



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

NATÁLIA FERREIRA TELES DOS SANTOS

**ANÁLISE DO POTENCIAL DA TENSÃO DE SEQUÊNCIA
POSITIVA PARA DETECTAR E DISTINGUIR O
ROMPIMENTO DO CONDUTOR EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Palmas/TO
2021

NATÁLIA FERREIRA TELES DOS SANTOS

**ANÁLISE DO POTENCIAL DA TENSÃO DE SEQUÊNCIA
POSITIVA PARA DETECTAR E DISTINGUIR O
ROMPIMENTO DO CONDUTOR EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão do curso apresentado à
UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus
Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica,
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Jadiel Caparrós da Silva

Palmas/TO
2021

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

- S237a Santos, Natália Ferreira Teles dos .
Análise do potencial da tensão de sequência positiva para detectar e distinguir o rompimento do condutor em sistemas de distribuição de energia elétrica. / Natália Ferreira Teles dos Santos. – Palmas, TO, 2021.
71 f.
Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2021.
Orientador: Jádriel Caparrós da Silva
1. Sistema de distribuição . 2. Componentes simétricas. 3. Distúrbios de tensão. 4. Tensão de sequência positiva. 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).

FOLHA DE APROVAÇÃO

NATÁLIA FERREIRA TELES DOS SANTOS

ANÁLISE DO POTENCIAL DA TENSÃO DE SEQUÊNCIA POSITIVA PARA DETECTAR E DISTINGUIR O ROMPIMENTO DO CONDUTOR EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

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

Data de aprovação: 13 / 05 / 2021

Banca Examinadora



Prof. Dr. Jádriel Caparrós da Silva, UFT.



Prof. Dr. Adélcio Maximiano Sobrinho, UFT.



Prof. Dr. Sergio Manuel Rivera Sanhueza, UFT.

Palmas-TO, 2021

*Dedico aos meus pais.
A minha irmã.
A minha avó.
Em memória do meu avô Nelson, que
mesmo eu não tendo a oportunidade de
conhecê-lo, foi importante em minha vida e em
minhas escolhas.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, porque sem ele eu não teria chegado até aqui.

Aos meus pais Terezinha e Crevaldo, que me educaram e são exemplos para mim, e me apoiaram incondicionalmente em minhas escolhas não medindo esforços para que eu chegasse até aqui.

A minha irmã Suzana, que me ajudou, me substituiu em alguns momentos de cobrança, tornando o caminho mais leve.

A minha avó Natalina, que não só foi fonte de inspiração para o meu nome, mas também um exemplo a se seguir, uma mulher forte e guerreira que guiou sua família pelo caminho certo não deixando que as adversidades impostas pela vida afetasse essa família. Ela sempre me apoiou e acreditou em minha capacidade.

A minha família, pelo o carinho, afeto e apoio que recebi de cada um durante a caminhada.

Aos amigos que a universidade me presenteou, pelos ensinamentos e conselhos tão importantes nesta longa caminhada, em especial João Victor Barreira, Faronak Kharaghani, Thierry Pereira, Helisson Castro, Diego Bandeira e Vinicius Gois.

A Gabriela, que foi uma companheira de jornada desde o início, sofrendo e batalhando juntas, chegamos até aqui.

Aos professores do colegiado de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins, que contribuíram em minha formação fazendo parte de quem eu sou hoje.

A professora Marilene, que me ensinou não só o cálculo, mas também a perseverança.

Ao professor Humberto, que me acolheu e aconselhou em um momento muito importante.

Ao professor Jadiel, pela a orientação e dedicação nesse trabalho e seus ensinamentos dentro do ambiente acadêmico e na área de estudo.

RESUMO

O rompimento de condutores energizados no sistema de distribuição, quando em contato com uma superfície de alta impedância, como o solo, representa grande risco à vida humana, podendo até mesmo provocar grandes incêndios. Os equipamentos de proteção convencionais de sobrecorrente apresentam grande limitação para detecção desse tipo de falta, e apesar do avanço no estudo do problema e na probabilidade de detecção dessas faltas, esses métodos ainda não apresentam alta confiabilidade e segurança em termos de detecção. Além disso, nesses métodos, não há como localizar a falta apenas pelo sistema de proteção. Entretanto, alguns estudos recentes propõem a detecção do rompimento de condutores pelo desequilíbrio de tensão. Então este trabalho propõe um método de detecção de rompimento de condutor e distinção de outros distúrbios, tendo como parâmetro de monitoramento a tensão de sequência positiva. Foram realizadas simulações no programa *Alternative Transients Program*, usando o sistema de 34 barras do IEEE como sistema teste. Estas simulações envolveram a modelagem do próprio sistema de distribuição bem como dos distúrbios aqui estudados que são: sag, swell, bem como o chaveamento de banco de capacitores, chaveamento de cargas concentradas, chaveamento de cargas distribuídas, chaveamento de ramos laterais, chaveamento de cargas não lineares e rompimento de condutores que podem causar distúrbios no sistema elétrico. Posteriormente, por meio de um *software* matemático, foram feitas análises a fim de localizar e distinguir os distúrbios do rompimento de condutor. Após a análise dos resultados, o método apresentou resultados satisfatórios, podendo ser uma ferramenta útil para o operador do sistema elétrico.

Palavras-chaves: Sistema de Distribuição. Componentes Simétricas. Distúrbios de Tensão. Tensão de Sequência Positiva. ATP.

ABSTRACT

The rupture of energized conductors in the distribution system, when in contact with a high impedance surface, such as the soil, represents a great risk to human life, and can even cause major fires. Conventional overcurrent protection equipment has a great limitation for detecting this type of fault, and despite the progress in the study of the problem and the probability of detecting these faults, these methods still do not have high reliability and safety in terms of detection. In addition, in these methods, there is no way to locate the fault by the protection system alone. However, some recent studies propose a detection of the rupture of conductors due to voltage imbalance. Then, this work offers a method of detecting conductor breakage and distinguishing from other disturbances, using the positive sequence voltage as a monitoring parameter. Simulations were performed in the Alternative Transients Program, using the IEEE 34 bus system as a test system. These simulations involved the modeling of the distribution system itself as well as the disorders studied here which are: sag, swell, as well as the switching of capacitor banks, switching of concentrated loads, switching of distributed loads, switching of side branches, switching of loads non-linear and conductor disruption that can cause disturbances in the electrical system. Subsequently, by means of mathematical software, analyzes were carried out in order to locate and distinguish the disturbances of the driver's disruption. After analyzing the results, the method presented satisfactory results, and can be a useful tool for the operator of the electrical system.

Key-words: Distribution System. Symmetric Components. Voltage Disturbances. Positive Sequence Voltage. ATP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma da técnica de detecção de falha baseada em PS.....	20
Figura 2- Representação fasorial da sequência positiva.....	23
Figura 3 - Representação fasorial da sequência negativa.....	24
Figura 4 - Representação fasorial da sequência zero.....	25
Figura 5 - Demonstração de distúrbio <i>sag</i> ocorrendo na fase.....	28
Figura 6 - Exemplo de um distúrbio <i>swell</i>	29
Figura 7 - Comportamento da tensão durante o chaveamento de banco de capacitor na.....	31
Figura 8 - Comportamento da tensão durante o chaveamento de carga concentrada.....	31
Figura 9 - Comportamento da tensão para o chaveamento de carga distribuída.....	32
Figura 10 - Comportamento da tensão para o chaveamento de parte do sistema.....	33
Figura 11 - Comportamento da tensão para o chaveamento de cargas não lineares.....	34
Figura 12 - Diagrama unifilar simplificado do sistema de 34 barras do IEEE.....	36
Figura 13 - Fluxograma do trabalho.....	37
Figura 14 - Representação da inserção do <i>probe voltage</i> entre o barramento 800 e 802.....	38
Figura 15 - Inserção de chave para a simulação do RC.....	40
Figura 16 - Inserção do resistor.....	40
Figura 17 - Inserção da chave para o chaveamento de parte do sistema.....	41
Figura 18 - Ponto de inserção das chaves no sistema para chaveamento dos ramos laterais...	42
Figura 19 - Ponto de inserção das chaves no sistema para carga concentrada.....	43
Figura 20 - Inserção da chave no barramento 848 para a simulação da carga concentrada.	43
Figura 21 - Inserção da chave para o chaveamento de carga distribuída.....	44
Figura 22 - Pontos de inserção das chaves.....	45
Figura 23 - Inserção da chave no barramento 848.....	45
Figura 24 - Simulação do distúrbio de afundamento de tensão (<i>sag</i>).....	47
Figura 25 - Simulação do distúrbio de elevação de tensão (<i>swell</i>).....	47
Figura 26 - Tensão de sequência positiva para a chave SWDL1 aberta.....	52
Figura 27 - Tensão de sequência positiva para a chave SWDL1 fechada.....	52
Figura 28 - Tensão de sequência positiva para a chave SWSL1 aberta.....	52
Figura 29 - Tensão de sequência positiva para a chave SWSL1 fechada.....	53
Figura 30 - Comportamento do chaveamento das cargas distribuídas.....	53
Figura 31 - Comportamento do chaveamento das cargas concentradas.....	54
Figura 32 - Tensão de sequencia positiva para a chave SWP1 aberta.....	54
Figura 33 - Tensão de sequencia positiva para a chave SWP1 fechada.....	55
Figura 34 - Comportamento da TSP para abertura e fechamento de todas as chaves.....	55
Figura 35 - TSP para chave SWBC1 aberta.....	57
Figura 36 - Tensão de sequência positiva para chave SWBC1 fechada.....	57
Figura 37 - Tensão de sequência positiva para o chaveamento de banco de capacitores.....	58
Figura 38 - Comportamento da TSP com cargas não lineares no barramento 802.....	59
Figura 39 - Comportamento da TSP com cargas não lineares no barramento 844.....	59
Figura 40 - Comportamento da TSP com cargas não lineares no barramento 848.....	60
Figura 41 - Comportamento da TSP para inserção de cargas não lineares nos barramentos 802, 844 e 848.....	60
Figura 42 - Comportamento da TSP para afundamento de tensão (<i>sag</i>).....	61
Figura 43 Comportamento TSP para elevação de tensão (<i>swell</i>).....	62
Figura 44 - Comportamento da TSP para <i>sag</i> e <i>swell</i>	62
Figura 45 - TSP para os eventos testados no barramento 844.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das VTCD.	27
Tabela 2 – Nomenclatura das partes do sistema.	41
Tabela 3 - Barras chaveadas e nomenclatura utilizada.	42
Tabela 4- Nomenclatura do chaveamento da carga distribuída.	44
Tabela 5 - Valores de TSP pré-evento e pós-evento para a o rompimento do condutor.	49
Tabela 6 - Valores de TSP para chaveamento de carga distribuída.	50
Tabela 7 - Valores de TSP para chaveamento de carga concentrada.	51
Tabela 8 - Valores de TSP pré-evento e pós-evento.	56
Tabela 9 - Valores de TSP para chaveamento de capacitores.	58
Tabela 10 - Valores de TSP para chaveamento de cargas não lineares.	60
Tabela 11 – Valores de TSP pré-evento e pós-evento para <i>Sag</i> e <i>Swell</i>	63
Tabela 12 - Valores da TSP para eventos no barramento 844.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transients Program
ATPDRAW	The graphical preprocessor to Eletromagnetic Transients Program
DIT	Distorção Harmônica Individual de Tensão
DTT	Distorção Harmônica de Tensão
FDV	Fator de distúrbio de tensão
FFT	Transformada rápida de Fourier
GSM	Global para Comunicações Móveis
IA	Inteligência Artificial
MAE	Máquina de Aprendizado Extremo
MVS	Máquina de Vetores de Suporte
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PS	Processamento de Sinal
PU	Por Unidade
RC	Rompimento do Condutor
RNA	Rede Neural Artificial
RNP	Rede Neural Probabilística
RNPM	Rede Neural de Percepção Multicamadas
SD	Sistema de Distribuição
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIA	Sistema Imunológico Artificial
SNR	Relação de sinal e ruído (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
TRPs	Técnicas De Reconhecimento De Padrões
TSP	Tensão de Sequência Positiva
UFT	Universidade Federal do Tocantins

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Operador
dB	Decibéis
V	Tensão
V_{a1}	Tensão fase A componente de sequencia positiva
V_{b1}	Tensão fase B componente de sequencia positiva
V_{c1}	Tensão fase C componente de sequencia positiva
V_{a2}	Tensão fase A componente de sequencia negativa
V_{b2}	Tensão fase B componente de sequencia negativa
V_{c2}	Tensão fase C componente de sequencia negativa
V_{a0}	Tensão fase A componente de sequencia zero
V_{b0}	Tensão fase B componente de sequencia zero
V_{c0}	Tensão fase C componente de sequencia zero
V_h	Tensão harmônica
V_f	Tensão fundamental
h	Índice de ordem das harmônicas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.2.3	Estrutura do Trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3	COMPONENTES SIMÉTRICAS	22
3.1	Considerações iniciais	22
3.2	Componentes Simétricas de Sequência Positiva	23
3.3	Componentes Simétricas de Sequência Negativa	24
3.4	Componentes de Sequência Zero	25
3.5	Fasores Assimétricos	25
3.6	Considerações Finais do Capítulo	26
4	DISTÚRBO DE TENSÃO	27
4.1	<i>Sag</i>	28
4.2	<i>Swell</i>	29
4.3	Chaveamentos de Banco de Capacitor, de Carga e de Parte do Sistema	30
4.4	Chaveamento de Cargas Não Lineares	33
4.5	Rompimento de Condutor	34
4.6	Considerações Finais	35
5	METODOLOGIA	36
6	TESTE E RESULTADOS	38
6.1	Aspectos Introdutórios	38
6.2	Implementação e Simulação no ATPdraw	39
6.2.1	Rompimento de Condutor	39
6.2.2	Chaveamento de Ramo Lateral (Parte do Sistema)	41
6.2.3	Chaveamento de Carga Concentrada	42
6.2.4	Chaveamento de Carga Distribuída	43
6.2.5	Chaveamento de Banco de Capacitor	45
6.2.6	Chaveamento de cargas não lineares	46
6.2.7	<i>Sag</i> e <i>Swell</i>	46
6.3	Análise dos Sinais Elétricos Pelo <i>Software</i> Matemático	47
6.3.1	Análise do método de distinção do Rompimento do Condutor	48
6.3.2	Chaveamento de Cargas	49
6.3.3	Chaveamento de Ramos Laterais	54
6.3.4	Chaveamento de Banco de Capacitores	56

6.3.5	Chaveamento de cargas não lineares	59
6.3.6	Sag e Swell	61
6.3.7	Distúrbios no Barramento 844	63
7	CONCLUSÃO	65
7.1	Sugestões de trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A – Publicações da Autora	71

1 INTRODUÇÃO

A Qualidade de Energia Elétrica - QEE é um termo que possui várias definições, mas de maneira geral, refere-se ao conjunto de fenômenos que afetam as formas de onda da tensão e corrente. A QEE afeta diretamente no desempenho dos equipamentos elétricos, ou seja, uma baixa QEE com onda de tensão e/ou onda de corrente que se desviam significativamente das normas, podem acarretar no mau funcionamento e até mesmo à falha, prejudicando a operação (ROCHA, 2016).

As concessionárias são responsáveis por entregar uma energia com qualidade, isto é, com amplitude e frequência conforme o estabelecido pelo órgão regulador, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Mas, a concessionária não é o responsável único pela qualidade de energia, os consumidores também possuem sua parcela de responsabilidade, isso porque, com o aumento intensivo da eletrônica de potência, aumentou-se também a injeção de harmônicos na rede elétrica, afetando a qualidade da energia elétrica. A medição da inserção de harmônicos na rede é feita pelo fator de potência e a ANEEL estabelece que:

Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente (ANEEL, 2020).

No Brasil, atualmente, a resolução que trata de QEE é a Resolução Normativa nº 888/2020 da ANEEL, disponível no módulo 8 do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica – PRODIST (ANEEL, 2020). Nesta, é definida o padrão de qualidade avaliando no regime permanente e transitório, sendo no regime permanente avaliado a tensão de regime permanente, o fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, e variação de frequência, e em regime transitório avalia-se a variação de tensão de curta duração. O PRODIST abrange os consumidores conectados à rede independente da classe de tensão, distribuidoras, centrais geradoras, importadores e exportadores de energia elétrica, transmissora detentoras de Demais Instalações de Transmissão - DIT, e o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (Brasil, 2020).

1.1 Justificativa

Com a sociedade cada vez mais exigente e conhecedora dos seus direitos como consumidores e deveres da concessionária, tem-se uma necessidade de um diagnóstico mais rápido de distúrbios no sistema de distribuição de energia elétrica, pois eles podem causar danos aos consumidores. Portanto, se faz necessário desenvolver um método de detecção de distúrbios que possa auxiliar o operador do sistema elétrico a fim de diminuir ou mitigar estes danos.

Com base neste contexto o presente trabalho apresenta uma alternativa de aliar os operadores com a automação, a partir de uma ferramenta que possibilita autonomia no sistema elétrico e viabilize a detecção de distúrbios na rede de distribuição de energia elétrica com uma maior assertividade, proporcionando uma correção mais rápida e eficaz e promovendo uma melhoria na QEE.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar, detectar e distinguir o Rompimento do Condutor - RC dos demais distúrbios de tensão que serão analisados, sendo: *sag*, *swell*, chaveamento de banco de capacitores, chaveamento de cargas concentradas, chaveamento de cargas distribuídas, chaveamento de ramos laterais e chaveamento de cargas não lineares. O sistema foi simulado no *software* livre *Alternative Transients Program* - ATP variando os parâmetros, simulando os distúrbios de tensão e os resultados foram analisados por meio de um *software* matemático, para detectar e diagnosticar os distúrbios, além de distingui-los do RC.

1.2.2 Objetivos Específicos

- i. Avaliar os indicadores de QEE definidos pelo módulo 8 do PRODIST;
- ii. Implementar o sistema teste de 34 barramentos do IEEE no *software* ATP/EMTP;
- iii. Modelar os distúrbios no *software* ATP/EMTP;

- iv. Coletar os resultados, apresentar um estudo das componentes simétricas e propor um método capaz de detectar e distinguir o RC sem confundir com outros distúrbios.

1.2.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é composto por sete capítulos correlacionados. No capítulo 1 é apresentado o problema contextualizado. São expostos também a justificativa e os objetivos (gerais e específicos) de realização do mesmo.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico de alguns trabalhos que abordaram o tema em questão, reforçando a importância da realização deste estudo. Nele também são evidenciados alguns órgãos que regulamentam e parametrizam a QEE.

Nos capítulos 3 e 4 são tratadas as definições para entendimento do que será estudado, Onde no capítulo 3 são feitas as definições pertinentes às componentes simétricas e o método de análise, e no capítulo 4 são tratadas das definições dos distúrbios e seus parâmetros.

No Capítulo 5 é abordada a metodologia empregada no desenvolvimento do método de detecção do RC. Nele é definido os *softwares* que foram utilizados para a implementação do sistema de distribuição de energia elétrica de 34 barras do *Institute of Engineers Electrical and Electronic- IEEE* e as simulações dos distúrbios.

O Capítulo 6 trata de como o sistema foi implementado no ATPdraw, quais os pontos de inserção das chaves responsáveis por simular os distúrbios estudados, bem como a modelagem matemática dos dados adquiridos pelo ATPdraw no *software* matemático.

