrer em sistemas de distribuição com a integração de um sistema de bateria com finalidade de carregamento veículos elétricos. Para validar a proposta, foi utilizado um sistema teste composto por cinco barras, no qual foram simuladas cinco situações distintas. O principal objetivo foi verificar a eficácia da TSN na identificação do RC e sua capacidade de distinguir esse fenômeno de outras ocorrências típicas do sistema.

Os resultados apresentados mostraram eficiência na detecção do RC aos demais eventos, principalmente com instalação de carregamento de bateria no final dos barramentos, obtendo eficiência do sistema teste modificado com medidor inserido na subestação mostrou eficiência de 73,91%, com o medidor na barra 5 obteve-se eficiência de 82,60%. Portanto, foi utilizado estudo para definir qual a lógica que deve ser utilizada para que resulte em uma maior eficiência, para esse sistema foi utilizado a lógica de que quando dois medidores acusarem um RC, a conclusão será que está ocorrendo realmente um RC dando maior eficiência ao sistema modelado, demonstrando também, que o sistema obtém maior eficiência com instalação de dois medidores.

Conclui-se que a TSN possui grande potencial para auxiliar na identificação de RC. Mesmo em sistemas mais complexos, com a presença de bateria, a técnica demonstrou bons resultados, fazendo com que tenha confiabilidade mesmo diante de anomalias recorrentes em sistemas elétricos, contribuindo para segurança e eficiência do sistema. Além disso, sua aplicação é relativamente simples, o que favorece sua implementação prática em ambientes reais.

Diante do crescimento contínuo na instalação de estações de recarga de veículos elétricos conectadas ao sistema de distribuição, sugere-se, como proposta para trabalhos futuros, a realização de estudos em sistemas com maior número de barramentos, como os de 33 e 34 barras. A utilização desses sistemas mais

complexos permitirá uma avaliação mais abrangente diante dos distúrbios e chaveamentos, além de observar a eficiência da TSN diante desses eventos.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-GALIL, T. K.; KAMEL, M.; YOUSSEF, A. M.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A.; "Power quality disturbance classification using inductive inference Approach". IEEE Transactions on Power Delivery, New York, 2004, v. 19, n. 4, pp. 1812-1818.
- ALVES, Marcos Gutierrez. **Sistema de geração distribuída fotovoltaica com acumulação, controle da injeção de potências ativa e reativa, com capacidade de operação conectada e ilhada**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2017.
- ARRUDA, Bruno Willian de Souza. **Classificação de Distúrbios de Energia baseada em sistemas imunológicos artificiais**. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2015.
- ATPDraw Version 7.3 **User's Manual**, may 2021.
- BATISTA, EDSON ANTONIO.; BRITO, MOACYR AURELIANO GOMES.; KAWAKITA, RENAM SAITO.; PEREZ, JADER LUCAS.; ANDREA, CRISTIANI QUEVEDO.; SCUCUGLIA, JOSÉ WANDERLEY. Detecção de faltas de alta impedância por meio de análise fasorial e correntes de sequência zero. Revista Principia, Paraíba, v.59, p.2-22. 2022.
- BERRA, Lucas. **Análise do impacto dos veículos elétricos no sistema elétrico interligado nacional**. 2023. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de Caxias do Sul (UCS), Bento Gonçalves, 2023.
- BOOLEN, M. H. J. Solving power quality problems: voltage sags and interruptions. New York: IEEE Press, 1999. 599 p.
- BRONZEADO, Herivelto S.; JESUS, Nelson C.; COGO, João R.; DUARTE, Luiz M. **Comparação entre os modelos de transformadores disponíveis no programa ATP para estudos de manobras de energização**. Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2017, Ouro Preto. Ouro Preto: CBA, 2017.
- CANGUÇU, Nilza Alves. **Contribuições para Avaliação dos Impactos Econômicos Causados por Mergulho de Tensão em Sistema Elétrico Industrial**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.
- CARVALHO, Jerson Dos Santos. **Metodologia para Detecção e Localização de Faltas em Rede Real de Distribuição Considerando a Inserção de Veículos Elétricos**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de fora, 2020.
- CARVALHO, Pedro Mendes de Menezes cabelo. **Estudo e Implementação de Modelo de Falta de Alta Impedância**. 2019. trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- CONZATTI, Gustavo. Análise e detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica utilizando técnicas de inteligência artificial. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2020.

CYNAMON, GABRIEL STEIN.; NETO, JOÃO AMIN MOOR.; BRASIL, THIAGO AMERICANO. Método de Identificação de Rompimento de Condutores em Redes de Distribuição Utilizando a STFT com Janelas de Tamanhos Distintos. **Conferência brasileira sobre qualidade energética elétrica**, São Luís, v.2, p. 1-8. 2023.

