



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

**HELDER MANDUCA ARAÚJO DO NASCIMENTO**

**DETECÇÃO DE ROMPIMENTO DE CONDUTORES EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA TENSÃO DE SEQUÊNCIA  
POSITIVA**

Palmas/TO  
2021

**HELDER MANDUCA ARAÚJO DO NASCIMENTO**

**DETECÇÃO DO ROMPIMENTO DE CONDUTORES EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA TENSÃO DE SEQUÊNCIA  
POSITIVA**

Este trabalho de conclusão de curso II foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Dr. Jadiel Caparrós da Silva.

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

---

N244d Nascimento, Helder Manduca Araújo do .  
Detecção De Rompimento de Condutores em Sistemas Elétricos de  
Potência Através da Tensão de Sequência Positiva. / Helder Manduca Araújo  
do Nascimento. – Palmas, TO, 2021.  
77 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus  
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2021.

Orientador: Jádriel Caparrós da Silva

1. Tensão de Sequência Positiva. 2. Sistemas de Distribuição. 3. Sistema  
Elétrico. 4. Rompimento de Condutor. 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

HELDER MANDUCA ARAÚJO DO NASCIMENTO

## DETECÇÃO DE ROMPIMENTO DE CONDUTORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA TENSÃO DE SEQUÊNCIA POSITIVA

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: 15 / 12 / 2021

Banca Examinadora



---

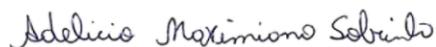
Prof. Dr. Jadiel Caparrós da Silva, UFT.



Documento assinado digitalmente  
KATHY CAMILA CARDOZO OSINSKI SENHORINI  
Data: 16/12/2021 18:45:55-0300  
Verifique em <https://verificador.itl.br>

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kathy Camila C. Osinski Senhorini, UFT.



---

Prof. Dr. Adelicio Maximiano Sobrinho,  
UFT.

Palmas-TO, 2021

*Dedico esse trabalho de conclusão de curso a minha família e a todos que me apoiaram e incentivaram ao longo do processo.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por permitir que eu esteja nesse mundo até o dia de hoje com muita saúde e disposição para cada dia ser uma pessoa melhor e mais empenhada com meus estudos, parentes e amigos.

Agradeço também aos meus pais Pedro Gomes do Nascimento e Elizabeth Rodrigues de Araújo por me criarem com muito amor e educação, nunca deixarem me faltar nada nessa vida, e por sempre me apoiarem em minhas decisões, me incentivando cada dia a ser uma pessoa melhor.

A minha irmã, Thalita Araújo do Nascimento, que sempre esteve ao meu lado me ajudando em momentos difíceis e sempre servindo de inspiração pra mim para eu ser sempre uma pessoa melhor, dedicada e corajosa.

Aos meus amigos que conheci ao longo dessa jornada na Universidade Federal do Tocantins, em especial, os meus colegas Murilo de Avila Dilli e Carlos André Rodrigues Bastos, que me acompanharam durante boa parte dessa jornada, e nesse tempo, vivemos muitas situações e aprendemos muitas coisas juntos, e acabaram por se tornar indispensáveis nessa “vida acadêmica”, juntamente também de minhas amigas Isabel Pereira Ribeiro De Menezes, Alana Pereira de Souza e Eduarda Rodrigues de Souza, as quais me ajudaram em muitos momentos, seja no âmbito universitário quanto em momentos de lazer, onde sempre nos divertimos muito.

Ao PET (Programa de Educação Tutorial) de Engenharia Elétrica, a todos os integrantes e a nossa tutora Dra. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini, que me proporcionaram diversas experiências novas em diferentes áreas, as quais, com certeza, me ajudarão muito no futuro.

Agradeço também aos meus professores, a professora Regiani Crystina Barbazelli e a professora Marilene Andreia Mantovani que me ensinaram o fundamental para dar continuidade no curso, aos professores Dr. Adélcio Maximiano Sobrinho, Dra. Stefani Carolline Leal de Freitas e Dr. Sergio Manuel Rivera Sanhueza, os quais me ensinaram muito sobre os sistemas elétricos, o que foi essencial para a produção desse trabalho de conclusão de curso. A professora Dra. Gisele Souza Parmezzani Marinho, a qual coordena a matéria de TCC 1, e também foi fundamental na realização deste trabalho juntos aos seus conhecimentos fornecidos para a realização do mesmo. E por último, mas não menos importante, ao meu orientador Jádriel Caparrós da Silva, que me aceitou como seu orientando, e sempre mostrou interesse em me ajudar na realização deste trabalho, sempre disponibilizando de seu tempo para

me orientar e “quebrar a cabeça” junto comigo a fim de chegarmos no objetivo, que era, e ainda é, terminar esse trabalho.

Enfim, agradeço a todos que estiveram envolvidos nessa jornada comigo, incluindo aqueles que não mencionei aqui, pois sei que o mínimo que uma pessoa faz, já muda e muito as emoções e atitudes de uma pessoa, e sem o apoio de todos que, mesmo por um minuto, conversaram comigo ao longo de todos esses anos, eu não seria quem eu sou hoje.

“A verdadeira motivação vem de realização, desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e reconhecimento.”

**Frederick Herzberg**

## RESUMO

O seguinte Trabalho de Conclusão de Curso II examina a eficiência da Tensão de Sequência Positiva (TSP). Comparado com outros distúrbios comuns em sistemas de distribuição de energia, ele é usado para detectar e distinguir quebras de condutor e outros eventos do sistema, como: comutação de banco de capacitores, comutação de carga distribuída, comutação de carga centralizada, comutação de ramificação lateral e dos distúrbios de tensão. Além de reduzir os custos de implantação e manutenção dos equipamentos de medição utilizados no sistema de distribuição de energia, o método aplicado é simples e prático de ser implementado no sistema de distribuição de energia. Os sistemas de distribuição de energia utilizados para os testes são os alimentadores de 5 barramentos, 33 barramentos, e no sistema teste IEEE de 34 barramentos. Para verificar o desempenho do método, foi utilizado o programa de simulação computacional ATPDraw para testá-lo e extrair as características do sinal de tensão. Em seguida, através do *software* Octave, foi adicionado ruído branco gaussiano ao sinal trifásico, para testar se o método é considerado à prova de ruído. Posteriormente, o sinal foi filtrado por um filtro Butterworth de segunda ordem com uma frequência de corte de 180 Hz. Após isso, as tensões trifásicas filtradas  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  são colocadas em janela em cada ciclo ( $\gamma$ ) e uma taxa de amostragem de 128 amostras por ciclo. Em seguida, é utilizado a Transformada Rápida de Fourier para calcular o fasor. Por fim, de forma a atingir o número mínimo de equipamentos de medição implantados no sistema de distribuição, o que permite a redução dos custos operacionais do sistema, o mesmo é implementado no *software* GAMS, que permite otimizar os melhores pontos de medição de tensão do sistema. Os resultados mostram que a detecção de rompimentos condutores através do TSP é eficaz e o distingue de outros eventos do sistema, portanto, um método eficiente, preciso, robusto e confiável é demonstrado para ajudar a corrigir as interferências no sistema elétrico e fornecer mais confiabilidade e qualidade aos sistemas de distribuição de energia. O trabalho continuará aplicando o mesmo método a outros sistemas de distribuição de energia com diferentes topologias e características para verificar a eficácia do método proposto.

**Palavras-chaves:** Detecção. Rompimento de Condutor. Tensão de Sequência Positiva. Sistema Elétrico. Distinção de Distúrbios. Sistemas de Distribuição.

## ABSTRACT

The following Course Conclusion Work II Positive Sequence Voltage (TSP) efficiency exam. Compared to other disturbances common in power distribution systems, it is used to detect and distinguish conductor breaks and other system events such as: capacitor bank switching, distributed load switching, centralized load switching, side branch switching and tension disorders. In addition to reducing the implementation and maintenance costs of the distribution equipment used in the energy distribution system, the planned method is simple and practical to be implemented in the energy distribution system. The power distribution systems used for the tests are the 5-bus, 33-bus, and IEEE 34-bus system test feeders. To verify the method's performance, it was used in the computer simulation program ATPDraw to test and extract the voltage signal characteristics. Then, through the Octave software, white Gaussian noise was added to the three-phase signal, to test whether the method is considered noise proof. Afterwards, the signal was filtered by a second-order Butterworth filter with a cut-off frequency of 180 Hz. After that, the filtered three-phase voltages  $V_a$ ,  $V_b$  and  $V_c$  are windowed in each cycle ( $\gamma$ ) and a sampling rate of 128 samples per cycle. Next, the Fast Fourier Transform is used to calculate the phasor. Finally, in order to reach the minimum number of equipment deployed in the distribution system, which allows for the reduction of the system's operating costs, it is implemented in the GAMS software, which allows optimizing the best voltage points in the system. The results show that detection of conductive breaks through the TSP is effective and distinguishes it from other system events, therefore, an efficient, accurate, robust and reliable method is made to help correct interferences in the electrical system and provide more reliability and quality to energy distribution systems. The work will continue to apply the same method to other power distribution systems with different topologies and characteristics to verify the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** Detection. Conductor Disruption. Positive Sequence Voltage. Electrical system. Distinction from Disturbances. Distribution Systems.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - MODELS de distúrbios de tensão do ATPDraw.....	28
Figura 2 - Gráfico do distúrbio <i>Sag</i> ocorrendo nas três fases simultaneamente.....	28
Figura 3 - Gráfico do distúrbio <i>Swell</i> ocorrendo nas três fases simultaneamente.....	29
Figura 4 - Gráfico do distúrbio <i>Outage</i> ocorrendo na fase A.....	29
Figura 5 - Gráfico das distorções harmônicas ocorrendo nas três fases simultaneamente.....	30
Figura 6 - Gráfico de <i>Sag</i> com Harmônicos ocorrendo nas três fases simultaneamente.....	30
Figura 7 - Gráfico de <i>Swell</i> com Harmônicos ocorrendo nas três fases simultaneamente.....	31
Figura 8 - Gráfico da Oscilação Transitória ocorrendo nas três fases simultaneamente.....	32
Figura 9 - Gráfico do evento Flicker ocorrendo nas três fases simultaneamente.....	32
Figura 10 - Gráfico do evento Fluctuation ocorrendo nas três fases simultaneamente.....	33
Figura 11 - Resistores e chave substituindo resistor na fase A. ....	34
Figura 12 - Configurações da chave inserida na fase A. ....	34
Figura 13 - Chave para o chaveamento de carga distribuída.....	35
Figura 14 - Chave para o chaveamento de ramo lateral. ....	35
Figura 15 - Chave para o chaveamento de capacitor.....	36
Figura 16 - Chave para o chaveamento de carga concentrada. ....	36
Figura 17 - Sistema teste de 5 barramentos.....	37
Figura 18 - Chaveamentos no sistema de 5 barramentos. ....	38
Figura 19 - Chaveamentos no sistema IEEE de 34 barramentos.....	39
Figura 20 - Chaveamentos no sistema de 33 barramentos. ....	40
Figura 21 - Decomposição de um sistema trifásico desbalanceado. ....	41
Figura 22 - Método utilizado para a simulação. ....	43
Figura 23 - Fluxograma da lógica utilizada nos sistemas teste de 5 barramentos e IEEE de 34 barramentos. ....	45
Figura 24 - Fluxograma da lógica utilizada no sistema teste de 33 barramentos.....	48
Figura 25 - Zonas de monitoramento de cada barramento.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações e Parâmetros de Modelagem Matemática	27
Tabela 2 - Eventos simulados no sistema de 5 barramentos.	38
Tabela 3 - Eventos simulados no sistema IEEE de 34 barramentos.	39
Tabela 4 - Eventos simulados no sistema IEEE de 33 barramentos.	40
Tabela 5 - Alocação ideal dos <i>PMUs</i> através do GAMS para um sistema de 5 barramentos.	44
Tabela 6 - Local ideal das <i>PMUs</i> recomendado pelo GAMS para o sistema IEEE de 34 barramentos.	46
Tabela 7 - Local ideal das <i>PMUs</i> recomendado pelo GAMS para o sistema de 33 barramentos.	47
Tabela 8 - Valores máximos e mínimos da TSP em cada evento no Caso I do sistema teste de 5 barramentos.	50
Tabela 9 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso I do sistema teste de 5 barramentos.	51
Tabela 10 - Eficiência do sistema geral do Caso I do sistema teste de 5 barramentos.	51
Tabela 11 - Valores máximos e mínimos da TSP em cada evento no Caso II do sistema teste de 5 barramentos.	51
Tabela 12 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso II do sistema teste de 5 barramentos.	52
Tabela 13 - Eficiência do sistema geral do Caso II do sistema teste de 5 barramentos.	52
Tabela 14 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso III do sistema teste de 5 barramentos	53
Tabela 15 - Eficiência do sistema geral do Caso III do sistema teste de 5 barramentos.	53
Tabela 16 - Resumo dos Resultados encontrados por Caso do sistema teste de 5 barramentos.	53
Tabela 17 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	54
Tabela 18 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	55
Tabela 19 - Eficiência geral do sistema do Caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	55
Tabela 20 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso II do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	56
Tabela 21 - Eficiência do sistema geral do Caso II do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	

	57
Tabela 22 - Valores máximos e mínimos da TSP no Caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	57
Tabela 23 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	58
Tabela 24 - Eficiência do sistema geral do Caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	58
Tabela 25 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso V do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	59
Tabela 26 - Eficiência do sistema geral do Caso V do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	59
Tabela 27 - Revisão dos Resultados encontrados por Caso do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	60
Tabela 28 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso I do sistema teste de 33 barramentos.	61
Tabela 29 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso I do sistema teste de 33 barramentos.	61
Tabela 30 - Eficiência do sistema geral do Caso I do sistema teste de 33 barramentos.	62
Tabela 31 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso II do sistema teste de 33 barramentos.	62
Tabela 32 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso II do sistema teste de 33 barramentos.	62
Tabela 33 - Eficiência do sistema geral do Caso II do sistema teste de 33 barramentos.	63
Tabela 34 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso III do sistema teste de 33 barramentos.	63
Tabela 35 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso III do sistema teste de 33 barramentos.	64
Tabela 36 - Eficiência do sistema geral do Caso III do sistema teste de 33 barramentos.	64
Tabela 37 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso IV do sistema teste de 33 barramentos.	65
Tabela 38 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso IV do sistema teste de 33 barramentos.	65
Tabela 39 - Eficiência do sistema geral do Caso IV do sistema teste de 33 barramentos.	65
Tabela 40 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso V do sistema teste de 33 barramentos.	

	66
Tabela 41 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso V do sistema teste de 33 barramentos.	66
Tabela 42 - Eficiência do sistema geral do Caso V do sistema teste de 33 barramentos.	67
Tabela 43 - Função de cada medidor na metodologia utilizada.	67

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

SEP	Sistemas Elétricos de Potência
TSP	Tensão de Sequência Positiva
DQEE	Distúrbios de Qualidade De Energia
CCF	Condição de Falha De Fase
FAI	Faltas de Alta Impedância
SD	Sistema de Distribuição
RC	Rompimento de Condutor
HD	High Definition
EOS	Estatísticas de Ordem Superior
MLP	Multilayer Perceptron
RNA	Rede Neural Artificial
DT	Distúrbio de Tensão
RMS	Root Mean Square
TSN	Tensão de Sequência Negativa

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>1.1 Considerações Iniciais</b>	<b>18</b>
<b>1.2 Problemas de Pesquisa</b>	<b>19</b>
1.2.1 Justificativa	20
<b>1.3 Objetivos</b>	<b>20</b>
1.3.1 Objetivo Geral	20
1.3.2 Objetivos Específicos	20
<b>1.4 Estrutura do Trabalho</b>	<b>21</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b>	<b>22</b>
<b>2.1. Rompimento de condutores</b>	<b>22</b>
<b>2.2. Métodos para a Identificação de Rompimentos de Condutores</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Tensão de Sequência Positiva</b>	<b>26</b>
<b>3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Distúrbios de Tensão</b>	<b>27</b>
3.1.1 Sag	28
3.1.2 Swell	28
3.1.3 Outage	29
3.1.4 Harmônicos	30
3.1.5 Sag com Harmônicos	30
3.1.6 Swell com Harmônicos	31
3.1.7 Oscilação Transitória	31
3.1.8 Flicker	32
3.1.9 Fluctuation	33
<b>3.2 Rompimento de Condutores</b>	<b>33</b>
<b>3.3 Chaveamento de Cargas</b>	<b>34</b>
3.3.1 Chaveamento de Carga Distribuída (SWDL)	35
3.3.2 Chaveamento de Ramo Lateral (SWP)	35
3.3.3 Chaveamento de Capacitor (SWBC)	36
3.3.4 Chaveamento de Carga Concentrada (SWSL)	36
<b>3.4 Sistema Teste de 5 Barramentos</b>	<b>37</b>
<b>3.5 Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos</b>	<b>38</b>
<b>3.6 Sistema Teste de 33 Barramentos</b>	<b>40</b>

<b>4. METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Tensão de Sequência Positiva</b>	<b>41</b>
<b>4.2 OCTAVE</b>	<b>42</b>
<b>4.3 GAMS STUDIO</b>	<b>43</b>
4.3.1 Sistema Teste de 5 barramentos	44
4.3.2 Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos	46
4.3.3 Sistema Teste de 33 Barramentos	47
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>50</b>
<b>5.1 Sistema Teste de 5 barramentos</b>	<b>50</b>
5.1.1 Caso I: Sistema com medidor alocado na subestação (1)	50
5.1.2 Caso II: Sistema com medidor alocado no barramento 5	51
5.1.3 Caso III: Sistema com um medidor alocado na subestação (1) e um medidor alocado no barramento 5	52
5.1.4 Resumo dos resultados obtidos para cada Caso do sistema de 5 barramentos	53
<b>5.2 Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos</b>	<b>54</b>
5.2.1 Caso I: Sistema com todos os barramentos e medidor alocado na subestação	54
5.2.2 Caso II: Sistema sem os barramentos críticos e medidor alocado na subestação	55
5.2.3 Caso III: Sistema com todos os barramentos e o medidor alocado no barramento 830	57
5.2.4 Caso IV: Sistema sem os barramentos críticos e o medidor no barramento 830	58
5.2.5 Caso V: Sistema sem os barramentos críticos e com um medidor alocado na subestação e um medidor alocado no barramento 830	58
5.2.6 Revisão dos Resultados Obtidos nos 5 Casos para o Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos	59
<b>5.3 Sistema Teste de 33 Barramentos</b>	<b>60</b>
5.3.1 Caso I: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 17	61
5.3.2 Caso II: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 21	62
5.3.3 Caso III: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 24	63
5.3.4 Caso IV: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 32	64
5.3.5 Caso V: Sistema teste sem barramentos críticos com medidores nos barramentos 17, 21, 24 e 3266	
<b>6. CONCLUSÃO</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE A: TRABALHOS PUBLICADOS</b>	<b>75</b>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) consiste basicamente em quatro partes: geração, transmissão que fica encarregada pelo transporte da energia elétrica entre a geração e a distribuição, a qual é responsável por entregar a energia elétrica ao consumidores e comercialização. Na geração de energia, geralmente existe um motor responsável pela geração de energia elétrica, normalmente denominado gerador. Na maioria dos sistemas de energia, os geradores responsáveis pela geração de energia elétrica são geradores síncronos, que são transmitidos e distribuídos aos usuários finais, e também existem sistemas de geração limpa, que não dependem de um motor. Essa vantagem se deve ao fato de que essas máquinas são capazes de gerar eletricidade em frequência constante (FRANCO et al., 2019).