No Capítulo 7 são expostas as conclusões referentes ao método desenvolvido. Por fim, tem-se o Apêndice A com as publicações da autora relacionadas ao tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo das componentes simétricas é uma ferramenta para tratar e analisar os circuitos polifásicos desequilibrados, o estudo foi apresentado em 1918 por Charles LeGeyt Fortescue em um encontro do *American Institute of Electrical Engineers* atualmente o IEEE (STEVENSON, 1986).

Segundo Stevenson, Fortescue provou com seu trabalho que:

...um sistema desequilibrados em n fasores correlacionados pode ser decomposto em n sistemas de fasores equilibrados denominados em componentes simétricos dos fasores originais. Os n fasores de cada conjunto de componentes são iguais em comprimento, e os ângulos entre os fasores adjacentes do conjunto são iguais (STEVENSON, 1986).

Kinderman enfatiza que o Teorema de Fortescue pode ser aplicado há um sistema de n fases, porém o sistema elétrico internacional é trifásico, ou seja, possui apenas três fases. “Um sistema 3ϕ de três fasores desbalanceados podem ser decompostos em três sistemas 3ϕ de três fasores desbalanceados chamados de componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero” (KINDERMAN, 2009).

A componente simétrica é uma ferramenta utilizada para o estudo dos distúrbios de tensão, distúrbios esses que afetam a QEE. O distúrbio de tensão se caracteriza por apresentar variações de curta duração na magnitude da tensão a partir de um valor nominal (ALVARENGA, *et al.* 2017).

A ANEEL (2020), no módulo 8 do PROSDIST, define a variação de tensão de curta duração como desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um valor de tempo inferior a três minutos. Também são definidos os tipos de distúrbios que são classificados de acordo com a duração e a amplitude de tensão em relação à tensão de referência.

A ONS (BRASIL, 2016) em seu submódulo 2.8 que trata sobre gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes, define os parâmetros dos distúrbios de tensão, sendo eles o tempo e a variação do valor eficaz da tensão em p.u (por unidade). Como exemplo de distúrbio de tensão, neste trabalho será abordado *sag* na faixa de variação de 0.1 a 0.9 p.u do valor eficaz e o *swell* com amplitude da tensão em relação à tensão de referência superior a 1.1 p.u.

Na revista, O Setor Elétrico, em capítulo que trata sobre qualidade de energia, Paulillo e Teixeira tratam sobre elevação (*swell*) e afundamento de tensão (*sag*), definindo-os e relatando as causas destes distúrbios, mostrando a importância do estudo destes desequilíbrios (PAULILLO e TEIXEIRA, 2013).

Em um trabalho de dissertação desenvolvido por Santos, é mostrado que o acionamento de banco de capacitores pode ocasionar sobretensões transitórias, essas sobretensões podem danificar dispositivos de eletrônica de potência, acionar indevidamente dispositivos de proteção e desligar cargas de consumidores (SANTOS, 2000).

Segundo Silva (2016), a inserção de cargas não lineares na rede elétrica a polui com harmônicos, e a presença destes harmônicos no sistema elétrico de potência - SEP resulta em aumento das perdas do sistema, aumento dos custos de manutenção, redução da vida útil de motores, falhas de equipamentos de proteção do sistema, erros nas respostas de equipamentos como transdutores, medidores de energia e relés (SILVA, 2016).

Oliveira Junior (2006), explana a importância de conhecer as causas e as configurações de um RC para que haja uma melhor detecção do distúrbio. Sendo uma das principais causas de RC, a redução de rigidez mecânica, causadas por redução da seção transversal do condutor, ou ainda, defeitos gerados por ciclos de altas temperaturas. Existem outras causas não controláveis, como abalroamentos de veículos em postes e descargas atmosféricas diretas nos condutores (OLIVEIRA JUNIOR, 2006).

Ao final, pretende-se analisar as componentes simétricas da tensão diante dos distúrbios para propor um método capaz de detectar o RC sem confundir com os outros distúrbios. Então, a fim de se construir uma estruturação técnica e filosófica desta pesquisa, visando o desenvolvimento e implementação de metodologias de detecção do RC, a seguir serão apresentados relevantes trabalhos de detecção e localização de RC utilizando técnicas de Inteligência Artificial - IA que serão à base dos trabalhos futuros.

São várias as propostas de métodos de detecção do RC no sistema de distribuição – SD. O'Brien *et al* (2016), em trabalho publicado na Conferência Anual de Engenheiros de Relé de Proteção, desenvolveram um método no qual a seção do circuito afetado é desenergizada enquanto o condutor ainda está caindo. Apesar de a proposta funcionar, este método é muito caro, pois é necessária uma rede inteligente composta por vários dispositivos eletrônicos inteligentes.

Um método similar também foi apresentado em conferência de Smart Grid na Arábia Saudita por Al-Ghannam *et al* (2017), nele a detecção do RC é baseada em medições de tensão distribuída, feita nos lados de baixa dos transformadores do SD e a comunicação por rede Sistema Global para Comunicações Móveis – GSM. Neste trabalho, o sistema localiza a falha pesquisando a última unidade ativa e a primeira unidade inativa e, após a identificação é feito o desligamento necessário para evitar a falta de alta impedância. Porém os resultados deste trabalho não foram satisfatório devido à temperatura ambiente, no caso em questão, de uma região desértica, afetando na comunicação entre os equipamentos.

Em trabalho apresentado na Conferencia Internacional de Harmônicos e Qualidade de Energia, Vieira *et al* (2018) propuseram uma metodologia para detecção do RC, por meio de medidores inteligentes colocados ao longo do alimentador para calcular o distúrbio de tensão, e usaram a abordagem de componentes de tensão simétricas. No entanto, o SD deve ser uma rede inteligente, gerando altos custos para a implementação e os autores relataram também falhas de derivação com alta resistência, pois as diferenças entre o desequilíbrio à montante e à jusante eram pequenas, dificultando o estabelecimento de um limite para distinguir seções com falha das seções em operação normal.

Uma proposta semelhante foi apresentada por Velayudham *et al* (2017) para a detecção de RC utilizando as tensões das componentes de sequencia negativas. Neste trabalho, o sistema deve ser uma rede inteligente, uma vez que os autores utilizaram os dados gravados na unidade de medição inteligente do lado de alta tensão e localizam as seções com falha aplicando a relação entre a distância da falha e os grupos de medição.

Com relação aos pontos de medição dispostos ao longo do SD, vale ressaltar que, na metodologia proposta neste trabalho, foi utilizado apenas um ponto de medição (na subestação do SD), diferenciando-se dos trabalhos que estão sendo aqui relatados, tornando a metodologia mais simples, fácil de ser implementada e com um menor custo. Entretanto, o desempenho do método pode ser afetado pela frequência da ocorrência dos distúrbios.

Para análise de tempo e frequência são utilizadas técnicas baseadas em processamento de sinal digital e método baseado em sistema especialista, que vêm ascendendo na pesquisa para investigar vários distúrbios nos SD de energia elétrica. De uma forma geral, esta técnica consiste em quatro etapas, sendo (MISHRA E PANIGRAHI, 2019):

Etapa 1 - Extração dos sinais (tensão e/ou corrente);

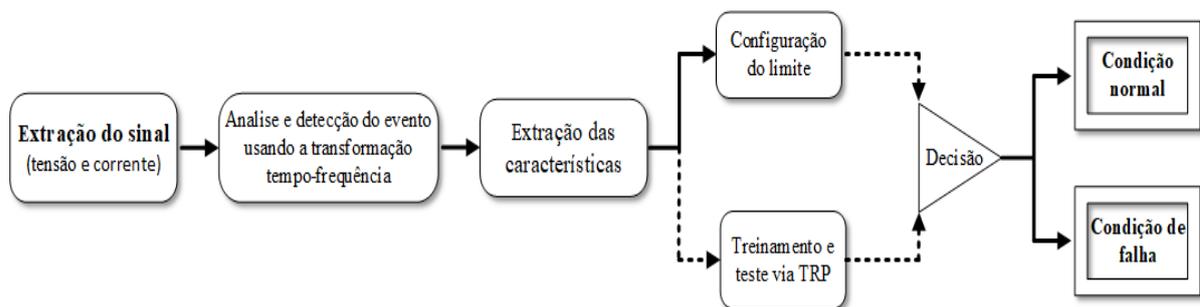
Etapa 2 - Extração das características dos sinais;

Etapa 3 - Configuração do limite;

Etapa 4 - Decisão.

Primeiramente é medida a tensão e/ou a corrente da linha, posteriormente é retirada as informações úteis para caracterizar os eventos de falhas feitas por meio do processamento de sinal. Na etapa três, é estabelecido um limite para decidir as condições normais ou condições de falha do SD. Este limite pode sofrer um ajuste absoluto apropriado para a classificação correta das condições de falha. Portanto, são utilizadas técnicas de reconhecimento de padrões - TRPs, como os classificadores inteligentes e integrados a essas técnicas baseadas em processamento de sinal, atuando como um sistema de detecção especialista, conforme mostra a linha pontilhada da Figura 1. Geralmente, as TRPs mais utilizadas em problemas de detecção de falhas são: Rede Neural Artificial - RNA, Rede Neural Probabilística - RNP, Rede Neural de Percepção Multicamadas - RNPM, Máquina de Vetores de Suporte - MVS, Sistema Imunológico Artificial - SIA, Máquina de Aprendizado Extremo - MAE e lógica Fuzzy (MISHRA e PANIGRAHI, 2019).

Figura 1: Fluxograma da técnica de detecção de falha baseada em PS.



Fonte: Adaptado de Mishra e Panigrahi. 2019.

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica de todos os distúrbios que serão analisados neste trabalho, sendo eles: rompimento de condutor, chaveamento de ramo lateral, chaveamento de carga concentrada, chaveamento de carga distribuída,

chaveamento de capacitor, chaveamento de carga não linear, *sag* e *swell*. Posteriormente foram expostos trabalhos que usaram técnicas de IA, para a detecção do RC suas aplicações e metodologias, bem como as dificuldades encontradas pelos autores na aplicação do método.

Diante do exposto nesta breve revisão bibliográfica, fica evidente a necessidade de estudos neste campo, com finalidade preventiva da proteção de pessoas e patrimônios.

3 COMPONENTES SIMÉTRICAS

3.1 Considerações iniciais

O teorema de Fortescue pode ser aplicado em um sistema polifásico de n fases, porém o SEP no Brasil é composto por apenas três fases, e conforme o teorema, um sistema trifásico pode ser decomposto em três sistemas equilibrados de fasores. O método consiste em encontrar os componentes simétricos da tensão e/ou da corrente no ponto de falta. Ao encontrar os valores de tensão e/ou corrente nos vários pontos, pode-se prever o comportamento do sistema. Esse sistema equilibrado de componentes é chamado de componentes de sequência positiva, componentes de sequência negativa e componentes de sequência zero. Sendo que as componentes de sequência positiva consistem em três fasores de mesmo módulo e defasados entre si em 120° com sequência igual à dos fasores originais A-B-C. Já a sequência negativa também é em módulo e defasado em 120° , porém com sequência de fase oposta aos fasores originais C-B-A. Na sequência zero os três fasores são iguais em módulo e não existe defasagem entre si (KINDERMAN, 2009).

Para fins de didática, será denominado as três fases de A, B e C, assim como é comumente denominadas, será considerado o índice 1 para sequência positiva, o índice 2 para sequência negativa e o índice 0 para sequência zero sendo então (STEVENSON, 1986):

V_{a1}, V_{b1}, V_{c1} sequência positiva;

V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} sequência negativa;

V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} sequência zero.

Cada um dos fasores desequilibrados originais representam a soma dos seus componentes e, portanto a sua representação em termos dos componentes é (STEVENSON, 1986):

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad 3.1$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad 3.2$$

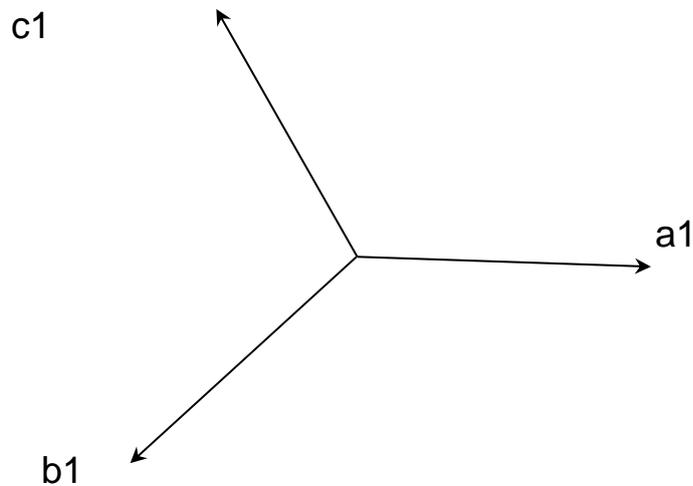
$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad 3.3$$

Sendo V_a a tensão da fase A, V_b a tensão na fase B e V_c a tensão na fase C.

3.2 Componentes Simétricas de Sequência Positiva

As componentes simétricas de sequência positiva representam o sistema trifásico em equilíbrio, em que há impedância de sequência positiva, tensão de sequência positiva e corrente de sequência positiva. Os fasores que representam as fases do sistema estão defasados em 120° . Na Figura 2, pode ser observada a representação fasorial da sequência positiva (STEVENSON, 1986).

Figura 2- Representação fasorial da sequência positiva.



Fonte: Adaptado de Stevenson, 1986.

Os fasores da Figura 2 podem ser matematicamente representados em função de apenas um fasor da componente da sequência, sendo comumente expressado em função da componente de sequência positiva A (STEVENSON, 1986).

$$V_{a1} \quad 3.4$$

$$V_{b1} = V_{a1} \cdot 1\angle 120^\circ \quad 3.5$$

$$V_{c1} = V_{a1} \cdot 1\angle 240^\circ \quad 3.6$$

Nota-se que, por ser um sistema equilibrado, as tensões foram expressas em função de V_{a1} em outra notação, que é comumente usada pela literatura, substitui-se o número complexo por uma representação literal (STEVENSON, 1986).

$$a = 1\angle 120^\circ \quad 3.7$$

Sendo assim a expressão 3.5 e 3.6 pode ser reescrita e colocada em termos de a (STEVENSON, 1986):

$$V_{a1} \quad 3.8$$

$$V_{b1} = \alpha^2 V_{a1} \quad 3.9$$

$$V_{c1} = a V_{a1} \quad 3.10$$

3.3 Componentes Simétricas de Sequência Negativa

Assim como as componentes simétricas de sequência positiva, a sequência negativa também é composta por fasores simétricos, e equilibrados, no entanto são defasados em 120° em sequência de fase opostas (C-B-A). O diagrama fasorial é representado na Figura 3, e os fasores também podem ser representados matematicamente em função do fasor da componente da sequência negativa A (STEVENSON, 1986).

$$V_{a2} \quad 3.11$$

$$V_{b2} = V_{a2} \cdot 1 \angle 120^\circ \quad 3.12$$

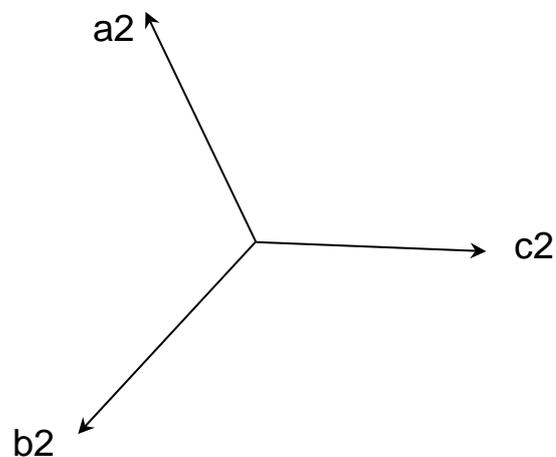
$$V_{c2} = V_{a2} \cdot 1 \angle 240^\circ \quad 3.13$$

$$V_{a2} \quad 3.14$$

$$V_{b2} = a^2 V_{a2} \quad 3.15$$

$$V_{c2} = a V_{a2} \quad 3.16$$

Figura 3 - Representação fasorial da sequência negativa.



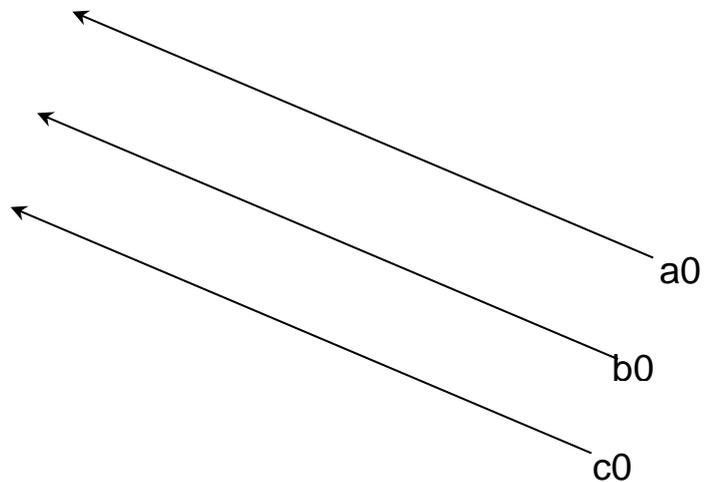
Fonte: Adaptado de Stevenson, 1986.

3.4 Componentes de Sequência Zero

Nas componentes de sequência zero, os fasores possuem o mesmo módulo e as defasagens entre si são nulas, assim como mostra a Figura 4. Por possuir essa peculiaridade da ausência de defasagem, a representação matemática da sequência zero se torna simples, como mostrado na Equação 3.17 (STEVENSON, 1986).

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} \quad 3.17$$

Figura 4 - Representação fasorial da sequência zero.



Fonte: Adaptado de Stevenson, 1986.

Stevenson demonstrou que, caso a soma dos fasores desequilibrados for zero, não haverá componentes de sequência zero. Observando isso e que a soma dos fasores de tensão de linha no sistema trifásico é sempre zero, pode-se observar que as componentes de sequência zero nunca estarão presentes nas tensões de linha, porém podem estar presentes nas tensões entre fase e neutro (STEVENSON, 1986).

3.5 Fasores Assimétricos

Assim como já descrito nas equações 3.1, 3.2 e 3.3, os fasores assimétricos podem ser escritos em função das componentes simétricas usando como referência a fase A, como são descritos nas equações 3.18, 3.19 e 3.20 (STEVENSON, 1986).

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad 3.18$$

$$V_b = \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} + V_{a0} \quad 3.19$$

$$V_c = \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2} + V_{a0} \quad 3.20$$

Para analisar a falta assimétrica em um sistema simétrico, devem-se determinar os componentes simétricos das correntes desequilibradas circulantes. As componentes de correntes de uma sequência de fase causam queda de tensão apenas na sequência em questão. Em um sistema balanceado as correntes são consideradas como circulantes em um sistema independente (STEVENSON, 1986).

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo teve intuito de introduzir os conceitos das componentes simétricas e como são feitas as decomposições da tensão e/ou da corrente em tensão de sequência negativa, sequência positiva e sequência zero, bem como é feita a análise da falta assimétrica em um sistema simétrico.