DECOL, Ediney; CLAUDINO, Ivo Mateus; CUTAS, Luiz Antonio Dybas. **Avaliação de um método prático de detecção de condutor rompido utilizando tensão em sistemas de distribuição radiais**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

DILLI, M. A.; NASCIMENTO, H. M. A.; SILVA, J. C. Conductor break detection in distribution system through negative sequence voltage. *REVISTA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMÁTICA Y COMUNICACIONES*, v. 2, p. 33-44, 2021.

DILLI, Murilo de Ávila. **Detecção do rompimento de condutores em sistemas elétricos de potência através da tensão de sequência negativa**. 132 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2021.

DUARTE, Rodrigo Sampaio. **Subestações de Energia Elétrica: Metodologia e Dimensionamento para uma Planta Elétrica Industrial**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia elétrica) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020.

EATON, J. W.; BATEMAN, D.; HAUBERG, S.; WEHBRING, R.; (2020). “GNU Octave version 6.1.0 manual: a highlevel interactive language for numerical computations”.

EATON, JOHN W. GNU.; Octave and reproducible research. **Elsevier**. 2012.

FILHO, Francisco da Costa Saraiva. **Proposta de Recuperador Dinâmico para Correção de Afundamento de Tensão**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FORTESCUE, Charles Legeyt. *Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks*. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 37, n. 2, p. 1027–1140, 1918.

GRIMALDI, R. B. G.; FERREIRA, T. V.; MONTALVÃO, J.; LIMA, E. M.; BRITO, N. S. D.; SANTOS, W. C. S.; MACEDO, M. S.; “Avaliação de técnicas alternativas para detecção de faltas de alta impedância”. 2020, pp. 1-8.

HONG, SONG-JI.; CHOI, JOON-HO.; AHN SEON-JU.; YUN, SANG-YUN.; Detecção de Falha de Condutor Aberto Usando Múltiplos Fatores de Medição de RTUs de Alimentação em Energia Redes de Distribuição com DGs. **IEEEAccess**, n.16. 2021.

IEEE. (2019); “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, IEEE Standard 1159TM-2019, (Revision of IEEE Std 1159-2009), pp. 1-97.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). IEEE Std 1453-2022 – IEEE Standard for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems. New York: IEEE, 2022.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *IEEE Std 519-2014 – IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York: IEEE, 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IEEE Std 1159-2018 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. New York: IEEE, 2018.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC 61000-2-2: Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2-2: Environment — Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. Geneva: IEC, 2016.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC 61000-4-15: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications. Geneva: IEC, 2010.

LOPES, G. N. **Diagnóstico de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica empregando técnicas de processamento de sinais**. São Carlos, SP: EESC/USP, 2020.

LOURENÇO, Christian Charles. **Qualidade de Energia: Influência de Harmônicos em Motores Elétricos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Faculdade Doctum de João Monlevade, João Monlevade. 2019.

MACHADO, ADILSON CARLOS, **Determinação das Perdas Suplementares em Motores de Indução Trifásico pelo Método EH-Star**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

OLIVEIRA, João Gabriel Souza Martins. **Modelagem e Detecção de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia**. 2013. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

PASTORIO, DIONI PAULO.; ALVES, JOSEMAR.; FRAGODO, TAINÁ ALMEIDA.; Uma Revisão Bibliográfica Sobre o Uso de Software de Análise de Dados: um olhar para o Octave. **REnCiMa**. v.12, n.3, p.1-23. 2021.

PEREIRA DE OLIVEIRA, PEDRO HENRIQUE; SENHORINI, K. C. G. O.; FREITAS, STEFANI CAROLLINE LEAL; SILVA, J. C.. Simulation tutorial in ATPDraw software for Lateral Branch Switching, Lumped Load, Distributed Load, Capacitor Switching in distribution systems. *Academic Journal on Computing, Engineering and Applied Mathematics*, v. 4, p. 1-3, 2023.

PEREIRA, Larissa Souza. **Gerenciamento e controle da operação de microrredes: um estudo de caso**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Campus de Sobral, Sobral, 2020.

PINTO, Yuri Gabriel. **Investigação de Soluções para os Impactos Técnicos Causados pela Conexão Massiva de Veículos Elétricos aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

SANTOS, Cláudio José. **Transitório Originados Pelo Chaveamento de Banco de Capacitores da Concessionária em um Sistema Elétrico de Distribuição**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.

SANTOS, Gabriela Milhomem. **Identificação de Rompimento de Condutores em Sistemas Elétricos de Distribuição Mediante a Tensão de Sequência Negativa na Presença de Pontos de Carregamento de Carros Elétricos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2023.

SANTOS, Natalia Ferreira Teles dos. **Análise de técnicas para detecção de rompimento de condutores em sistemas de distribuição elétrica**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2021.