Nos últimos anos, a indústria de energia passou por uma reestruturação, especialmente nas últimas duas décadas, várias mudanças, como o crescimento da geração de energia distribuída e o avanço da tecnologia de eletrônica de potência, têm desempenhado um papel cada vez mais importante nos aspectos técnicos e comerciais do SEP. As mudanças no setor de energia estão relacionadas à necessidade de se obter um alto nível de continuidade do fornecimento e qualidade de energia, levando ao desenvolvimento de sistemas que possam detectar e classificar as falhas do sistema de energia, com o objetivo de monitorar e reconstruir o abastecimento de uma forma adequada, eficiente e segura (NASCIMENTO et al., 2021).

Os SEPs dependem cada vez mais da aplicação de interruptores e dispositivos de proteção de estado sólido, bem como conversores de frequência e cargas não lineares. Esses elementos são os principais motivos para alterar as características da forma de onda da energia transmitida. Essas alterações são classificadas como Distúrbios de Qualidade de Energia (DQEE). Além de reduzir a vida útil do equipamento, o DQEE também pode causar mau funcionamento ou falhas de dispositivos de proteção, danos a bancos de dados de serviços de tecnologia da informação e ações imprevisíveis de sistemas de controle automático (PINHO; GARCIA, 2021).

Uma Condição de Falha de Fase (CFF) refere-se à desconexão da alimentação monofásica ou bifásica fora da geração. Quando a CFF ocorre, ele fornece energia desequilibrada para o equipamento de utilização, causando falha do equipamento ou falha na instalação. Existem muitos motivos para a falta de fase, como um conector de barramento

danificado ou uma conexão solta. Se a CFF ocorrer em um lado do transformador, a tensão induzida será gerada em ambos os lados, cuja magnitude é afetada pela conexão do enrolamento e pelas condições de carga. No entanto, os dispositivos de proteção de relé existentes não podem responder efetivamente às falhas em todas as condições operacionais (DU; TAN; 2021).

Condutores quebrados no sistema de distribuição de energia, e mesmo seu contato com superfícies de alta impedância, não tornarão o sistema de proteção sensível. Esse tipo de ocorrência e suas alterações costumam ser chamadas de Falhas de Alta Impedância (FAI). A concessionária acredita que uma falha gravíssima de alta impedância causará uma série de danos materiais e imateriais, como multas, penalidades administrativas, acidentes e mortes por choques elétricos (GRIMALDI, 2020).

As magnitudes de corrente de sequência positiva, negativa e zero em conjunto com as relações de ângulo de fase entre a tensão e corrente de sequência positiva e entre a tensão e corrente de sequência negativa podem ser um método eficaz para detectar condições de fase aberta. Esquemas de comparação de fase podem utilizar tensão e corrente de sequência positiva de transdutores de tensão de média tensão existentes e correntes convencionais e corrente de sequência negativa como um indicador primário de condições de fase aberta, no entanto, apesar da eficácia desse método, o mesmo demanda altos custos de implementação e manutenção, além de necessitar que o sistema de distribuição seja uma *smart grid* (SUFANA, 2020).

## 1.2 Problemas de Pesquisa

Hoje em dia, um dos principais problemas dos Sistemas de Distribuição (SD) de energia é o problema de detectar e identificar a quebra de condutores em SEPs. Quando ocorre uma quebra de condutor e o mesmo toca uma superfície de alta impedância (como concreto, asfalto, areia ou vegetação), pode ocorrer uma Falha de Alta Impedância (FAI), que normalmente não é localizada de forma segura e não pode ser diferenciada de outros eventos comuns na rede, e isso acaba por trazer riscos à propriedade e à vida humana (MISHRA; PANIGRAHI, 2019). Devido à corrente extremamente baixa desse tipo de falha, ele fará com que o esquema de proteção convencional falhe ao ativar porque requer uma corrente grande o suficiente (BHANDIA et al., 2020). Por essas razões, a relevância de detectar esse fenômeno é evidente.

### 1.2.1 Justificativa

O procedimento proposto da Tensão de Sequência Positiva (TSP) é mais simples do que os mecanismos citados neste trabalho, conforme expõem os resultados, que alcançam níveis idênticos de eficiência e, além disso, é um método mais econômico, por não ser preciso a utilização de dispositivos de comunicação avançados, *smart grids* com uma variedade de medidores e dispositivos inteligentes. Todos os testes foram modelados com o *software* ATP por meio da interface ATPDraw e o processamento e cálculo do TSP foram realizados com *software* matemático Octave. Os casos para a realização dos estudos foram modelados usando os sistemas teste de 5 barramentos, 33 barramentos, e IEEE de 34 barramentos. Além de modelar esses sistemas teste, também foram simulados os seguintes distúrbios de tensão no ATPDraw: *Sag*, harmônico, *Swell* com Harmônico, *Outage*, *Sag* com Harmônico, *Swell*, *flicker* e *fluctuation*. Além também dos eventos de chaveamento de banco de capacitores, chaveamento de ramo lateral, chaveamento de cargas distribuídas e chaveamento de cargas concentradas.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem o foco de apresentar um algoritmo para atender as variadas necessidades do SD e aplicá-lo à quebra de condutores, além de propor um instrumento que pode ser usado em SDs para fornecer energia de qualidade e confiabilidade, finalmente, ajudar a aplicar e desenvolver dispositivos que podem operar automaticamente para detectar quebras de condutor (antes que a FAI ocorra) para auxiliar na tomada de decisão do sistema e reduzir o fornecimento defeituoso de energia.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar a montagem de um modelo, desenvolvido no *software* livre ATPDraw (HØIDALEN, 1992), que consiga reproduzir as principais características de tensão do Rompimento de Condutor (RC) e dos outros eventos.
2. Implementar um algoritmo baseado na TSP calculada a cada ciclo ( $\gamma$ ) aplicado à detecção e diferenciação do RC em comparação com os outros eventos, utilizando o *software* livre OCTAVE (EATON et al., 2020).
3. Por último, conseguir a melhor localização para os medidores nos sistemas testes,

utilizando o *software* General Algebraic Modeling System, GAMS (ADAMS), que é um sistema de modelagem de alto nível para otimização matemática e que proporciona uma solução para aumentar a visibilidade do sistema de distribuição.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos, onde o primeiro Capítulo contém uma apresentação da introdução do assunto contendo as considerações iniciais, a problemática da pesquisa, assim com seus objetivos gerais e específicos, e a sua justificativa, ou seja, aqui o leitor terá uma noção do que será discutido nos próximos capítulos.

No segundo Capítulo, é exposto alguns artigos, teses e dissertações a respeito do tema, expondo um breve resumo de cada trabalho e os pontos negativos dessas pesquisas, embasando a fundamentação teórica deste presente trabalho.

O terceiro Capítulo, contém a metodologia utilizada para obtenção dos resultados, explicação dos *softwares* utilizados, o cálculo da TSP, além da apresentação dos sistemas contendo 5 barramentos, 34 barramentos do IEEE e 33 barramentos.

No quarto Capítulo é feito a apresentação das modelagens dos distúrbios e chaveamentos utilizados neste trabalho, além das simulações realizadas.

É no quinto Capítulo que estão expostos os resultados obtidos, com a análise e a discussão deles, mostrando os valores de eficiência do método proposto em todo o trabalho.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas desta pesquisa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

No processo de distribuição de energia elétrica é necessária atenção quanto às etapas que levam a eletricidade até o consumidor, assim como diversas manutenções precisas que acabam por envolver centenas de pessoas, com o fim de entregar a mesma com a melhor qualidade e segurança possível. Entretanto, mesmo com todas as precauções, frequentemente ocorrem falhas no sistema que acabam por ocasionar obstruções no abastecimento de energia e outros problemas que podem pôr os consumidores em situações de perigo. O RC é um dos principais casos de falhas em SEPs, e que causam ambos os problemas citados anteriormente, além de serem difíceis de detectar de uma forma imediata. Com isso, este capítulo tem a intenção de trazer diversas obras como dissertações, artigos e livros relacionados aos RCs, assim como formas de identificação dos mesmos e também uma abordagem quanto a TSP.

### **2.1. Rompimento de condutores**

Em sua dissertação, Silva (2020) mostra que existem diversos fatores que contribuem para os RCs de circuitos primários de redes de distribuição. Uma das causas principais que ocasionam o RC é a redução da rigidez mecânica do condutor, que pode ser causada por uma redução da seção transversal do condutor, pois o tamanho da seção está diretamente relacionado com a dificuldade de ocorrer um rompimento, já que uma seção maior é composta por um maior número de fios que acaba por exigir um esforço mecânico maior. Isso pode ser ocasionado por colisões diretas à rede, como galhos de árvores, pássaros, antenas de TV, cerol de pipas, entre outros. Outro fator que causa o rompimento é a idade do circuito, pois, devido aos desgastes naturais ao longo dos anos, o sistema acaba por se tornar mais frágil. A exposição do alumínio presente no circuito a altas temperaturas, em casos de conexão defeituosa, causa mudanças na rigidez do mesmo, ocorrendo uma deformação até o limite do material, fazendo com que ocorra o rompimento. Más conexões série e paralela em condutores do circuito primário também contribuem para os RCs, uma vez que alteram sua rigidez mecânica devido ao aquecimento excessivo. E também tem outros fatores como abalroamentos de veículos em postes, descargas atmosféricas diretas, entre outros fatores.

Stein (2019), explica em sua dissertação que quando um condutor do circuito primário de uma rede aérea de distribuição de média tensão entra em contato com uma superfície que apresenta uma alta resistência elétrica, ocorre a chamada FAI, que tem como principal característica, uma corrente elétrica relativamente baixa. Esse evento pode ser causado também,

por exemplo, pela inclinação de uma árvore sobre a rede primária. É difícil especificar o valor da corrente para cada parte do alimentador, pois não depende dos parâmetros da linha, mas da resistência característica do condutor ao terra. Além disso, as condições meteorológicas podem afetar significativamente a corrente gerada por tais falhas.

Em sua dissertação, Guaracy (2019) fala que, em função da baixa corrente de falta, as FAI não prejudicam os equipamentos elétricos dos consumidores, todavia, é suficiente para ocasionar situações de perigo a vidas de humanos e animais, já que cabos energizados podem estar ao alcance da população, podendo também causar incêndios e explosões. A dificuldade de detecção e localização pode fazer com que as FAI gerem multas às distribuidoras de energia elétrica devido ao tempo de interrupção. Bacil (2020), fala que as FAI podem ser classificadas como ativas e passivas, onde ambas as faltas acontecem quando o condutor energizado se aproxima ou encosta em outro objeto com elevado valor resistivo, porém as faltas ativas formam arcos elétricos ao mesmo tempo que as faltas passivas não apresentam o acontecimento deste fenômeno.

## **2.2. Métodos para a Identificação de Rompimentos de Condutores**

Como o processo de identificação do RC acaba por ser um procedimento complicado, devido ao fato da corrente ser de um valor baixo, tornando-a difícil de ser detectada. Com isso, muitos pesquisadores investigam vários métodos com o intuito de identificar RCs de uma forma rápida e eficaz, a fim de impedir novos transtornos em redes elétricas.

Huang et al., (2020) estabelece um método de detecção de RCs com base no sensor de visão, onde, primeiramente, as imagens do condutor são capturadas pelo sistema de aquisição de imagens, utilizando o robô de inspeção, que é equipado com duas câmeras HD (High Definition) para operar em um fio terra aéreo de 220 kV. O sistema de inspeção do robô proposto consiste principalmente em três partes: os sensores de visão instalados em um robô de inspeção, a rede de comunicação 4G/WIFI e o centro de monitoramento. Em primeiro lugar, as câmeras HD montadas no robô são usadas para adquirir imagens de luz visível em tempo real do condutor. Em seguida, por meio da codificação de compressão e da codificação de descompressão, as informações são transmitidas à central de monitoramento pela rede de comunicação 4G/WIFI. Finalmente, é utilizado o algoritmo de análise de falha do condutor embutido na central de monitoramento para realizar a análise de armazenamento e enviar o resultado para o computador, onde as tarefas de manutenção correspondentes são formuladas, entretanto o método mencionado ainda apresenta erros de cálculo, que causam problemas no condutor de transmissão, que são desconhecidos pelos autores, o que causa o problema na

textura da superfície que foi abordado, com isso, o método ainda exige correções para uma eficiência mais satisfatória.

Em sua dissertação, Hart (2018) utiliza o método CIGRÉ (*Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*), o qual relaciona grandezas dos módulos das tensões de linha para obter o fator de equilíbrio do sistema. Para isso, é necessário levar em consideração o tempo de fechamento de elos fusíveis, religadores e outros equipamentos que possam interferir na identificação da falta. Em uma primeira situação, o sistema reagirá como uma rede convencional, com apenas um sentido de fluxo de potência, sendo no sentido da geração para a carga. Nessa situação de teste, tem-se a intenção de determinar o fator de equilíbrio para uma rede convencional. Neste caso, todas as cargas interligadas estão equilibradas e em seguida é introduzido uma FAI na fase A do primário do alimentador. Em uma outra situação, está inserida a micro geração das residências, e da mesma forma, este projeto faz a análise do sistema sem FAI, determinando o fator de equilíbrio, e posteriormente, a análise é efetuada com o RC da rede primária. No entanto, foi verificada uma limitação da técnica proposta, pois, se em algum momento a geração distribuída aproximar sua capacidade de potência próxima a carga total instalada, não é possível distinguir o evento de falta nem sua localização, pelo fato de apresentar um baixo percentual de desequilíbrio de tensão.

O método de Carvalho et al., (2021) estabelece uma detecção por meio de Estatísticas de Ordem Superior (EOS) e rede neural *Multilayer Perceptron* (MLP), onde é utilizado um sistema de distribuição que é modelado no *software* ATPDraw, onde são simulados os dois tipos de falta e coletados os sinais. Estes formam duas classes de sinais, sendo então fornecidos a ferramenta de extração de características baseada em EOS, onde são calculados os cumulantes de 2ª, 3ª e 4ª ordens para cada classe, gerando um conjunto de características. Em seguida o discriminante linear de Fisher aplicado ao conjunto selecionando os melhores cumulantes capazes de distinguir as duas classes. Ao final, os melhores cumulantes de cada classe, são aplicados a entrada de uma Rede Neural Artificial (RNA) do tipo MLP com três entradas, sendo assim reconhecidos os padrões de cada tipo de falta, possibilitando uma classificação correta, entretanto, para o modelo de FAI proposto, é necessária análise ampla da variabilidade dos parâmetros para que seja possível definir vários tipos de superfície de alta impedância, tendo-se assim, a necessidade de aplicar outras técnicas de classificação.

Sena et al., (2020) demonstra um método que utiliza RNA com função de base radial e transformada *Wavelet* estacionária, onde o sistema começa com a medição de corrente trifásica quando o alimentador é iniciado e, em seguida, aplica o sinal de corrente ao bloco de decomposição do sinal por meio da transformada *Wavelet*. Depois, foram usadas a extração e

classificação de parâmetros da rede neural. Ao mesmo tempo, esses sinais também são aplicados ao módulo que avalia a amplitude da corrente para analisar a sobrecorrente e a perda de carga do alimentador. Finalmente, o bloco de atuação tomará decisões sobre a proteção do sistema, entretanto, são necessárias mais simulações buscando atingir o máximo possível de transitórios do sistema, de forma a evitar falsos alarmes para os SDs, já que um interrompimento indevido do fornecimento de energia pode acarretar prejuízos de grande ordem para a sociedade.

Cavalari et al., (2021) apresenta um método para localizar FAI monofásicas baseado em busca exaustiva a partir de um banco de dados, o qual foi construído através de simulações de diversos cenários usando valores de tensão e corrente *Root Mean Square* (RMS). O algoritmo desenvolvido calcula a distância aproximada da FAI em relação ao início do alimentador, utilizando o sistema de distribuição IEEE de 34 barramentos. Todas as cargas do sistema são expressas como impedância constante, pois a combinação de diferentes modelos de carga em média tensão faz com que se comportem como impedância constante durante as falhas. Os reguladores de tensão também são ignorados porque podem interferir na tensão no alimentador durante uma falta e interromper o processo de estimativa da localização da FAI. Devido à maioria dos defeitos que ocorrem no sistema de distribuição de energia serem do tipo fase-terra, neste trabalho somente faltas monofásicas fase-terra são analisadas, contudo, a variação do número de medidores não foi significativamente impactante em casos de falta no início do alimentador, fazendo-se necessário mais desenvolvimentos para torna-lo mais eficaz.

Em seu relatório, Silva (2020) propõe um método de análise da potencialidade da Tensão de Sequência Negativa (TSN), aplicado à detecção e distinção do RC em SDs antes que ocorresse a FAI. Para chegar aos resultados, foram analisados 4 casos de simulação do sistema que foram divididos em: sistema completo, sistema sem os barramentos críticos, sistema com redução topológica (19 barramentos) e sistema com redução topológica (11 barramentos). Para cada um desses casos, se fez necessário a simulação dos eventos do sistema teste (IEEE de 34 barramentos), medição e arquivamento da tensão na subestação, o cálculo da tensão de sequência negativa e por fim o cálculo da detecção e distinção do RC, porém, em alguns casos, não foi possível distinguir o RC de outros eventos, como para os casos de barramentos monofásicos localizados nas extremidades dos ramais, barramentos distantes do medidor da TSN ou eventos em que o valor da TSN em regime permanente já se encontrava acima do limite mínimo estabelecido.

### 2.3. Tensão de Sequência Positiva

A TSP se mostra como um fator que pode ser utilizado em métodos para detecção de RCs. Wang et al., (2019) fala em seu artigo que, os distúrbios de tensão podem ser categorizados como distúrbios trifásicos balanceados e desequilibrados. Os primeiros são geralmente causados por partidas de motor e por falhas simétricas. Estes últimos estão relacionados a falhas assimétricas de curto-circuito e comutação de uma grande carga monofásica. No domínio da sequência, a perturbação de voltagem balanceada tem apenas uma fonte de sequência positiva. Em contraste, a perturbação desequilibrada fornece fontes de sequência positiva, negativa e zero. Entretanto, quando o sistema de backup precisa ser energizado, alguns distúrbios externos são necessários para detectar a condição, e com isso, o método depende de perturbações naturais desequilibradas onde seu o desempenho pode ser afetado pela frequência de ocorrência de tais distúrbios.

