



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

MURILO DE ÁVILA DILLI

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

Palmas/TO
2021

MURILO DE ÁVILA DILLI

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

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

Orientador: Prof. Dr. Jadiel Caparrós da Silva.

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

D578d Dilli, Murilo de Ávila.

Detecção do rompimento de condutores em sistemas elétricos de potência através da tensão de sequência negativa. / Murilo de Ávila Dilli. – Palmas, TO, 2021.

132 f.

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

Orientador: Jádriel Caparrós da Silva

1. Detecção de rompimento de condutor. 2. Distinção de eventos. 3. Tensão de sequência negativa. 4. Sistema elétrico de potência. 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

MURILO DE ÁVILA DILLI

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

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.



Prof. Dr. Adelicio Maximiano Sobrinho, UFT.

Documento assinado digitalmente
gov.br KATHY CAMILA CARDOZO OSINSKI SENHORINI
Data: 16/12/2021 18:48:59-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof^a. Dr^a. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini, UFT.

*Dedico esta monografia de conclusão de curso
á todos aqueles que me apoiaram e me
ajudaram de qualquer maneira, que estiveram
comigo nesta caminhada e ao meu lado nos
momentos mais difíceis, desde aos familiares
até aos amigos.*

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por me abençoar com saúde e me dar forças em todo momento durante essa jornada, me dando conforto nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Cátia de Ávila Dilli e Osvaldo César Gonçalves Dilli, que me deram toda a base necessária para o homem que sou, e, além do amor e carinho, me passaram uma tranquilidade para me preocupar apenas com os estudos, o que facilitou muito.

Aos meus irmãos, Laura de Ávila Dilli e Eduardo de Ávila Dilli, que deram todo o apoio e souberam compreender meus momentos de ausência, além de sempre me proporcionarem momentos de alegrias e descontração.

Aos meus tios, Simone Rejane Vitória de Ávila e Claudiomiro Madruga de Oliveira, em que nos momentos que estive morando só em Palmas, foram um momento de refúgio para eu descansar e sentir o carinho familiar, mesmo morando em outra cidade. Além de outros tios e tias que mesmo longe, estiveram presentes sempre na minha vida.

A minha vó Docila Gonçalves Dilli, na qual amo muito e dedico este trabalho, já que foi uma mulher batalhadora que perdeu o marido cedo e teve que criar três filhos sem deixar que nada lhes faltasse, tendo a minha gratidão pela criação do meu pai e minha admiração.

Agradeço aos amigos mais próximos, em especial aos meus colegas Helder Manduca Nascimento e Carlos André Rodrigues Bastos, nos quais formamos grupos de estudos para todas as disciplinas, sendo de extrema importância para meu êxito acadêmico, além de possibilitarem momentos de descontração e diversão, assim como minhas amigas Eduarda Rodrigues Sousa e Alana Pereira de Sousa, sempre dispostas a me aturarem e me arrancarem sorrisos, nos quais eu agradeço e me davam ânimo e força para seguir em frente.

Meu muito obrigado ao grupo de Programa de Educação Tutorial (PET) de Engenharia Elétrica, como todos os seus integrantes e a tutora Dra. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini, onde me deu uma vasta experiência em vários âmbitos e o interesse pelo tema desse trabalho.

Quero agradecer a todos os professores, como a prof. Dra. Marilene Andreia Mantovani, na qual me deu uma ótima base para seguimento do curso, aos professores Dr. Sergio Manuel Rivera Sanhueza, Dra. Stefani Caroline Leal de Freitas e Dr. Adelicio Maximiano Sobrinho, nos quais possibilitaram um conhecimento maior sobre o sistema elétrico no geral, essencial nesse trabalho, a prof. Dra. Gisele Souza Parmezani Marinho, que sem seu ensinamento e dedicação este trabalho não seria possível, e ao meu orientador Dr. Jadiel Caparrós da Silva, que me procurou e demonstrou interesse na realização deste tema de pesquisa e disponibilizou

seu tempo, além de compartilhar seu conhecimento no qual foi essencial na realização deste trabalho.

E por fim e não menos importantes, a todos meus familiares e amigos, que de maneiras diferentes, me ajudaram nessa caminhada e serei eternamente grato.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

RESUMO

O Trabalho de Conclusão de Curso II em questão analisa a eficiência da Tensão de Sequência Negativa (TSN), aplicada à detecção e distinção do rompimento de condutor em comparação a outros distúrbios, que comumente ocorrem no sistema de distribuição, e de outros eventos do sistema, como chaveamento de banco de capacitores, chaveamento de cargas distribuídas, chaveamento de cargas concentrada e chaveamento de ramo lateral. A metodologia aplicada é simples e pratica de ser implementada em sistemas de distribuição, além de visar a redução de custos de implementação e manutenção de dispositivos de medição empregados no sistema de distribuição. Até o momento os sistemas de distribuição usados para os testes foram os alimentadores de 5 barramentos, 33 barramentos e 34 barramentos do IEEE, que com o objetivo de validar o desempenho do método, foram realizados testes com o programa de simulação computacional ATPDrawTM, a fim de extrair características dos sinais de tensão. Posteriormente, através do *software* Octave, um ruído branco gaussiano foi adicionado aos sinais trifásicos e o método é considerado imune aos ruídos. Em seguida, o sinal foi filtrado através de um filtro Butterworth de segunda ordem com frequência de corte de 180 Hz. Posteriormente, as tensões trifásicas filtradas V_a , V_b e V_c foram janeladas a cada ciclo (γ), com uma taxa de amostragem de 128 amostras por ciclo. Então, os fasores foram calculados usando a transformada rápida de Fourier. Por fim, de modo a alcançar o menor número de implementação de dispositivos de medição e assim reduzir os custos operacionais do sistema, o sistema foi implementado no *software* GAMS que forneceu uma otimização dos melhores pontos de medição da tensão no sistema. Os resultados demonstram que a detecção do rompimento de condutores através da TSN se deu de forma eficiente, distinguindo-o dos outros eventos do sistema, portanto, mostrando-se uma metodologia eficiente, robusta, precisa e confiável para o auxílio na correção de distúrbios no sistema elétrico, proporcionando maior confiabilidade e qualidade da distribuição de energia elétrica. A continuação do trabalho se dará através da aplicação da mesma metodologia para outros sistemas de distribuição com topologias e características diferentes, a fim de validar o método proposto.

Palavras-chaves: Detecção. Rompimento de Condutor. Tensão de Sequência Negativa. Sistema Elétrico. Distinção de Eventos.

ABSTRACT

The Course Completion Work I in question analyzes the efficiency of the Negative Sequence Voltage (NSV), applied to the detection and distinction of the conductor break compared to other disturbances, which commonly occur in the distribution system, and other system events, such as capacitor bank switching, distributed load switching, concentrated load switching and side branch switching. The applied methodology is simple and practical to be implemented in distribution systems, in addition to aiming at reducing the costs of implementing and maintaining measuring devices used in the distribution system. So far, the distribution system used for the tests was the 5-bus, 33-bus, 34 bus buses from the IEEE, which in order to validate the performance of the method, tests were performed with the computer simulation program ATPDrawTM, in order to extract characteristics from the signs of tension. Subsequently, using Octave software, a white Gaussian noise was added to the three-phase signals and the method is considered immune to noise. Then, the signal was filtered through a second order Butterworth filter with a cutoff frequency of 180 Hz. Subsequently, the filtered three-phase voltages V_a , V_b and V_c were windowed at each cycle (γ), with a sampling rate of 128 samples per cycle. Then, the phasors were calculated using the fast Fourier transform. Finally, in order to achieve the least number of measurement devices to be implemented and thus reduce the operating costs of the system, the system was implemented in the GAMS software which provided an optimization of the best voltage measurement points in the system. The results demonstrate that the detection of conductor rupture through the NSV occurred efficiently, distinguishing it from the other events in the system, therefore, showing an efficient, robust, precise and reliable methodology to aid in the correction of disturbances in the system. electrical system, providing greater reliability and quality of electricity distribution. The work will continue through the application of the same methodology to other distribution systems with different topologies and characteristics, in order to validate the proposed method.