4 DISTÚRPIO DE TENSÃO

O distúrbio de tensão é um dos indicadores da QEE insatisfatória, esse fenômeno é caracterizado por qualquer variação identificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema elétrico trifásico, conforme é definido no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2020).

As variações de tensão de curta duração – VTCD são os desvios nos valores eficazes da tensão que ocorrem em curtos espaços de tempo. As VTCD são classificadas em variações momentâneas e variações temporárias, sendo que o parâmetro para esta classificação é a duração inferior a três segundos para variação momentânea de tensão, e superior a três segundos e inferior a três minutos para variação temporária de tensão (ANEEL, 2020).

O afundamento de tensão, que nas literaturas internacionais é chamado de *sag*, é uma variação na amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência em que está superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u. A elevação de tensão, chamado nas literaturas internacionais de *swell*, é caracterizada pela variação na amplitude de tensão superior a 1,1 p.u. No módulo 8 do PRODIST também é feita essa classificação conforme a Tabela 1(ANEEL, 2020).

Tabela 1 - Classificação das VTCD.

Classificação	Denominação	Duração do Evento	Amplitude da Tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a 3 s	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 s	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 s	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a 3 s e inferior ou igual a 1 minuto	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a 3 s e inferior a igual a 1 minuto	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a 3 s e inferior ou igual a 1 minuto	Superior a 1,1 pu

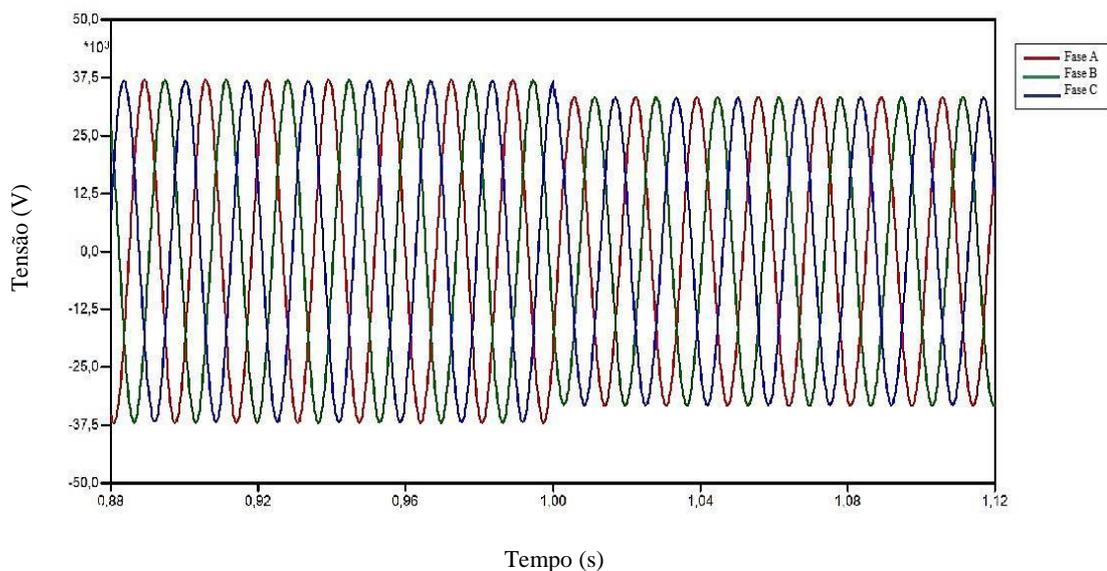
Fonte: PRODIST, 2020.

4.1 Sag

O afundamento de tensão é um tipo de VTCD, em que há uma deformação ou um achatamento da onda de tensão, por alguns ciclos e posteriormente voltando à normalidade. Segundo Paulillo e Teixeira (2013) normalmente esse distúrbio é causado por faltas no SEP, partidas de grandes motores, corrente *inrush* de transformadores, sendo a razão mais comum de curtos circuitos nas redes de distribuição. O elevado valor da corrente de curto-circuito causa o afundamento da tensão no barramento em que a barra do curto circuito está conectada.

Na Figura 5 é possível observar um distúrbio da forma de onda de tensão, onde há um afundamento nas ondas das fases A, B e C a partir de 1,00 segundos caracterizando um *sag*.

Figura 5 - Demonstração de distúrbio *sag* ocorrendo na fase.



Fonte: Autora.

O afundamento de tensão ocorre em maior frequência no sistema elétrico e, portanto, seu estudo é de extrema importância, pois sua ocorrência no geral não causam grandes danos aos equipamentos, porém representam cerca de 68% do problemas de QEE relacionados ao consumidores industriais, isso porque é crescente o uso de equipamentos eletrônicos sensíveis nas instalações industriais modernas, e por consequência tem-se um elevado número de interrupções do processo industrial, correlacionado ao distúrbio de afundamento de tensão (OLIVEIRA, 2015).

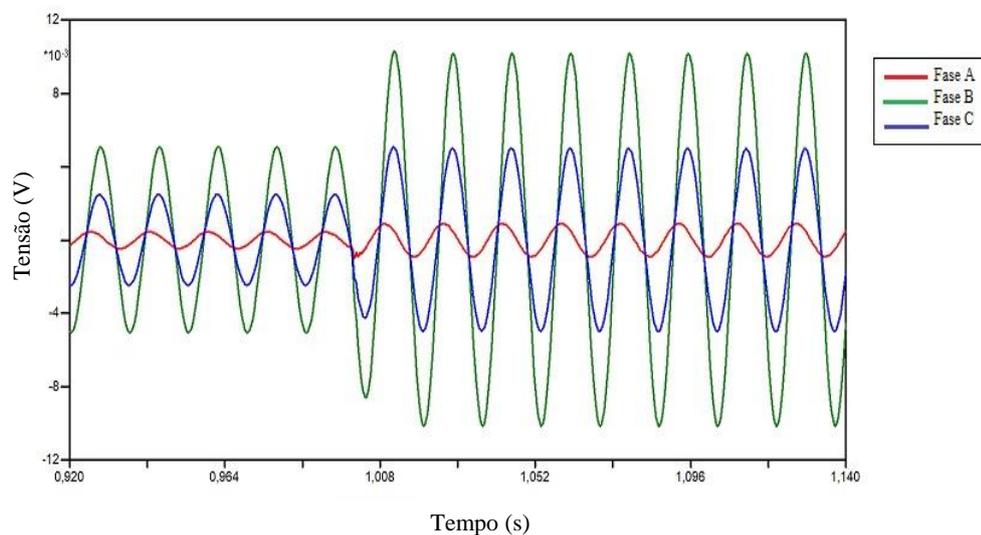
4.2 Swell

Ao contrario do que acontece em *sag*, na elevação de tensão (*swell*) é observado que há um aumento na amplitude da tensão e esse aumento normalmente é causado por faltas monofásicas, ou seja, falta fase-terra, no sistema elétrico, onde a tensão na fase em curto é reduzida, enquanto que nas demais fases ocorrem um aumento de tensão. Essa elevação de tensão causam danos nos supressores de sobretensão, uma vez que os mesmos são dimensionados para drenar por microssegundos, mas o *swell* ocorre por dezenas de milissegundos (ROCHA, 2016).

Saídas de grandes cargas, ou ainda acionamento de bancos de capacitores também podem ser causas da ocorrência da elevação de tensão, onde a duração dessa ocorrência vai depender do tempo de respostas dos equipamentos de regulação de tensão (PAULILLO e TEIXEIRA, 2013).

Na Figura 6 pode ser observado o comportamento da onda durante a ocorrência de uma elevação de tensão nas fases A, B e C a partir de 1,008 segundos.

Figura 6 - Exemplo de um distúrbio *swell*.



Fonte: Autora.

4.3 Chaveamentos de Banco de Capacitor, de Carga e de Parte do Sistema

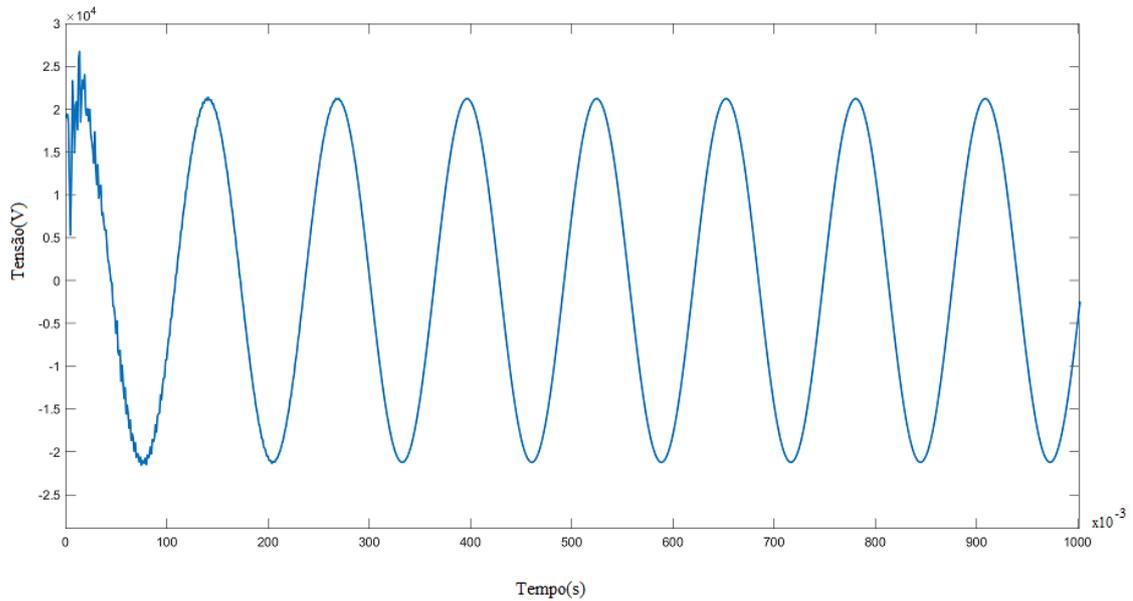
O chaveamento de banco de capacitor, chaveamento de cargas e chaveamento de parte do sistema, não são distúrbios, porém a ocorrência destes podem gerar variações na tensão semelhante aos distúrbios. Esse comportamento vai depender do comando em questão, ou seja, se estão sendo inseridas ou retiradas do barramento, conforme mostram as Figuras 7, 8, 9 e 10, que representam respectivamente o chaveamento de banco de capacitores, chaveamento de carga concentrada, chaveamento de carga distribuída e chaveamento de parte do sistema.

Segundo Carleto (2017), ocorrem diversos tipos de chaveamento “comutação” (liga/desliga) entre os dispositivos do SEP de acordo com a necessidade, como manutenção da subestação ou atuação de um disjuntor de proteção.

O Chaveamento de banco de capacitores afeta na amplitude da tensão e dentre os fatores que afetam esse distúrbio estão: o tamanho do capacitor chaveado e a capacidade de curto circuito no local do capacitor chaveado. Dependendo da dimensão do banco de capacitor e dos elementos de indutância e capacitância e de como estão distribuídas no circuito, as sobretensões transitórias podem alcançar níveis bastante altos em caso de interrupção momentânea da corrente de *inrush*, fazendo com as tensões transitórias possam ser amplificadas no barramento em que o banco de capacitor está sendo chaveado. A amplificação de tensão também pode ocorrer em vários níveis de tensão, em um sistema que possua dois, três, ou quatro níveis de tensão, ocasionando danos em equipamentos instalados nos mesmos. São várias as formas de atenuar o efeito negativo do chaveamento dos bancos de capacitores, dentre eles estão o fechamento síncrono das chaves de comando e pré-inserção de resistores (SANTOS, 2000).

Na Figura 7 é possível observar o comportamento da onda da tensão com o chaveamento de um banco de capacitor, durante um período de 2 segundos.

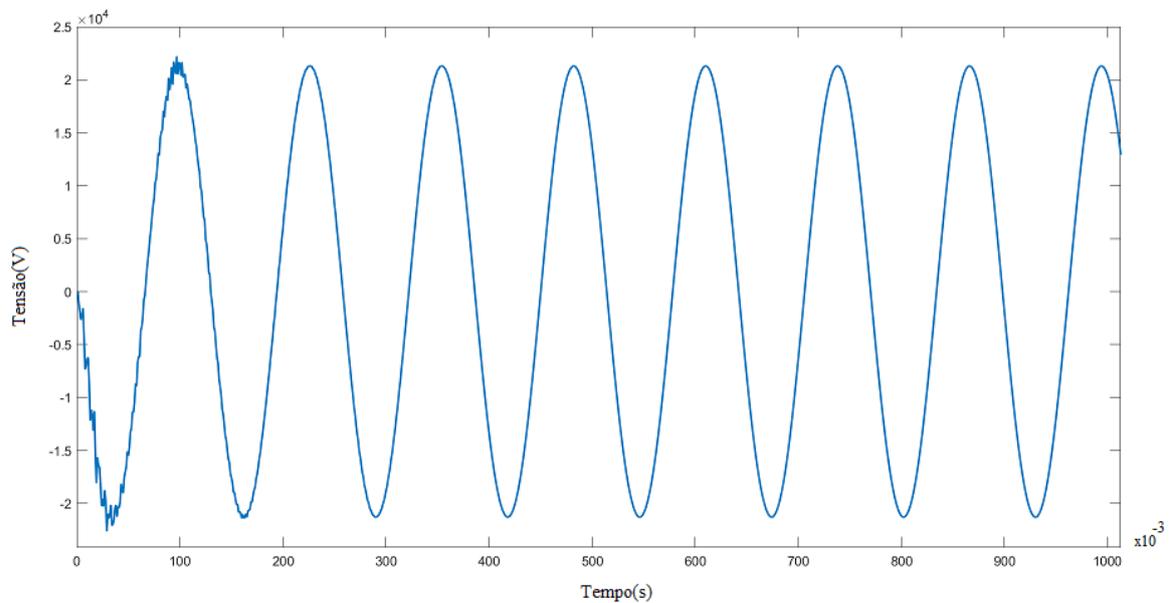
Figura 7 - Comportamento da tensão durante o chaveamento de banco de capacitor na.



Fonte: Autora.

Em estudo de SD, as cargas concentradas são representações de consumidores primários e transformadores de rede de distribuição. A Figura 8 mostra o chaveamento de carga concentrada, bem como o comportamento da tensão no período de 2 segundos, caracterizando um distúrbio de tensão.

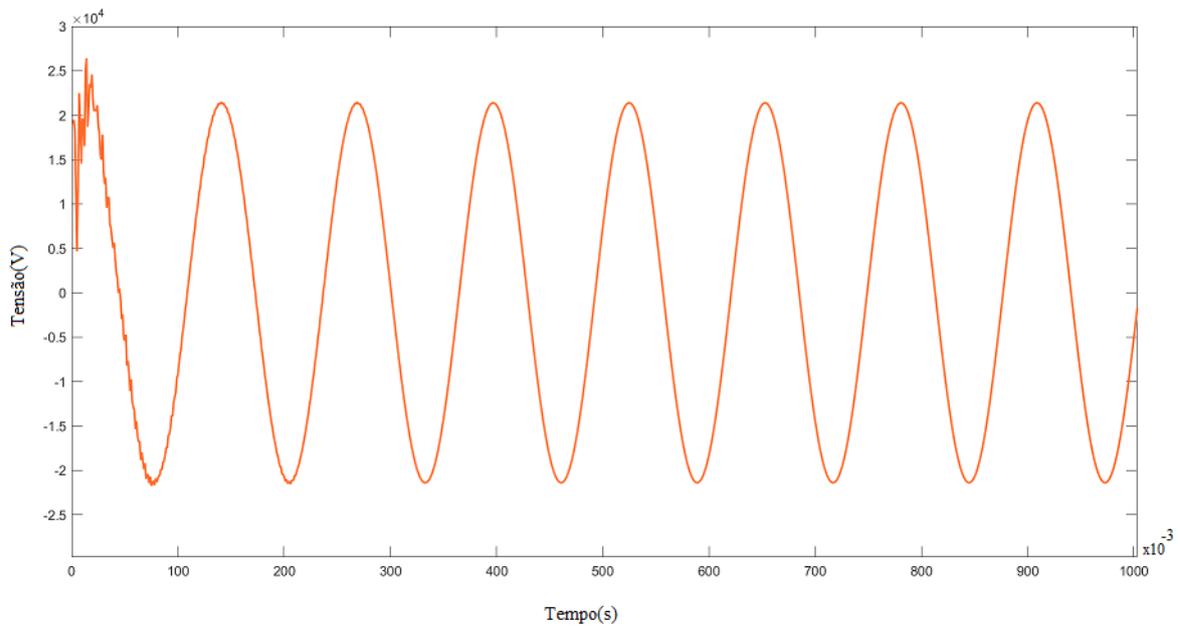
Figura 8 - Comportamento da tensão durante o chaveamento de carga concentrada.



Fonte: Autora.

A carga distribuída no estudo SD representa os consumidores secundários o comportamento do chaveamento das cargas uniformemente distribuídas pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Comportamento da tensão para o chaveamento de carga distribuída.

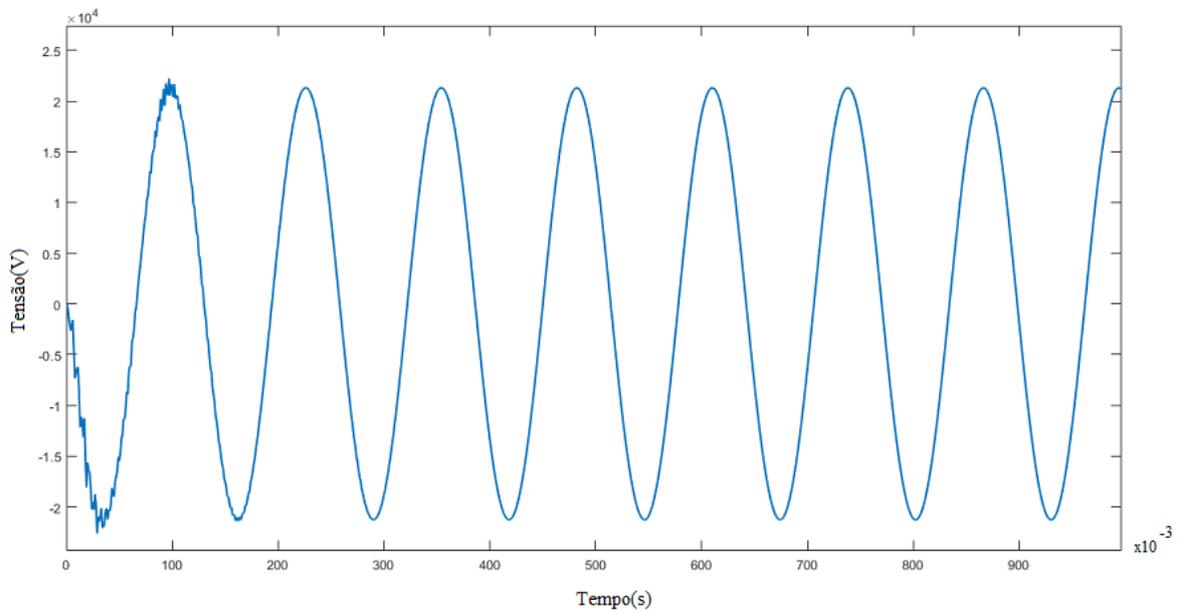


Fonte: Autora.