Em sua dissertação, Cruz (2019) utiliza um detector de TSP que era necessário para moldar um filtro de *by-pass* para seu trabalho, onde a operação do mesmo foi baseada no uso de um circuito *Phase Locked Loop*, do qual a frequência fundamental do sistema é extraída, e a partir deste são geradas correntes auxiliares. Com essas variáveis, calcula-se a potência instantânea do sistema, e posteriormente, com o auxílio de filtros passa-baixo, são extraídos os componentes médios. Uma vez eliminados os componentes oscilatórios, são calculadas as tensões, que só serão associadas à frequência fundamental do sistema, e, portanto, às componentes de sequência positiva. Por fim, são obtidas as tensões de fase no referencial abc associado à sequência positiva, com o uso da transformada inversa de Clarke, no entanto, a implementação real deste filtro de desvio ativo é principalmente limitada pela conexão que o compensador tem com o sistema, visto que é necessário um processo de sintonia dos parâmetros de acoplamento do inversor para obter o melhor desempenho do sistema, reduzir a ondulação nas ondas injetadas e minimizar as perdas causadas durante o processo de compensação.

### 3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Para a realização de toda a modelagem e simulação presente nesse trabalho, fez-se uso do *software* de simulação de circuitos ATPDraw, no qual foram realizadas simulações de distúrbios de tensão, chaveamentos de capacitores, chaveamento de carga e ramais, além também de RCs. Tudo isso vai ser desenvolvido nas subseções a seguir, com relação aos sistemas teste empregados.

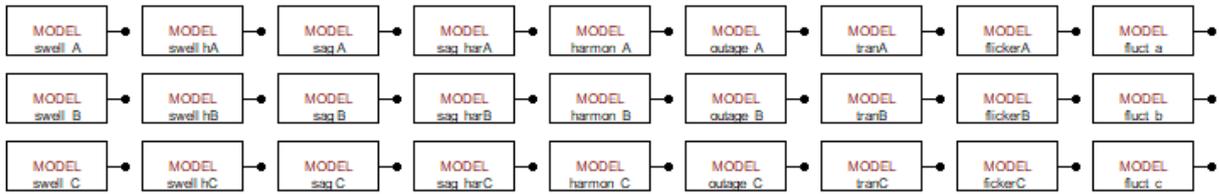
#### 3.1 Distúrbios de Tensão

Os distúrbios de tensão são sinais indesejados presentes em SDs que acabam por alterar a forma padrão de ondas de tensão de redes elétricas e ocasionam várias falhas no sistema, que podem causar mau funcionamento em equipamentos, acidentes, entre outros. Estes, podem ser confundidos com RCs devido à uma detecção imprecisa dos equipamentos de proteção das concessionárias. Com isso, segundo Abdel-Galil et al., (2004), pode-se representar esses distúrbios por meio de equações e parâmetros de modelagem matemática, aqui representada pela Tabela 1, e também utilizando uma ferramenta disponibilizada pelo *software* ATPDraw chamada MODEL, representada pela Figura 1, onde existe a possibilidade de simular esses distúrbios mediante códigos que configuram as equações descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Equações e Parâmetros de Modelagem Matemática

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

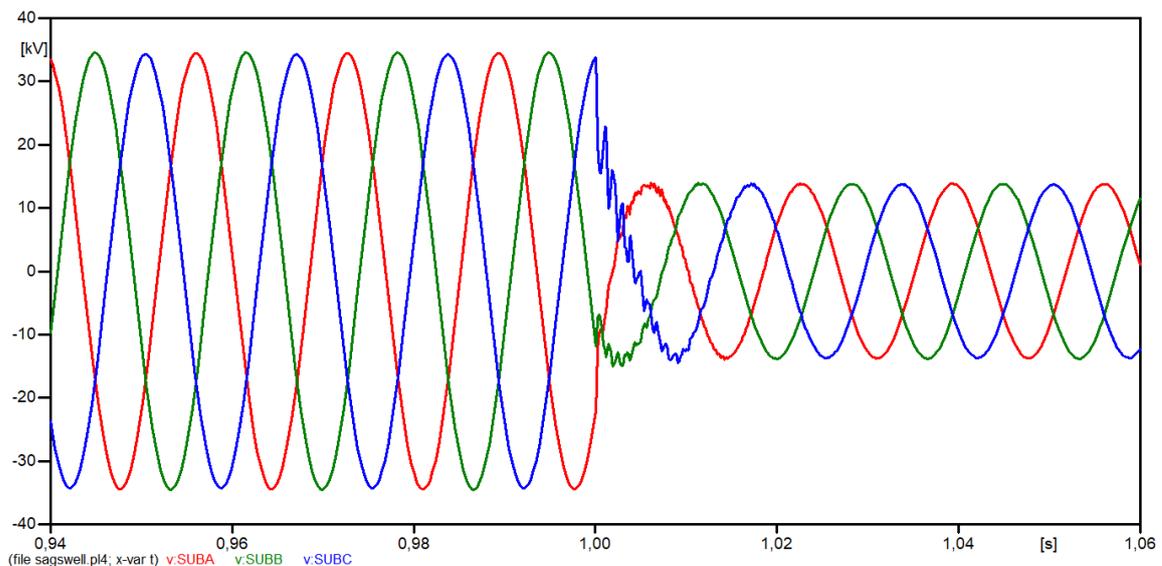
Figura 1 - MODELS de distúrbios de tensão do ATPDraw.



Fonte: Autor.

### 3.1.1 Sag

O *Sag*, também conhecido como afundamento de tensão, é um tipo de variação de tensão de curta duração, em que há uma deformação ou um achatamento da onda de tensão. Normalmente, esse tipo de distúrbio é causado por falha do SEP, partida de grandes motores e corrente de energização do transformador (Paulillo, 2013). Na Figura 2, pode-se encontrar o gráfico do distúrbio acontecendo em três fases no tempo de um segundo.

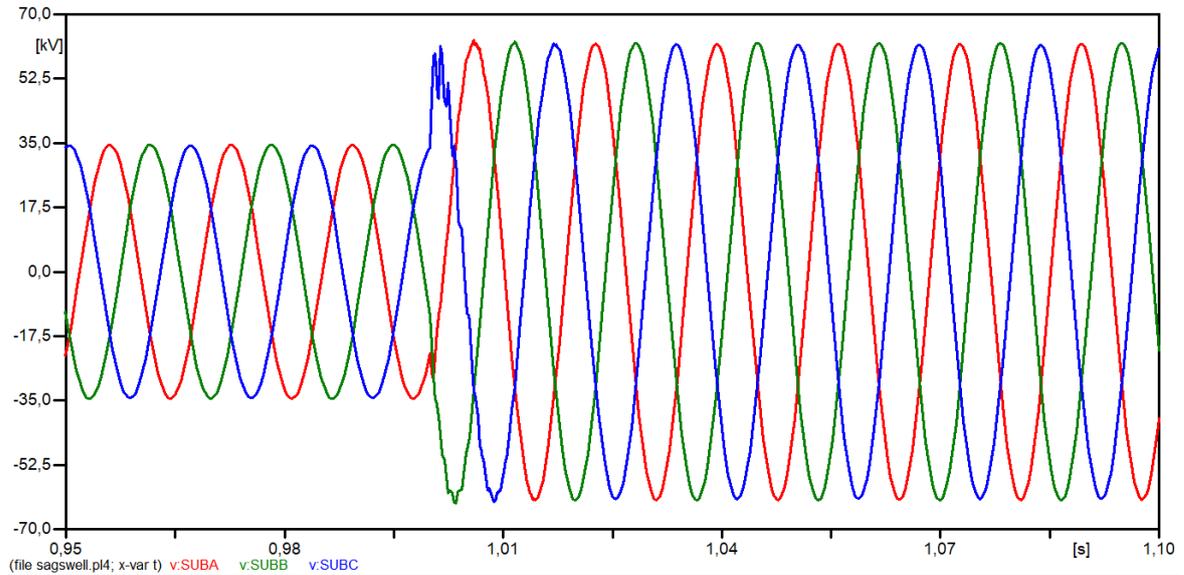
Figura 2 - Gráfico do distúrbio *Sag* ocorrendo nas três fases simultaneamente.

Fonte: Autor.

### 3.1.2 Swell

Diferente do que acontece no *Sag*, no *Swell*, que também é conhecido como elevação de tensão, observa-se um aumento na amplitude da tensão, geralmente causado por uma falta monofásica, ou seja, uma falta fase-terra no SD. Este aumento de tensão pode danificar o supressor de sobretensão já que é programado para drenar em alguns microssegundos, mas o *Swell* pode ocorrer por dezenas de milissegundos (Rocha, 2016). Na Figura 3, pode-se encontrar o gráfico do respectivo distúrbio acontecendo em três fases no tempo de um segundo.

Figura 3 - Gráfico do distúrbio *Swell* ocorrendo nas três fases simultaneamente.

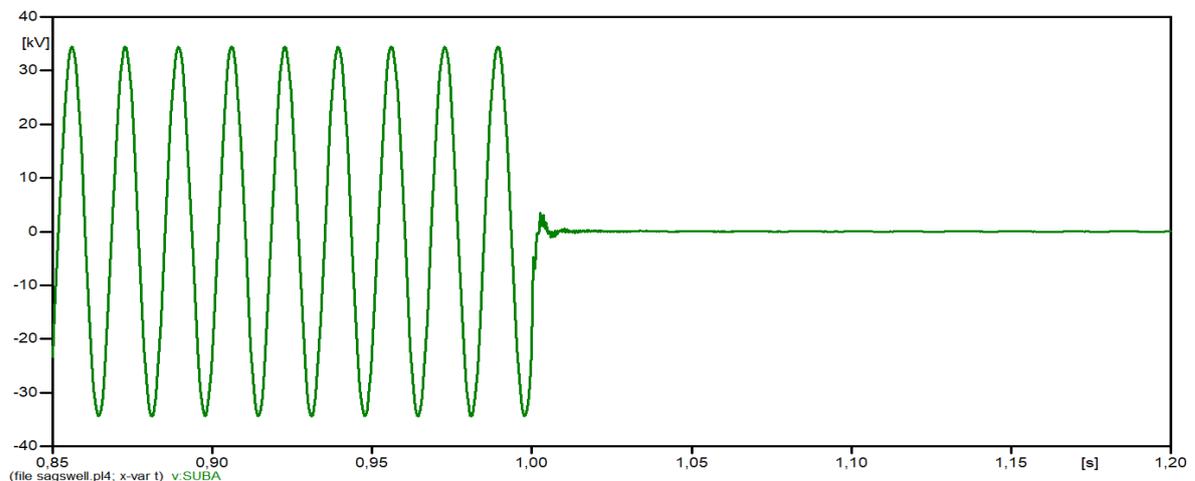


Fonte: Autor.

### 3.1.3 Outage

Os *outages* são conhecidos como o momento em que o fornecimento de eletricidade a uma área é interrompido devido a uma falha técnica na retirada de um item do sistema. É imperativo que distúrbios recorrentes no sistema de distribuição contribuam para a falta de confiabilidade do sistema de energia. Os *outages* são causados por falhas que duram menos de um minuto ou também por interrupções programadas que duram mais de um minuto (Adelakun; Olanipekun, 2020). Na Figura 4, pode-se encontrar o gráfico do respectivo distúrbio acontecendo na fase A, no tempo de um segundo.

Figura 4 - Gráfico do distúrbio *Outage* ocorrendo na fase A.

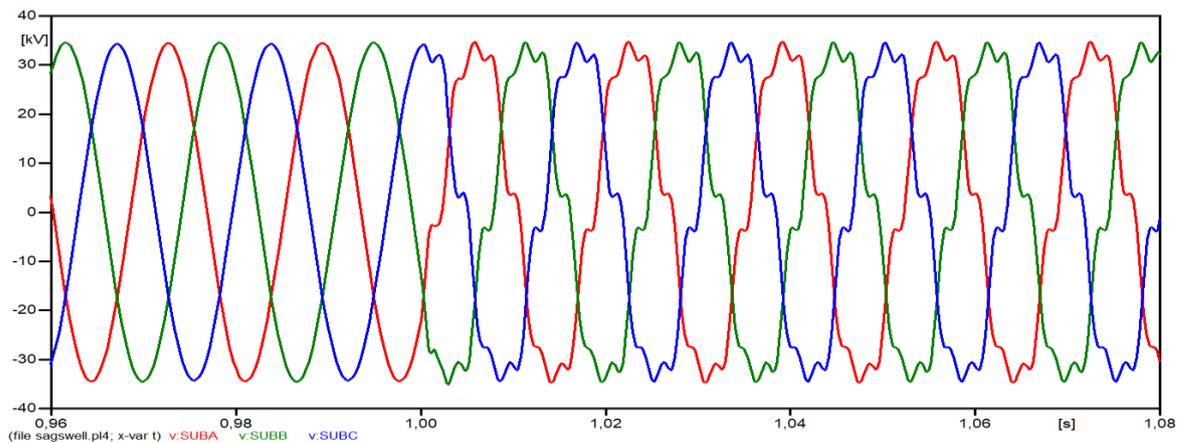


Fonte: Autor.

### 3.1.4 Harmônicos

Em Silva (2019), é mostrado que a distorção harmônica é um fenômeno relacionado à deformação das formas de onda de tensão e corrente em relação à onda senoidal da frequência fundamental. A ordem harmônica ( $h_n$ ) é um número que representa o espectro de frequência relacionado à onda distorcida, onde a frequência harmônica é um múltiplo inteiro da frequência fundamental ( $h_1$ ). A distorção harmônica é causada principalmente por cargas não lineares, unidades de geração que utilizam conversores de frequência e fontes chaveadas. Na Figura 5, pode-se encontrar o gráfico do respectivo distúrbio acontecendo em três fases no tempo de um segundo.

Figura 5 - Gráfico das distorções harmônicas ocorrendo nas três fases simultaneamente.

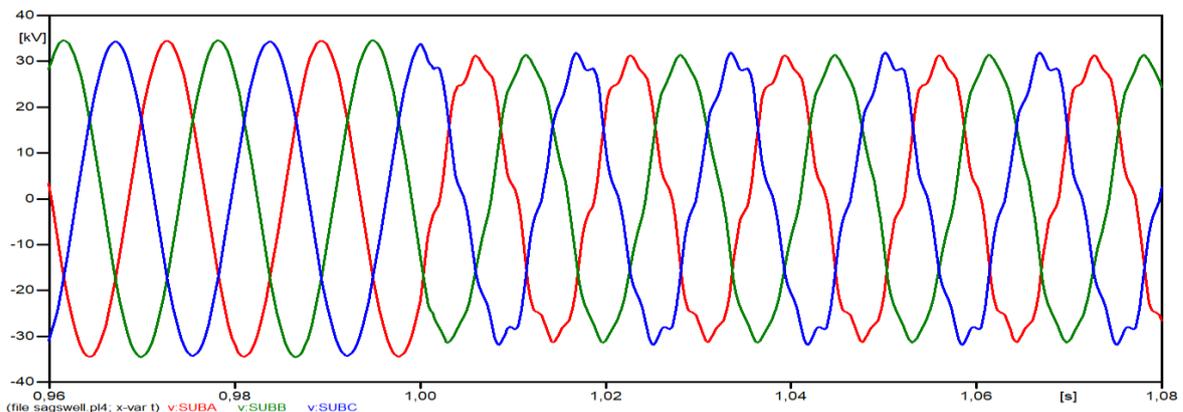


Fonte: Autor.

### 3.1.5 Sag com Harmônicos

Pode ocorrer uma subtensão ou queda de tensão (*Sag*) e harmônicos ao mesmo tempo. Estes dois eventos juntos causam outro tipo de distorção da forma de onda. Na Figura 6, pode-se encontrar o gráfico do respectivo distúrbio acontecendo em três fases no tempo de um segundo.

Figura 6 - Gráfico de *Sag* com Harmônicos ocorrendo nas três fases simultaneamente.

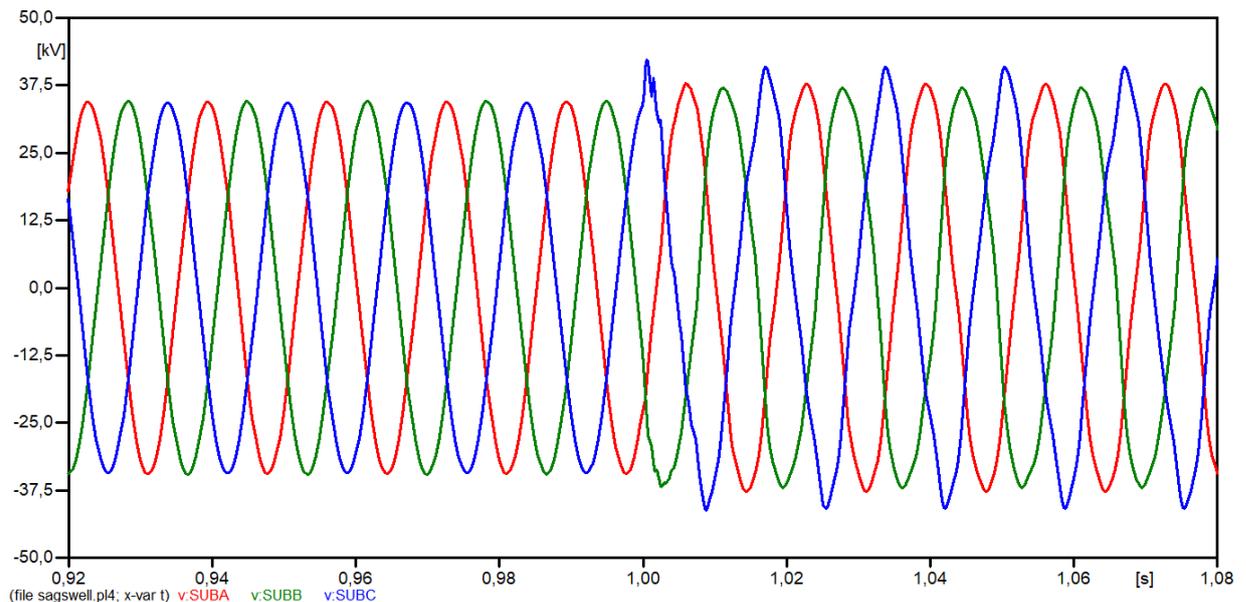


Fonte: Autor.

### 3.1.6 Swell com Harmônicos

São dois tipos de distúrbios que ocorrem ao mesmo tempo, *Swell* e harmônicos, que possuem as características dos dois distúrbios, ou seja, sobretensão ou subida de tensão, incluindo a soma de ondas de múltiplas frequências à onda fundamental, resultando em distorção harmônica. Através da Figura 7, pode ser visto o gráfico do respectivo distúrbio acontecendo em três fases no tempo de um segundo.

Figura 7 - Gráfico de *Swell* com Harmônicos ocorrendo nas três fases simultaneamente.