Key-words: Detection. Conductor Rupture. Negative Sequence Voltage. Electrical System. Events Distinction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- MODELS do ATPDraw™ contendo os distúrbios de tensão.	35
Figura 2- Código do swell na fase A implementado na rotina MODELS.....	36
Figura 3- Gráfico do acontecimento do swell ocorrendo nas três fases simultaneamente.	37
Figura 4- Código do sag na fase A implementado na rotina MODELS.....	38
Figura 5- Gráfico do acontecimento do sag ocorrendo nas três fases simultaneamente.	38
Figura 6- Código do harmônico na fase A implementado na rotina MODELS.....	39
Figura 7- Gráfico do acontecimento do harmônico ocorrendo nas três fases simultaneamente.	40
Figura 8- Código do swell com harmônico na fase A implementado na rotina MODELS.....	40
Figura 9- Gráfico do acontecimento do swell com harmônico ocorrendo nas três fases.	41
Figura 10- Código do sag com harmônico na fase A implementado na rotina MODELS.....	41
Figura 11- Gráfico do acontecimento do sag com harmônico ocorrendo nas três fases.	42
Figura 12- Código do outage na fase A implementado na rotina MODELS.	43
Figura 13- Gráfico do acontecimento outage ocorrendo na fase A.	43
Figura 14- Código da oscilação transitória na fase A implementado na rotina MODELS.	44
Figura 15- Gráfico do acontecimento da oscilação transitória ocorrendo nas três fases.....	44
Figura 16 - Código do flicker na fase A implementado na rotina MODELS.....	45
Figura 17 - Gráfico do acontecimento do flicker ocorrendo nas três fases.	45
Figura 18 - Código do fluctuation na fase A implementado na rotina MODELS.....	46
Figura 19 - Gráfico do acontecimento do fluctuation ocorrendo nas três fases.	46
Figura 20- Chave e resistores alocados em cada barramento.	47
Figura 21- Parâmetros da chave inserida na fase A.....	47
Figura 22- Chave para o chaveamento de ramo lateral.	48
Figura 23- Código da chave do ramo lateral.	49
Figura 24- Chave para o chaveamento de carga concentrada.	49
Figura 25- Código da chave de carga concentrada.....	50
Figura 26- Chave para o chaveamento de carga distribuída.....	50
Figura 27- Código da chave de carga distribuída.	51
Figura 28- Chave para o chaveamento de capacitor.....	51
Figura 29- Código da chave de capacitor.	52
Figura 30- Sistema teste de 5 barramentos.....	52
Figura 31- Localização dos chaveamentos no sistema de 5 barramentos.	53

Figura 32- Sistema teste IEEE de 34 barramentos.	54
Figura 33- Localização dos chaveamentos no sistema IEEE de 34 barramentos.....	55
Figura 34 - Sistema teste de 33 barramentos.....	56
Figura 35 - Localização dos chaveamentos no sistema de 33 barramentos.	57
Figura 36- Decomposição de um sistema trifásico desbalanceado.	58
Figura 37- Metodologia da simulação.	60
Figura 38- Sequência negativa de tensão nos eventos simulados ocorrendo em 1 segundo. ...	61
Figura 39- Fluxograma da lógica utilizada no sistema teste de 5 barramentos.....	63
Figura 40 - Fluxograma da lógica utilizada no sistema teste de 33 barramentos.....	66
Figura 41 - Zonas de atuação de cada medidor no sistema teste de 33 barramentos.	93
Figura 42- Localização das chaves SWDL no sistema teste de 5 barramentos.....	108
Figura 43- Localização da chave SWBC no sistema teste de 5 barramentos.....	108
Figura 44- Localização das chaves SWP no sistema teste IEEE de 34 barramentos.	110
Figura 45- Localização das chaves SWSL no sistema teste IEEE de 34 barramentos.....	110
Figura 46- Localização das chaves SWDL no sistema teste IEEE de 34 barramentos.	111
Figura 47- Localização das chaves SWBC no sistema teste IEEE de 34 barramentos.	111
Figura 48 - Localização das chaves SWP no sistema teste de 33 barramentos.....	112
Figura 49 - Localização das chaves SWDL no sistema teste de 33 barramentos.....	112
Figura 50 - Localização das chaves SWBC no sistema teste de 33 barramentos.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores de corrente de falta para cada tipo de superfície.....	27
Tabela 2- Modelagem matemática dos distúrbios de tensão.	35
Tabela 3- Número de eventos simulados no sistema de 5 barramentos.	53
Tabela 4- Número de eventos simulados no sistema IEEE 34 barramentos.	55
Tabela 5 - Número de eventos simulados no sistema 33 barramentos.....	57
Tabela 6- Alocação ideal dos PMUs através do GAMS para um sistema de 5 barramentos...	62
Tabela 7- Alocação ideal dos PMUs através do GAMS para um sistema IEEE de 34 barramentos.	64
Tabela 8 - Alocação ideal dos PMUs através do GAMS para um sistema de 33 barramentos.	65
Tabela 9-Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso I do sistema teste de 5 barramentos.	68
Tabela 10- Distinção do RC com os demais eventos no caso I do sistema teste de 5 barramentos.	69
Tabela 11- Eficiência do sistema geral do caso I do sistema teste de 5 barramentos.	69
Tabela 12- Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso II do sistema teste de 5 barramentos.	70
Tabela 13- Distinção do RC com os demais eventos no caso II do sistema teste de 5 barramentos.	70
Tabela 14- Eficiência do sistema geral do caso II do sistema teste de 5 barramentos.	71
Tabela 15- Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso III do sistema teste de 5 barramentos.	71
Tabela 16- Distinção do RC com os demais eventos no caso III do sistema teste de 5 barramentos.	72
Tabela 17- Eficiência do sistema geral do caso III do sistema teste de 5 barramentos.....	72
Tabela 18- Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso IV do sistema teste de 5 barramentos.	72
Tabela 19- Distinção do RC com os demais eventos no caso IV do sistema teste de 5 barramentos.	73
Tabela 20- Eficiência do sistema geral do caso IV do sistema teste de 5 barramentos.....	73
Tabela 21- Distinção do RC com os demais eventos no caso V do sistema teste de 5 barramentos	74