A reconfiguração topológica do SD é feita por manobras que requerem o chaveamento de parte do sistema, é um procedimento de planejamento de curto prazo normalmente feito para reestabelecimento do SD para o estado normal. Porém esta manobra pode ocasionar comportamentos no SD que caracterizam um distúrbio de tensão (SOUZA, 2018).

O comportamento da tensão, em um período de 2 segundos, na ocorrência do chaveamento de parte do sistema pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Comportamento da tensão para o chaveamento de parte do sistema.



Fonte: Autora.

4.4 Chaveamento de Cargas Não Lineares

As cargas não lineares são cargas que distorcem as formas de onda da corrente e/ou tensão. Equipamentos que possuem esse tipo de carga são comuns e são visto tanto em consumidores industriais, como em consumidores domésticos. São exemplos de equipamentos com cargas não lineares:

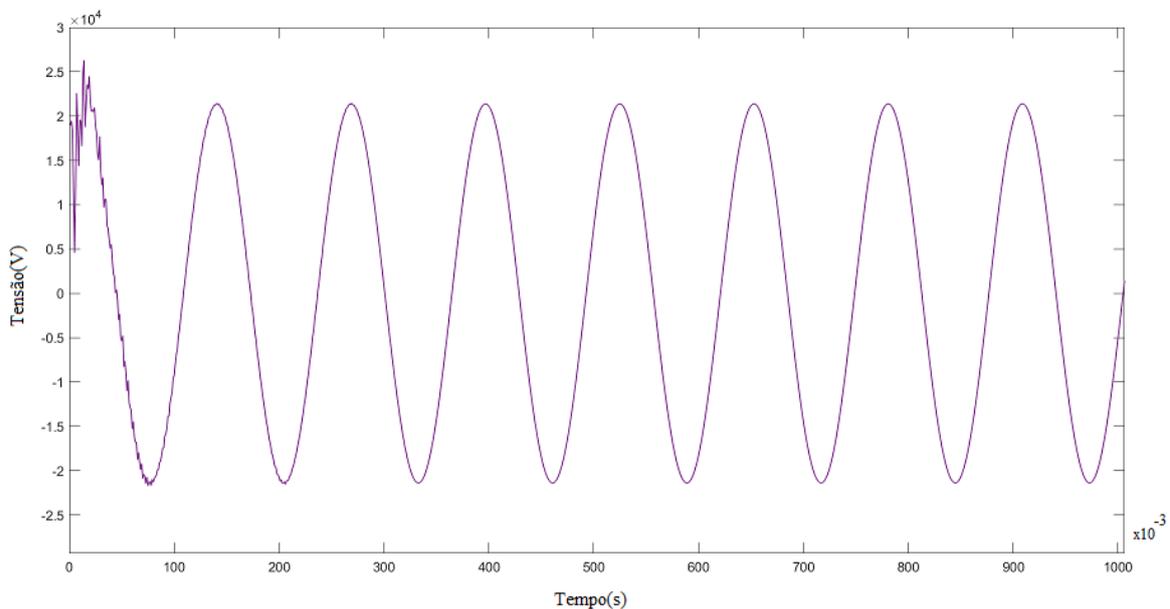
- Conversores e inversores de frequência;
- Retificadores;
- Fornos a arco e indução;
- Fontes chaveadas;
- Lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos;

A defasagem entre as correntes demandadas pelas cargas e as tensões de alimentação, gera um fluxo de potência oscilatório entre a fonte e a carga, sem que haja a conversão em potência útil, portanto, sendo um efeito indesejado, porém por muitas vezes necessário para excitar os campos magnéticos e elétricos de algumas cargas (PAREDES, REIS, DECKMANN, 2017).

Um dos principais efeitos da inserção de cargas não lineares no SEP é a geração de harmônicos na rede. De acordo com o ponto de acoplamento comum das cargas não lineares, elas podem ser classificadas como fontes de harmônicos de corrente ou fontes de harmônicos de tensão, porém essa identificação não é simples, pois depende do que está sendo imposto pela carga e pela tensão. (PAREDES, REIS, DECKMANN, 2017).

Na Figura 11 é demonstrado o comportamento da tensão com a inserção de cargas não lineares no SD.

Figura 11 - Comportamento da tensão para o chaveamento de cargas não lineares.



Fonte: Autora.

4.5 Rompimento de Condutor

O RC é um dos problemas que causam bastante preocupação às concessionárias, uma vez que esta ocorrência pode ser classificada como falta de alta impedância. Neto (2005) em seu trabalho comenta o motivo desta preocupação.

Uma rede de distribuição é normalmente protegida através da atuação de um sistema convencional de proteção formado, basicamente, por relés de sobrecorrente, de desequilíbrio de carga entre as fases (corrente de neutro) e de fusíveis. Esse sistema, usualmente, não detecta faltas de alta impedância (NETO, 2005).

Então a detecção do RC não pode ser realizada por meio de dispositivos de proteção convencionais, assim, esta detecção e comunicação com a concessionária ficam dependentes da população, ou órgãos como a polícia e bombeiros. Ainda em seu trabalho, Neto (2005) descreve os motivos pelos quais ocorre o RC e que as correntes e tensões normais dos alimentadores são pouco afetadas, fazendo com que o desequilíbrio natural dos alimentadores possa limitar a proteção baseada em corrente de neutro ou outro parâmetro indicador de desequilíbrio, na maioria dos casos de faltas de alta impedância, a corrente diminui com a duração da falta.

Silva *et al* (2020), em estudo realizado para análise da tensão de sequência negativa como método de distinção do RC dos eventos como *sag*, *swell*, chaveamento de carga concentrada, chaveamento de carga distribuída, chaveamento de carga não linear e chaveamento de parte do sistema, mostrou que o método obteve uma alta porcentagem de distinção do RC em relação aos outros eventos estudados. Então mostrando ser uma técnica promissora para uma primeira triagem.

Portanto, o estudo das componentes simétricas pode ser uma ferramenta de identificação de RC em uma rede de distribuição de energia elétrica.

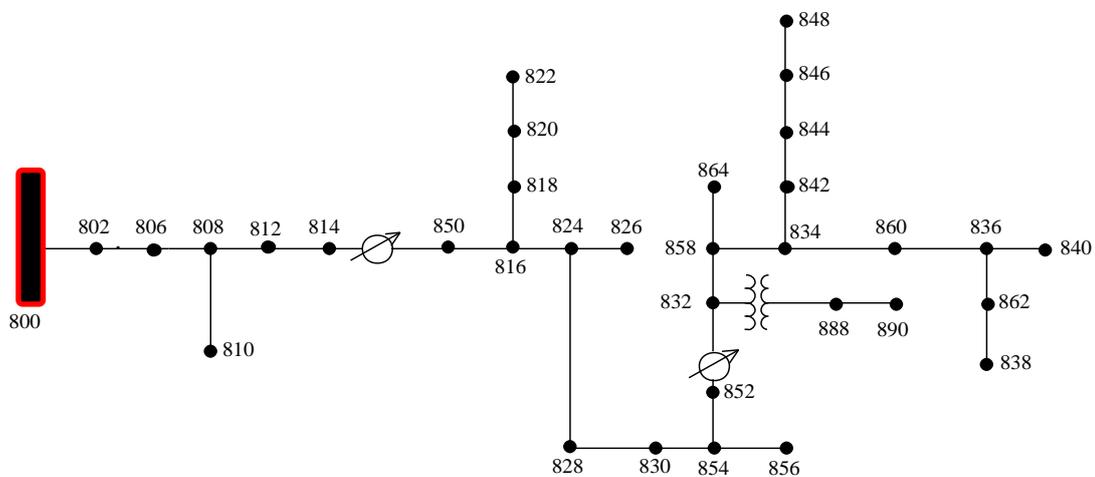
4.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os conceitos de todos os distúrbios de tensão estudados neste trabalho, suas principais causas, comportamentos de onda, formas de detecção e os efeitos destes no SEP.

5 METODOLOGIA

Para o estudo em questão foi escolhido o sistema teste de 34 barras do IEEE, cujo diagrama unifilar está apresentado na Figura 12. Este sistema é um alimentador real que está localizado no Arizona, EUA, composto por um 34 barramentos, um transformador 24,9kV/4,16kV, dois transformadores e capacitores *shunt* e caracterizado por uma tensão nominal de 24,9 kV e cargas desbalanceadas (IEEE, 1992).

Figura 12 - Diagrama unifilar simplificado do sistema de 34 barras do IEEE.



Fonte: Adaptado do IEEE.

A análise proposta neste trabalho realiza-se em duas fases:

- Modelagem deste sistema de 34 barras do IEEE no *software* livre ATPdraw, bem como os distúrbios de tensão *sag*, *swell* e os chaveamentos de banco de capacitores, chaveamentos de carga (concentradas e distribuída), o chaveamento de parte do sistema, chaveamento de cargas não lineares e o RC, explicados e exemplificados no capítulo 4;
- Implementação do método de análise tensão de sequência positiva - TSP para detectar e distinguir o RC através de apenas um ponto de medição (sendo ele no medidor da subestação) através de um *software* matemático.

Entre os distúrbios de tensão propostos, a distinção do RC dos demais distúrbios se mostra um grande desafio para as distribuidoras. A bibliografia apresentada no capítulo 2 mostrou que um método promissor é o de análise das componentes simétricas. Portanto,

este trabalho direcionou o estudo para análise das componentes simétricas de tensão de sequência positiva, para observar a distinção entre o RC dos demais distúrbios.

Como o propósito é de investigar e propor uma metodologia simples, fácil de ser implementada e com um menor custo, foi utilizado apenas um ponto de medição, sendo ele no barramento da subestação do SD.

Com o registro dos dados de tensão, o processamento e cálculo dos dados da TSP foram feitas por meio do *software* matemático, em que para cada simulação, um ruído branco Gaussiano com uma relação de sinal-ruído (Signal-to-Noise Ratio –SNR) de 20 dB foi adicionado aos sinais de tensão trifásicos. Posteriormente, o sinal foi filtrado por meio de um filtro Butterworth de segunda ordem com frequência de corte de 180 Hz. Então, as tensões trifásicas filtradas V_a , V_b e V_c foram janeladas a cada ciclo (γ), com uma taxa de amostragem de 128 amostras por ciclo. Por fim, os fasores foram calculados usando a transformada rápida de Fourier - FFT. Na Figura 13 são expostos os passos seguidos para a realização deste trabalho.

Figura 13 - Fluxograma do trabalho.



Fonte: Adaptado de SILVA, 2020.

6 TESTE E RESULTADOS

A realização das etapas expostas anteriormente levou a relevantes contribuições, embasamento adquirido com o estudo do tema e proporcionou considerações sobre os principais métodos aplicados à detecção, distinção e localização do RC, bem como a dificuldade da detecção deste distúrbio.

Através da parametrização do RC, os sinais obtidos foram analisados a fim de identificar suas principais diferenças. A análise dos resultados deste trabalho segue de acordo com o que será explicado nas próximas subseções.

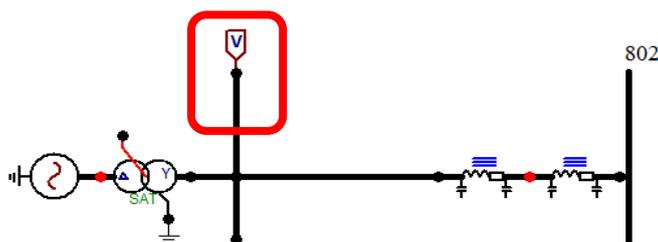
6.1 Aspectos Introdutórios

Distinguir o RC dos demais distúrbios se prova bastante complexo principalmente com a era de automatização que incide sobre o SEP, onde a busca por um sistema com o mínimo de interrupções e uma excelente qualidade e confiabilidade da energia requer ao setor de energia a implementação de métodos de detecção de faltas, cada vez mais precisos.

Este trabalho propõe analisar o potencial de identificação e distinção do RC em um sistema de distribuição por meio TSP. Toda caracterização dos sinais do RC e dos outros eventos foram realizadas utilizando o sistema teste de 34 barras do IEEE cujo diagrama unifilar do mesmo foi apresentado na Figura 12.

O barramento 800 do SD é a subestação, e para aferição de dados, um *probe* de medição foi inserido logo em seguida, ou seja, entre o barramento 800 e 802. O *probe* no ATPDraw é equivalente aos instrumentos de medição, no caso aqui, foi inserido o *probe voltage* que se refere a um voltímetro, conforme pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Representação da inserção do *probe voltage* entre o barramento 800 e 802.



Fonte: SILVA, 2020.

Ao estruturar o sistema elétrico através da interface ATPDraw, é gerado um arquivo tipo ATP que contém todos os parâmetros do sistema a serem analisados, e para manipulação desses parâmetros foi utilizado um *software* matemático. Os dados obtidos decorrem dos seguintes eventos analisados:

- Rompimento de condutor;
- Chaveamento de ramo lateral;
- Chaveamento de carga concentrada;
- Chaveamento de carga distribuída;
- Chaveamento de capacitor;
- Chaveamento de carga não linear;
- *Sag* e *Swell*;

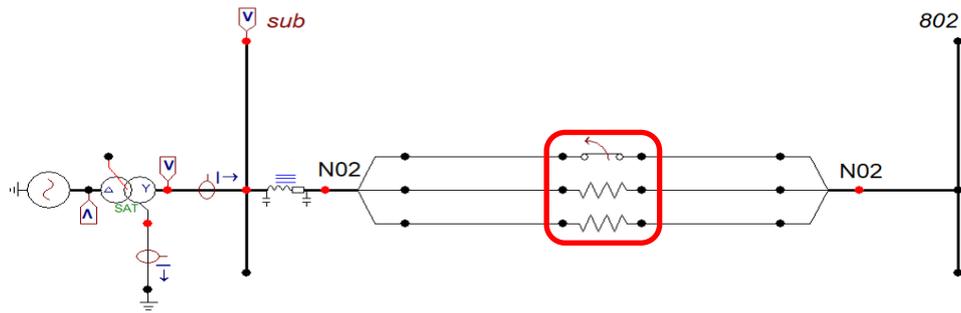
6.2 Implementação e Simulação no ATPdraw

Foram desenvolvidos modelos para reproduzir as características comportamentais dos sinais de tensão resultantes dos distúrbios. As simulações e análises da aplicação dos modelos no sistema escolhido, estão apresentadas e explicadas nos subtópicos seguintes.

6.2.1 Rompimento de Condutor

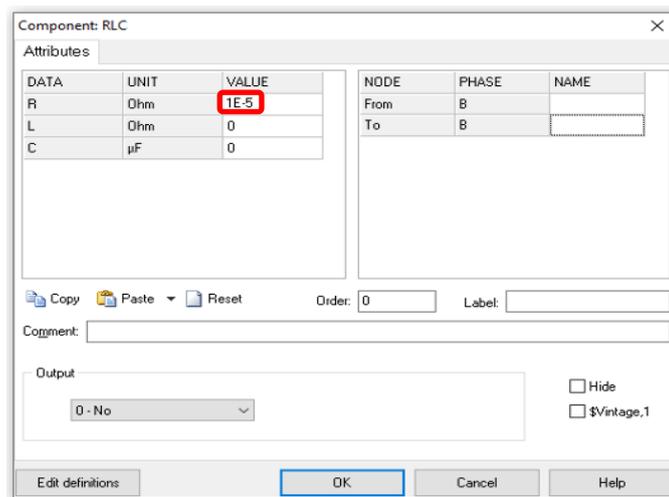
Para o RC, foram inseridas chaves em conjunto com resistores em todos os barramentos do sistema, como mostrado na Figura 15. As chaves usadas são do tipo monofásicas, e resistor associado possui valor ôhmico muito baixo ($1E-5 \Omega$) e os mesmos são necessários para que não houvesse erro na compilação do ATPDraw. A configuração dos resistores pode ser observada na Figura 16.

Figura 15 - Inserção de chave para a simulação do RC.



Fonte: SILVA, 2020.

Figura 16 - Inserção do resistor.



Fonte: SILVA, 2020.

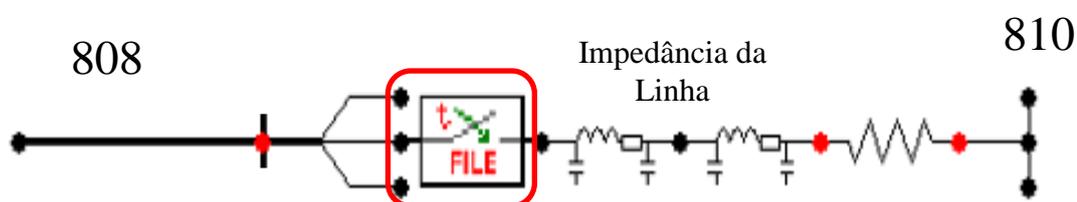
Para que não fosse necessário fazer este esquema manualmente para os 33 barramentos do sistema teste (excluindo o barramento 800 por se tratar da subestação), foi desenvolvida uma rotina de automatização do RC no *software* matemático. Através desta rotina, foi possível inserir diferentes ângulos de incidência do RC, sendo: 0° , 45° , 90° , 135° , 225° , 270° e 315° .

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas 231 simulações e para todos estes sete ângulos foram salvos os sinais de tensão das três fases, todos com medição apenas na subestação.

6.2.2 Chaveamento de Ramo Lateral (Parte do Sistema)

Para o estudo desse evento, foram operadas (inseridas e removidas) oito chaves após o barramento de início dos ramais do sistema elétrico em estudo. A Figura 17, demonstra a inserção da chave entre os barramentos 808 e 810 do sistema no ATPDraw. Assim como no RC foi necessário inserir um resistor de baixo valor ôhmico ($1E-5 \Omega$) para que não houvesse erro na compilação do simulador ATPDraw.

Figura 17 - Inserção da chave para o chaveamento de parte do sistema.



Fonte: SILVA, 2020.

Com a modelagem, foi desenvolvida a Tabela 2 onde é descrito as barras de início e fim dos ramais bem como a nomenclatura adotada.

Tabela 2 – Nomenclatura das partes do sistema.

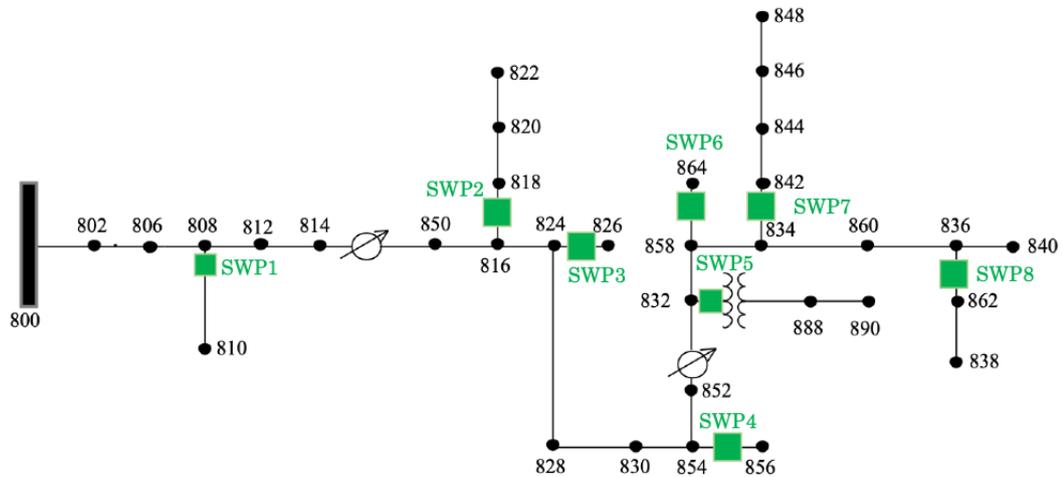
	Início							
	Fim							
Barra	808	816.	824	854	832	858	834	836
	810	818	826	856	890	864	842	838
Nomenclatura	SWP1	SWP2	SWP3	SWP4	SWP5	SWP6	SWP7	SWP8

Fonte: SILVA, 2020.