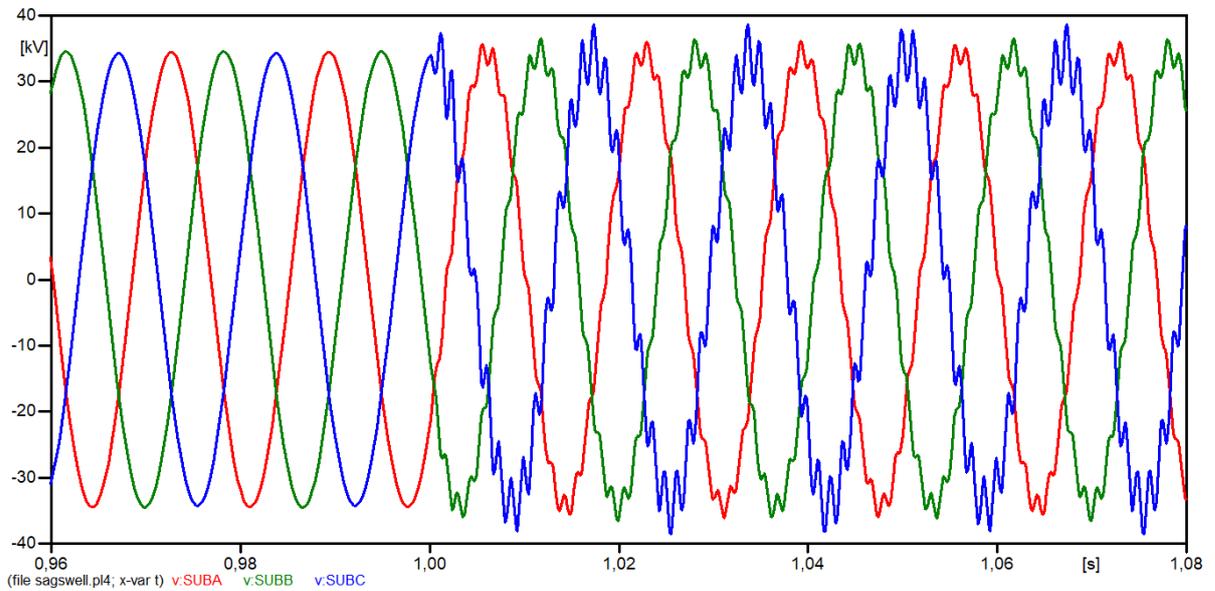


Fonte: Autor.

### 3.1.7 Oscilação Transitória

É um fenômeno que faz com que a forma de onda da tensão oscile. Seu modo de oscilação não segue as características de outros eventos como para aumento ou queda de tensão, e não há soma de onda com múltiplas frequências fundamentais, e nem interrupções. São oscilações que ocorrem em uma duração rápida de menos de um minuto e causam distorção da onda de tensão trifásica. Na Figura 8, pode-se encontrar o gráfico do respectivo distúrbio acontecendo em três fases no tempo de um segundo.

Figura 8 - Gráfico da Oscilação Transitória ocorrendo nas três fases simultaneamente.

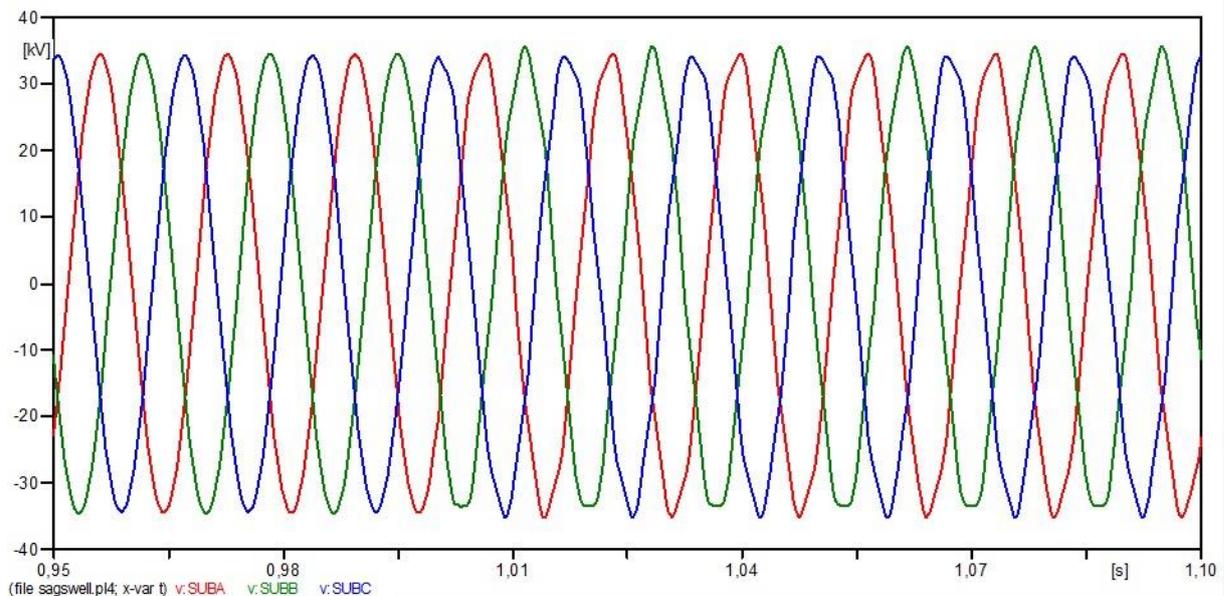


Fonte: Autor.

### 3.1.8 Flicker

O Flicker é uma percepção subjetiva das flutuações na iluminância da lâmpada causadas por flutuações de tensão. É um parâmetro importante para medir a qualidade da energia e uma causa significativa de falha de fornecimento de energia e equipamentos elétricos (Gao, H. et al. 2020). Na Figura 9, pode-se encontrar o gráfico do respectivo distúrbio acontecendo em três fases no tempo de um segundo.

Figura 9 - Gráfico do evento Flicker ocorrendo nas três fases simultaneamente.

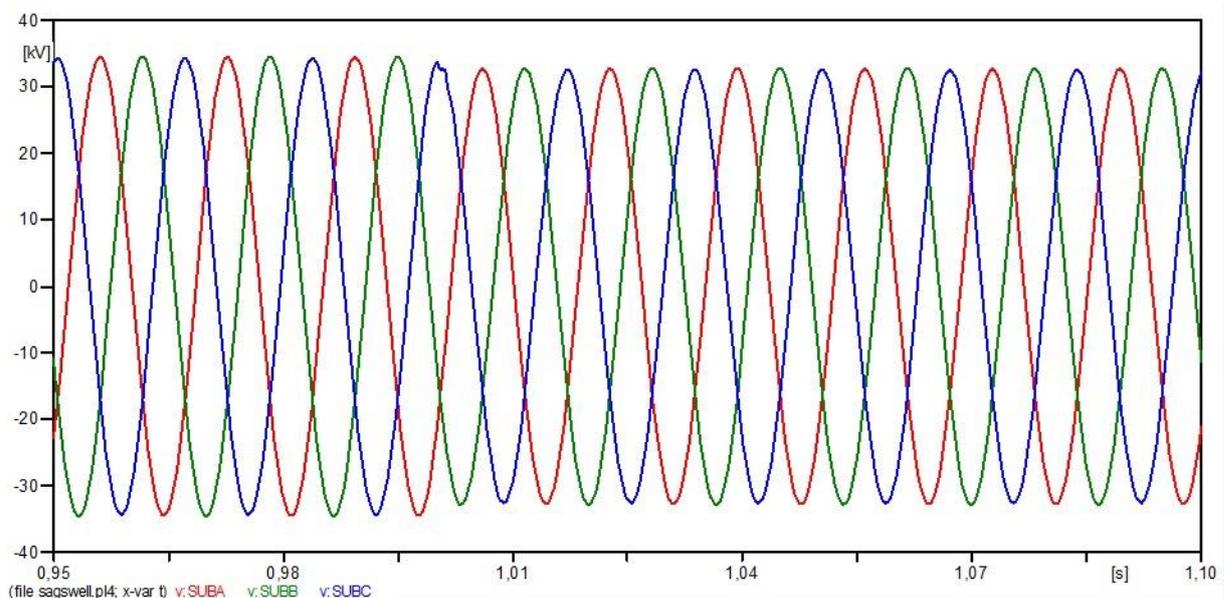


Fonte: Autor.

### 3.1.9 Fluctuation

A flutuação de tensão é entendida como uma série de mudanças de tensão ou uma variação contínua do valor RMS ou de pico da tensão. A variação de voltagem é mais frequentemente manifestada por cintilação, que pode se tornar desagradável em uma intensidade alta o suficiente (Wiczynsk, 2017). Na Figura 10, pode-se encontrar o gráfico do respectivo distúrbio acontecendo em três fases no tempo de um segundo.

Figura 10 - Gráfico do evento Fluctuation ocorrendo nas três fases simultaneamente

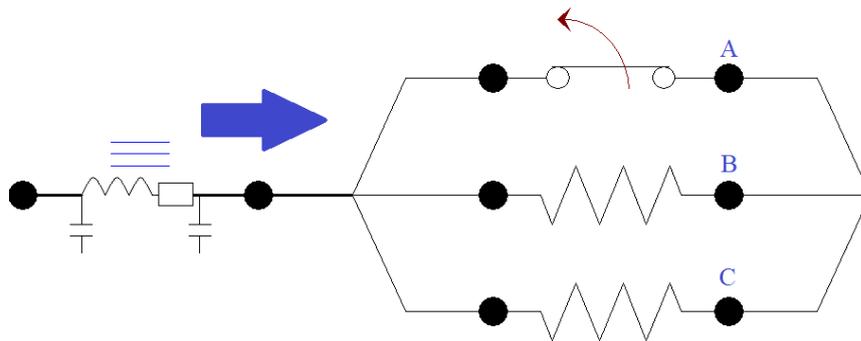


Fonte: Autor.

### 3.2 Rompimento de Condutores

Em todos os barramentos dos sistemas usados no ATPDraw, há o RC através da inserção de chaves monofásicas na fase A e, para evitar erros de compilação no *software* ATPDraw, um resistor de  $1 \times 10^{-5} \Omega$  foi inserido em todos os barramentos das fases B e C, assim mostrado na Figura 11, cujo valor é muito baixo e não afetará os resultados. E também, a chave da fase A é programada para ser fechada a partir do tempo -1s, logo, a chave é fechada antes do início da simulação, a abertura da chave ocorre em 1,020714s e o ângulo de incidência de ruptura da simulação é de  $315^\circ$ , mostrado na Figura 12.

Figura 11 - Resistores e chave substituindo resistor na fase A.



Fonte: Autor.

Figura 12 - Configurações da chave inserida na fase A.

Component: TSWITCH

Attributes			Characteristic		
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-cl	s	1	From	1	
T-op	s	1.020714	To	1	
Imar	Amps	1000			
3-ph	0/1	0			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No  Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Autor.

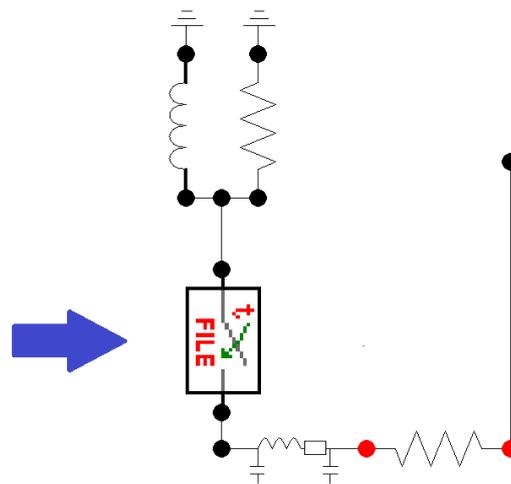
### 3.3 Chaveamento de Cargas

O sistema elétrico é constantemente afetado por chaveamento de múltiplas cargas e, com isso, tem-se o objetivo de simular esses eventos e analisar se a retirada e colocação de uma determinada carga no sistema não se confundirá com RC. Quatro tipos de chaveamentos foram usados, conforme mostrado, e dependendo do sistema teste, nem todos os tipos foram usados, como será mostrado posteriormente.

### 3.3.1 Chaveamento de Carga Distribuída (SWDL)

O SWDL, isto é, alocar e retirar a carga distribuída entre as três fases, poderá causar a identificação incorreta do RC no dispositivo de proteção, portanto, simular este tipo de chaveamento é útil para testar se a metodologia proposta será capaz de detectar e distinguir o RC do SWDL. A Figura 13 mostra a chave automática utilizada para simular o SWDL neste trabalho.

Figura 13 - Chave para o chaveamento de carga distribuída.

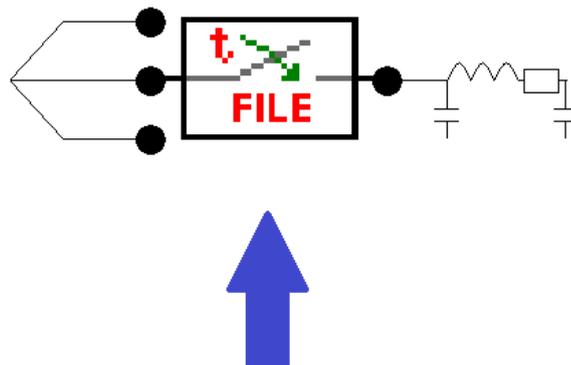


Fonte: Autor.

### 3.3.2 Chaveamento de Ramo Lateral (SWP)

A fim de avaliar se o método proposto neste trabalho pode distinguir a comutação de ramificações laterais em comparação com RC, foi modelado o SWP no *software* ATPDraw. Nesses sistemas com ramificações laterais, a comutação tem uma mudança de estado da chave em 1 segundo por meio de uma chave automática, representada pela Figura 14.

Figura 14 - Chave para o chaveamento de ramo lateral.

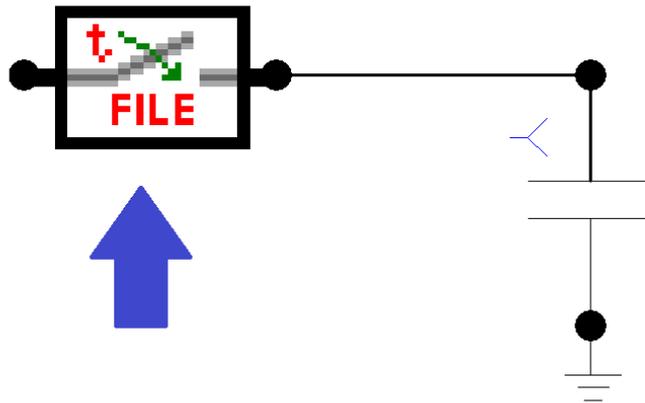


Fonte: Autor.

### 3.3.3 Chaveamento de Capacitor (SWBC)

Os capacitores ocasionam a oscilação da frequência dos sinais de maneira transitória, o que acaba por causar um erro na detecção de RCs. Com isso, nota-se a importância na simulação deste evento no ATPDraw, assim representado na Figura 15.

Figura 15 - Chave para o chaveamento de capacitor.

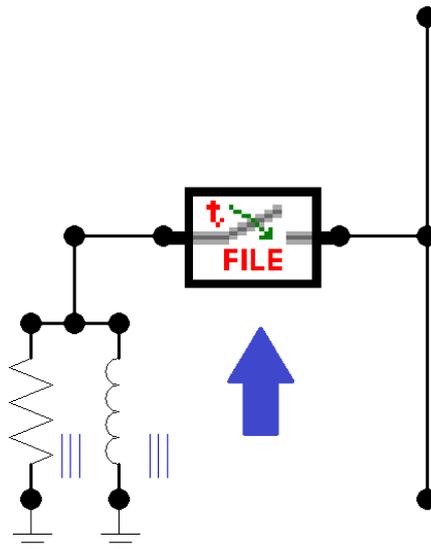


Fonte: Autor.

### 3.3.4 Chaveamento de Carga Concentrada (SWSL)

O SWSL, isto é, alocar e retirar a carga concentrada em uma das fases, pode causar a identificação incorreta do RC no dispositivo de proteção, portanto, simular este tipo de chaveamento é extremamente útil para testá-lo na distinção de um RC. Na Figura 16 é mostrado a chave automatizada do SWSL.

Figura 16 - Chave para o chaveamento de carga concentrada.

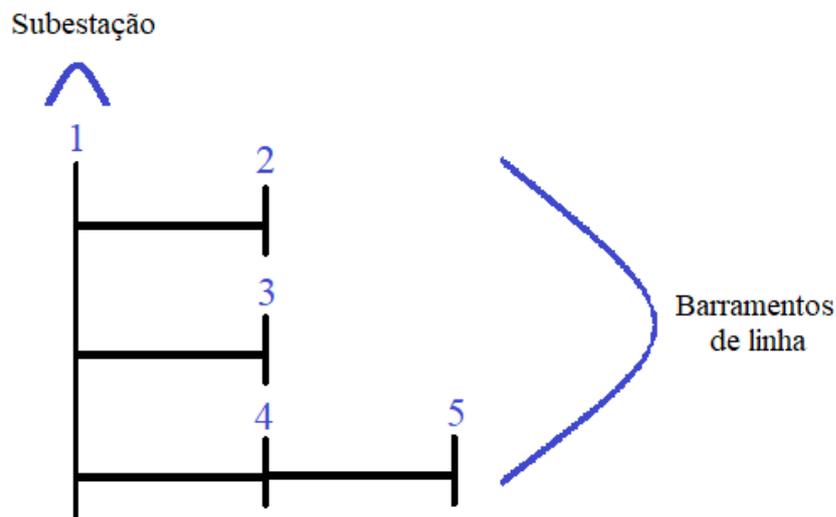


Fonte: Autor.

### 3.4 Sistema Teste de 5 Barramentos

Segundo Lima e Minussi (2012), o sistema de 5 barramentos, cujo 4 barras são de cargas e a outra é a subestação, tem como tensão base 11,5 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 15,3 kW e 8,8 kVAr, respectivamente. Na Figura 17 é representado o diagrama unifilar referente ao sistema de 5 barramentos.

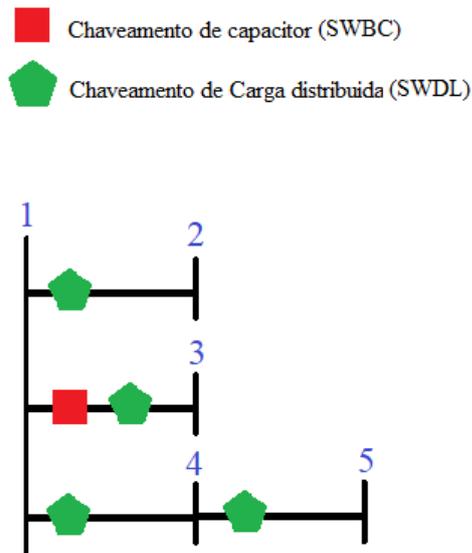
Figura 17 - Sistema teste de 5 barramentos.



Fonte: Adaptado de Lima; Minussi, 2012.

Este sistema foi modelado no ATPDraw com adição da rotina MODELS que inclui Distúrbio de Tensão (DT) e também uma distribuição de chave de carga distribuída (SWDL). Para fins de teste, uma chave de capacitor (SWBC) foi adicionada ao barramento 3. A Figura 18 mostra a localização dessas chaves no sistema geral de uma forma ilustrativa.

Figura 18 - Chaveamentos no sistema de 5 barramentos.



Fonte: Adaptado de Lima; Minussi, 2012.