Tabela 22- Eficiência do sistema geral do caso V do sistema teste de 5 barramentos.....	74
Tabela 23- Resumo dos Resultados encontrados por caso do sistema teste de 5 barramentos.	75
Tabela 24- Valores máximos e mínimos da TSN no caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	76
Tabela 25- Distinção do RC com os demais eventos no caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	76
Tabela 26- Eficiência do sistema geral do caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos...	77
Tabela 27- Distinção do RC com os demais eventos no caso II do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	78
Tabela 28- Eficiência do sistema geral do caso II do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	78
Tabela 29- Valores máximos e mínimos da TSN no caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	80
Tabela 30- Distinção do RC com os demais eventos no caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	80
Tabela 31- Eficiência do sistema geral do caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	81
Tabela 32- Valores máximos e mínimos da TSN no caso IV do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	81
Tabela 33- Distinção do RC com os demais eventos no caso IV do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	82
Tabela 34- Eficiência do sistema geral do caso IV do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	82
Tabela 35- Distinção do RC com os demais eventos no caso V do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	83
Tabela 36- Eficiência do sistema geral do caso V do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	84
Tabela 37- Resumo dos Resultados encontrados por caso do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	84
Tabela 38 - Valores máximos e mínimos da TSN no caso I do sistema teste de 33 barramentos.	86
Tabela 39 - Distinção do RC com os demais eventos no caso I do sistema teste de 33 barramentos.	87
Tabela 40 - Eficiência do sistema geral do caso I do sistema teste de 33 barramentos.	87
Tabela 41 - Valores máximos e mínimos da TSN no caso II do sistema teste de 33 barramentos.	88

Tabela 42 - Distinção do RC com os demais eventos no caso II do sistema teste de 33 barramentos.	88
Tabela 43 - Eficiência do sistema geral do caso II do sistema teste de 33 barramentos.	89
Tabela 44 - Valores máximos e mínimos da TSN no caso III do sistema teste de 33 barramentos.	89
Tabela 45 - Distinção do RC com os demais eventos no caso III do sistema teste de 33 barramentos.	90
Tabela 46 - Eficiência do sistema geral do caso III do sistema teste de 33 barramentos.	90
Tabela 47 - Valores máximos e mínimos da TSN no caso IV do sistema teste de 33 barramentos.	91
Tabela 48 - Distinção do RC com os demais eventos no caso IV do sistema teste de 33 barramentos.	91
Tabela 49 - Eficiência do sistema geral do caso IV do sistema teste de 33 barramentos.	91
Tabela 50 - Função do medidor de cada barramento no caso V do sistema teste de 33 barramentos.	92
Tabela 51 - Valores mínimos e máximos da TSN do RC para cada medidor utilizado no sistema teste de 33 barramentos.	92
Tabela 52 - Distinção do RC com os demais eventos no caso V do sistema teste de 33 barramentos.	94
Tabela 53 - Eficiência do sistema geral do caso V do sistema teste de 33 barramentos.	95
Tabela 54 - Resumo dos Resultados encontrados por caso do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	95
Tabela 55- Valor da TSN no RC do sistema teste original de 5 barramentos.	114
Tabela 56- Valor da TSN no RC do sistema teste modificado de 5 barramentos.	114
Tabela 57- Valor da TSN nos DTs do sistema teste original de 5 barramentos.	114
Tabela 58- Valor da TSN nos DTs do sistema teste modificado de 5 barramentos.	115
Tabela 59- Valor da TSN nos chaveamentos do sistema teste original de 5 barramentos.	115
Tabela 60- Valor da TSN nos chaveamentos do sistema teste modificado de 5 barramentos.	116
Tabela 61- Valor da TSN no RC do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	118
Tabela 62- Valor da TSN nos DTs do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	119
Tabela 63- Valor da TSN no SWBC do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	119
Tabela 64- Valor da TSN no SWP do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	120
Tabela 65- Valor da TSN no SWSL do sistema teste IEEE de 34 barramentos.	120

Tabela 66- Valor da TSN no SWDL do sistema teste IEEE de 34 barramentos.....	121
Tabela 67 - Valor da TSN no RC do sistema teste de 33 barramentos.	124
Tabela 68 - Valor da TSN no RC do sistema teste de 33 barramentos.	125
Tabela 69 - Valor da TSN nos DTs do sistema teste de 33 barramentos.	126
Tabela 70 - Valor da TSN nos DTs do sistema teste de 33 barramentos.	126
Tabela 71 - Valor da TSN no SWBC do sistema teste de 33 barramentos.	127
Tabela 72 - Valor da TSN no SWBC do sistema teste de 33 barramentos.	127
Tabela 73 - Valor da TSN no SWP do sistema teste de 33 barramentos.	127
Tabela 74 - Valor da TSN no SWP do sistema teste de 33 barramentos.	128
Tabela 75 - Valor da TSN no SWDL do sistema teste de 33 barramentos.	128
Tabela 76 - Valor da TSN no SWDL do sistema teste de 33 barramentos.	130

LISTA DE ABREVIATURAS

UFT	Universidade Federal do Tocantins
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TSN	Tensão de Sequência Negativa
RC	Rompimento de Condutores
FAI	Falha de Alta Impedância
SD	Sistema de Distribuição
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
GAMS	General Algebraic Modeling System
ATP	Alternative Transiet Program
RNA	Redes Neurais Artificiais
DT	Distúrbios de Tensão
SWP	Chaveamento de Ramo Lateral
SWDL	Chaveamento de Carga Distribuída
SWSL	Chaveamento de Carga Concentrada
SWBC	Chaveamento de Capacitor
PMU	Unidade de Medição Fasorial
pu	Por Unidade
std	Desvio Padrão
min	Mínimo
máx	Máximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Considerações Iniciais	22
1.2	Problema de pesquisa	23
1.2.1	Justificativa	23
1.3	Objetivos	24
1.3.1	Objetivo Geral.....	24
1.3.2	Objetivos Específicos.....	24
1.4	Estrutura do Trabalho	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	Rompimento de Condutores	26
2.2	Métodos de Detecção de Rompimento de Condutores	27
2.3	Métodos de Detecção Utilizando a Sequência Negativa	30
3	MODELAGEM E SIMULAÇÃO	34
3.1	Distúrbios de Tensão	34
3.1.1	Swell	35
3.1.2	Sag.....	37
3.1.3	Harmônicos	38
3.1.4	Swell com Harmônicos	40
3.1.5	Sag com Harmônicos	41
3.1.6	Outage	42
3.1.7	Oscilação Transitória	43
3.1.8	Flicker	44
3.1.9	Flutuação	45

3.2	Rompimento de Condutores	47
3.3	Chaveamentos de Cargas	48
3.3.1	Chaveamento de Ramo Lateral (SWP)	48
3.3.2	Chaveamento de Carga Concentrada (SWSL)	49
3.3.3	Chaveamento de Carga Distribuída (SWDL)	50
3.3.4	Chaveamento de Capacitor (SWBC)	51
3.4	Sistema Teste de 5 Barramentos.....	52
3.5	Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos	54
3.6	Sistema Teste de 33 Barramentos.....	56
4	METODOLOGIA	58
4.1	Tensão de Sequência Negativa	58
4.2	OCTAVE	59
4.3	GAMS Studio	61
4.3.1	Sistema teste de 5 barramentos	62
4.3.2	Sistema teste IEEE de 34 barramentos	63
4.3.3	Sistema teste de 33 barramentos	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
5.1	Sistema teste de 5 barramentos	68
5.1.1	Caso I: Sistema teste sem modificação e medidor alocado na subestação (1).....	68
5.1.2	Caso II: Sistema teste modificado.....	70
5.1.3	Caso III: Sistema teste sem modificação e medidor alocado no barramento 5.....	71
5.1.4	Caso IV: Sistema teste modificado e o medidor alocado no barramento 5	72
5.1.5	Caso V: Sistema teste modificado e com um medidor alocado na subestação (1) e um medidor alocado no barramento 5	73