Um medidor instalado no barramento da subestação registrou as informações da tensão durante o chaveamento de parte do sistema, dados estes, utilizados para analisar a TSP e comparar com os dados de RC.

Em cada um dos oito pontos indicados na Tabela 2, foi simulada a abertura e fechamento da chave, totalizando 16 simulações para este caso. Na Figura 18, é possível observar os pontos onde foram inseridas chaves nos ramais do sistema para a realização dos testes no alimentador de 34 barras do IEEE.

Figura 18 - Ponto de inserção das chaves no sistema para chaveamento dos ramos laterais.



Fonte: Adaptado do IEEE.

6.2.3 Chaveamento de Carga Concentrada

O chaveamento de carga concentrada foi outro distúrbio estudado, e as características deste evento foram utilizadas para a comparação e análise com os sinais de RC. A Tabela 3 indica os barramentos dos ramos de chaveamento de carga concentrada e a nomenclatura adotada.

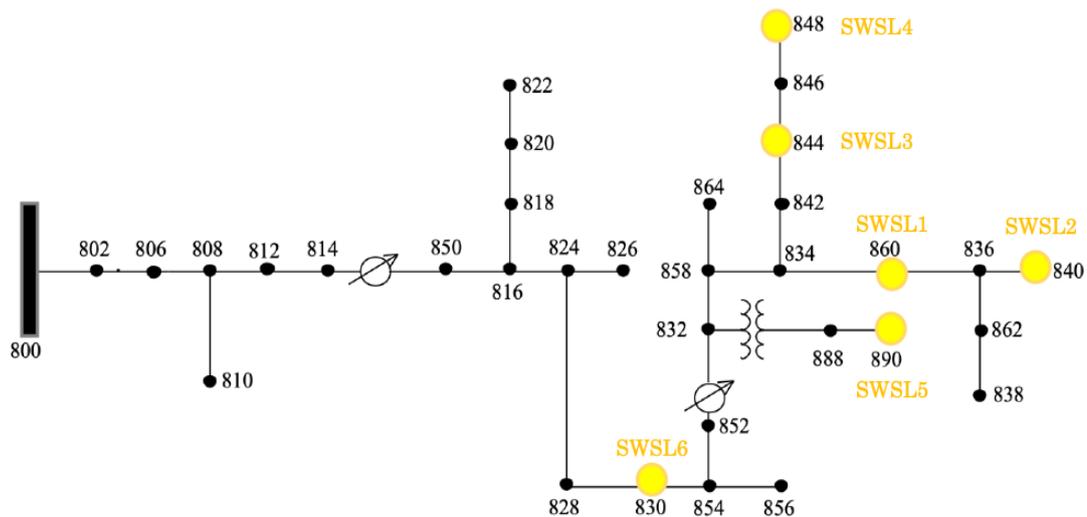
Tabela 3 - Barras chaveadas e nomenclatura utilizada.

Barra	860	840	844	848	890	830
Nomenclatura	SWSL1	SWSL2	SWSL3	SWSL4	SWSL5	SWSL6

Fonte: SILVA, 2020.

Para a realização dos testes, foram inseridas chaves conectadas em série com as 6 cargas já existentes no sistema teste de 34 barras do IEEE. O processo para a realização deste evento consiste na abertura e fechamento das chaves, portanto, totalizando 12 simulações. Na Figura 19 é possível observar os pontos em que as chaves foram inseridas no sistema.

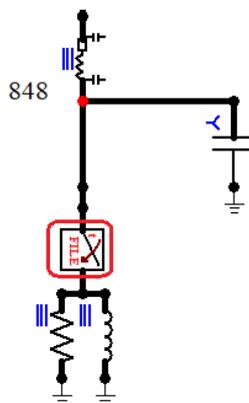
Figura 19 - Ponto de inserção das chaves no sistema para carga concentrada.



Fonte: Adaptado IEEE.

Na Figura 20 mostra umas das seis chaves inseridas no sistema no ATPdraw, localizada no barramento 848.

Figura 20 - Inserção da chave no barramento 848 para a simulação da carga concentrada.



Fonte: Autora.

6.2.4 Chaveamento de Carga Distribuída

Para esta situação, foram inseridas chaves em série em 19 pontos com a função de conectar e desconectar as cargas distribuídas, resultando assim em 38 simulações. A Tabela 4 descreve os barramentos dos ramais de chaveamento e a nomenclatura adotada.

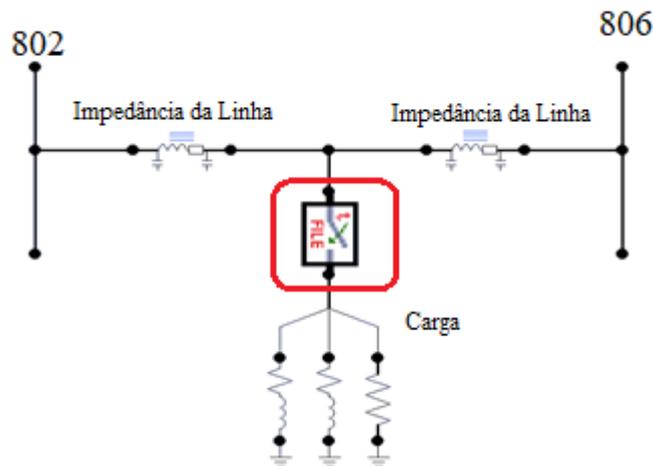
Tabela 4- Nomenclatura do chaveamento da carga distribuída.

	Início	Fim								
Barra	802	806	808	810	818	820	820	822	831	824
Nomenclatura	SWDL1		SWDL2		SWDL3		SWDL4		SWDL5	
Barra	824	826	824	828	828	830	854	856	832	858
Nomenclatura	SWDL6		SWDL7		SWDL8		SWDL9		SWDL10	
Barra	858	864	858	834	834	860	860	836	836	840
Nomenclatura	SWDL11		SWDL12		SWDL13		SWDL14		SWDL15	
Barra	862	838	842	844	844	846	846	848		
Nomenclatura	SWDL16		SWDL17		SWDL18		SWDL19			

Fonte: SILVA, 2020.

A Figura 21 mostra a chave inserida entre os barramentos 802 e 806, onde é possível observar a abordagem utilizada neste trabalho para a simulação de carga distribuída, em que o total das cargas distribuída foram concentradas entre dois barramentos.

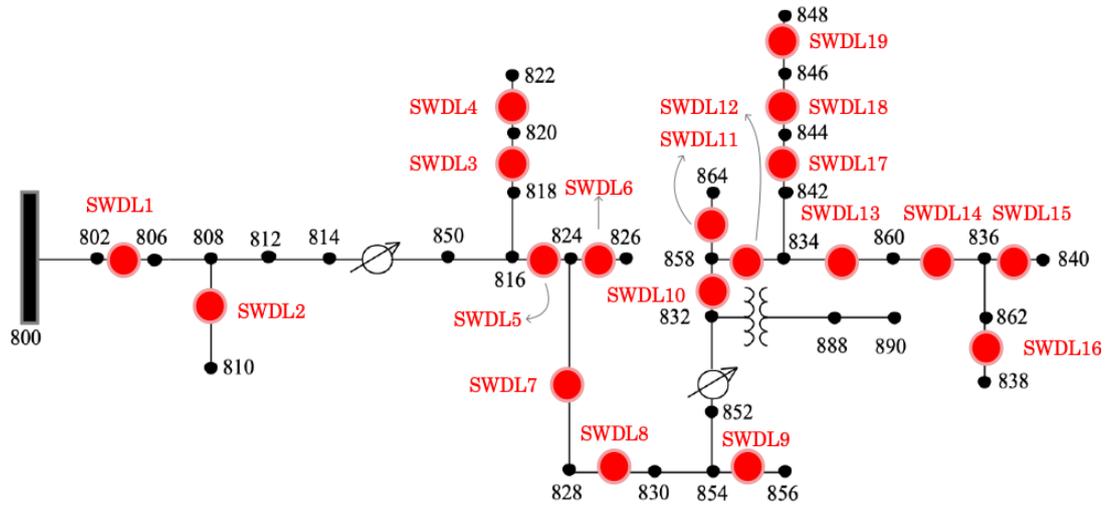
Figura 21 - Inserção da chave para o chaveamento de carga distribuída.



Fonte: SILVA, 2020.

A Figura 22 mostra a locação de todas as chaves no sistema alimentador de 34 barras do IEEE e a nomenclatura utilizada.

Figura 22 - Pontos de inserção das chaves.

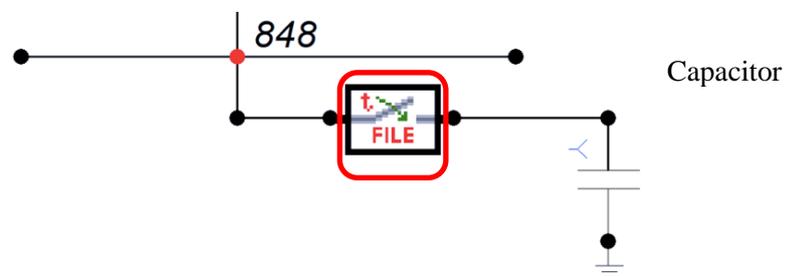


Fonte: Adaptado do IEEE.

6.2.5 Chaveamento de Banco de Capacitor

A simulação foi realizada por meio do chaveamento dos capacitores presentes no alimentador de 34 barras do IEEE, sendo eles conectados aos barramentos 844 e 848. Para isto, foram inseridas chaves em série com os capacitores, como é possível ver na Figura 23 o exemplo da barra 848. As nomenclaturas do chaveamento de capacitor, adotada para este trabalho foram SWBC1 e SWCB2 que correspondem respectivamente localizadas no barramento 844 e 848.

Figura 23 - Inserção da chave no barramento 848.



Fonte: SILVA, 2020.

6.2.6 Chaveamento de cargas não lineares

Para esta simulação foram inseridos retificadores nos barramentos 802, 844, 848 com consumo de energia variando de maneira aleatória entre 400KW e 500KW a cada dois ciclos. Assim como nos casos anteriores, foram inseridas chaves no sistema com estas cargas simulando a energização e desenergização. Durante o chaveamento das cargas não lineares, foram registradas as informações de tensão por meio do medidor de tensão previamente instalado.

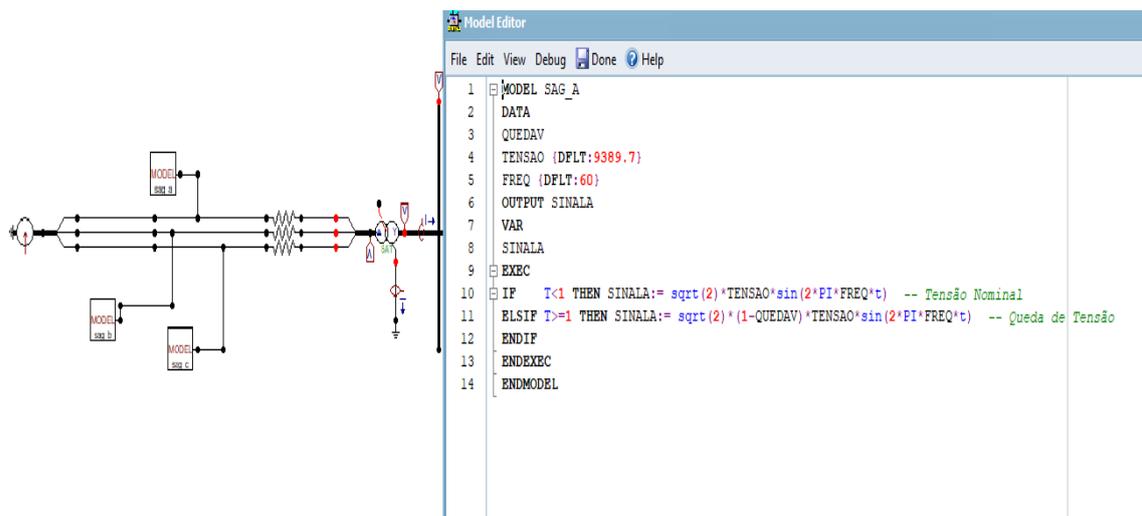
6.2.7 *Sag* e *Swell*

Para a simulação dos distúrbios *Sag* e *Swell*, foi desenvolvida uma rotina MODELS, que é considerada uma ferramenta de simulação de algoritmos genéricos, que permite o controle das operações de componentes elétricos do sistema no ATPDraw. Essa ferramenta permite ao usuário o desenvolvimento de componentes do sistema elétrico que não estão disponíveis na biblioteca da do ATPdraw. A rotina é feita por especificações e alterações do valor de parâmetros numéricos e/ou analógicos (DUBÉ, 1996).

Foram desenvolvidos os blocos que simulam a ocorrência dos distúrbios modelados matematicamente, sendo um representando o distúrbio *Sag*, e outro representando o distúrbio *Swell*. Os MODELS desenvolvidos foram de natureza monofásica, logo, tiveram que ser replicados para cada fase, totalizando assim seis blocos ajustados e aplicados no sistema de 34 barras do IEEE.

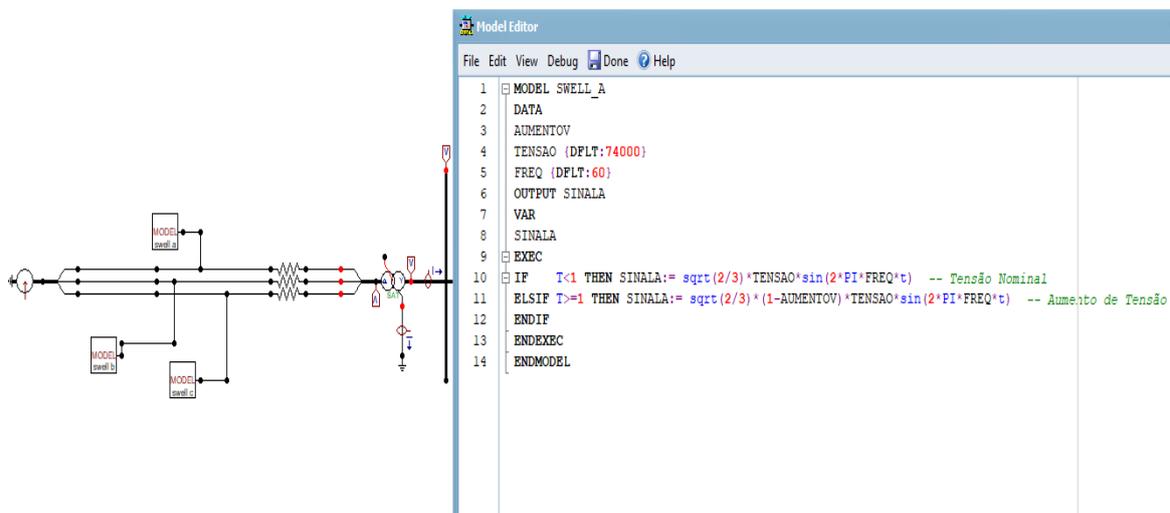
Conforme se observa nas Figuras 24 e 25, é possível fazer a alteração dos parâmetros que representam a intensidade da falha e o instante inicial da sua ocorrência. Nas figuras também nota-se o código de modelagem do distúrbio.

Figura 24 - Simulação do distúrbio de afundamento de tensão (sag).



Fonte: Autora.

Figura 25 - Simulação do distúrbio de elevação de tensão (swell).



Fonte: Autora.

6.3 Análise dos Sinais Elétricos Pelo Software Matemático

Como já explicitado no Capítulo 5, após a extração dos sinais elétricos através do ATPdraw, foi realizado uma análise matemática dos eventos estudados. Essa análise tem como objetivo principal, comparar todos os distúrbios de tensão e mensurar a eficiência do método de análise de TSP para a detecção e distinção do RC.

No *software* matemático foi desenvolvida uma rotina para que os sinais elétricos extraídos fossem analisados. O arquivo gerado pelo ATP com tensão das fases e o tempo foi lido, inserido um ruído gaussiano de 20 dB, para simular o SEP, posteriormente o sinal foi filtrado por meio do filtro *Butterworth* de segunda ordem com frequência de corte de 180 Hz.

6.3.1 Análise do método de distinção do Rompimento do Condutor

Foi simulado o RC em todos os barramentos, com exceção do barramento da subestação e os barramentos monofásicos da fase B. Por meio desta simulação foram obtidos os seguintes valores para tensão pós-evento: valor mínimo de 36522V, valor médio de 36618V, valor máximo de 36757 V e valor desvio padrão de 82,8 V.

O valor de TSP mínimo foi obtido para a simulação do RC nos barramentos 810, 822, 826, 838, 856 e 864 (destacados em amarelo na Tabela 5). Este valor foi selecionado como limite para a distinção do RC dos demais eventos.

Todos estes valores da TSP foram obtidos com relação de sinal e ruído (*Signal to Noise Ratio* – SNR) de 20 dB adicionado ao sinal de pré-evento e pós-evento, com ângulo de chaveamento de 90° do RC para todos os barramentos.

O cálculo do percentual de precisão de distinção do RC foi feita por meio da Equação 6.1, em que é feita a relação do número total de eventos, com o número de eventos que obtiveram valores de TSP superiores ao valor limite (36522 V). Portanto, uma distinção bem sucedida entre o RC e os demais eventos ocorria quando a TSP calculada após o evento fosse menor do que o valor mínimo da TSP estabelecido para o RC.

$$P_{\%20dB} = \frac{(Total - Erros)}{Total} \times 100\% \quad 6.1$$

onde, *Total* é o número total de eventos e *Erros* é o número total de erros considerando os valores que fariam com que o evento não fosse diferenciado do valor mínimo do RC.

Tabela 5 - Valores de TSP pré-evento e pós-evento para a o rompimento do condutor.

Rompimento	Tensão Pré-Evento (V)	Tensão Pós-Evento (V)	Rompimento	Tensão Pré-Evento (V)	Tensão Pós-Evento (V)
Barra 802	36522	36719	Barra 840	36522	36532
Barra 806	36522	36720	Barra 842	36522	36532
Barra 808	36522	36732	Barra 844	36522	36525
Barra 810	36522	36522	Barra 846	36469	36583
Barra 812	36522	36746	Barra 848	36522	36595
Barra 814	36522	36757	Barra 850	36522	36757
Barra 816	36522	36757	Barra 852	36522	36651
Barra 818	36522	36654	Barra 854	36522	36638
Barra 820	36522	36634	Barra 856	36522	36522
Barra 822	36522	36522	Barra 858	36522	36548
Barra 824	36522	36642	Barra 860	36522	36595
Barra 826	36522	36522	Barra 862	36469	36583
Barra 828	36522	36642	Barra 864	36522	36522
Barra 830	36522	36645	Barra 888	36522	36676
Barra 832	36522	36651	Barra 890	36522	36676
Barra 834	36522	36536	Média	36.519	36618
Barra 836	36522	36547	Desvio Padrão	12,7	82,8
Barra 838	36522	36522	Máximo	36522	36757
			Mínimo	36469	36522

Fonte: Autora.