Com isso, na Tabela 2 são representados os eventos demonstrados que foram simulados no ATPDraw, os RCs, excluindo o barramento da subestação (1), os chaveamentos citados em dois estados (chave aberta e chave fechada), e os distúrbios de tensão (DT), para que os dados de tensão gerados fossem salvos.

Tabela 2 - Eventos simulados no sistema de 5 barramentos.

Eventos	Número de eventos simulados
SWDL	8
DT	9
RC	4
SWBC	2
<b>Total:</b>	<b>23</b>

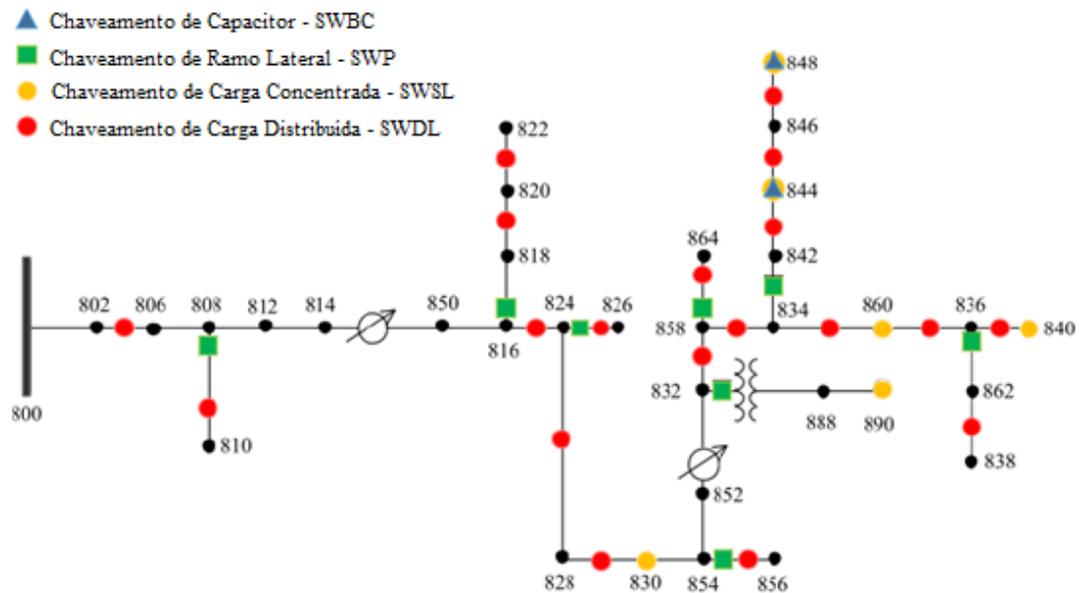
Fonte: Autor.

### 3.5 Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos

Este é um alimentador real localizado no Arizona, nos Estados Unidos, com uma tensão nominal de 24,9 kV. É caracterizado por dois reguladores em linhas longas e levemente carregadas, um transformador em linha para seções curtas de 4,16 kV, carga desequilibrada e capacitores em derivação (IEEE, 1992). A caracterização dos sinais RC e outros eventos foi realizada no *software* ATPDraw usando esse sistema.

O sistema de 34 barramentos do IEEE foi modelado no ATPDraw e adicionado uma rotina MODELS que contém os distúrbios de tensão (DT), houve também a alocação das chaves para os chaveamentos (onde não teve modificação quanto a carga do sistema) de chaveamentos de cargas distribuídas (SWDL), cargas concentradas (SWSL), chaveamento de capacitores (SWBC) e chaveamentos de ramos laterais (SWP). A Figura 19 mostra o sistema IEEE de 34 barramentos com a localização dessas chaves no sistema geral de uma forma mais ilustrativa.

Figura 19 - Chaveamentos no sistema IEEE de 34 barramentos.



Fonte: Adaptado de IEEE (1992).

Com isso, na Tabela 3 são representados os eventos demonstrados que foram simulados no ATPDraw, os RCs, excluindo o barramento da subestação (1), os chaveamentos citados em dois estados (chave fechada e chave aberta), e os distúrbios de tensão (DT), para salvar os dados de tensão gerados.

Tabela 3 - Eventos simulados no sistema IEEE de 34 barramentos.

Eventos	Número de eventos simulados
SWDL	38
RC	33
SWP	16
SWSL	12
DT	9
SWBC	4
<b>Total:</b>	<b>112</b>

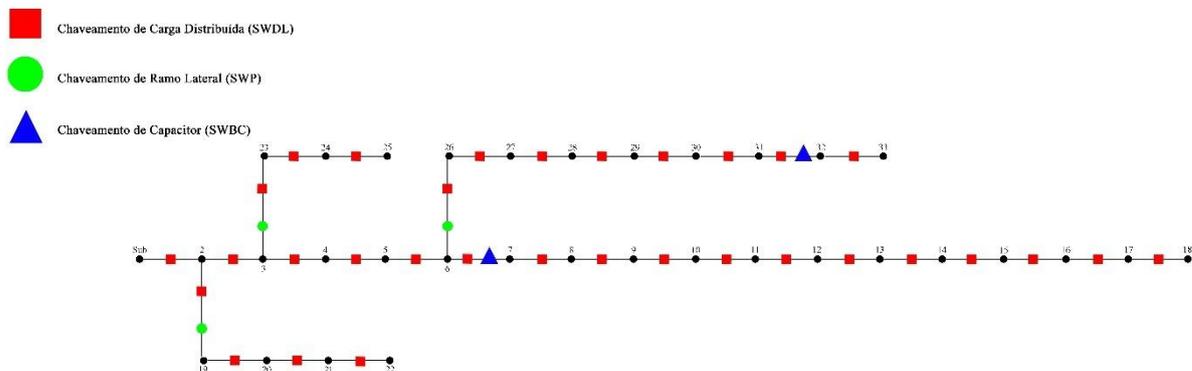
Fonte: Autor.

### 3.6 Sistema Teste de 33 Barramentos

O sistema utilizado nesse capítulo é o sistema de distribuição trifásico de 33 barramentos. O mesmo é composto por 32 barras de carga e 1 subestação. A tensão básica do sistema é 12,66KV as demandas de potência ativa e reativa são, respectivamente, 3.715 kW e 2.315 kVAr. (Dharageshwari, K.; Nayanatara, C.; 2015). Na Figura 20 é representado o diagrama unifilar referente ao sistema de 33 barramentos.

O sistema de 33 barramentos do IEEE foi modelado no ATPDraw e adicionado uma rotina MODELS que contém os distúrbios de tensão (DT), houve também a alocação das chaves para os chaveamentos de cargas distribuídas (SWDL), chaveamento de capacitores (SWBC) e chaveamentos de ramos laterais (SWP).

Figura 20 - Chaveamentos no sistema de 33 barramentos.



Fonte: Autor.

Com isso, na Tabela 4 são representados os eventos demonstrados que foram simulados no ATPDraw, os RCs, excluindo o barramento da subestação (1), os chaveamentos citados em dois estados (chave fechada e chave aberta), e os distúrbios de tensão (DT), para salvar os dados de tensão gerados.

Tabela 4 - Eventos simulados no sistema IEEE de 33 barramentos.

Eventos	Número de eventos simulados
SWDL	64
RC	32
SWP	6
DT	9
SWBC	4
<b>Total:</b>	<b>115</b>

Fonte: Autor.

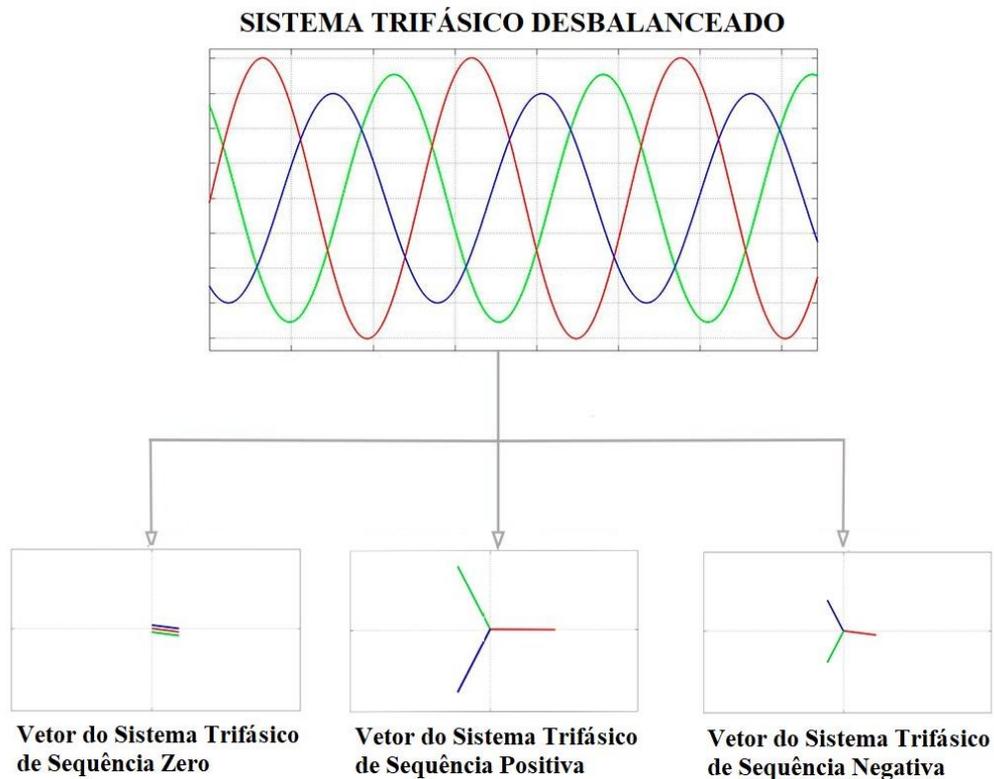
## 4. METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados os métodos utilizados para chegar aos resultados, que serão mostrados posteriormente no capítulo 5. Primeiramente, vai ser falado sobre a TSP, que é a base do algoritmo utilizado para detecção e distinção de RC, e posteriormente será mostrado como foi utilizado os softwares OCTAVE e GAMS.

### 4.1 Tensão de Sequência Positiva

Em seu livro, Stevenson (1986) fala que um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto fasorialmente em três sistemas trifásicos equilibrados, que são: Sequência Zero, Sequência Positiva e Sequência Negativa. Essa decomposição pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 - Decomposição de um sistema trifásico desbalanceado.



Fonte: Adaptado de STEVENSON, 1986.

Em IEEE (2019), é falado que o desequilíbrio em um sistema trifásico é definido como a razão entre a magnitude do componente de sequência negativa e a magnitude do componente de sequência positiva. Esta definição pode ser aplicada tanto para tensão quanto para corrente. Normalmente, o desequilíbrio de tensão de uma rede trifásica é inferior a 5%. Também é definido que, através de medições de valores RMS fase a fase sem ângulo, é possível determinar o fator de desequilíbrio, todavia, este trabalho utiliza exclusivamente o valor de TSP. Com isso, em sua obra, Stevenson (1986) define que é possível determinar os valores da TSP ( $V_{pos}$ ), TSN ( $V_{neg}$ ) e da tensão de sequência zero ( $V_{zero}$ ), como pode ser visto na Equação (1):

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

onde  $\alpha = 1 \angle 120^\circ$  e  $\alpha = 1 \angle 240^\circ$ .

É possível decompor os três fasores assimétricos em seus componentes simétricos (sequências zero, positiva e negativa), como mostrado na Equação (1). O foco deste trabalho foi investigar o comportamento da TSP, com isso, a Equação (1) foi decomposta e (2) mostra somente a TSP:

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

Assim, foi utilizada a componente de sequência positiva dos sinais de tensão das fases a ( $V_a$ ), b ( $V_b$ ) e c ( $V_c$ ) para que fosse fornecido um método de análise da potencialidade da TSP em identificar e distinguir o RC de outros eventos no SD, utilizando uma quantidade mínima de medidores no SD.

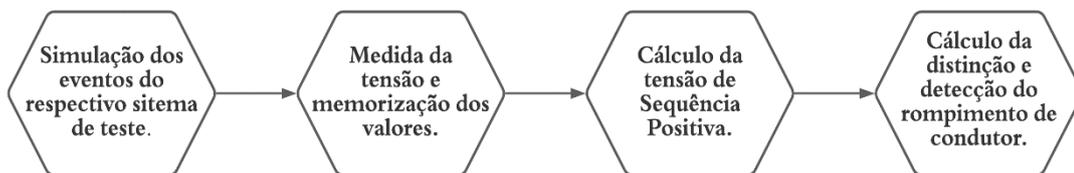
## 4.2 OCTAVE

Este programa é um *software* de linguagem de alto nível, usado especialmente para cálculos numéricos. Ele fornece uma interface de linha de comando conveniente para resolver numericamente problemas lineares e não lineares e realizar outras simulações numéricas. O mesmo possui ferramentas abrangentes para resolver problemas comuns de álgebra linear, integrar funções constantes, encontrar as raízes de equações não lineares, processar polinômios e integrar equações diferenciais ordinárias e diferenciais algébricas. Ele pode ser facilmente estendido e personalizado por meio de funções definidas pelo usuário na própria linguagem OCTAVE, ou usando módulos de carregamento dinâmico escritos em C++, C, Fortran e outras linguagens (EATON et al., 2020).

Depois de gravar os dados de tensão, o *software* OCTAVE foi usado para processar e

calcular os dados da TSP. Para cada simulação, o ruído branco gaussiano com uma relação sinal-ruído (SNR) de 20, 40 e 50 dB é adicionado ao sinal trifásico da tensão. Deve-se ressaltar que em sistemas de distribuição de energia, o SNR costuma ser de 48 a 70 dB (TOMIC et al., 2007), (TAN; RAMACHANDARAMURTHY, 2010) e (NANDI et al., 2021). O valor SNR é selecionado para avaliar a imunidade do método proposto ao ruído, e, a fim de não tornar este trabalho repetitivo, será mostrado apenas os resultados de 20 dB, ou seja, para o pior caso de SNR. Em seguida, o sinal é filtrado por um filtro Butterworth de segunda ordem com uma frequência de corte de 180 Hz. Posteriormente, as tensões trifásicas filtradas  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  são colocadas em janela em cada ciclo ( $\gamma$ ), com uma taxa de amostragem de 128 amostras/ciclo. Em seguida, é usada a Transformada Rápida de Fourier para calcular o fasor. Todo o processo proposto até agora é mostrado na Figura 22:

Figura 22 - Método utilizado para a simulação.



Fonte: Autor.

Obtendo os valores de TSP após a falha, os mesmos podem ser distinguidos de outros eventos testados em cada sistema teste, como Distúrbio de tensão (DT): *Sag*, *Swell*, harmônico, *Sag* com harmônico, *Swell* com harmônico, *Outage*, *flicker* e *fluctuation* e Oscilação Transitória. Além também dos chaveamentos de: carga concentrada (SWSL), carga distribuída (SWDL), capacitor (SWBC) e de ramo lateral (SWP). Com o intuito de utilizar a menor quantidade de medidores no sistema, foi utilizado o *software* GAMS Studio®, que será discutido na próxima subseção.

### 4.3 GAMS STUDIO

Foi utilizado o *software* GAMS Studio®, que é um programa editor de código em linguagem C++ e QT (plataforma de desenvolvimento de interfaces gráficas) e possui uma enorme biblioteca que permite sua utilização para programação e otimização matemática para utilizar o mínimo de medidores no sistema. Portanto, o Gcode 8.4 (Min No. *PMU* Placement for Maximizing the Observability) da biblioteca GAMS foi adequado para os sistemas testes usados, usando o menor número de medidores de tensão para fornecer a maior observabilidade do sistema. Para tanto, é definida uma variável binária  $\alpha_i$ , na qual o estado do barramento  $i$  é

observável (1) ou não observável (0). De acordo com Souroudi (2017), o problema de otimização se dá por:

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

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

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

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

onde  $i$  e  $j$  são índices de barramento,  $\Omega_B$  é o conjunto de todos os barramentos na rede,  $x_i$  é uma variável binária, indicando se existe uma unidade de medição fasorial ( $PMU$ ) (1) ou não (0), e  $\alpha_i$  é um inteiro variável (observabilidade). Seu valor mínimo é definido como 1 para tornar toda a rede observável, e  $N_{PMU}$  é o número de dispositivos de medição disponíveis. Com isso, o *software* GAMS realiza a otimização da função objetivo (Equação 3), sujeito às restrições impostas pelas Equações 4, 5 e 6.

#### 4.3.1 Sistema Teste de 5 barramentos

Por meio do *software* GAMS e adaptando o código Gcode 8.4 para o sistema de 5 barramentos, pode-se ver através da Tabela 5 os barramentos que segundo o código simulado no GAMS, é a alocação ideal dos  $PMUs$ .

Tabela 5 - Alocação ideal dos  $PMUs$  através do GAMS para um sistema de 5 barramentos.

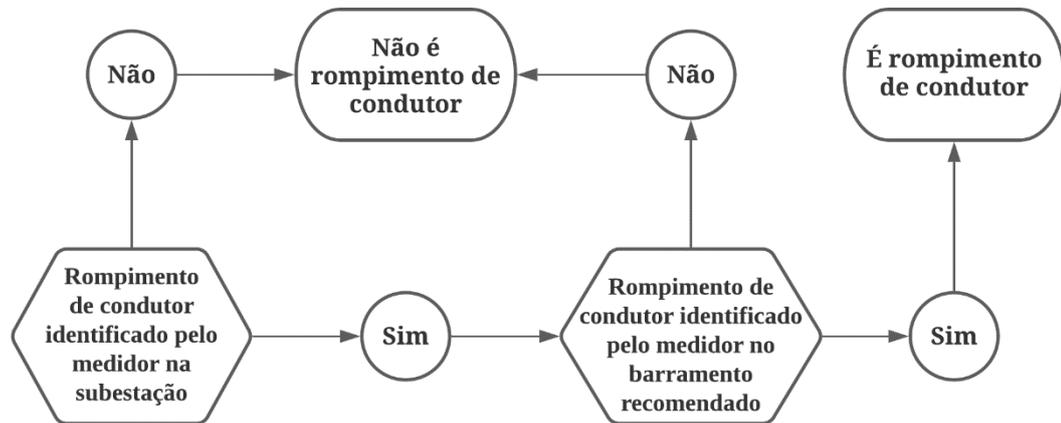
Barramentos	NPMU	
	1	2
1	1	
2		
3		
4		
5		1
<b>Total de barramentos</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

Fonte: Autor

Como pode ser visto através da Tabela 5, o Gcode 8.4 recomenda o uso de 2  $PMUs$  para observar os 5 barramentos no sistema teste, portanto, um medidor é utilizado no barramento da

subestação (barramento 1) e barramento 5. A Figura 23 demonstra o fluxograma usado para distinguir e detectar RC.

Figura 23 - Fluxograma da lógica utilizada nos sistemas teste de 5 barramentos e IEEE de 34 barramentos.



Fonte: Autor.

Portando, pela lógica proposta, só será um RC se ambos os medidores acusarem o rompimento.