5.1.6	Resumo dos resultados obtidos para cada caso do sistema de 5 barramentos	74
5.2	Sistema teste IEEE de 34 barramentos	75
5.2.1	Caso I: Sistema teste com todos os barramento e medidor alocado na subestação .	75
5.2.2	Caso II: Sistema teste sem os barramentos críticos e medidor alocado na subestação	77
5.2.3	Caso III: Sistema teste com todos os barramentos e o medidor alocado no barramento	836;
		79
5.2.4	Caso IV: Sistema teste sem os barramentos críticos e o medidor alocado no barramento 836	81
5.2.5	Caso V: Sistema teste sem os barramentos críticos e com um medidor alocado na subestação e um medidor alocado no barramento 836	83
5.2.6	Resumo dos resultados obtidos para cada caso do sistema IEEE de 34 barramentos	84
5.3	Sistema teste de 33 barramentos	85
5.3.1	Caso I: Sistema teste sem os barramentos críticos com medidor no barramento 17;	86
5.3.2	Caso II: Sistema teste sem os barramentos críticos com medidor no barramento 21;	88
5.3.3	Caso III: Sistema teste sem os barramentos críticos com medidor no barramento 24;	89
5.3.4	Caso IV: Sistema teste sem os barramentos críticos com medidor no barramento 32;	90
5.3.5	Caso V: Sistema teste sem os barramentos críticos e com medidores alocados nos barramentos 17, 21, 24 e 32.....	92
5.3.6	Resumo dos resultados obtidos para cada caso do sistema de 33 barramentos	95
6	CONCLUSÕES	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

APÊNDICE A: TRABALHO PUBLICADO	104
APÊNDICE B: TRABALHO aceito para publicação	105
ANEXO A: Localização das chaves no sistema teste de 5 barramentos.....	106
ANEXO B: Localização das chaves no sistema teste IEEE de 34 barramentos	110
ANEXO C: Localização das chaves no sistema teste DE 33 barramentos	112
ANEXO E: VALORES DA TSN NO SISTEMA TESTE (ORIGINAL E MODIFICADO) DE 5 BARRAMENTOS	114
ANEXO F: VALORES DA TSN NO SISTEMA TESTE IEEE DE 34 BARRAMENTOS	118
ANEXO G: VALORES DA TSN NO SISTEMA TESTE DE 33 BARRAMENTOS	124

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é composto por diversos dispositivos usados para transmitir energia elétrica desde a geração até o uso, em zonas urbanas, rurais ou industriais. Basicamente, o SEP inclui quatro etapas: geração de energia, transmissão de energia, distribuição e consumo de eletricidade. A geração de energia é estabelecida por uma usina, que pode ser, por exemplo, uma usina hidrelétrica, uma usina termelétrica, uma usina solar ou uma usina eólica. Transmissão refere-se à transmissão de energia elétrica para a subestação. A distribuição faz parte de um sistema que distribui energia elétrica para os centros consumidores (área urbana, rural ou industrial) (CARLETO, 2019).

O aumento da demanda por energia elétrica levou a uma recente reformulação da estrutura comercial e técnica do SEP. A qualidade da energia tem se tornado um objeto de pesquisa cada vez mais importante neste setor, pois está diretamente relacionada à competitividade de mercado e aos aspectos técnicos dos serviços prestados com agentes de geração, transmissão e distribuição (NASCIMENTO et al., 2021).

Em relação à interrupção do fornecimento de energia elétrica, o SEP sofre muitos distúrbios técnicos ou naturais. Portanto, existem muitos eventos, como um curto-circuito trifásico, a saída ou entrada de um grande bloco de carga, esses eventos vão causar interferência no SEP, o que ajuda a contar os motivos do desligamento da alimentação de energia, ocasionando a paralização de um conjunto grande de consumidores (PAIXÃO et al., 2021).

Nos últimos anos, devido ao aumento da demanda por eletricidade, a operação do sistema elétrico tornou-se muito complicada (BELANÇON, 2020). Um grande número de barramentos significa que a ordem da matriz de impedância aumenta, e técnicas de otimização precisam ser utilizadas para reduzir o tempo de execução do programa que irá analisar o fluxo de carga da rede durante o processo de detecção de distúrbios. Esse aumento tem um impacto maior no sistema de distribuição de energia, pois são os circuitos terminais da fonte de alimentação.

A condição de circuito aberto do condutor é causada pela perda de um ou mais condutores no sistema de energia devido a condutores rompidos, fusíveis queimados, conexões soltas, operações de chaveamento incorretas e desconexão acidental ou aterramento de condutores. Este é um desafio não resolvido, especialmente em redes de distribuição de energia e usinas com transformadores auxiliares (ADEWOLE et al., 2020).

De acordo com a estrutura do transformador e da conexão do enrolamento, o evento de condutor aberto pode ser caracterizado pela corrente de sequência negativa. Se houver carga suficiente no lado de baixa tensão do transformador, pode haver uma componente significativa de Tensão de Sequência Negativa (TSN) (IEEE, 2020). Este valor de TSN permite o estudo para a análise da detecção de Rompimento de Condutores (RC).

1.2 Problema de pesquisa

Atualmente, um dos maiores problemas dos sistemas de distribuição de energia é o desafio de detectar e distinguir Rompimento de Condutores (RC) em sistemas elétricos. Quando ocorre o RC e um condutor toca uma superfície de alta impedância (como concreto, asfalto, areia ou vegetação), pode ocorrer uma Falha de Alta Impedância (FAI), que geralmente não pode ser detectada de forma confiável e não pode ser distinguida de outros eventos comuns na rede, que acabam gerando riscos para a vida humana e à propriedade (MISHRA; PANIGRAHI, 2019). Devido ao motivo que a corrente deste tipo de falta é extremamente baixa, ela ocasiona o não acionamento do esquema convencional de proteção, já que este necessita de uma corrente suficientemente considerável (BHANDIA et al., 2020). Por esses motivos, fica clara a relevância da detecção desse fenômeno.

1.2.1 Justificativa

Os resultados mostram que o método proposto neste trabalho, utilizando a TSN é mais simples que as técnicas mencionadas na fundamentação teórica apresentada no Capítulo 2, atingindo iguais níveis de eficiência, além de ser um método mais econômico, pois não é necessário que o sistema de distribuição seja uma *smart grid* com diversos medidores, equipamentos de comunicação avançada e dispositivos inteligentes. Todos os testes foram modelados utilizando o *software* ATPTM através da interface ATPDrawTM e o processamento e cálculo da TSN foi realizada através do *software* matemático Octave. Os casos de estudo foram modelados utilizando o sistema de distribuição teste do IEEE de 34 barramentos, o sistema de distribuição de 5 barramentos e 33 barramentos. Além da modelagem destes sistemas testes no ATPDrawTM, também foram realizadas simulações dos seguintes distúrbios de tensão: Swell, Sag, Harmônico, Outage, Swell-Harmônico, Sag-Harmônico, Flicker, Fluctuation, e os eventos de chaveamento de banco de capacitores, chaveamento de cargas distribuídas, chaveamento de cargas concentrada e chaveamento de ramo lateral.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho concentra-se em propor um algoritmo para atender as diferentes demandas do Sistema de Distribuição (SD), aplicado ao rompimento do condutor, além de propor uma ferramenta capaz de ser utilizada nos SDs, com objetivo de proporcionar energia com qualidade e confiabilidade, e por fim, contribuir para o desenvolvimento e aplicação de dispositivos capazes de operar automaticamente, na detecção do rompimento do condutor (antes da ocorrência da FAI), de forma a auxiliar o sistema na tomada de decisão e redução de falhas no fornecimento de energia elétrica.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Realizar a montagem de um modelo, desenvolvido no *software* livre ATPDraw™ (HØIDALEN), que reproduza as principais características de tensão do RC e dos outros eventos.
2. Implementar um algoritmo baseado na TSN calculada a cada ciclo (γ) aplicado à detecção e distinção do RC em comparação com os outros eventos, utilizando *software* livre OCTAVE (EATON et al.).
3. Por fim, obter a melhor localização dos 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 fornece uma solução para aumentar a observabilidade de 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, são expostos alguns artigos, teses e dissertações a respeito do tema, apresentando um breve resumo de cada trabalho e os pontos negativos dessas pesquisas, embasando a fundamentação teórica deste presente trabalho.