Nas subseções a seguintes, serão expostos os valores de pré-Evento e pós-evento da TSP para todos os eventos separadamente, bem como o cálculo da porcentagem de acerto de cada evento conforme a Equação 6.1 e as formas de ondas de cada evento.

6.3.2 Chaveamento de Cargas

Para este evento foi analisado o chaveamento de cargas concentradas e cargas distribuídas por meio do *software* matemático, onde foram gerados os valores de tensão para as chaves abertas e fechadas. No sistema foram inseridas vinte e cinco chaves, sendo destas, seis chaves para cargas concentradas e dezenove chaves para cargas distribuídas, os valores de tensão extraídos estão registrados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Valores de TSP para chaveamento de carga distribuída.

Chaveamento	Pré Evento	Pós Evento	Chaveamento	Pré Evento	Pós Evento
SWDL10_abre	36522	36534	SWDL1_fecha	36562	36522
SWDL10_fecha	36534	36522	SWDL2_abre	36522	36533
SWDL11_abre	36522	36524	SWDL2_fecha	36533	36522
SWDL11_fecha	36524	36522	SWDL3_abre	36522	36549
SWDL12_abre	36522	36549	SWDL3_fecha	36549	36522
SWDL12_fecha	36549	36522	SWDL4_abre	36522	36637
SWDL13_abre	36522	36646	SWDL4_fecha	36637	36522
SWDL13_fecha	36646	36522	SWDL5_abre	36522	36532
SWDL14_abre	36522	36592	SWDL5_fecha	36532	36522
SWDL14_fecha	36592	36522	SWDL6_abre	36522	36552
SWDL15_abre	36522	36555	SWDL6_fecha	36552	36522
SWDL15_fecha	36555	36522	SWDL7_abre	36522	36525
SWDL16_abre	36522	36544	SWDL7_fecha	36525	36522
SWDL16_fecha	36544	36522	SWDL8_abre	36522	36527
SWDL17_abre	36522	36530	SWDL8_fecha	36527	36522
SWDL17_fecha	36530	36522	SWDL9_abre	36522	36525
SWDL18_abre	36522	36559	SWDL9_fecha	36525	36522
SWDL18_fecha	36559	36522	Média	36538	36538
SWDL19_abre	36522	36540	Desvio Padrão	29,3265933	29,32659
SWDL19_fecha	36540	36522	Máximo	36646	36646
SWDL1_abre	36522	36562	Mínimo	36522	36522

Fonte: Autora.

Os valores destacados em vermelho representam os eventos que não puderam ser distinguidos do RC. A Equação 6.2 mostra como foi realizado o cálculo da porcentagem de distinção do RC em relação aos chaveamentos de carga distribuída.

$$P_{SWSL\%20dB} = \frac{(Total - Erros)}{Total} \times 100\% = \frac{(38 - 18)}{38} \times 100\% = 52,63\% \quad 6.2$$

Tabela 7 - Valores de TSP para chaveamento de carga concentrada.

Chaveamento	Pré Evento	Pós Evento	Chaveamento	Pré Evento	Pós Evento
SWSL1_abre	36522	36589	SWSL4_fecha	36590	36522
SWSL1_fecha	36589	36522	SWSL5_abre	36522	36972
SWSL2_abre	36522	36552	SWSL5_fecha	36972	36522
SWSL2_fecha	36552	36522	SWSL6_abre	36522	36555
SWSL3_abre	36522	36994	SWSL6_fecha	36555	36522
SWSL3_fecha	36994	36522	Média	36.615	36.615
SWSL4_abre	36522	36590	Desvio Padrão	173,6906	173,6906
			Máximo	36994	36994
			Mínimo	36522	36589

Fonte: Autora.

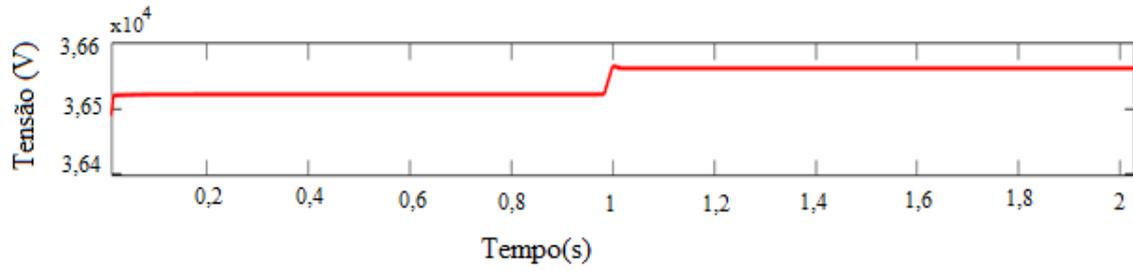
A Equação 6.3 mostra como foi realizado o cálculo da porcentagem de correta de distinção do RC em relação aos chaveamentos de carga concentrada.

$$P_{SWSL\%20dB} = \frac{(Total - Erros)}{Total} \times 100\% = \frac{(12 - 6)}{6} \times 100\% = 50\% \quad 6.3$$

Os resultados obtidos com os testes de chaveamento de cargas concentradas e cargas distribuídas mostraram uma confiabilidade média 50%, isso se deve porque as tensões obtidas com as aberturas das chaves excederam o limite estabelecido.

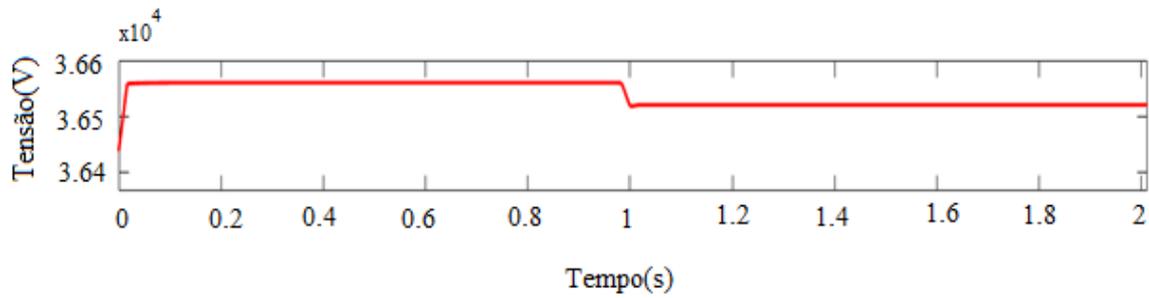
As Figuras 26 e 27 demonstram o comportamento da TSP com a operação da chave SWDL1, que representa o chaveamento de carga distribuída, mostrando respectivamente a chave aberta e fechada. O comportamento da TSP no chaveamento de carga concentrada é representado pelas Figuras 28 e 29, em que são analisados a abertura e fechamento da chave SWSL1.

Figura 26 - Tensão de sequência positiva para a chave SWDL1 aberta.



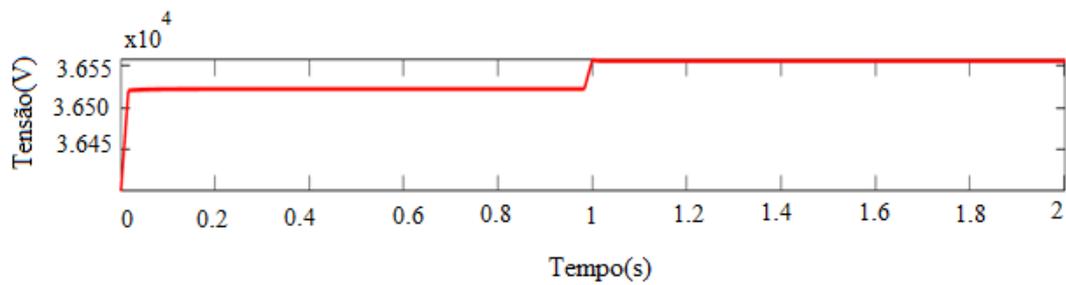
Fonte: Autora.

Figura 27 - Tensão de sequência positiva para a chave SWDL1 fechada.



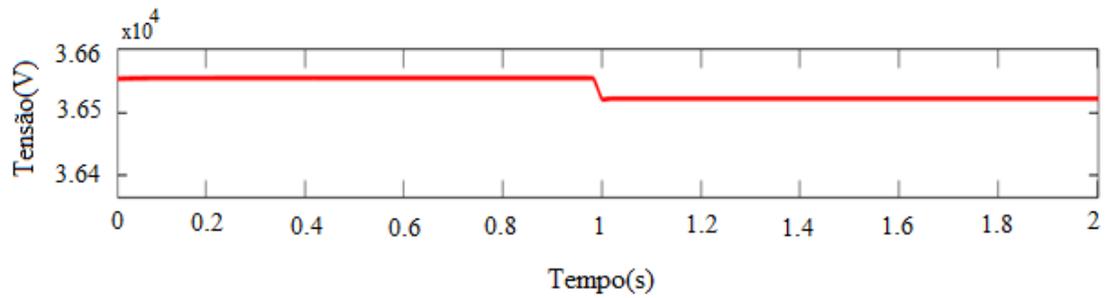
Fonte: Autora.

Figura 28 - Tensão de sequência positiva para a chave SWSL1 aberta.



Fonte: Autora.

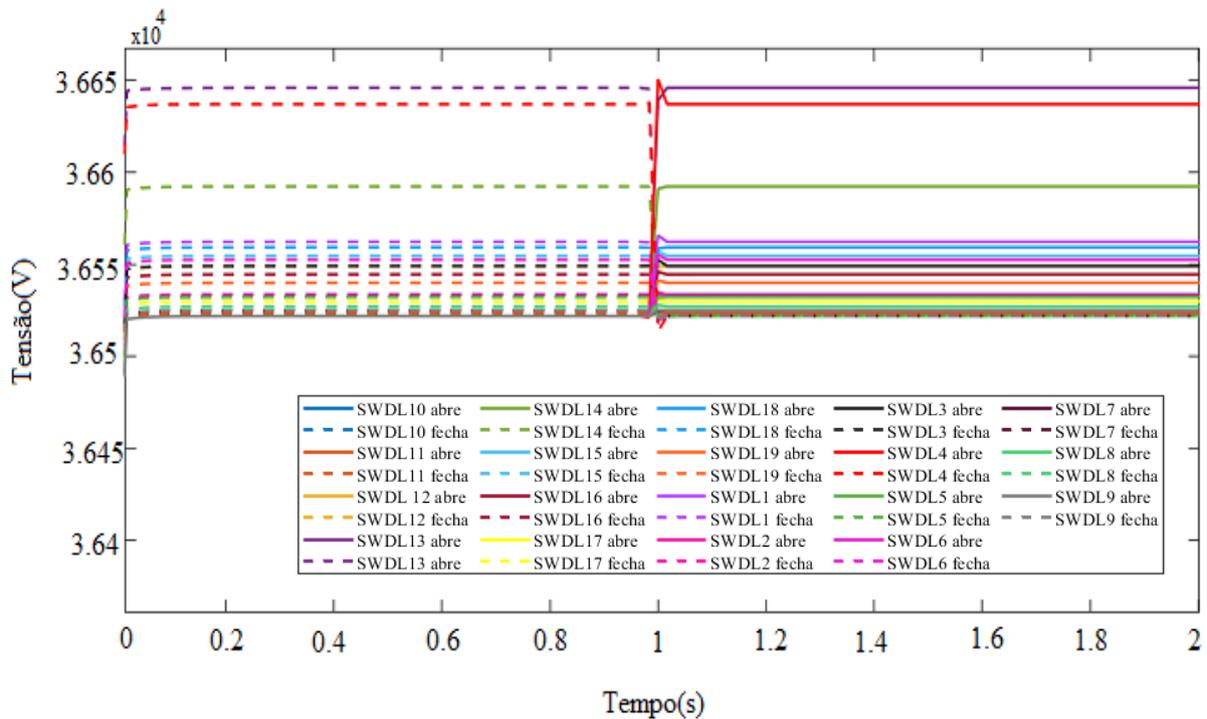
Figura 29 - Tensão de sequência positiva para a chave SWSL1 fechada.



Fonte: Autora.

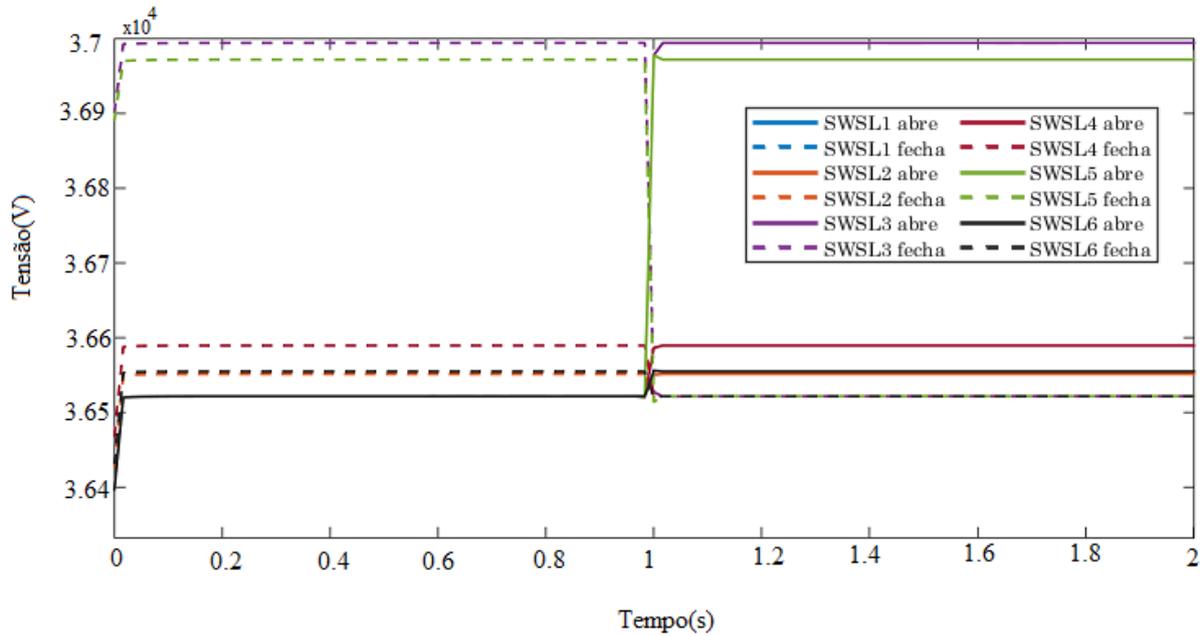
Na Figura 30 e 31 é possível ver o comportamento de todos os chaveamentos de cargas distribuídas e cargas concentradas respectivamente. Ao analisar as figuras, nota-se que há sobreposições de linhas, isso porque, o comportamento das ondas se assemelha e possui valores bem próximos.

Figura 30 - Comportamento do chaveamento das cargas distribuídas.



Fonte: Autora.

Figura 31 - Comportamento do chaveamento das cargas concentradas.



6.3.3 Chaveamento de Ramos Laterais

No chaveamento de parte do sistema foram inseridas 8 chaves para a simulação deste evento. Nas Figuras 32 e 33 são apresentados o comportamento da tensão de sequência positiva de da chave SWP1 em um período de 2 segundos, onde é importante ressaltar que os comportamentos das demais chaves se assemelham ao comportamento da mesma, como pode ser visto através da Figura 34.

Figura 32 - Tensão de sequência positiva para a chave SWP1 aberta.

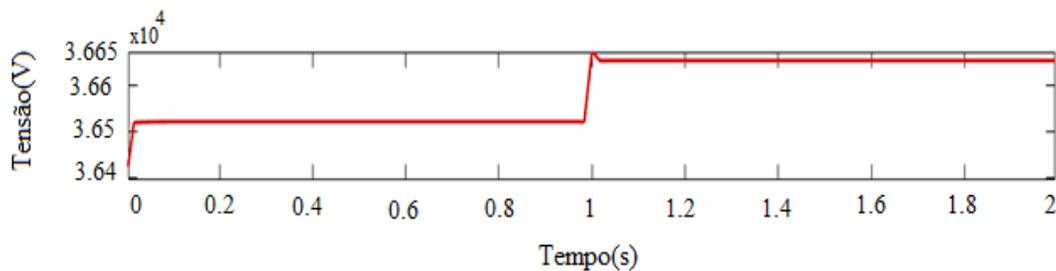
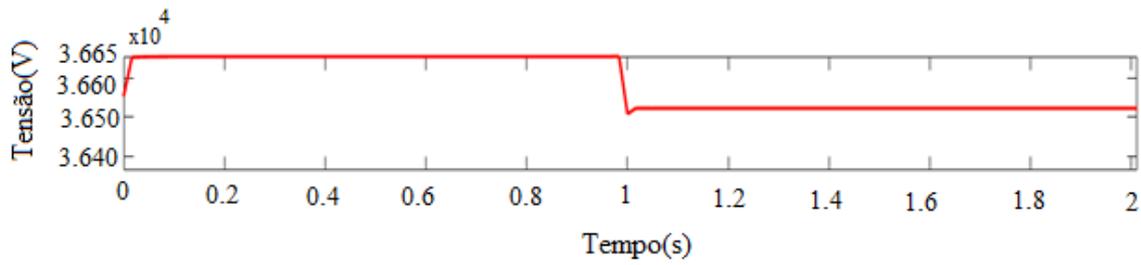
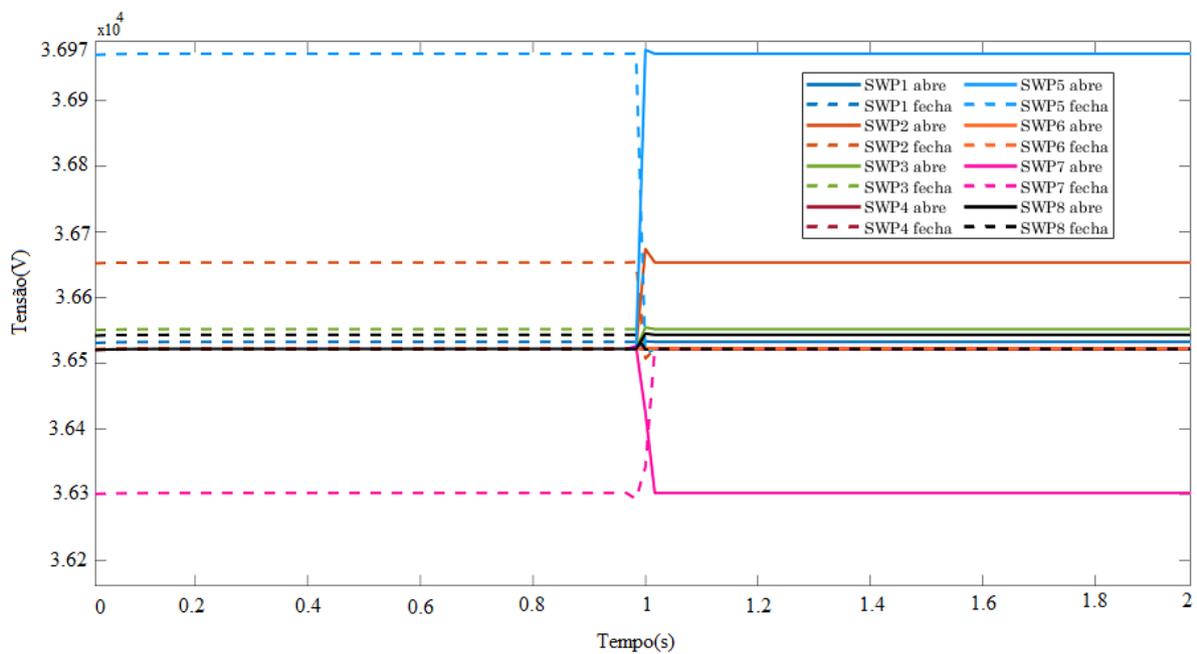


Figura 33 - Tensão de sequencia positiva para a chave SWP1 fechada.