SANTOS, Wellin Sílvia Costa. **Identificação de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição**. Tese (Doutorado em Engenharia elétrica) - Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2016.

SILVA, José Antônio Cândido Borges. **Um Localizador de Falhas de Alta Impedância a Partir de Dados Reais Utilizando Inteligência Artificial**. Tese (Doutorado em Engenharia elétrica) - Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2016.

SOARES. Ciro Felipe Nascimento; PAULO, Lucas Cabral. **Análise de Qualidade de Energia Elétrica em uma Indústria Alimentícia: Distúrbios Observados nas Correntes e Tensões Durante Eventos de Interrupção, Restabelecendo e Operação em Regime**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia, Valparaíso de Goiás. 2023.

SOUZA, E. S. **Novas Modelagens Matemáticas para Otimização do Problema de Restauração em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais**. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2018.

SOUZA, Lucas Saioron de Castro. **Estudo e simulação de um conversor bidirecional na estratégia V2G para mitigação de picos em demandas residenciais**. 2025. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2025.

STEIN, Henrique. **Uma nova Proposta para Detecção de Falhas de Alta Impedância Envolvendo a Ruptura do Condutor**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete. 2019.

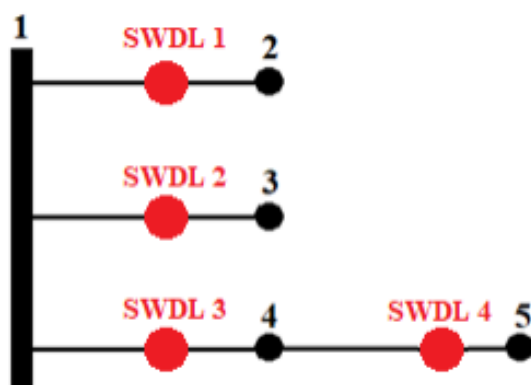
STEVENSON, William D.; “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”. Ed. McGraw- Hill do Brasil, 1986, pp. 10-36.

TEIXEIRA, Wendell William. **Investigação do Impacto da Recarga de Veículos Elétricos na Qualidade de Energia de Redes de Distribuição de Energia Elétrica**

Via Análise de Dados de Medição. 2021. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021.

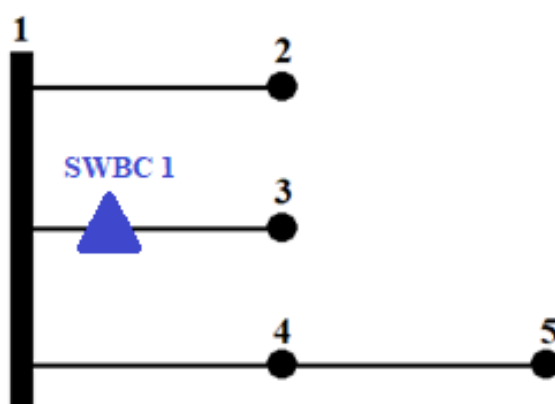
ANEXO A: LOCALIZAÇÃO DAS CHAVES NO SISTEMA DE 5 BARRAMENTOS

Figura 13 - Localização das chaves SWDL no sistema teste de 5 barramentos.



Fonte: DILLI, 2021.

Figura 14 - Localização da chave SWBC no sistema teste de 5 barramentos.



Fonte: DILLI, 2021.

ANEXO B: VALORES DA TSN NO SISTEMA TESTE (ORIGINAL E MODIFICADO) DE 5 BARRAMENTOS

Tabela 18 - Valor da TSN no RC do sistema teste original de 5 barramentos.

Barramentos	<u>Medidor na Subestação</u>		<u>Medidor no barramento 5</u>	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
2	779,9512329	779,9512498	772,1207520	772,0304762
3	779,9512930	779,9726983	772,1207520	772,4006898
4	779,9522322	785,9130723	772,0420813	780,6986324
5	779,9512339	794,6303711	772,0207520	786,4107666
média	779,9514980	785,0993479	772,0760843	777,9076413
std	0,000490278	6,93509855	0,052307651	6,951218853
máx	779,9522322	794,6303711	772,1207520	786,4107666
min	779,9512329	779,9512498	772,0207520	772,0304762

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 - Valor da TSN no RC do sistema teste modificado de 5 barramentos.

Barramentos	<u>Medidor na Subestação</u>		<u>Medidor no barramento 5</u>	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
2	764,3071899	764,4080963	759,9912109	759,9923586
3	764,3071899	792,2379150	759,9912720	760,1686898
4	764,3073120	780,6098724	759,9915161	760,7096306
5	764,3071899	764,3080964	759,9913940	781,8616943
média	764,3072205	775,3909950	759,9913483	765,5418433
std	6,10E-05	13,59546617	0,000135337	10,79005051
máx	764,3073120	792,2379150	759,9915161	781,8616943
min	764,3071899	764,3080964	759,9912109	759,9923586

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 - Valor da TSN nos DTs do sistema teste original de 5 barramentos.