Assim, serão mostrados os resultados no capítulo seguinte, para os Casos citados a seguir no sistema teste de 5 barramentos:

- Caso I: Sistema teste com medidor alocado na subestação (1);
- Caso II: Sistema teste com medidor alocado no barramento 5;
- Caso III: Sistema teste com um medidor alocado na subestação (1) e um medidor alocado no barramento 5;

### 4.3.2 Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos

Através de um processo iterativo, com a exclusão do barramento da subestação, que já possui um medidor nela, e dos barramentos monofásicos B, pois os rompimentos ocorreram na fase A, utilizando o código do Gcode 8.4, é fornecida a resposta otimizada e a Tabela 6, mostra o local ideal dos *PMUs* para o sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Tabela 6 - Local ideal das *PMUs* recomendado pelo GAMS para o sistema IEEE de 34 barramentos.

Barramentos	NPMU						
	1	2	3	4	5	6	7
806			1		1	1	1
808				1	1		
814						1	1
816		1	1	1	1		
818						1	1
824						1	1
830	1	1	1	1	1	1	
832				1	1	1	
854							1
860							1
888							1
<b>Total de barramentos observados</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>19</b>

Fonte: Autor.

Como pode ser visto através da Tabela 6, para obter um sistema totalmente observável, o *software* GAMS recomenda a instalação de 7 *PMUs*, entretanto, um dos objetivos deste trabalho é reduzir o custo de implantação e manutenção das *PMU*. Portanto, inicialmente foi instalado um medidor de tensão na subestação, e a seguir todo o processo descrito na Figura 22 foi executado, e comparado com os demais eventos. Posteriormente, um segundo medidor de tensão foi instalado no barramento 830, que foi o resultado mais recomendado através das iterações do *software* GAMS. A lógica seguida é a mesma representada pela Figura 23.

Com isso, foi definido que quando os dois medidores detectarem o RC realmente será um RC, e, quando apenas um dos dois medidores detectar o RC, conclui-se que não será RC. Posteriormente, essa mesma lógica será utilizada no último Caso, que será visto no próximo capítulo, onde serão apresentados os resultados encontrados para os seguintes Casos no sistema teste IEEE de 34 barramentos:

- Caso I: Sistema teste com todos os barramentos e medidor alocado na subestação (800);
- Caso II: Sistema teste sem os barramentos críticos e medidor alocado na subestação (800);
- Caso III: Sistema teste com todos os barramentos e o medidor alocado no barramento 830;

- Caso IV: Sistema teste sem os barramentos críticos e o medidor alocado no barramento 830;
- Caso V: Sistema teste sem os barramentos críticos e com um medidor alocado na subestação (800) e um medidor alocado no barramento 830;

#### 4.3.3 Sistema Teste de 33 Barramentos

Através do *software* GAMS novamente, adaptando o código Gcode 8.4 para o sistema de 33 barramentos, pode-se ver através da Tabela 7 os barramentos que, de acordo com o código simulado no GAMS, é a alocação ideal dos *PMUs*.

Tabela 7 - Local ideal das *PMUs* recomendado pelo GAMS para o sistema de 33 barramentos.

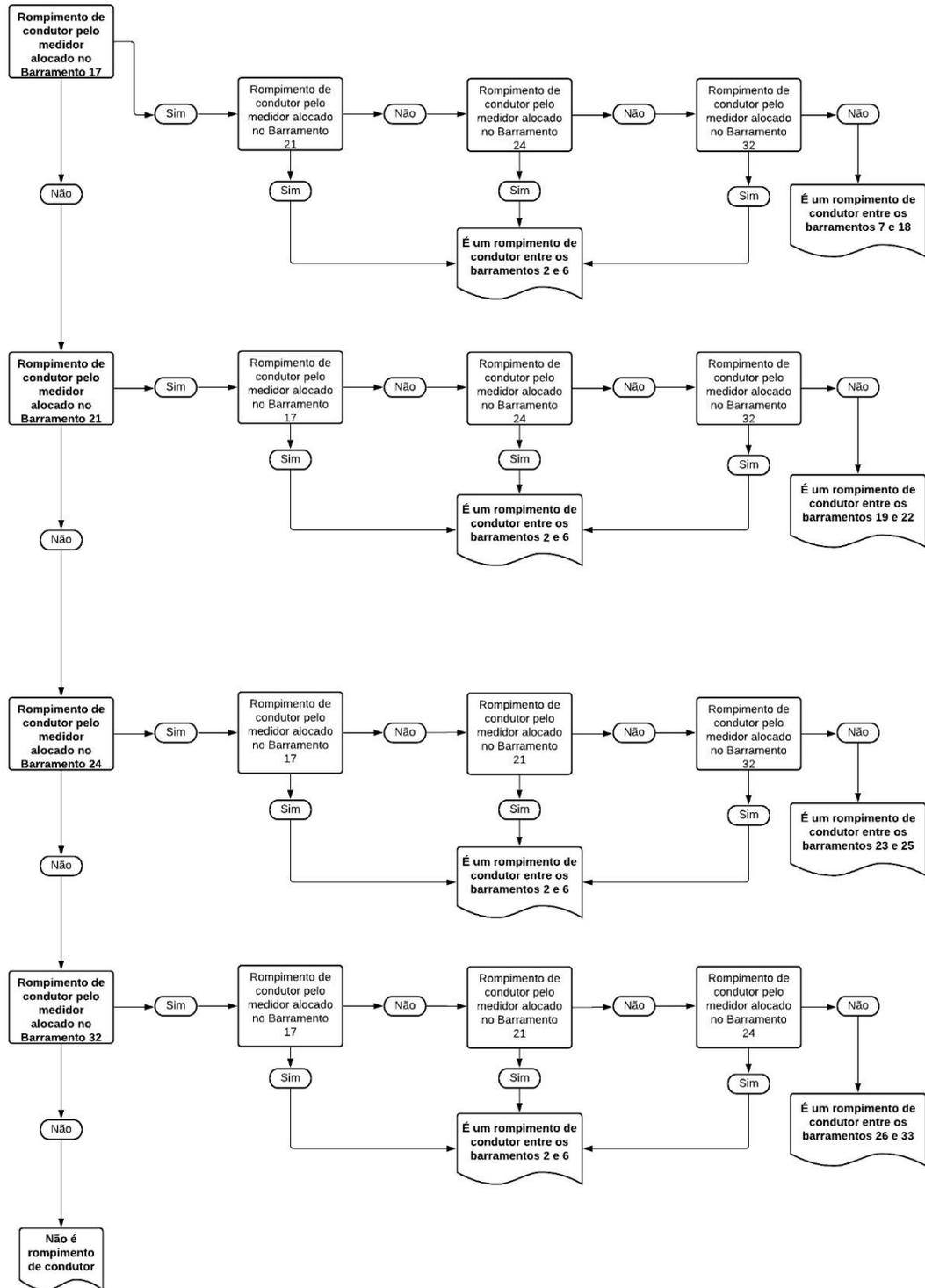
Barramentos	N <sup>PMU</sup>										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2							1	1	1		1
3	1	1	1	1							
4					1					1	1
8							1		1		1
10				1				1		1	
11									1	1	1
13				1		1		1			
14								1	1	1	1
15							1				
17			1			1		1	1	1	1
20		1									
21					1		1	1	1	1	1
24					1	1	1	1	1	1	1
26						1				1	1
27				1	1						
28							1	1		1	
29						1			1		1
30					1						
32			1			1	1		1	1	1
<b>Total de barramentos observados</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>19</b>	<b>22</b>	<b>25</b>	<b>28</b>	<b>31</b>	<b>33</b>

Fonte: Autor.

Como pode ser visto através da Tabela 7, o Gcode 8.4 recomenda o uso de 11 *PMUs* para observar os 33 barramentos no sistema teste, entretanto, o objetivo desse trabalho é de também ser econômico, com isso, foi alocado um medidor apenas no barramento com mais recomendações (barramento 24), mas, foi visto que a eficiência do sistema teve um resultado insatisfatório, logo, foi adicionado outros medidores em outros barramentos com as maiores recomendações até que se alcançasse uma eficiência satisfatória. Por fim foram adicionados 4

medidores nos barramentos 17, 21, 24 e 32. A Figura 24 demonstra o fluxograma usado para distinguir e detectar RC.

Figura 24 - Fluxograma da lógica utilizada no sistema teste de 33 barramentos.



Através do fluxograma pode-se ver a lógica usada pode identificar aproximadamente onde ocorre o RC. Onde, foi definido que, se apenas um medidor reconhecer o RC, o mesmo estará acontecendo no ramal instalado. Se dois ou mais medidores confirmarem RC, isso acontecerá entre os barramentos ramificados "comuns", ou seja, entre os barramentos 2 e 6. Se nenhum medidor reconhece RC, então não ocorreu RC.

Com isso, serão mostrados os resultados no capítulo seguinte, para os Casos citados a seguir no sistema teste de 33 barramentos:

- Caso I: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 17;
- Caso II: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 21;
- Caso III: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 24;
- Caso IV: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 32;
- Caso V: Sistema teste sem barramentos críticos com medidores nos barramentos 17, 21, 24 e 32.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, seguem-se as subseções que demonstram os resultados obtidos em cada sistema teste utilizados neste trabalho com o intuito de analisar a eficiência da metodologia proposta.

### 5.1 Sistema Teste de 5 barramentos

Como pôde ser visto na subseção 4.3.1, para o sistema teste de 5 barramentos, foram testados 3 Casos que se diferem entre si na maneira que foram modelados e nos resultados encontrados, conforme poderá ser visto nas subseções.

#### 5.1.1 Caso I: Sistema com medidor alocado na subestação (1)

Inicialmente, foi simulado, com o medidor alocado na subestação do sistema original, o RC nos 4 barramentos e os valores encontrados foram: mínimo de 20391,28 V, máximo de 20425,60 V, média 20399,86 V e desvio padrão de 17,16 V. Através dos limites de valores mínimos e máximos, são definidos como do RC quando um evento estiver entre estes valores. O rompimento no barramento 2 é aquele que obteve o menor valor, enquanto o rompimento no barramento 4 foi o que teve o maior valor. Depois de simular os RCs, foram simulados também os DTs e chaveamentos, também com seus valores mínimos e máximos, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores máximos e mínimos da TSP em cada evento no Caso I do sistema teste de 5 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Mínimo (V)</b>	<b>Máximo (V)</b>
RC	20391,28	20425,60
DT	486,95	22396,88
SWBC	20387,37	20389,20
SWSL	20364,46	21094,55

Fonte: Autor.

Por meio do valor da TSP, pode-se analisar quais eventos estão entre os valores mínimo e máximo de RC. Portanto, esses eventos são classificados incorretamente como RC, reduzindo a eficiência de distinguir o RC de outros eventos simulados. Usa-se então a Equação 7 para calcular a eficiência do mesmo.

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

Dentre eles, *Total* é o número total de eventos, e *Erros* é o número de eventos entre os limites máximo e mínimo de RC, ou seja, o número de eventos que serão reconhecidos como RC. Portanto, após adicionar 20 dB de SNR (relação sinal-ruído) ao sinal trifásico, a Tabela 9 mostra a eficiência de distinguir RC de outros eventos.

Tabela 9 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso I do sistema teste de 5 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	1	88,89%
SWBC	2	0	100,00%
SWSL	8	3	62,50%
<b>TOTAL</b>	19	4	78,95%

Fonte: Autor.

Portanto, pode-se observar na Tabela 9 que nem todos os eventos se distinguem do RC, por exemplo, os chaveamentos de carga concentrada (SWSL) que tiveram quase metade de seus dados identificados com RCs e sua eficiência é de 62,50%. Juntamente com os RCs, a eficiência geral do sistema, neste Caso, é obtida na Tabela 10.

Tabela 10 - Eficiência do sistema geral do Caso I do sistema teste de 5 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
23	4	<b>82,61%</b>

Fonte: Autor.

Ainda que para este primeiro Caso tenha dado uma eficiência de 83,00%, o resultado obtido não foi totalmente satisfatório, então, a fim de buscar uma melhora da distinção do RC com os demais eventos, fez-se uso do *software* GAMS, que recomendou a instalação do medidor no barramento 5, como será mostrado no Caso II.

### 5.1.2 Caso II: Sistema com medidor alocado no barramento 5

Através do Capítulo da metodologia, viu-se que para o sistema teste de 5 barramentos, o *software* GAMS recomendou a alocação do medidor no barramento 5. Com isso, foram encontrados os valores máximos e mínimos, conforme visto na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores máximos e mínimos da TSP em cada evento no Caso II do sistema teste de 5 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Mínimo (V)</b>	<b>Máximo (V)</b>
RC	15414,50	20369,94
DT	487,88	22373,37
SWBC	20366,04	20367,86
SWSL	20343,33	21072,29

Fonte: Autor.

Assim, com a definição dos novos limites dos valores mínimo e máximo do RC, que foram 15414,50 V e 20369,94 V, respectivamente, pode-se calcular a eficiência de distinguir o RC em relação aos demais eventos, conforme Tabela 12. Na Tabela 13, é mostrada a eficiência geral do sistema neste Caso.

Tabela 12 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso II do sistema teste de 5 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	5	44,44%
SWBC	2	2	0,00%
SWSL	8	1	87,50%
<b>TOTAL</b>	<b>19</b>	<b>8</b>	<b>57,89%</b>

Fonte: Autor.

Tabela 13 - Eficiência do sistema geral do Caso II do sistema teste de 5 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
23	8	<b>65,22%</b>

Fonte: Autor.

Portanto, percebeu-se pela Tabela 12 as porcentagens de eficiência da distinção do RC encontradas, conclui-se que o Caso II possui uma eficiência inferior ao Caso I. Com isso, foram colocados dois medidores, um na subestação e outro no barramento 5, a fim de se encontrar uma eficiência satisfatória, como visto no Caso III da subseção a seguir.

### 5.1.3 Caso III: Sistema com um medidor alocado na subestação (1) e um medidor alocado no barramento 5

Este Caso foi feito da mesma maneira que mostrado na Figura 23, utilizando dois medidores, um na subestação tendo seus limites indo de 20391,28 V a 20425,60 V, e outro no barramento 5 com limite mínimo de 15414,50 V e máximo de 20369,94 V. Assim, fez-se o uso da seguinte lógica:

- No Caso de os dois medidores reconhecerem que não é um RC, a conclusão será que não é um RC.
- No Caso de um dos dois medidores reconhecer o RC, a conclusão será que não é um RC;
- No Caso de os dois medidores reconhecerem o RC, a conclusão será que realmente é um RC;

Com isso, tem-se então a Tabela 14 com a distinção do RC com os demais eventos, e na Tabela 15 a eficiência final do sistema com o método proposto.

Tabela 14 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso III do sistema teste de 5 barramentos

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	0	100,00%
SWBC	2	0	100,00%
SWSL	8	0	100,00%
<b>TOTAL</b>	19	0	100,00%

Fonte: Autor.

Tabela 15 - Eficiência do sistema geral do Caso III do sistema teste de 5 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
23	0	<b>100,00%</b>

Fonte: Autor.

Portanto, obteve-se uma eficiência de 100% na distinção e detecção do RC, que acaba por ser o objetivo dessa pesquisa, provando assim a eficiência desse método para esse sistema teste utilizando TSP.

#### 5.1.4 Resumo dos resultados obtidos para cada Caso do sistema de 5 barramentos

Através da Tabela 16 pode-se ver o resumo dos resultados obtidos em cada Caso no sistema teste de 5 barramentos.

Tabela 16 - Resumo dos Resultados encontrados por Caso do sistema teste de 5 barramentos.

<b>Casos</b>	<b>Valor mínimo da TSP na subestação (V)</b>	<b>Valor mínimo da TSP no barramento 5 (V)</b>	<b>Porcentagem de distinção do RC</b>	<b>Eficiência geral do sistema</b>
I	20391,28	-	78,95%	82,61%
II	-	15414,50	57,89%	65,22%
III	20391,28	15414,50	100,00%	100,00%

Fonte: Autor.

Portanto, a partir da Tabela 16, pode-se ver que colocando dois medidores, a eficiência se tornou muito melhor, mostrando que o aumento de medidores aumenta a capacidade do sistema de distinguir e identificar os RCs dos demais eventos.

## 5.2 Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos

Como foi mostrado no final do Capítulo de metodologia, mais especificamente na subseção 4.3.2, para o sistema teste IEEE de 34 barramentos, foram testados 5 Casos diferentes entre si na forma que foram modelados, e assim foram encontrados diferentes resultados, conforme pode ser visto nas subseções a seguir:

### 5.2.1 Caso I: Sistema com todos os barramentos e medidor alocado na subestação

Utilizando um medidor na subestação (barramento 800), foram simulados os RCs em todos os barramentos, obtendo-se assim, os seguintes resultados: valor mínimo 58698,25 V, valor médio 59094,12 V e desvio padrão 233,39 V, valor máximo 59408,26 V. Este valor máximo de TSP foi obtido na simulação RC no barramento 816, onde o mesmo foi escolhido como o limite distintivo do RC em comparação com outros eventos simulados.

Assim, foi feito de maneira análoga da obtenção dos valores da TSP para o RC e obteve-se os valores da TSP para os distúrbios de tensão (DT) e para os chaveamentos. A Tabela 17 mostra os valores mínimos e máximos encontrados para os eventos de chaveamento e de DT.

Tabela 17 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Mínimo (V)</b>	<b>Máximo (V)</b>
RC	58698,25	59408,2695
DT	20400,91	65413,4766
SWBC	58555,13	58722,5859
SWP	58465,82	59584,2969
SWSL	58902,71	59583,7109
SWDL	58893,03	59093,75

Fonte: Autor.

Caso a TSP dos eventos de DT e dos chaveamentos forem superiores em relação ao limite inferior, ou seja, o valor mínimo da TSP para o RC (58698,25 V), significa que este evento foi classificado como um RC incorretamente. Pode-se analisar cada um dos eventos através desses valores mínimos e máximos da TSP, observando assim quais deles seriam detectados como RC, e, através da Equação 7, pode-se determinar a eficiência na detecção.

Através da Tabela 18, pode-se ver a porcentagem de distinção do RC em comparação com os demais eventos simulados, com SNR de 20 dB adicionado aos sinais trifásicos de tensão. Com esses dados, conclui-se que uma distinção bem-sucedida entre o RC e os outros eventos ocorre quando o TSP calculado após o evento é menor que o valor mínimo da TSP

estabelecido para o RC ou superior ao valor máximo da TSP definida para o RC.

Tabela 18 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	3	66,67%
SWBC	4	1	75,00%
SWP	16	14	12,50%
SWSL	12	10	16,67%
SWDL	38	38	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>79</b>	<b>66</b>	<b>16,46%</b>

Fonte: Autor.

Todavia, pode-se ver que, através da Tabela 18, considerando os limites de tensão definidos pelas 33 simulações de RC aplicado às 77 simulações para os demais eventos, houveram muitos Casos em que não foi possível distinguir o RC. O pior Caso foi o SWDL, pois através da Tabela 16, pode-se observar que os valores das 38 simulações vão de 58893,03 V a 59093,75 V, logo todas simulações detectariam erroneamente estes eventos como RC. Assim, através da Tabela 19, e juntamente com os acertos na detecção do RC em cada um dos 33 barramentos, pode-se definir a eficiência geral.