Fonte: Autora.

Figura 34 - Comportamento da TSP para abertura e fechamento de todas as chaves.



Fonte: Autora.

Na Tabela 8 são registrados os valores de tensão de sequência positiva, em vermelho estão os valores de TSP que ultrapassam o valor mínimo de TSP para o rompimento de condutor.

Tabela 8 - Valores de TSP pré-evento e pós-evento.

Chaveamento	Pré Evento (V)	Pós Evento(V)
SWP1_abre	36522	36532
SWP1_fecha	36532	36522
SWP2_abre	36522	36654
SWP2_fecha	36654	36522
SWP3_abre	36522	36552
SWP3_fecha	36552	36522
SWP4_abre	36522	36521
SWP4_fecha	36521	36522
SWP5_abre	36522	36972
SWP5_fecha	36972	36522
SWP6_abre	36522	36523
SWP6_fecha	36523	36522
SWP7_abre	36522	36302
SWP7_fecha	36302	36522
SWP8_abre	36522	36543
SWP8_fecha	36543	36522
Média	36548	36548
Desvio Padrão	131.2	131.2
Máximo	36972	36972
Mínimo	36302	36302

Fonte: Autora.

A Equação 6.4 apresenta como foi realizado o cálculo da porcentagem acerto da distinção do RC em relação aos chaveamentos ramos laterais.

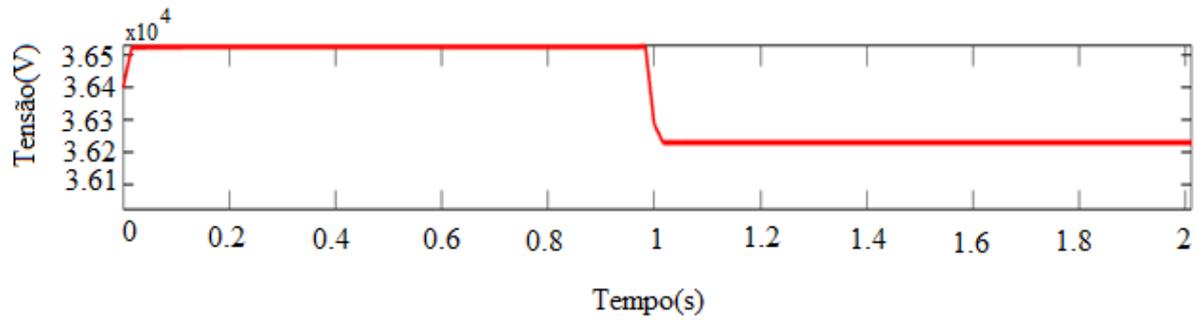
$$P_{SWSL\%20dB} = \frac{(Total - Erros)}{Total} \times 100\% = \frac{(16 - 6)}{16} \times 100\% = 62,5\% \quad 6.4$$

Para o chaveamento de parte do sistema o percentual de distinção foi de 62,5%, a maior parte das aberturas das chaves não foram distinguidas do RC, apenas as chaves SWP3 e SWP7 que obtiveram valores de TSP inferiores à 36522V.

6.3.4 Chaveamento de Banco de Capacitores

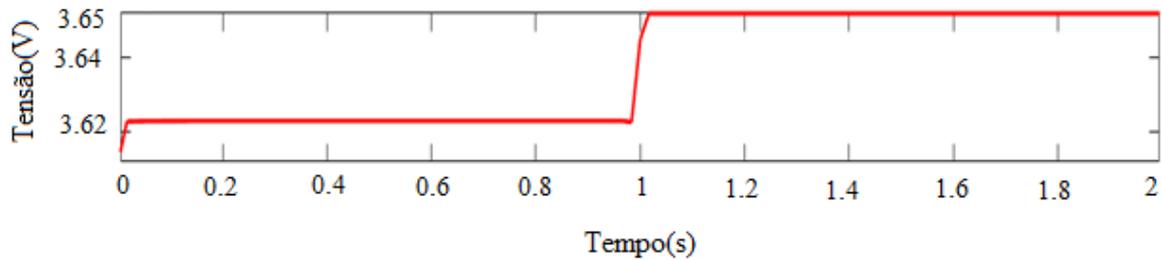
Foram inseridas no sistema de 34 barras do IEEE dois bancos de capacitores nos barramentos 844 e 848 representados pelas chaves SWBC1 e SWBC2. Nas Figuras 35 e 36 é mostrado o comportamento da TSP para o chaveamento, localizada no barramento 844, aberta e fechada respectivamente.

Figura 35 - TSP para chave SWBC1 aberta.



Fonte: Autora.

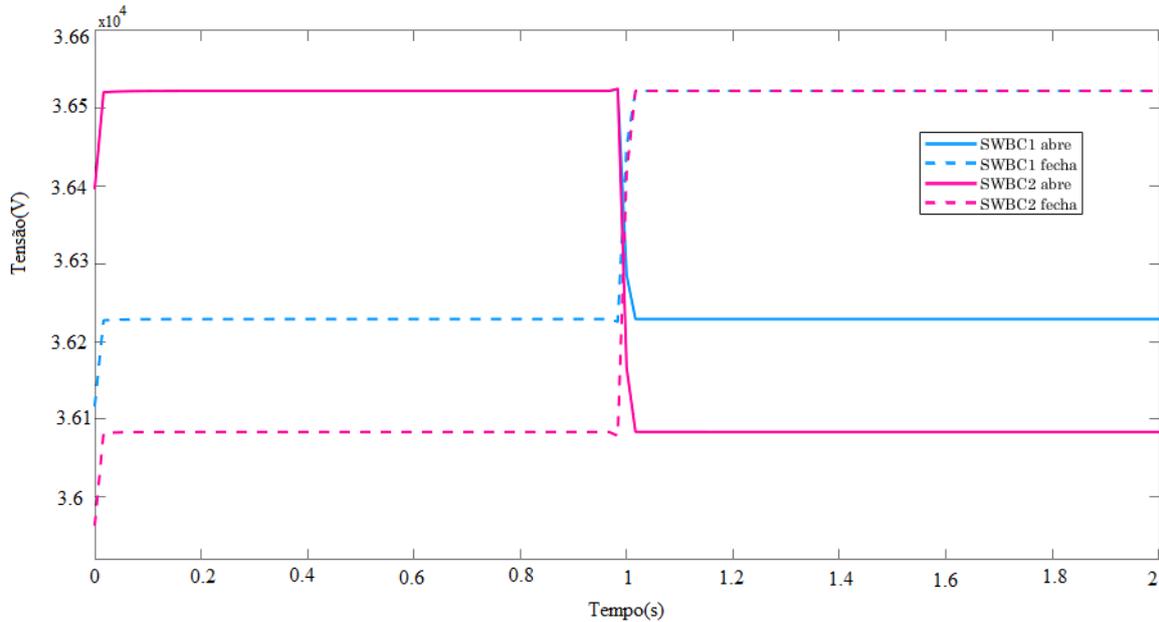
Figura 36 - Tensão de sequência positiva para chave SWBC1 fechada.



Fonte: Autora.

Na Figura 37 é representado o comportamento da TSP, para ambos os bancos de capacitores, em um período de dois segundos, em que se pode notar que os comportamentos das tensões seguem o mesmo padrão.

Figura 37 - Tensão de sequência positiva para o chaveamento de banco de capacitores.



Fonte: Autora.

Na Tabela 9 são registrados os valores de TSP para o chaveamento de banco de capacitores. É possível observar que há distinção de todos os casos de chaveamento do banco de capacitores em relação ao RC.

Tabela 9 - Valores de TSP para chaveamento de capacitores.

Chaveamnto	Pré Evento	Pós Evento
SWBC1_abre	36522	36229
SWBC1_fecha	36229	36522
SWBC2_abre	36522	36084
SWBC2_fecha	36084	36522
Média	36339	36339
Desvio Padrão	219.26	219.26
Máximo	36522	36522
Mínimo	36084	36084

Fonte: Autora.

A Equação 6.5 mostra o cálculo da porcentagem de correta de distinção do RC em relação aos chaveamentos de banco de capacitores.

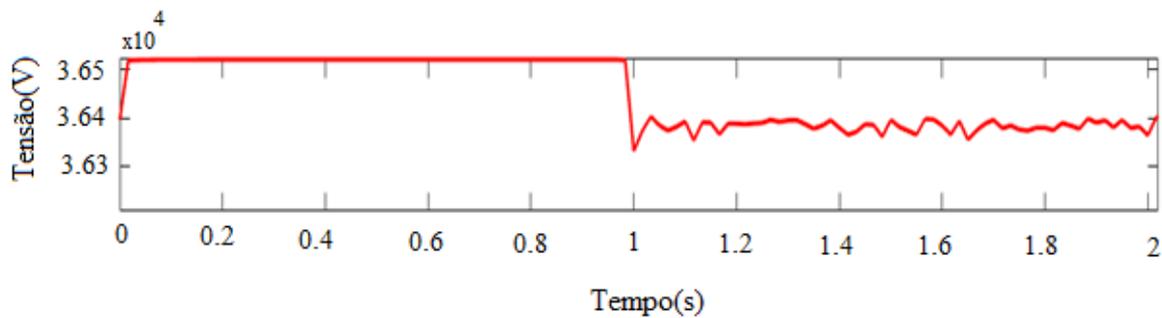
$$P_{SWSL\%20dB} = \frac{(Total - Erros)}{Total} \times 100\% = \frac{(4 - 0)}{4} \times 100\% = 100\% \quad 6.5$$

Para este evento o método se mostrou altamente confiável, pois não houve extrapolação dos valores de tensão de sequência positiva pós-evento em relação ao valor mínimo de TSP do rompimento de condutor.

6.3.5 Chaveamento de cargas não lineares

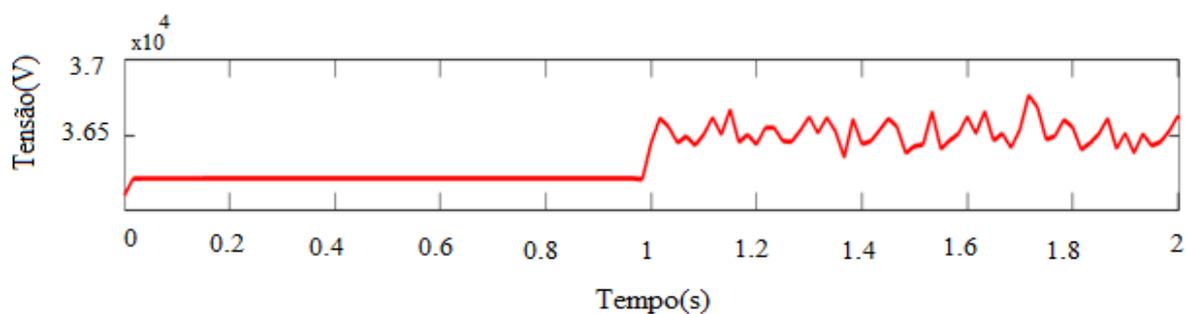
Nas Figuras 38, 39 e 40 é possível observar separadamente o comportamento da TSP com a inserção de cargas não lineares nos barramentos 802, 844 e 848 respectivamente. Já na Figura 41 é apresentado o comportamento da TSP de todos os barramentos analisados.

Figura 38 - Comportamento da TSP com cargas não lineares no barramento 802.



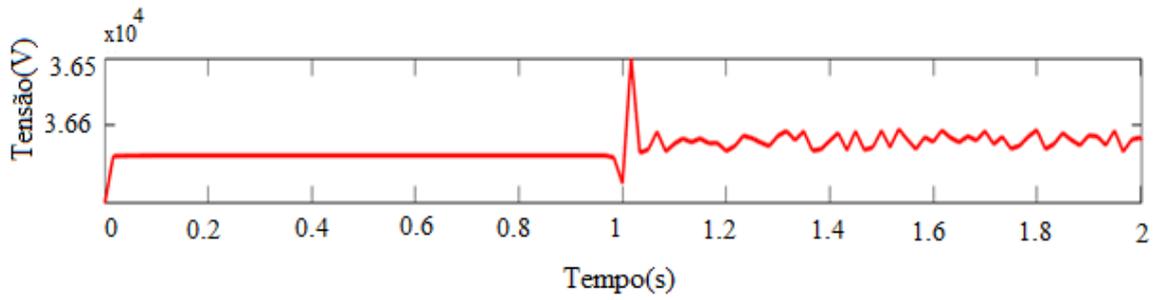
Fonte: Autora.

Figura 39 - Comportamento da TSP com cargas não lineares no barramento 844.



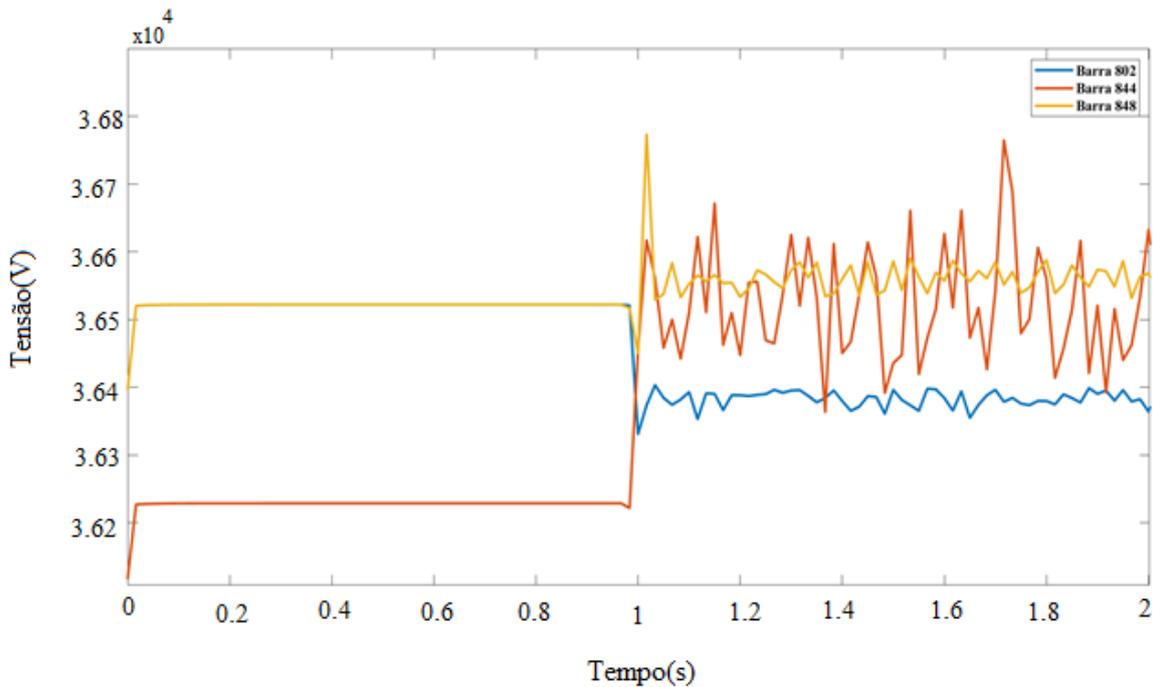
Fonte: Autora.

Figura 40 - Comportamento da TSP com cargas não lineares no barramento 848.



Fonte: Autora.

Figura 41 - Comportamento da TSP para inserção de cargas não lineares nos barramentos 802, 844 e 848.



Fonte: Autora.

Os valores de tensão de sequência positiva de pré-evento e pós-evento para chaveamentos de cargas não lineares nos barramentos estão registrados na Tabela 10. É possível observar que em dois casos não foram possíveis distinguir o evento de chaveamento de cargas não lineares do RC.

Tabela 10 - Valores de TSP para chaveamento de cargas não lineares.

Chaveamento	Pré Evento	Pós Evento
Barra 802	36522	36380
Barra 844	36229	36543
Barra 848	36522	36559
Média	36424	36494
Desvio Padrão	169.28	98.779
Máximo	36522	36559
Mínimo	36229	36380

Fonte: Autora.

A Equação 6.6 mostra o cálculo da porcentagem de correta de distinção do RC em relação ao chaveamento de cargas não lineares.

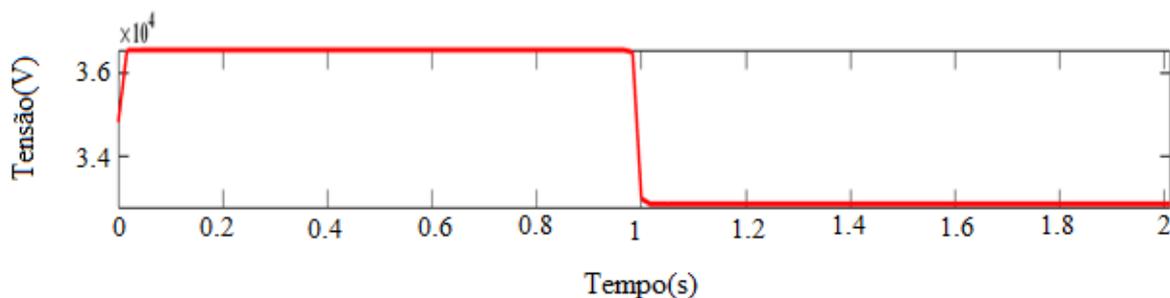
$$P_{SWSL\%20dB} = \frac{(Total - Erros)}{Total} \times 100\% = \frac{(3 - 2)}{3} \times 100\% = 33,3\% \quad 6.6$$

Neste distúrbio foi possível a identificação e distinção do RC apenas na barra 802, sendo, portanto um resultado pouco satisfatório.

6.3.6 Sag e Swell

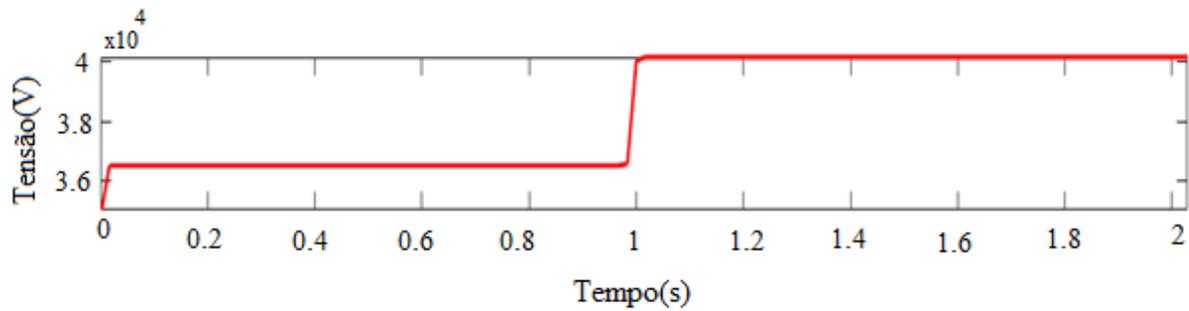
Na Figura 42 é possível observar o comportamento da TSP para o distúrbio de afundamento de tensão (*sag*). Já na Figura 43 é demonstrado o comportamento para a elevação de tensão (*swell*). A comparação dos eventos é vista na Figura 44, nela notam-se claramente as diferenças de comportamento.