Eventos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
Flicker	810,6231894	812,9896432	810,4579638	813,6325489
Fluctuation	810,6532718	819,0367451	810,4637892	820,5489726
Harmônicos	810,6214286	835,9923748	810,4721658	837,2563124
Oscilação Transitória	810,6894520	846,5731928	810,4316795	850,6325479
Outage	810,6894279	854,3289174	810,4789246	862,8975462
Sag	810,6497823	873,5143287	810,4267897	874,5632879
Sag com Harmônicos	810,6218793	920,5637196	810,4213680	922,4213979
Swell	810,6423199	914,6987463	810,4127936	916,7846986
Swell com Harmônicos	810,6423785	910,2256843	810,4963127	914,2569874
media	810,6481255	865,3248169	810,4513097	868,1104778
std	0,026299079	41,51318863	0,029132073	41,8398265
máx	810,6894520	920,5637196	810,4963127	922,4213979
min	810,6214286	812,9896432	810,4127936	813,6325489

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 - Valor da TSN nos DTs do sistema teste modificado de 5 barramentos.

Eventos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
Flicker	799,9965232	845,6367188	783,1128164	813,8495207
Fluctuation	799,9687453	864,3215332	783,1158164	801,7923846
Harmônicos	799,9596478	820,3475894	783,1156816	783,1128164
Oscilação Transitória	799,9257489	845,6367188	783,1618164	839,7721103
Outage	799,8965232	800,4385459	783,1620164	790,4382715
Sag	799,8165232	803,9284756	783,1698164	823,1083756
Sag com Harmônicos	799,8965232	860,4792136	783,1613164	839,7721103
Swell	799,8465232	845,6367188	783,1638216	841,9204712
Swell com Harmônicos	799,8465232	863,2154073	783,1647182	827,1059338
media	799,9059201	838,8489913	783,1475355	817,8746660
std	0,061907358	24,71276359	0,024715026	22,03913679
máx	799,9965232	864,3215332	783,1698164	841,9204712
min	799,8165232	800,4385459	783,1128164	783,1128164

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 - Valor da TSN nos chaveamentos do sistema teste original de 5 barramentos.

Chaveamentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWBC 1 (abre)	779,6556989	739,4570313	772,5689195	732,3829346
SWBC1 (fecha)	779,9536729	794,6303101	774,1096802	786,4107056
SWDL1 (abre)	779,9511359	779,9503101	772,0207516	773,9204817
SWDL1 (fecha)	779,9574969	785,1932847	772,0207584	775,1038742
SWDL2 (abre)	779,9578639	794,2303711	772,0207514	776,4421983
SWDL2 (fecha)	779,9589729	782,9853176	772,0207518	782,5673296
SWDL3 (abre)	779,9599789	794,6303711	772,0207516	772,0289653
SWDL3 (fecha)	779,9545309	781,6301584	772,0207519	786,5007666
SWDL4 (abre)	779,9593699	794,0156390	772,0207519	774,7650328
SWDL4 (fecha)	779,9547529	794,6303101	772,0207512	785,0192865
media	779,9212329	784,1353103	772,2844619	774,5141575
std	0,095138795	16,84025572	0,664051486	15,79773047
máx	779,9599789	794,6303711	774,1096802	786,5007666
min	779,6556989	739,4570313	772,0207512	732,3829346

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 - Valor da TSN nos chaveamentos do sistema teste modificado de 5 barramentos.

Chaveamentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWBC 1 (abre)	720,3073125	754,1779150	742,1589637	742,0546875
SWBC1 (fecha)	720,4078926	790,4852295	742,7835429	784,6541748
SWDL1 (abre)	720,8970127	745,8932014	742,9912715	772,4583019
SWDL1 (fecha)	735,8867123	750,4796832	742,6378964	777,6201483
SWDL2 (abre)	735,8963127	740,2279634	744,9732649	765,0256348
SWDL2 (fecha)	735,3073124	776,9072451	744,9912712	780,9846137
SWDL3 (abre)	735,3073121	779,1023875	744,9913946	808,1157924
SWDL3 (fecha)	735,4265122	772,2379150	744,9912716	791,6616943
SWDL4 (abre)	737,2568126	780,5478963	744,6578964	810,8623880
SWDL4 (fecha)	737,3073389	775,2379150	744,8746325	799,8616943
media	731,4000531	766,5297352	744,0051406	783,3299130
std	7,531269508	17,23167599	1,194195832	20,84821775
máx	737,3073389	790,4852295	744,9913946	810,8623880
min	720,3073125	740,2279634	742,1589637	742,0546875

Fonte: Elaborado pelo autor.