O terceiro capítulo realiza a apresentação das modelagens dos distúrbios, chaveamentos e sistemas testes utilizados neste trabalho, além das simulações feitas.

O quarto capítulo, contém a metodologia utilizada para obtenção dos resultados, explicação dos *softwares* utilizados, o cálculo da TSN e a lógica usada em cada sistema teste.

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.

Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas desta pesquisa, de acordo com tudo que foi exposto e demonstrado ao longo do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma das diversas funções e obrigações das concessionárias de energia elétrica é manter a qualidade de energia e a segurança de seus consumidores, evitando o máximo possível de falhas que ocasionam a interrupção de fornecimento e principalmente problemas que põem em risco a vida humana. Um dos eventos que proporcionam ambos os casos é o RC e seu acontecimento é complicado de ser identificado de maneira quase instantânea. Este capítulo trará artigos, teses, livros, dissertações referentes ao RC, os métodos e técnicas para sua identificação, além da abordagem sobre a TSN.

2.1 Rompimento de Condutores

O SEP brasileiro em quase toda sua totalidade se encontra interligado, resultando em uma grande extensão de condutores passando pelos mais diversos territórios brasileiros, expondo esses condutores a diversas situações que podem ocasionar o seu rompimento.

Em sua tese, NETO (2005) informa que os principais causadores do rompimento de condutores em sistemas de distribuição são as descargas atmosféricas, a corrosão gerada pelo clima das regiões e o contato com os galhos de árvores. Quando uma descarga atmosférica atinge um condutor, este sofre uma sobretensão ou a ruptura do cabo pela fusão de um os vários fios que compõem este condutor. No caso da ruptura causada pela corrosão, ela é causada pela deposição de materiais não-metálicos, à exposição a substâncias que retêm umidade e a presença de sais, que somados ao fator da temperatura, direção e velocidade dos ventos, e a umidade do local, agravam ainda mais a corrosão do condutor. Por fim, o contato com galhos das árvores em cabos nus ocasiona curtos-circuitos e juntamente em condutores isolados podem danificá-los fisicamente, facilitando sua ruptura.

A autora BUENO (2019), explica que quando um condutor do sistema elétrico entra em contato com uma superfície de alta impedância, seja por um rompimento ou não, ocasiona a chamada Falta de Alta Impedância (FAI). Este tipo de falta tem como característica correntes próximas ou até abaixo da corrente nominal de carga dos alimentadores, dificultando sua identificação, já que os dispositivos de proteção convencionais utilizam a sobrecorrente como o parâmetro pra sua atuação.

Em sua dissertação, LEITE (2017) afirma que apesar das FAI não representarem perigo para componentes do sistema elétrico, elas acabam gerando uma ameaça iminente ao patrimônio, animas e seres humanos, já que muitas vezes, quando os condutores se rompem,

ficam pendurados e permanecem energizados. Os baixos valores de corrente podem ser relacionados a alta impedância do caminho de retorno da corrente de falta ou a falha em pontos eletricamente remotos em relação à fonte, podendo ser também uma combinação de ambos os casos. Além disso, as FAIs podem ser classificadas como ativas e passivas; as ativas são aquelas que há a presença de arco elétrico, podendo ser ocasionadas pelo rompimento do condutor em que a corrente de carga é interrompida, chamada de faltas *série*, e quando não há o rompimento do condutor, havendo contato com um objeto qualquer, chamada de faltas *shunt*; as passivas são aquelas que há a interrupção da corrente no ponto que ocorreu a falta, ocasionada pelo rompimento do condutor sem que haja contato de nenhum objeto próximo. Além disso, LEITE (2017) expõe na Tabela 1 em que para um nível de tensão determinado, os valores das correntes de falta sofrem alterações de acordo com o tipo de superfície de contato:

Tabela 1- Valores de corrente de falta para cada tipo de superfície.

Tipo de Superfície	Corrente [A]
Asfalto seco ou areia	0
Areia molhada	15
Relva seca	20
Gramma seca	25
Relva molhada	40
Gramma molhada	50
Concreto reforçado	75

Fonte: LEITE, 2017

2.2 Métodos de Detecção de Rompimento de Condutores

Pela difícil detecção dos rompimentos de condutores, já que este resulta numa baixa corrente imperceptível nos equipamentos de proteção convencionais, diversos métodos e técnicas surgiram ao longo dos anos com o propósito na rápida detecção para assim evitar os danos ao patrimônio e os riscos de vida gerado pelo RC.

GRIMALDI et al., 2020, menciona que o problema do rompimento de condutores ocasiona prejuízos materiais e imateriais, como acidentes, multas, sanções administrativas e outros. É proposto então, três metodologias pouco usuais na detecção de RC: Vetores de Energia dos Centroides das Sub-bandas Espectrais, no qual é aplicada a transformada rápida de Fourier para estimativa do espectro de potência, e, através do uso de superposição dos filtros, este espectro é dividido em um número de sub-bandas de frequência sobrepostas e assim localizado os centroides espectrais de um sinal no domínio de frequência usado como um dos parâmetros na detecção do RC; Operador de energia Teager, no qual é calculado a energia de

um sinal não se baseando somente na sua amplitude, mas também na frequência do sinal, e esta energia utilizada como parâmetro na identificação do RC; e Preditor Linear, que resumidamente trata-se de uma operação matemática onde os valores futuros de um sinal de tempo discreto são estimados em um função linear de amostras anteriores. Apesar das diversas técnicas alternativas que focam na identificação do RC, onde obteve-se resultados satisfatório, GRIMALDI et al., 2020, relatam o problema no tratamento das ocorrências de falsos positivos de detecção, ou seja, um evento usual do sistema elétrico, como os chaveamentos de carga podem ser confundidos como um RC.

Em LEÃO et al., 2020, ressalva-se que a baixa magnitude de corrente produzida em um RC é uma das maiores dificuldades dos equipamentos de proteção dos SEP e com este condutor ficando energizado possibilita a ocorrência de incêndios e riscos de morte. Em seu estudo, há a apresentação das características de tensão e correntes de FAI em galhos de árvores, especialmente do tipo Ipê Roxo, onde a simulação foi realizada em laboratório e o método utilizado foi a captura de oscilografias através do relé comercial SEL 751, no qual este captura 32 amostras por ciclo e 65 ciclos em cada evento. Apesar dos bons resultados, o trabalho de LEÃO et al., 2020, trata-se de um material específico, nesse caso o Ipê Roxo, que entra em contato com os condutores, sendo uso dessa metodologia limitado e específico.

Os autores CARDOSO e CAMPOS (2021), apresentam um algoritmo diferente dos usuais, não utilizando os parâmetros de linha para os cálculos e verificado seu erro perante diversos tipos de faltas, cujo resultado foi uma precisão que possibilita a aplicação prática se comparado aos algoritmos tradicionais. O *software* utilizado nas simulações dos RC foi o ATPDrawTM e os dados convertidos no formato Comtrade. Os tipos de faltas simulados no artigo de CARDOSO e CAMPOS (2021) foram as monofásicas, bifásicas, bifásicas a terra e trifásicas, porém outros eventos que ocorrem na rede não foram testados, como os chaveamentos, os distúrbios de tensão e outros que o algoritmo poderia confundir com um RC.