Figura 42 - Comportamento da TSP para afundamento de tensão (*sag*).



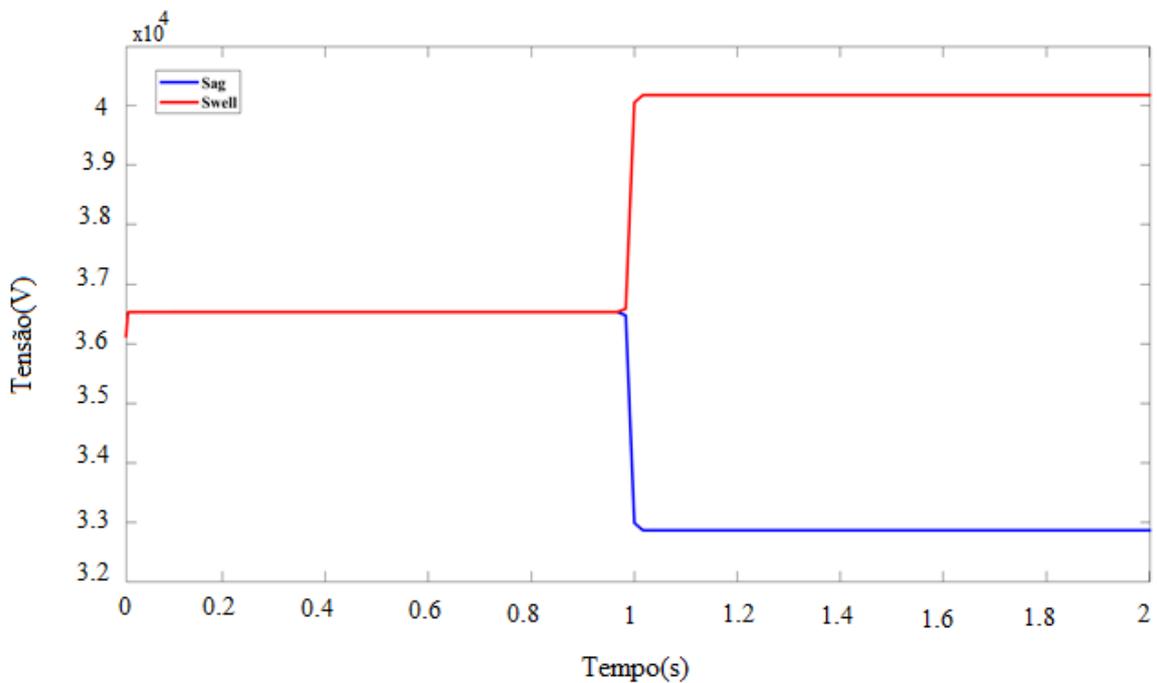
Fonte: Autora.

Figura 43 Comportamento TSP para elevação de tensão (*swell*).



Fonte: Autora.

Figura 44 - Comportamento da TSP para *sag* e *swell*.



Fonte: Autora.

Os valores de TSP para afundamento (*sag*) e elevação (*swell*) de tensão são registrados na Tabela 11, onde constam os valores da TSP de pré-evento e pós-evento para os dois eventos. Como destacado em vermelho, não foi possível distinguir o RC de qualquer caso de elevação de tensão. A Equação 6.7 mostra a porcentagem de correta detecção de todos os casos de afundamento de tensão e a Equação 6.8 mostra que houve zero por cento de detecção para o caso de elevação de tensão.

$$P_{sag}20dB = \frac{(Total - Erros)}{Total} \times 100\% = \frac{(34 - 0)}{34} \times 100\% = 100\% \quad 6.7$$

$$P_{swell}20dB = \frac{(Total - Erros)}{Total} \times 100\% = \frac{(34 - 34)}{34} \times 100\% = 0\% \quad 6.8$$

Tabela 6 – Valores de TSP pré-evento e pós-evento para *Sag* e *Swell*.

Evento	Pré Falta	Pós Falta
Sag	36532	32870
Swell	36532	40174
Média	36532	36522
Desvio Padrão	0	5164.9
Máximo	36532	40174
Mínimo	36532	32870

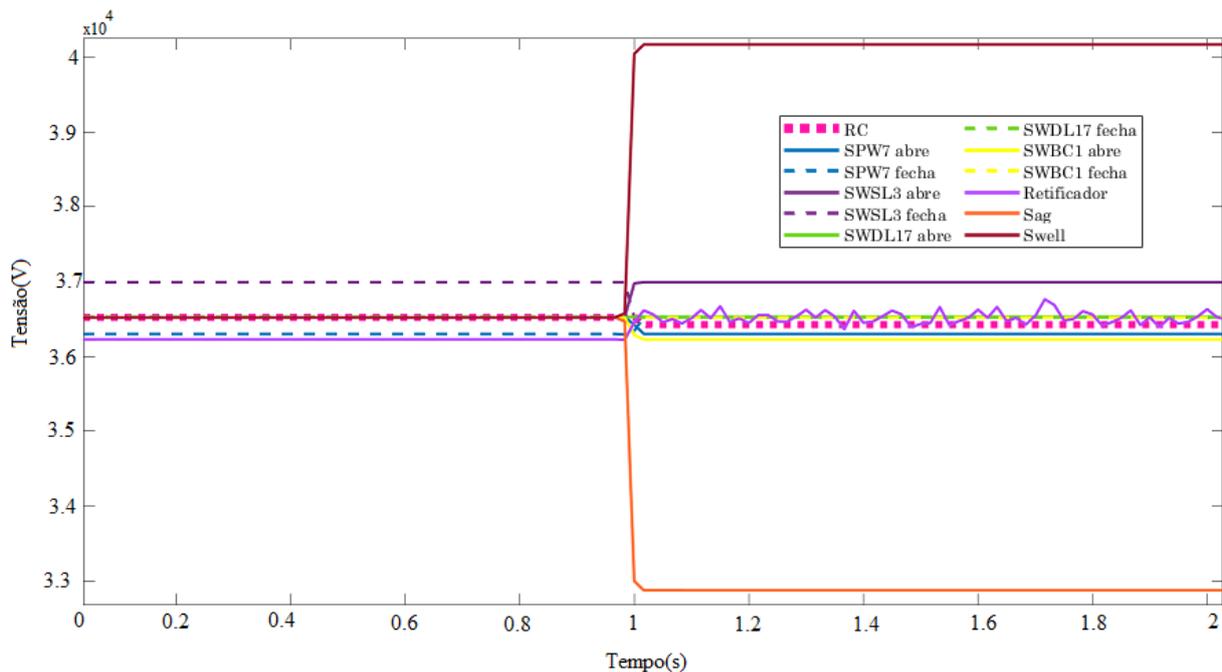
Fonte: Autora.

Para os distúrbios de *sag* e *swell* foi feita uma simulação para cada barramento totalizando 34 eventos para *sag* e 34 eventos para *swell*, para o caso de afundamento de tensão foi obtido um resultado de 100% de confiabilidade, já na elevação de tensão não houve evento que pudessem distingui-lo de um RC, e isso se dá pela característica do evento que é justamente um aumento da tensão, ou seja, ultrapassando o valor limite definido.

6.3.7 Distúrbios no Barramento 844

Foi realizada comparações dos valores absolutos da TSP para os eventos ocorridos na barra 844. O barramento foi escolhido por está localizado eletricamente mais distante da subestação, também por ser uma barra fim de linha e com pouco carregamento. A Figura 45 exibe a comparação dos valores absolutos da TSP com SNR igual a 20 dB e ângulo de chaveamento em 90°, portanto todos eventos ocorrem em 1 segundo.

Figura 45 - TSP para os eventos testados no barramento 844.



Fonte: Autora.

Os valores da TSP de pré-evento e pós-evento para todos os eventos ocorridos na barra 844 estão registrados na Tabela 12, em amarelo está o valor de tensão para o rompimento do condutor, e em verde são os eventos que não puderam ser distinguidos do RC, pois os valores de tensão ultrapassaram o valor limite.

Tabela 7 - Valores da TSP para eventos no barramento 844

Chaveamento	Pré Evento (V)	Pós Evento (V)
Rompimento de Condutor	36522	36425
SWP7 abre	36522	36302
SWP7 fecha	36302	36522
SWSL3 abre	36522	36994
SWSL3 fecha	36994	36522
SWDL17 abre	36522	36530
SWDL17 fecha	36530	36522
SWBC1 abre	36522	36229
SWBC1 fecha	36229	36522
Retificador	36229	36543
Sag	36522	32870
Swell	36522	40174
Média	36495	36513
Desvio Padrão	198.7	1567.9
Máximo	36994	40174
Mínimo	36229	32870

Fonte: Autora.

7 CONCLUSÃO

O problema relacionado ao rompimento de condutor no sistema de distribuição de energia elétrica é objeto de estudos e gera grande preocupação no setor elétrico, já que este problema impõe grandes riscos aos seres vivos, e pela perda pecuniária imposta às empresas de energia elétrica.

Este trabalho analisou o potencial do uso da TSP para identificar o rompimento do condutor em um sistema de distribuição. Para este estudo foi utilizado o sistema de 34 barras do IEEE, para testar a capacidade da TSP em detectar o RC e distinguir dos demais eventos de distúrbios de tensão. Os resultados obtidos indicaram a capacidade de detectar o RC, porém para alguns casos o método não foi capaz de distinguir o RC dos demais eventos, como foi o caso do *swell*, pois o valor de TSP é bem maior que o valor mínimo de TSP para o RC, que é o valor limite estabelecido.

Comparando cada evento com o rompimento de condutor foi possível observar que os eventos que obtiveram melhores resultados foram o chaveamento de banco de capacitores e o de afundamento de tensão (*sag*), a capacidade de distinção para ambos os eventos foi de 100%. A elevação de tensão (*swell*) foi o distúrbio que não foi possível ser distinguido do RC e isso está associado à sua característica que é o aumento da tensão, outro distúrbio com baixa capacidade de distinção foi o chaveamento de cargas não lineares, os demais distúrbios obtiveram resultados superiores a 50%.

Os resultados obtidos com este estudo mostraram que o uso da TSP é uma alternativa viável para a detecção do rompimento do condutor, além disso, é uma alternativa economicamente atraente. Ainda é necessária uma estratégia diferente para definir o limiar para reduzir o número de erros.

As ondas de tensão de sequencia positiva, em regime transitório, possuem comportamentos característicos diferentes para cada distúrbio, em um tempo de dois segundos, podendo ser usado para a distinção e detecção do RC.

7.1 Sugestões de trabalhos futuros

Este trabalho teve como ênfase analisar o uso da TSP para a detecção do rompimento de condutor no SD. Porém outros estudos poderão ser desenvolvidos, a partir deste, como a realização de testes deste método em outros modelos de SDs. Outra sugestão é a associação deste método a outros métodos de distinção para potencializar os resultados e propor uma ferramenta capaz de ser utilizada em tempo real nos SDs, proporcionando uma maior qualidade de energia.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – **Qualidade da Energia Elétrica**, 2020, Brasil.

AL-GHANNAM, S. H.; KHAN, Y.; AHMAD, U.; MALIK, N. H.; AL-ARAINY, A. A. e AL-SHAHRANI, B. S. **Development of open (broken) conductor detection system for high resistivity areas**. Saudi Arabia Smart Grid (SASG), 2017, pp. 1–8. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/8356491> > Acesso em: 22/11/2020.

ALVARENGA, R. F.; SALES, A. G. B.; FOLHA, A. A. A. e SILVA, J. C. **Classificação De Distúrbios De Tensão Em Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica Utilizando Sistemas Imunológicos Artificiais**. Simpósio de Estudos em Engenharia Elétrica do Tocantins. 2017.

CARLETO, N. **Subestações Elétricas**. Brasília. Distrito Federal. NT Editora. 2017. Disponível em < <https://avant.grupont.com.br/dirVirtualLMS/arquivos/texto/2b97358dffc8ed5b9881db23255d654c.pdf> > Acesso em 20/11/2020.

DUBÉ, L. **How to use MODELS-based user-defined network components in ATP**. In: EUROPEAN EMTP USERS GROUP MEETING, 1996, Budapest. Proceedings...

HOIDALEN. H. K., AtpdrawTM- **The Graphical Preprocessor To Atp Electromagnetic Transients Program**. Disponível em: <<https://www.atpdraw.net/>> Acesso em 22/11/2020.

IEEE. **IEEE PES Distribution Systems Analysis Subcommittee Radial Test Feeders**. Disponível em: <<https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Acesso em: 22/11/2020.

KINDERMANN, G. **Proteção do Sistema Elétrico de Potência**. Vol 3. 3ª ed. Florianópolis. Santa Catarina: LabPlan, 2009.

LIMA, F. P. A.; LOPES, M. L. M.; LOTUFO, A. D. P. e MINUSSI, C. R. An artificial immune system with continuous-learning for voltage disturbance diagnosis in electrical distribution systems. **Expert Systems with Applications**, v. 56, p. 131-142. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/172756>>. Acesso em 23/11/2020.

MISHRA, M. e PANIGRAHI, R. R., “**Taxonomy of high impedance fault detection algorithm**,” Measurement, 2019. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119308218?via%3Dihub> > Acesso em: 22/11/2020.

NETO, R. A. P. **Sistemas Para Detecção De Falta De Alta Impedância E De Rompimento De Condutores Em Redes De Distribuição De Energia Elétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia, Área de Concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais) - Programa de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: < https://www.protcom.net/Literatura/Protecao/Redes/TESES/2005_DETEC%C3%87%C3%83O%20DE%20FALTA%20DE%20ALTA%20IMPED%C3%82NCIA%20_ROMPIMENTO%20CONDUTORES.pdf > Acesso em: 19/11/2020.

O'BRIEN, W.; UDREN, E.; GARG, K.; HAES, D. e SRIDHARAN, B. **Catching falling conductors in midair detecting and tripping broken distribution circuit conductors at protection speed**. Annual Conference for Protective Relay Engineers(CPRE), 2016, pp. 1–11. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/7914881> > Acesso em : 22/11/2020.

OLIVEIRA, F. D. **Monitoramento e Análise de Afundamentos Momentâneos de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: < <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1045M.PDF> > Acesso em: 16/04/2021.

OLIVEIRA JUNIOR, D. A.. **Faltas de Alta Impedância: Detecção e Localização de Rompimento de Condutores em Circuito Primário de Redes Aéreas de Distribuição Baseado em Desequilíbrio de Tensão.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/AVFV-6WHFU5>>. Acesso em 27/11/2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, Padrões de Desempenho da Rede Básica – Submódulo 2.8. **Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes.** Procedimentos de Rede, revisão 2, 2016, Brasil. Disponível em: <http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%20%2FSubm%C3%B3dulo%202.8%2FSubm%C3%B3dulo%202.8.pdf> > Acesso em 27/11/2020.

PAREDES, H. K. M.; REIS P. H. F. e DECKMANN, S. M. **Caracterização De Cargas Lineares E Não Lineares Em Condições De Tensões Não Senoidais.** Eletrôn. Potên., Campo Grande, v. 22, n. 1, p. 50-62, jan./mar. 2017. Disponível em: <<https://sobraep.org.br/site/uploads/2018/06/rvol22no1p15.pdf>> Acesso em: 15/04/2021.

PAULILLO, G. e TEIXEIRA, M. D. Variações de Tensão de Curta Duração – Parte I. **Qualidade de Energia.** Cap. 5. 2013. Disponível em: <http://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/2013/09/ed-88_Fasciculo_Cap-V-Qualidade-de-energia.pdf>. Acesso em 27/11/2020.

POMILIO, J. A. **Efeitos e Causas de Harmônicas no Sistema de Energia Elétrica.** Universidade de Campinas, Campinas – SP, 2006. Disponível em: <<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html>> Acesso em: 20/11/2020.

ROCHA, J. E. **Qualidade da Energia Elétrica.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2016. Disponível em: <https://www.protcom.net/Literatura/Medicao/Qualidade/NOTAS%20DE%20AULA/NOTAS%20DE%20AULA_QUALIDADE%20ENERGIA%20EL%C3%89TRICA.pdf> Acesso em 20/11/2020.

SANTOS, C. J. Transitórios Originados Pelo Chaveamento De Banco De Capacitores Da Concessionária Em Um Sistema Elétrico De Distribuição. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2000. Disponível em: < https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-01112017-111100/publico/Dissert_Santos_ClaudioJ.pdf > Acesso em 20/11/2020.

SILVA, J. C., Análise da tensão de sequência negativa aplicada à detecção do rompimento do condutor em sistemas de distribuição. Relatório Técnico (Pós-doutorado), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo – USP . Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/351049695_Analise_da_tensao_de_sequencia_negativa_aplicada_a_deteccao_do_rompimento_do_condutor_em_sistemas_de_distribuicao >. Acesso: 10/03/2021.

SILVA, J. C; LOPES, N. G; TRONDOLI, L.H.P.C. e VIEIRA, J. C. M. Analysis of the Negative Sequence Voltage to Detect Conductor Break in Distribution Systems. 2020.

SILVA, L. R. Avaliação Da Presença De Cargas Não Lineares Na Rede Elétrica Utilizando O Software Openss. UNB. Brasília – DF, 2016. Disponível em: < https://fga.unb.br/articles/0001/6697/Lucas_Rodrigues_TCC_I__1_.pdf > Acesso em: 20/11/2020.

SOUZA, E. S. Novas Modelagens Matemáticas para Otimização do Problema de Restauração em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/153237/souza_es_dr_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y > Acesso em 15/04/2021.

STEVENSON, W. D. Elementos de análise de sistemas de potencia. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986.

VELAYUDHAM T.; GANESH, S. e KANIMOZHI, R. **Locating Ground Fault in Distribution Systems Using Smart meter**. International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA 2017), pp. 104-109. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/8212774> > Acesso em: 22/11/2020.

VIEIRA, F. L.; FILHO, J. M. C.; SILVEIRA, P. M.; GUERRERO, C. A. V. e LLEITE, M. P. **High impedance fault detection and location in distribution networks using smart meters**. International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2018, pp. 1-6. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/8378825> > Acesso em: 22/11/2020.

APÊNDICE A – Publicações da Autora

Santos, N. F. T., Santos, G. A., Kharaghani, F. A., Freitas, S. C. L and Silva, J. C. ,
Simulation Tutorial in ATPdraw software – IEEE 4 Nodes Test Feeder – Part 1, 2020
IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition – Latin America (T&D
LA) | 978-1-7281-4155-8/20\$31.00©2020 IEEE | DOI: 10.1109/TDLA47668.2020.9326094

SANTOS, N. F. T., SANTOS, G. A., KHARAGHANI, F. A., TELES, J. B. and
Silva, J. C. **An Artificial Immunological System Applied to the Diagnosis of Voltage
Disorders In Electric Distribution Systems**, Brazilian Journal of Development, Curitiba,
v.7, n.1, p.9996-10010, Jan. 2021,| DOI:10.34117/bjdv7n1-67