Tabela 19 - Eficiência geral do sistema do Caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
112	66	<b>41,07%</b>

Fonte: Autor.

A eficiência obtida não teve resultados satisfatórios, como pode ser visto na Tabela 19, e portanto, com o intuito de aumentar a eficiência na distinção de RC em comparação com os demais eventos, foi estudado e analisado o sistema novamente sem os barramentos críticos, assim representado na próxima subseção.

### 5.2.2 Caso II: Sistema sem os barramentos críticos e medidor alocado na subestação

Através da simulação anterior, foi visto que os menores valores da TSP no RC foram em barramentos monofásicos de fase B e aqueles que possuíam pouca ou nenhuma carga. Com isso, esses barramentos serão considerados como críticos nesta subseção. É importante acentuar que, algumas referências informam que as faltas em extremidades do alimentador ou em ramos laterais apresentam uma probabilidade menor de serem detectadas e que uma condição de RC

varia com a resistência e a localização da falta (JAYAMAHA et al., 2017) (MISHRA et al., 2019). Com isso, a sensibilidade da TSP também varia com esses parâmetros.

Então a mesma análise anterior foi realizada novamente, porém excluindo estes barramentos chamados de críticos na análise do RC, e também alguns que não estão em ramos laterais e extremidades, mas tem valores baixíssimos de carga, sendo eles os barramentos: 810, 826, 838 e 856 (monofásicos de fase B), e os barramentos: 822, 840, 862, 858, 834, 842, 844, 846, 848 e 864 (com pouca ou nenhuma carga). Assim, com o medidor ainda na subestação (800), observou-se uma mudança em relação ao valor máximo e mínimo da TSP do RC, sendo: valor mínimo de 58962,52 V e valor máximo de 59408,26 V. Assim, quando o medidor localizado na subestação mensurar um valor de TSP superior à 58962,52 V e inferior a 59408,26 V ele será detectar como um RC.

Com este novo valor mínimo da TSP do RC, pode-se analisar em comparação com os demais eventos e assim determinar uma nova eficiência na distinção, através da Equação 7. A Tabela 20 mostra a porcentagem da distinção do RC com os demais eventos simulados.

Tabela 20 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso II do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	0	100,00%
SWBC	4	0	100,00%
SWP	16	2	87,50%
SWSL	12	3	75,00%
SWDL	38	3	92,11%
<b>TOTAL</b>	<b>79</b>	<b>8</b>	<b>89,87%</b>

Fonte: Autor.

Como pode-se ver na Tabela 20, aconteceu um aumento na eficiência quanto à distinção do RC em comparação com os demais eventos. Com os barramentos críticos a porcentagem de distinção era de 16,46% e sem os barramentos críticos foi de 89,87%, sendo que das 77 simulações, apenas 8 eventos foram identificados erroneamente como RC.

Em alguns Casos, entretanto, não foi obtido um êxito na distinção. Além disso, muitos barramentos foram considerados críticos, o que acabou por diminuir a área delimitada para detecção dos RC, já que em um sistema real os barramentos críticos estão presentes. A Tabela 21 mostra a eficiência geral do sistema, isto é, a capacidade de ele distinguir um evento normal de um rompimento, e identificar o próprio RC em todos os barramentos.

Tabela 21 - Eficiência do sistema geral do Caso II do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
112	22	<b>80,36%</b>

Fonte: Autor.

Depois de todos os dados adquiridos, pôde-se evidenciar que, mesmo que a metodologia apresentada até esta subseção seja fácil e prática de ser aplicada, a mesma apresenta algumas desvantagens quando se trata da distinção do RC em relação aos demais eventos. Pode-se notar também que a detecção do RC com medições apenas no barramento da subestação é um desafio, especialmente se o evento ocorrer longe dele ou em barramentos com pouca ou nenhuma carga. Com o intuito de aumentar a eficiência na distinção do RC dos demais eventos, a próxima seção mostrará um estudo de otimização aplicado a locação de um medidor em outro local do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

### 5.2.3 Caso III: Sistema com todos os barramentos e o medidor alocado no barramento 830

Conforme foi visto na última seção da metodologia, o *software* GAMS, que é responsável por recomendar a melhor localização para alocar um medidor, recomendou na primeira iteração a alocação de um medidor no barramento 830. Com isso, foi colocado um medidor neste barramento e simulado os dados de tensão de todos os eventos já citados. Em seguida, foi realizado o processamento dos dados e o cálculo da TSP pelo *software* de processamento de algoritmos matemáticos OCTAVE, em que, foi inserido um ruído branco gaussiano com SNR de 20 dB adicionado ao sinal das três fases em cada simulação, e, posteriormente, o sinal foi filtrado por um filtro Butterworth de segunda ordem, com uma frequência de corte de 180 Hz, para que depois, as três fases filtradas  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  fossem janeladas em cada ciclo ( $\gamma$ ) com taxas de amostragem de 128 amostras por ciclo e então, os fasores foram calculados utilizando a transformada de Fourier. Os resultados do medidor no barramento 830 são mostrados na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores máximos e mínimos da TSP no Caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Mínimo (V)</b>	<b>Máximo (V)</b>
RC	44560,11	57934,60
DT	19922,03	62928,82
SWBC	54130,59	56325,73
SWP	55718,54	61339,12
SWSL	56755,71	61335,75
SWDL	56750,33	57950,61

Fonte: Autor.

Como feito antes, foi identificado como um RC, todo evento que tenha o valor da TSP inferior ao mínimo (44560,11 V) e superior ao máximo (57934,60 V). Por meio da Tabela 23, é mostrada a porcentagem da eficiência da distinção do RC, em comparação com os demais eventos realizados através da Equação 7.

Tabela 23 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	4	55,56%
SWBC	4	4	0,00%
SWP	16	15	6,25%
SWSL	12	10	16,67%
SWDL	38	37	2,63%
<b>TOTAL</b>	<b>79</b>	<b>70</b>	<b>11,39%</b>

Fonte: Autor.

Analisando a Tabela 23, pode-se ver que a eficiência na distinção do RC com os demais eventos utilizando um medidor no barramento recomendado pelo GAMS não atingiu níveis satisfatórios, em consequência do valor baixo do limite da TSP estabelecida para o RC (44560,113 V). Tendo isso em vista, a eficiência geral pode ser vista na Tabela 24.

Tabela 24 - Eficiência do sistema geral do Caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
112	70	<b>37,50%</b>

Fonte: Autor.

#### 5.2.4 Caso IV: Sistema sem os barramentos críticos e o medidor no barramento 830

A fim de encontrar uma eficiência melhor, foi excluído novamente os barramentos determinados como críticos neste sistema. Entretanto, após realizar a retirada dos barramentos críticos, notou-se que não houve mudança quanto aos limites de mínimo (44560,11 V) e máximo (57934,60 V), e, portanto, a eficiência acabou por ser a mesma do Caso III.

#### 5.2.5 Caso V: Sistema sem os barramentos críticos e com um medidor alocado na subestação e um medidor alocado no barramento 830

Neste último Caso, houve a associação dos valores encontrados pelo medidor na subestação e pelo medidor alocado no barramento 830, como foi explicado na Figura 23. Os limites utilizados serão 58962,52 V (mínimo) e 59408,26 V (máximo) com relação à

subestação, 44560,11 V (mínimo) e 57934,60 V (máximo) com relação ao barramento 830. A análise foi feita utilizando a seguinte lógica:

- No Caso de os dois medidores reconhecerem que não é um RC, a conclusão será que não é um RC.
- No Caso de um dos dois medidores reconhecer o RC, a conclusão será que não é um RC;
- No Caso de os dois medidores reconhecerem o RC, a conclusão será que realmente é um RC;

Com isso, a porcentagem de distinção do RC com os demais eventos testados pode ser vista através da Tabela 25.

Tabela 25 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso V do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	0	100,00%
SWBC	4	0	100,00%
SWP	16	2	87,50%
SWSL	12	3	75,00%
SWDL	38	2	94,74%
<b>TOTAL</b>	<b>79</b>	<b>7</b>	<b>91,14%</b>

Fonte: Autor.

Através da Tabela 25, pode-se ver que houve uma distinção maior do RC comparado com a eficiência nos Casos anteriores. Porém, apesar do aumento na distinção do RC em relação com os eventos simulados, tem-se os problemas dos barramentos críticos, nos quais ao acontecer um RC nesses barramentos, não haverá a identificação do mesmo, fazendo com que a eficiência geral do sistema não permaneça em 91,14%, como mostrado na Tabela 25. Com isso, a Tabela 26, mostra a eficiência geral do sistema, conforme o estabelecido no Caso V.

Tabela 26 - Eficiência do sistema geral do Caso V do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
112	21	<b>81,25%</b>

Fonte: Autor.

### 5.2.6 Revisão dos Resultados Obtidos nos 5 Casos para o Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos

A Tabela 27 mostra a eficiência geral de todos os Casos na distinção do RC em comparação com os demais eventos testados.

Tabela 27 - Revisão dos Resultados encontrados por Caso do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Casos	Nº de barramentos	Valor mínimo da TSP na subestação (V)	Valor mínimo da TSP no barramento 836 (V)	Porcentagem de distinção do RC	Eficiência geral do sistema
I	33	58698,25	-	16,46%	41,07%
II	25	58962,52	-	89,87%	80,36%
III	33	-	44560,11	11,39%	37,50%
IV	25	-	44560,11	11,39%	37,50%
V	25	58962,52	44560,11	91,14%	81,25%

Fonte: Autor.

Com a análise dos cinco Casos apresentados nesta subseção, foi possível verificar como os barramentos críticos afetam a capacidade da TSP de ser usado em esquemas de detecção de RC. Um outro fator de extrema importância que puderam ser observados em relação à detecção do RC está relacionado à carga dos barramentos, pois sempre houve uma componente significativa da TSP para o RC em Casos de cargas elevadas.

Pode-se observar que o método de análise proposto para o sistema IEEE de 34 barramentos oferece o potencial de analisar o TSP para detectar e distinguir RC no sistema de distribuição de energia. Em relação aos pontos de medição dispostos ao longo do SD, é importante lembrar que no método proposto neste trabalho, apenas um ponto de medição (barramento da subestação) foi utilizado inicialmente, e em seguida outro ponto de medição foi otimizado pelo *software* GAMS para diferenciá-lo de outros métodos mencionados no Capítulo 2. Para efeitos de estudo, foi testada também o barramento 816 do Sistema Teste IEEE de 34 barramentos, que foi recomendado pelo GAMS em uma segunda iteração, o qual apresentou a mesma eficiência demonstrada pelo barramento 830.

### 5.3 Sistema Teste de 33 Barramentos

Assim como foi indicado ao final do Capítulo de metodologia, mais especificamente na subseção 4.3.3, para o sistema teste de 33 barramentos, foram testados 5 Casos diferentes entre si, e assim foram encontrados diferentes resultados. Nesse sistema, não foi utilizado um medidor na subestação, pois, através de simulações, foi visto que a eficiência do sistema com a presença do mesmo acabou não sendo satisfatória. Os valores encontrados nesse Capítulo já se encontram sem a presença dos valores dos barramentos críticos (barramento 18, 22, 25 e 33), já que foi visto nos últimos dois sistemas que a eficiência dos mesmos fica melhor sem os tais barramentos, conforme pode ser visto nas subseções a seguir:

### 5.3.1 Caso I: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 17

Com um medidor no barramento 17, foram simulados os RCs em todos os barramentos, obtendo-se assim, os seguintes resultados: valor mínimo 19239,35 V, valor médio 22190,57 V e desvio padrão 2952,41 V, valor máximo 25330,34 V. Os valores mínimos e máximos de cada evento podem ser vistos na Tabela 28 a seguir.

Tabela 28 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso I do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Mínimo (V)</b>	<b>Máximo (V)</b>
RC	19239,35	25330,34
DT	491	27758,79
SWBC	24937,26	24968,57
SWP	24991,33	59584,29
SWDL	24982,53	25613,39

Fonte: Autor.

Por meio da Tabela 29, é mostrada a porcentagem da eficiência da distinção dos limites do RC, em comparação com os demais valores dos eventos realizados através da Equação 7.

Tabela 29 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso I do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	6	<b>33,33%</b>
SWBC	4	4	<b>0,00%</b>
SWP	6	4	<b>33,33%</b>
SWDL	64	64	<b>0,00%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>83</b>	<b>78</b>	<b>6,02%</b>

Fonte: Autor.

Entretanto, através da Tabela 30 pode-se ver que, considerando os limites de tensão definidos pelas 32 simulações de RC aplicado às 83 simulações para os demais eventos, houveram muitos Casos em que não foi possível distinguir o RC. Os piores casos foram o SWDL e SWBC, pois, como pode ser visto através da Tabela 28, todos os valores dos mesmos se encontram dentro dos limites definidos pelos valores dos rompimentos de condutor, logo todas simulações detectariam erroneamente estes eventos como RC. Assim, através da Tabela 30, e juntamente com os acertos na detecção do RC em cada um dos 32 barramentos, pôde-se definir a eficiência geral.

Tabela 30 - Eficiência do sistema geral do Caso I do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
115	82	<b>28,70%</b>

Fonte: Autor.

Como pode ser visto na Tabela 30, a eficiência obtida não teve resultados satisfatórios, e portanto, com o intuito de aumentar a eficiência na distinção de RC em comparação com os demais eventos, foi estudado e analisado o sistema agora o sistema com o medidor no barramento 21, que também foi recomendado pelo *software* GAMS, e fica em outro ramal do sistema, como pode ser visto no Caso II.

### 5.3.2 Caso II: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 21

Agora com um medidor no barramento 21, foram simulados os RCs em todos os barramentos, obtendo-se assim, os seguintes resultados: valor mínimo 19750,23 V, valor médio 25034,32 V e desvio padrão 2033,66 V, valor máximo 26395,83 V. Os valores mínimos e máximos de cada evento podem ser vistos na Tabela 31 a seguir.

Tabela 31 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso II do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Mínimo (V)</b>	<b>Máximo (V)</b>
RC	19750,23	26395,83
DT	502,11	28478,89
SWBC	25595,62	25619,19
SWP	15362,42	26081,48
SWDL	25627,41	25845,73

Fonte: Autor.

Através da Tabela 32, é mostrada a porcentagem da eficiência da distinção dos limites do RC, em comparação com os demais valores dos eventos realizados através da Equação 7.

Tabela 32 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso II do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	6	<b>33,33%</b>
SWBC	4	4	<b>0,00%</b>
SWP	6	5	<b>16,67%</b>
SWDL	64	64	<b>0,00%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>83</b>	<b>79</b>	<b>4,82%</b>

Fonte: Autor.

Assim como no caso anterior, através da Tabela 32, foi visto que aplicando a distinção de RC em relação aos demais eventos, não se alcançou uma eficiência satisfatória. Os piores casos, novamente, foram o SWDL e SWBC, onde, por meio da Tabela 31, pode-se ver que todos os valores dos mesmos se encontram dentro dos limites definidos pelos valores dos RCs, logo, todas simulações detectaram erroneamente estes eventos como RC. Assim, através da Tabela 33, e juntamente com os acertos na detecção do RC em cada um dos 32 barramentos, pôde-se definir a eficiência geral.

Tabela 33 - Eficiência do sistema geral do Caso II do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
115	83	<b>27,83%</b>

Fonte: Autor.

Analisando o sistema com o medidor no barramento 21, pôde-se ver que houve uma redução na eficiência com relação ao Caso I, onde o medidor se encontrava no barramento 17. Com isso, no próximo Caso, será alocado um medidor 24, também indicado pelo GAMS, e que fica em outro ramal do sistema, a fim de ver se no mesmo a identificação da distinção de RCs tem uma melhor eficiência.

### 5.3.3 Caso III: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 24

Alocando novamente um medidor em outro barramento, agora no barramento 24, foram simulados os RCs em todos os barramentos, obtendo-se assim, os seguintes resultados: valor mínimo 20224,07 V, valor médio 25643,92 V e desvio padrão 2077,69 V, valor máximo 26845,29 V. Os valores mínimos e máximos de cada evento podem ser vistos na Tabela 34 a seguir.

Tabela 34 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso III do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Mínimo (V)</b>	<b>Máximo (V)</b>
RC	20224,07	26845,29
DT	495,42	29195,26
SWBC	26236,68	26309,56
SWP	15710,29	26779,55
SWDL	26270,98	26509,48

Fonte: Autor.

Na Tabela 35 pode ser vista as porcentagens de distinção dos valores de RC com relação aos demais eventos no sistema com o medidor no barramento 24 realizados através da equação 7.

Tabela 35 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso III do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	6	<b>33,33%</b>
SWBC	4	4	<b>0,00%</b>
SWP	6	5	<b>16,67%</b>
SWDL	64	64	<b>0,00%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>83</b>	<b>79</b>	<b>4,82%</b>

Fonte: Autor.

Pôde-se ver então que a eficiência na distinção de RC foi igual ao Caso II, o que não demonstrou nenhum avanço com relação ao medidor anterior, mesmo sendo em ramais diferentes. Novamente os piores casos se encontraram nos chaveamentos SWBC e SWDL, que se explica por meio da Tabela 34, onde pode-se ver que todos os valores dos mesmos se encontram dentro do limite estabelecido pelo RC. Com isso, por meio da Tabela 36 pode-se ver a eficiência geral do sistema juntamente com o acerto na detecção dos RCs em todos os 32 barramentos.

Tabela 36 - Eficiência do sistema geral do Caso III do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
115	83	<b>27,83%</b>

Fonte: Autor.

Como já foi dito, a eficiência do Caso III acabou sendo igual à do Caso II, onde tinha um medidor alocado no barramento 21. Com isso, no Caso IV será alocado outro medidor em outro barramento que fica em outro ramal e que também foi recomendado pelo GAMS, a fim de ver se o medidor alocado nesse outro ramal pode ter uma eficiência que seja satisfatória.

#### 5.3.4 Caso IV: Sistema teste sem barramentos críticos com medidor no barramento 32

Com o medidor agora no barramento 32, foram simulados os RCs em todos os barramentos, obtendo-se assim, os seguintes resultados: valor mínimo 19202,49 V, valor médio 23029,54 V e desvio padrão 2833,29 V, valor máximo 25357,12 V. Os valores mínimos e máximos de cada evento podem ser vistos na Tabela 37 a seguir.

Tabela 37 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso IV do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Mínimo (V)</b>	<b>Máximo (V)</b>
RC	19202,49	25357,12
DT	493,85	27891,06
SWBC	25040,56	25087,4
SWP	15728,06	25476,81
SWDL	25100,52	25499,31

Fonte: Autor.

Na Tabela 38 podem ser vistas as porcentagens de distinção dos valores de RC com relação aos demais eventos no sistema com o medidor no barramento 32 realizados através da equação 7.

Tabela 38 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso IV do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	6	<b>33,33%</b>
SWBC	4	4	<b>0,00%</b>
SWP	6	4	<b>33,33%</b>
SWDL	64	63	<b>1,56%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>83</b>	<b>77</b>	<b>7,23%</b>

Fonte: Autor.