SILVA (2020) menciona uma nova proposta que utiliza basicamente o comportamento das correntes inter-harmônicas que estão presentes no arco elétrico no momento do RC. Para isto, foi construído um religador com a inteligência de identificar essas correntes inter-harmônicas e seu teste foi feito em diferentes tipos de solos. O princípio é basicamente utilizando a amplitude das variações desse tipo de corrente, onde quanto maior ela, maior o conteúdo inter-harmônico associado a corrente que flui através do arco elétrico. Apesar do método proposto por SILVA (2020) ser bastante interessante, em faltas sem arco-elétrico, ou seja, que possuem componentes inter-harmônicos com baixa amplitude, os resultados expostos

não foram satisfatórios, além da implementação dessa inteligência de identificação do RC no religador se torna relativamente uma técnica cara.

BUENO (2019) propõe uma técnica de detecção que utiliza a extração das características das correntes na subestação de energia, contendo um sistema de interferência Fuzzy no qual avalia as características e realiza a classificação das FAIs. Utilizando o *software* ATPDrawTM, a simulação foi realizada com um alimentador radial acoplado a um modelo de arco elétrico, na tentativa de representar as características reais desse tipo de falta. O algoritmo proposto foi implantado no *software* MATLAB e a detecção é feita através de cálculos algébricos baseados nas informações das oscilografias das correntes trifásicas retiradas da subestação, no qual identifica a anormalidade do sinal e este é analisado e classificado através da lógica nebulosa Fuzzy. É também feita uma análise envoltória do sinal, com objetivo de distinguir os RC dos curtos-circuitos monofásico, bifásico e trifásico. Então, é encontrado um índice através da diferença absoluta entre a amplitude de referência das correntes trifásicas e a mensurada que é constatada a anomalia. Em sua pesquisa, BUENO (2019) consegue classificar as faltas, através da extração das características dos índices, porém não é utilizado alguns eventos que ocorrem ao longo das redes elétricas, como o chaveamento de carga, chaveamento de bancos de capacitores, além dos distúrbios de tensão que ocorrem nela.

Uma técnica mais moderna é proposta por GIMENEZ et al., 2021, onde se utiliza um método baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs) para a detecção e a localização do RC, que considera a variação diária do carregamento do sistema, utilizando medições fasoriais ou não fasoriais, cujo a detecção e localização das faltas são feitas por áreas delimitadas por medidores. É utilizada a inteligência artificial, em especial as redes neurais para isto, onde três tipos de estruturas de RNAs são propostos, em que duas são utilizadas medições sincronizadas e na última estrutura são utilizadas medições não sincronizadas. As topologias de RNAs propostos por GIMENEZ et al., 2021, são dependentes das características dos sistemas de distribuição e, portanto, não podem ser realizadas em todo local, restringindo o uso dessa metodologia, já que é necessário um estudo realizando simulações para aferir a disponibilidade do uso deste método.

Em sua dissertação, RIBEIRO (2020) demonstra duas modelagens de detecção em que ambas realizam o processamento dos sinais trifásicos de tensão do transformador de potência da saída da subestação, onde primeiramente é aplicada a transformação de Park e a transformada de Wavelet a fim de agregar os sinais das fases e evidenciar as componentes que possuem uma alta frequência dos transitórios através dos coeficientes de detalhe das

componentes de eixo direto e zero. Após esta etapa, os sinais passam por uma avaliação de um algoritmo adaptativo que tem como função a identificação das ocorrências de transitórios e por fim, blocos classificadores com limiares pré-definidos realizam a retirada de características específicas que possibilitam a análise da ocorrência dos eventos. Em seu trabalho, RIBEIRO (2020) acabou não incluindo a injeção de ruídos aleatórios nas tensões trifásicas na entrada do sistema, deixando a simulação um pouco distante do que é observado na realidade dos sinais das redes reais.

Pode-se observar diversos métodos para detecção de RC, todos tendo seus pontos positivos e negativos, porém uma técnica vem sendo estudada e usada nos últimos anos, na qual utiliza-se a TSN. Esta técnica que utiliza a TSN também será utilizada e investigada neste trabalho. A subseção seguinte mostra os últimos e os principais trabalhos que utilizaram a TSN para detecção e distinção do RC.

2.3 Métodos de Detecção Utilizando a Sequência Negativa

Um método que vem sendo bastante utilizado recentemente em diversas teses, trabalhos e pesquisas é o uso da tensão de sequência negativa como um dos parâmetros para a identificação do RC.

SCHWEITZER (2017) define que a sequência negativa é uma das três componentes simétricas de um sistema de potência trifásico. Essas componentes são utilizadas no cálculo do desbalanço desse sistema, usando apenas o cálculo monofásico, o que acaba simplificando o processo. A grandeza de sequência negativa está presente com valores substanciais durante as condições de faltas desequilibradas no sistema de potência. Para mensurar esses valores de sequência negativa, são utilizados relés que possuem “Elemento Direcional de Sequência-Negativa” no qual observa a tensão e a corrente de sequência negativa em uma linha de transmissão e em seguida é comparado os ângulos de fase de ambas as grandezas, e uma falta é identificada quando a corrente de sequência negativa está adiantada em 180 graus menos o ângulo característico da linha de transmissão em relação a TSN. Outro tipo de relé chamado SEL-321 utiliza a relação entre as duas grandezas que resulta em uma impedância de sequência negativa, onde, quando esta impedância fica próxima de zero, indica que há uma falta à frente.

O IEEE (2020) menciona a importância na coordenação do relé de detecção de fase aberta com os relés de detecção de falhas existentes. Uma falha linha a linha de alta impedância, em que seus valores estão abaixo dos de captação do relé de detecção de falhas, produzirá uma TSN significativa.

De acordo com JAYAMAHA et al., 2017, uma condição de fase aberta é causada por um RC, e este pode ser detectado através da razão entre a corrente de sequência negativa e a positiva. A corrente de sequência negativa é baixa sob condições normais, porém em questões de desequilíbrio, como em um RC, resulta em um aumento no valor da corrente de sequência negativa mensurada. Ao ser feito a divisão da corrente de sequência negativa pela corrente de sequência positiva resulta na porcentagem de desequilíbrio da corrente em um determinado ponto. Assim o método propõe que o pior desequilíbrio do sistema seja considerado para definir os limites. O método de JAYAMAHA et al., 2017, não é capaz de diferenciar por exemplo um RC de um fusível queimado, mostrando que há variação da falha dependendo da resistência e a localidade dela, variando assim a sensibilidade deste método de acordo com estes parâmetros, evidenciando uma menor eficiência em falhas ocorridas ao final do alimentador ou em ramos laterais.

No método proposto por STEIN (2019), utiliza-se os valores de corrente mensurados na subestação, onde conta com a instalação de um detector de transitórios sendo utilizado como gatilho no processo de identificação da fase de buildup, uma característica de quando ocorre o RC em que há uma queda na amplitude da corrente e este comparado com a metodologia que se baseia na análise da corrente de sequência negativa, na qual mostrou resultados satisfatórios na classificação dos RCs e não atuando em casos falsos de eventos transitórios do sistema, como energização de transformadores e chaveamentos de capacitores, assim como a entrada e saída de cargas. Apesar dos resultados interessantes, STEIN (2019) não utiliza a sequência negativa como um parâmetro de identificação e sim de comparação, além de não testar seu método com a adição de ruídos e distúrbios de tensão, deixando seu sistema mais distante da realidade.

Os trabalhos de LIMA (2013), ALVARENGA (2017) e SALES (2017) demonstram um método para detectar e classificar os distúrbios de tensão nos sistemas elétricos, através das oscilografias de tensão mensuradas na subestação. Usa-se o algoritmo de seleção negativa de um sistema imunológico artificial que faz a distinção dos sinais normais e anormais. Esta análise é feita por janelamentos das oscilografias, em que realizam a comparação dos sinais com os detectores que avaliam a afinidade entre as janelas. Em casos que há a ultrapassagem da afinidade dos sinais com um limite definido pelo operador, o sinal é classificado pela taxa de afinidade chamada de “casamento”. O método foi testado em sistemas testes de 5, 33, 84 e 134 barramentos. Contudo, os ótimos resultados obtidos em seus métodos, LIMA (2013), ALVARENGA (2017) e SALES (2017) não realizaram um método específico de identificação do RC, e sim de vários distúrbios de tensão, onde os valores encontrados de eficiência podem ser camuflados pela eficiência na identificação das demais anormalidades, além de ser uma

técnica relativamente complexa e cara, que utiliza Inteligência Artificial, especificamente os sistemas imunológicos artificiais.

Portanto, esta subsecção abordou diversas técnicas e métodos que utilizam a sequência negativa como parâmetro para detecção de um RC. O uso da TSN como o objeto de estudo para detectar o RC e distingui-lo dos demais eventos do SEP será utilizado neste trabalho, conforme descrito nos próximos capítulos.

3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Toda modelagem e simulação dos eventos e sistemas utilizados neste trabalho foram feitos no *software* ATPDrawTM, onde realizou-se, o rompimento dos condutores, simulação de distúrbios de tensão, chaveamento de carga, ramais e capacitores, conforme pode ser visto nas próximas subseções, além da modelagem dos sistemas testes utilizados.

3.1 Distúrbios de Tensão

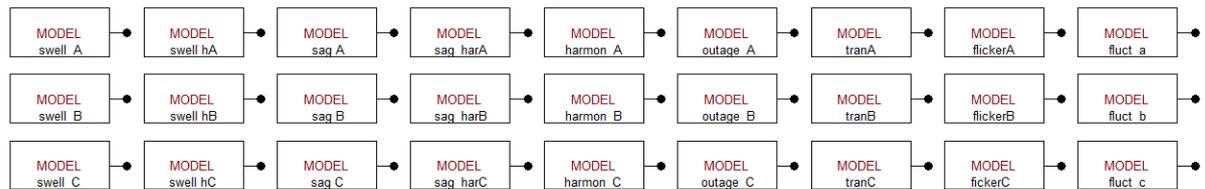
Os distúrbios de tensão (DT) são algo recorrente nos sistemas de distribuição e tratam-se de fenômenos ocasionados pelos mais diversos motivos e que são capazes de distorcer a forma de onda de tensão de uma rede elétrica de forma transitória ou não, trazendo diversas consequências e prejuízos, e muita das vezes, podem ser confundidos como um rompimento de condutor pelos equipamentos de proteção convencionais. Conforme (ABDEL-GALIL, 2004) pode-se representar esses distúrbios de tensão através de uma modelagem matemática mostrada na Tabela 2, e utilizando a ferramenta MODEL (Figura 1), oferecida pelo *software* ATPDrawTM, pode-se simular os distúrbios de tensão através de códigos que representavam as equações da Tabela 2.

Tabela 2- Modelagem matemática dos distúrbios de tensão.

Evento	Parâmetros	Equação
Swell	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A (1 + \alpha(u(t_2) - u(t_1))) \sin(\omega t)$
Sag	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A (1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1))) \sin(\omega t)$
Harmônicos	$0.05 \leq \alpha_3 \leq 0.15, 0.05 \leq \alpha_5 \leq 0.15, 0.05 \leq \alpha_7 \leq 0.15, \sum \alpha_i^2 = 1$	$v(t) = A (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t) + \alpha_7 \sin(7\omega t))$
Outage	$0.9 \leq \alpha \leq 1, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A (1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1)))$
Sag com harmônicos	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T, 0.05 \leq \alpha_3 \leq 0.15, 0.05 \leq \alpha_5 \leq 0.15$	$v(t) = A (1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1))) (\sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t))...$
Swell com harmônicos	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T, 0.05 \leq \alpha_3 \leq 0.15, 0.05 \leq \alpha_5 \leq 0.15$	$v(t) = A (1 + \alpha(u(t_2) - u(t_1))) (\sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t))...$
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	$0.05 \leq \gamma \leq 0.1, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A \sin(\omega t) (1 - \gamma (u(t_2) - u(t_1)))$

Fonte: Adaptado de ABDEL-GALIL, 2004.

Figura 1- MODELS do ATPDrawTM contendo os distúrbios de tensão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.1 Swell

De acordo com BOOLEN (2000), um *swell* trata-se de uma sobretensão ou uma elevação de tensão de forma transitória que possui duração média inferior a um minuto. Em TOUMI et al., 2020, há a definição que o *swell* possui como características um aumento da tensão entre 1,1 e 1,8 pu (por unidade) em relação ao valor da tensão nominal. O *swell* ocorre

por diversos motivos e entre eles estão: o chaveamento de banco de capacitores, manobras da concessionária, partida de grandes equipamentos, fiação e equipamentos sobrecarregados ou subdimensionados, variações de carga, conexões mal feitas, curtos-circuitos e má utilização dos transformadores. São várias as consequências geradas pela ocorrência do *swell* como a redução da vida útil além das eficiências dos equipamentos, um aumento no aquecimento e nas oscilações de motores e lâmpadas, erro no processamento e até perda de dados, e falhas na operação de alguns dispositivos. Esse fenômeno pode ser corrigido através da instalação de compensadores estáticos reativos e reguladores de tensão, certificação da qualidade da fiação e o redimensionamento de circuitos fora do padrão atual.

A Figura 2 trata-se do código utilizado na rotina MODELS do ATPDrawTM utilizado para simulação do *swell* na fase A, com uma tensão nominal de 69 kV e frequência de 60 Hz, e na Figura 3, tem-se o gráfico do fenômeno acontecendo respectivamente nas três fases no tempo de um segundo.

Figura 2- Código do swell na fase A implementado na rotina MODELS.