Pode-se ver que a eficiência no Caso IV com um medidor alocado no barramento 32 do sistema de 33 barramentos teve uma melhora com relação aos casos anteriores, entretanto, ainda assim é uma eficiência muito baixa e não satisfaz o objetivo desse trabalho. Novamente o SWBC se apresentou como o pior resultado com 0,00% de distinção, mostrando que seus valores de tensão estão todos dentro do limite definido pelo RC, como pode ser visto na Tabela 37. Através da Tabela 39 pode-se ver então a eficiência geral do sistema juntamente com o acerto na detecção dos RCs em todos os 32 barramentos.

Tabela 39 - Eficiência do sistema geral do Caso IV do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
115	81	<b>29,57%</b>

Fonte: Autor.

Analisando o sistema, agora com o medidor no barramento 32, pôde-se ver que houve um aumento na eficiência com relação aos casos anteriores, entretanto, ainda assim, com uma

porcentagem insuficiente para o que se objetiva nesse trabalho.

Através das simulações nesses últimos casos (Caso I, II, III e IV), foi percebido que os valores de tensão que sofriam mais alterações se encontravam nos ramais onde estavam inseridos os medidores, com isso, foi decidido a criação de um método com os 4 medidores juntos (barramentos 17, 21, 24 e 32) utilizando os limites de tensão da TSP unicamente dos ramais de cada medidor em cada um desses barramentos específicos sem os barramentos críticos, como pode ser visto no Caso V a seguir.

### 5.3.5 Caso V: Sistema teste sem barramentos críticos com medidores nos barramentos 17, 21, 24 e 32

Nesse Caso V, foram utilizados os 4 medidores utilizados nos casos anteriores, onde foram simulados todos os RCs, utilizando assim os valores de tensão apenas dos barramentos que se encontravam nos ramais de cada medidor, pois notou-se que os valores dos mesmos sofriam mais alterações ao longo das simulações, gerando assim os valores mínimos e máximos mostrados na Tabela 40 a seguir.

Tabela 40 - Valores mínimos e máximos da TSP no Caso V do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Barramentos</b>	<b>Mínimo (V)</b>	<b>Máximo (V)</b>
17	19239,35	19365,2
21	19750,23	19750,45
24	20224,07	20224,44
32	19202,49	19844,87

Fonte: Autor.

Na Tabela 41 podem ser vista as porcentagens de distinção dos valores de RC com relação aos demais eventos no sistema com o medidor nos barramentos 17, 21, 24 e 32 realizados através da equação 7 utilizando a metodologia da Figura 24.

Tabela 41 - Distinção do RC com os demais eventos no Caso V do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Evento</b>	<b>Total de Simulações</b>	<b>Total de Erros</b>	<b>Porcentagem de distinção de RC</b>
DT	9	0	<b>100,00%</b>
SWBC	4	0	<b>100,00%</b>
SWP	6	0	<b>100,00%</b>
SWDL	64	0	<b>100,00%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>83</b>	<b>0</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: Autor.

Como pode ser visto na Tabela 41, a distinção de RC apresentou uma eficiência de 100,00%, utilizando a metodologia da Figura 24, onde foi definido que se ocorrer a detecção de um RC, o mesmo estará localizado no ramal do medidor que o identificou, e se dois medidores identificarem um RC, o mesmo estará ocorrendo no ramal comum que interligam os demais ramais, ou seja, entre os barramentos 2 e 6, o que acabou por superar de forma incontestável a eficiência dos casos anteriores. Com isso, a Tabela 42 mostra como ficou a eficiência geral do sistema com a adição dos valores dos RCs do sistema de 33 barramentos.

Tabela 42 - Eficiência do sistema geral do Caso V do sistema teste de 33 barramentos.

<b>Nº de casos</b>	<b>Erros</b>	<b>Eficiência</b>
115	4	<b>96,52%</b>

Fonte: Autor.

Pode-se ver que o sistema apresentou apenas 4 erros gerando uma eficiência geral de 96,52%. Esses são referentes aos barramentos críticos presentes no sistema, que acabam não sendo identificados como RCs. Através da Tabela 43, pode-se ver a função de cada medidor nos barramentos utilizados nessa metodologia.

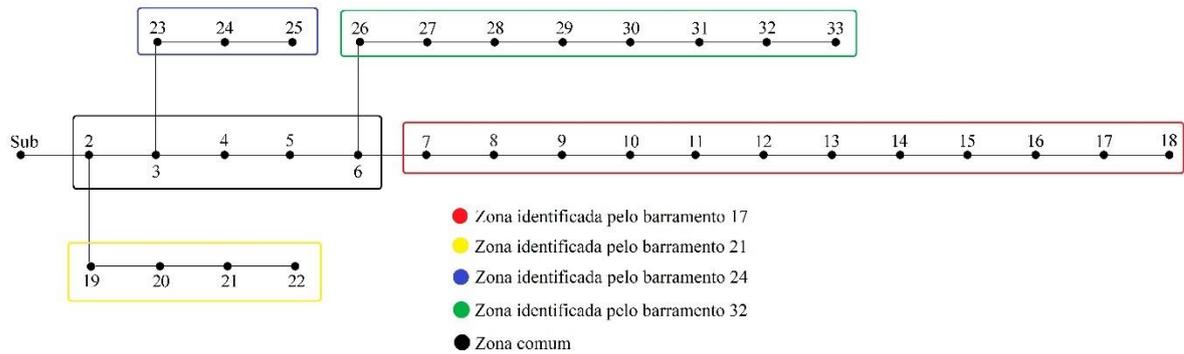
Tabela 43 - Função de cada medidor na metodologia utilizada.

<b>Barramentos</b>	<b>Zona de Identificação</b>
17	Detectar os RCs entre os barramentos 7 e 18
21	Detectar os RCs entre os barramentos 19 e 22
24	Detectar os RCs entre os barramentos 23 e 25
32	Detectar os RCs entre os barramentos 26 e 33

Fonte: Autor.

Na Figura 25 pode-se ver as zonas que cada barramento fica responsável por “monitorar”, ou seja, se ocorrer um RC em determinada zona, será um determinado medidor que irá identificá-lo.

Figura 25 - Zonas de monitoramento de cada barramento.



Fonte: Autor.

Sendo assim, a metodologia funciona da seguinte forma:

- Quando apenas o medidor do barramento 17 identifica uma TSP com um valor dentro do limite de mínimo e máximo definido pela Tabela 41, o medidor em questão determinará que um RC está acontecendo entre os barramentos 7 e 18 (Zona identificada pelo barramento 17);
- Quando apenas o medidor do barramento 21 identifica uma TSP com um valor dentro do limite de mínimo e máximo definido pela Tabela 41, o medidor em questão determinará que um RC está acontecendo entre os barramentos 19 e 22 (Zona identificada pelo barramento 21);
- Quando apenas o medidor do barramento 24 identifica uma TSP com um valor dentro do limite de mínimo e máximo definido pela Tabela 41, o medidor em questão determinará que um RC está acontecendo entre os barramentos 23 e 25 (Zona identificada pelo barramento 24);
- Quando apenas o medidor do barramento 32 identifica uma TSP com um valor dentro do limite de mínimo e máximo definido pela Tabela 41, o medidor em questão determinará que um RC está acontecendo entre os barramentos 26 e 33 (Zona identificada pelo barramento 32);
- Quando dois ou mais medidores identificam uma TSP que esteja dentro dos limites de mínimo e máximo definido pela Tabela 41, os medidores em questão determinarão que está ocorrendo um RC entre os barramentos 2 e 6.

## 6. CONCLUSÃO

Devido à atual demanda por eletricidade e, portanto, à crescente expansão dos SDs, além das constantes mudanças neste cenário, este trabalho é baseado em modelos de detecção e diferenças entre RC e vários outros tipos de eventos que podem ocorrer no SD. Para os testes, foram utilizados um sistema teste de 5 barramentos, um de 33 barramentos e o sistema teste IEEE de 34 barramentos; no sistema de cinco barramentos, foi preciso criar três Casos para analisar a capacidade do TSP de detectar RC e distingui-lo de eventos comuns; para o sistema de 33 barramentos foi necessário criar cinco Casos para analisar a mesma função e para o sistema IEEE de 34 barramentos, também foram criados cinco Casos para realizar o mesmo. Os resultados mostraram a capacidade da TSP em detectar corretamente o RC.

Foi utilizada uma metodologia de análise que utilizou apenas dois pontos de medição, dois no sistema teste de 5 barramentos (na subestação e no barramento 5), e outros dois no sistema teste IEEE de 34 barramentos (na subestação e no barramento 830 do sistema teste), sendo simples e prática de ser implementada. Já no sistema de 33 barramentos, foi usado um método que utilizou 4 pontos de medição, onde, depois de algumas simulações, como foi mostrado no Capítulo 4, percebeu-se que a eficiência do sistema seria melhor com a presença dos mesmos. No sistema teste de 5 barramentos, foi visto uma eficiência satisfatória (acima de pelo menos 90%), de 100%, sem a necessidade de mudanças, tendo total distinção e detecção dos RCs dos demais eventos.

Apesar de não apresentar uma eficiência totalmente satisfatória, que foi de 81,25%, a TSP foi capaz de detectar e distinguir RCs em grande parte dos barramentos do sistema teste IEEE 34 barras. A fim de atingir uma taxa de 100% de detecção e distinção do RC em comparação com os DTs e os eventos de chaveamento, sugere-se adicionar uma análise com três medidores no sistema teste de 34 barramentos do IEEE.

No sistema teste de 33 barramentos, apesar de serem utilizados mais medidores que nos sistemas anteriores, o mesmo apresentou uma ótima eficiência geral ao final de 96,52%, o que prova que o uso de mais medidores no sistema não foi um exagero, já que os mesmos foram capazes de detectar e distinguir os RCs em quase todo o sistema. O sistema acabou por não apresentar 100% de eficiência, pois as TSPs com pouca carga apresentam dificuldade quanto à distinção com os RCs, que são as chamadas barras críticas, ou com pouca carga. Uma maneira de tentar corrigir isso seria adicionar cargas ao final desses barramentos que acabam por ser em finais de linha.

Assim, pode-se ver que TSP é uma tecnologia promissora que pode ser usada com outras

tecnologias para triagem preliminar para formar um método de detecção de RC confiável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-GALIL, T. K.; KAMEL, M.; YOUSSEF, A. M.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A.; Power quality disturbance classification using inductive inference Approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, 2004, v. 19, n. 4, pp. 1812-1818.
- ADELAKUN, N. O.; OLANIPEKUN, B. A.; Outage Analysis and System Disturbances on 330 kV and 132 kV Transmission System in Nigeria. **European Journal of Engineering Research and Science**. Vol. 5, No. 1. 2020, pp. 1-3.
- BACIL, G. G.; SIMULAÇÃO DE FAI EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**. 2020, pp. 21-152.
- BHANDIA, R.; MURO, J. D. J. C.; CVETKOVIC, M.; PALENSKY, P.; “High impedance fault detection using advanced distortion detection technique”. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2020, pp. 1.
- CARVALHO, J. G. S.; ALMEIDA, A. R.; SOUZA, J. V. S. B.; SOBREIRA, B. O.; FERREIRA, D. D.; Detecção e Classificação de FAI usando Estatística de Ordem Superior e Rede Neural MLP. **Universidade Federal do Piauí**. 2021, pp. 3-6.
- CAVALARI, C. F.; MUSSI, C. O.; ARAUJO, D. R. R. P.; ARAUJO, L. R.; Localização de FAI em Alimentadores de Distribuição Utilizando Busca Exaustiva. **Universidade Federal de Juiz de Fora**. 2021, pp. 2-6.
- CRUZ, J. A. C.; MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN HIL DE UN FILTRO ACTIVO EN DERIVACIÓN. **LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**. 2019, pp. 19,20-39.
- DHARAGESHWARI, K.; NAYANATARA, C.; Multiobjective Optimal Placement of Multiple Distributed Generations in IEEE 33 Bus Radial System Using Simulated Annealing. **2015 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies [ICCPCT]**. 2015, pp. 3-7.
- DU, Y.; TAN, W.; Power Based Open Phase Condition Detection Scheme. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. 2021, pp. 2-10.

EATON, J. W.; BATEMAN, D.; HAUBERG, S.; WEHBRING, R.; (2020). “GNU Octave version 6.1.0 manual: a highlevel interactive language for numerical computations”. Disponível em: <<https://www.gnu.org/software/octave/doc/v6.1.0/>>.

FRANCO, M.; SANTOS, J. C. C. DOS; PIZZOLATO, G. P.; SANTOS, J. O. DOS; HASSELEIN, H.; SANTOS, E. M. DOS. MÉTODO PARA DETECÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO E OSCILAÇÕES ESTÁVEIS DE POTÊNCIA EM GERADORES SÍNCRONOS. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**. 2020.

GAO, Haitao. XU, Peng. TAO, Jin. HUANG, Shihui. WANG, Rugang. ZHOU, Quan. Voltage Flicker Detection Based on Probability Resampling. **Energies** **2020**. 2020, pp. 1-12.

GRIMALDI, R. B. G.; FERREIRA, T. V.; MONTALVÃO, J.; LIMA, E. M.; BRITO, N. S. D.; SANTOS, W. C.; MACEDO, M. S.; AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA DETECÇÃO DE FAI. **Sociedade Brasileira de Automática**. 2020, pp. 1-8.

GUARACY, P. A.; COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**. 2019, pp 165,166-170.

HART, M. V.; DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FAI EM ALIMENTADORES INTELIGENTES DE DISTRIBUIÇÃO. **UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO**. 2018, pp. 35,36-52.

HØIDALEN, H. K.; “Atpdraw<sup>TM</sup>- The graphical preprocessor to atp electromagnetic transients program.” [Online]. Disponível em: <<https://www.atpdraw.net/>>. 1992.

HUANG, X.; WU, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, H.; Method of Transmission Conductor Loosened Detect Based on Image Sensors. **IEEE**. 2020, pp. 2-13.

IEEE. (1992); “1992 Test Feeder Cases” [Online]. Disponível em: <<https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>.

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

JAYAMAHA, D. K. J. S.; MADHUSHANI, I. H. N.; GAMAGE, R. S. S. J.; TENNAKOON,

P. P. B.; LUCAS, J. R.; JAYATUNGA, U.; “Open conductor fault detection”. Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), 2017, pp. 1-5.

LIMA, F. P. A.; MINUSSI, C. R.; “Análise de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica usando o algoritmo de seleção negativa”. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS –BRACIS-2012, Curitiba. Encontro Nacional de Inteligência Artificial. Curitiba: PUC, 2012. p. 1-12.

MISHRA, M.; PANIGRAHI, R. R.; “Taxonomy of High Impedance Fault Detection Algorithm”, Measurement, vol. 148, 2019, pp. 1-19.

NANDI, K.; DAS, A. K.; GHOSH, R.; DALAI, S.; CHATTERJEE, B.; “Hiperbolic window s-transform aided deep neural network model-based power quality monitoring framework in electrical power system”. IEEE Sensors Journal, 2021, vol. 21, no. 12, pp. 13685-13703.

NASCIMENTO, L. A. F.; RICCIOTTI, V. B. S. D.; RICCIOTTI, A. C. D.; JÚNIOR, A. B.; OLIVEIRA, P. T. C.; RIBEIRO, J. C.; DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CURTO-CIRCUITOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA DISCRETA FRACIONÁRIA DE FOURIER E REDE NEURAL ARTIFICIAL. **Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica**. Ed. Atena, 2021, p.126.

PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M.; BACCA, I.; FILHO, J. M. C.; Variações de tensão de curta duração - Parte I. **Qualidade de Energia**. Capítulo 5. 2013, pp. 3-10.

PINHO, A. C.; GARCIA, E. G. A.; Novas Métricas para a Classificação de Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. 2021, pp. 1-6.

SENA, G. G.; DUQUE, C. A.; SILVA, L. R. M.; ALEIXO, R. R.; DETECÇÃO DE FAI UTILIZANDO REDE NEURAL COM FUNÇÃO DE BASE RADIAL E TRANSFORMADA WAVELET ESTACIONÁRIA. **Universidade Federal de Juiz de fora**. 2020, pp 2-8.

SILVA, J. C.; Análise da tensão de sequência negativa aplicada à detecção do rompimento do condutor em sistemas de distribuição. **Universidade de São Paulo – USP**. 2020, pp. 15,33-60.

SILVA, H. R. J.; Análise de uma nova proposta para identificação de FAI em redes aéreas de distribuição. **Repositório Institucional - Universidade Federal de Uberlândia**. 2020, pp. 41,42-104.

SILVA, M. P. C.; METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE FILTROS PARA MITIGAÇÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**. 2019, pp. 24-143.

STEIN, H.; UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE FAI ENVOLVENDO A RUPTURA DO CONDUTOR. **Universidade Federal do Pampa**. 2019, pp. 33-94.

STEVENSON, W. D.; “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”. Ed. McGraw- Hill do Brasil, 1986, pp. 296-458.

SUFANA, C.; “Methods for Detecting and Analyzing an Open Phase Condition of a Power Circuit to a Nuclear Plant Station Service or Startup Transformer”. Working Group K11 Methods for Analyzing and Detecting an Open Phase Condition of a Power Circuit to a Nuclear Plant Station Service or Startup Transformer. **IEEE**. 2020, pp. 17-92.

TAN, R. H.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; “Numerical model framework of power quality events,” European Journal of Scientific Research, 2010, vol. 43, no. 1, pp. 30–47.

TOMIC, J. J.; KUSLJEVIC, M. D.; VUJICIC, V. V.; “A new power system digital harmonic analyzer,” IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 772–780.

GAO, H.; XU, P.; TAO, J.; HUANG, S.; WANG, R.; ZHOU, Q.; Voltage Flicker Detection Based on Probability Resampling. **Energies 2020**. 2020, pp. 1-12.

WANG, X.; DING, T.; XU, W.; An Open Conductor Condition Monitoring Scheme Using Natural Voltage and Current Disturbances. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**. 2019, pp. 2,3-10.

WICZYNSK, Grzegorz. Estimation of Pst Indicator Values on the Basis of Voltage Fluctuation Indices. **IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT**. 2017, pp. 1-10.

**APÊNDICE A: TRABALHOS PUBLICADOS**

NASCIMENTO, H. M. A.; DILLI, M. Á.; SILVA, J. C.; “Tutorial de simulação no software ATPDraw<sup>TM</sup> do sistema de distribuição IEEE 34 barras”. CBQEE 2021 - XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2021, pp. 1-6.

DILLI, M. Á.; NASCIMENTO, H. M. A.; SILVA, J. C.; “Conductor break detection in distribution system through negative sequence voltage”. Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones - RIELAC, 2021, pp. 1-14.

**APÊNDICE B: CAPÍTULO DE LIVRO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO**

DILLI, M. Á.; NASCIMENTO, H. M. A.; SILVA, J. C.; “Tutorial de simulação no software ATPDraw <sup>TM</sup> do sistema de distribuição IEEE 34 barras”. Livro Engenharia, Gestão e Inovação, Ed. Poisson, 2021, pp. 1-6.