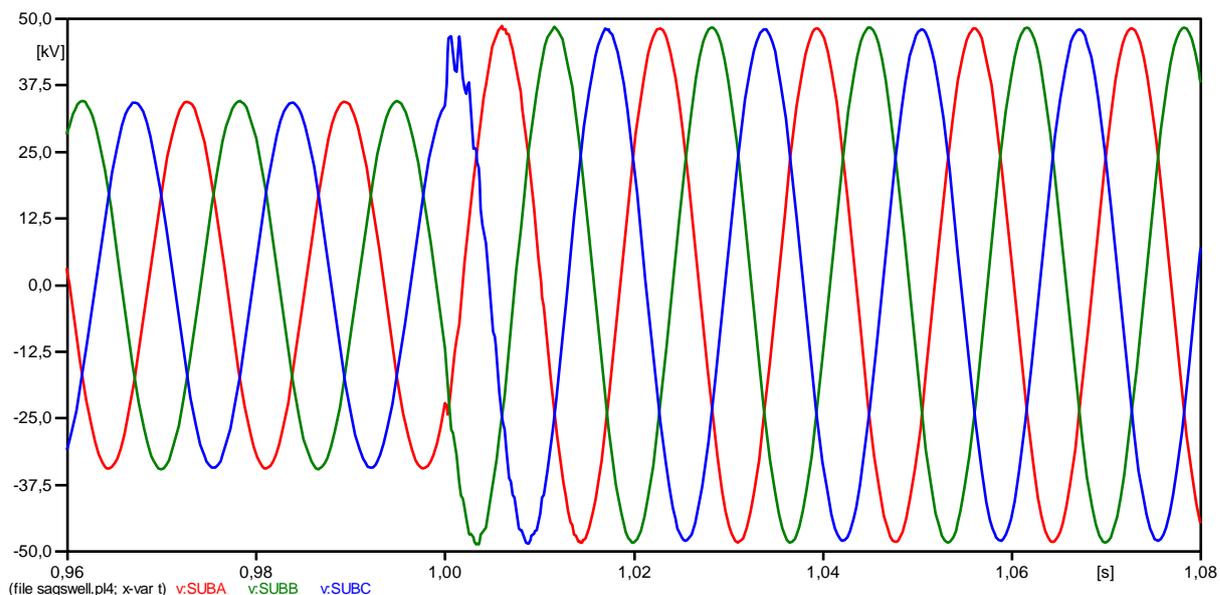
```

MODEL SWELL_A
DATA
AUMENTOV
TENSAO {DFLT:69000}
FREQ {DFLT:60}
OUTPUT SINALA
VAR
SINALA
EXEC
IF T < 1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t) -- Tensão Nominal
ELSIF T >= 1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*(1+AUMENTOV)*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t) -- Aumento de Tensão
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 3- Gráfico do acontecimento do swell ocorrendo nas três fases simultaneamente.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.2 Sag

TOUMI et al., 2020, define que se trata de um afundamento da tensão elétrica ou subtensão de forma transitória e de duração média inferior a um minuto, e possui como característica uma tensão de 0,1 a 0,9 pu em relação a tensão nominal a qual está submetida. Da mesma maneira que o *swell*, o *sag* é ocasionado pelos seguintes fatores: o chaveamento de banco de capacitores, manobras da concessionária, partida de grandes equipamentos, fiação e equipamentos sobrecarregados ou subdimensionados, variações de carga, conexões mal feitas e curtos-circuitos. As consequências do acontecimento deste fenômeno é a redução da vida útil além das eficiências dos equipamentos, um aumento no aquecimento e nas oscilações de motores e lâmpadas, erro no processamento e até perda de dados, e falhas na operação de alguns dispositivos. As formas de evitar um *sag* é análogo ao de evitar um *swell*: através da instalação de compensadores estáticos reativos e reguladores de tensão, certificação da qualidade da fiação e o redimensionamento de circuitos fora do padrão atual (BOOLEN, 2000).

A Figura 4 demonstra como o *sag* na fase A com em uma tensão nominal de 69 kV e frequência de 60 Hz foi modelado na rotina MODELS do ATPDrawTM. O gráfico do fenômeno acontecendo nas três fases no tempo de um segundo e está demonstrado na Figura 5.

Figura 4- Código do sag na fase A implementado na rotina MODELS.

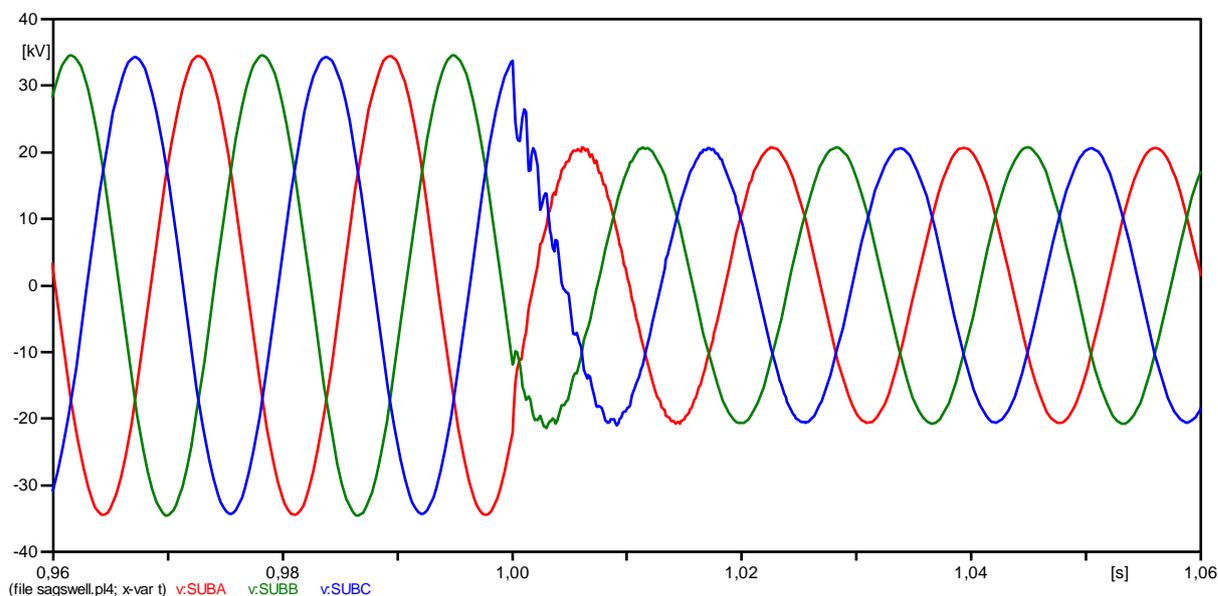
```

MODEL SAG_A
DATA
QUEDAV
TENSAO {DFLT:69000}
FREQ {DFLT:60}
OUTPUT SINALA
VAR
SINALA
EXEC
IF T<1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t) -- Tensão Nominal
ELSIF T>=1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*(1-QUEDAV)*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t) -- Queda de Tensão
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 5- Gráfico do acontecimento do sag ocorrendo nas três fases simultaneamente.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.3 Harmônicos

Harmônicos gerados por cargas críticas não lineares são uma grande preocupação para as indústrias (KHERGADE et al., 2020). Em DUGAN et al., 1996, as distorções harmônicas são caracterizadas por uma soma de ondas de frequências múltiplas da frequência fundamental e possuindo amplitudes decrescentes. A injeção desse fenômeno na rede se dá pela instalação no sistema de cargas não lineares, ou seja, aquelas que a corrente não é proporcional a tensão senoidal aplicada nesta carga, gerando assim uma corrente harmônica que a circulação desta gera tensões harmônicas através da impedância da rede. Além das cargas não lineares, outros

dispositivos podem causar o aparecimento de harmônicas, como inversores de frequência, dispositivos eletrônicos de acionamento, fontes chaveadas e variadores de velocidade. Os principais problemas que este fenômeno ocasiona são os danos em capacitores, o mau funcionamento de dispositivos de proteção como relés, fusíveis e disjuntores, diminuição nos desempenhos dos motores e o sobreaquecimento de equipamentos e cabos.

A solução na eliminação destas distorções harmônicas é além do uso de filtros de harmônicas, o uso de reatores de linha, o aterramento de transformadores isolados e a melhoria nas fiações elétricas (BOLLEN, 2000).

Pode-se ver na Figura 6 o código implementado na rotina MODELS do ATPDrawTM da injeção de um harmônico de terceira, quinta e sétima ordem na fase A, ou seja, com uma frequência múltipla de 3, 5 e 7 em relação a fundamental que é de 60 Hz. Na Figura 7 encontra-se o gráfico do fenômeno acontecendo nas três fases no tempo de um segundo.

Figura 6- Código do harmônico na fase A implementado na rotina MODELS.

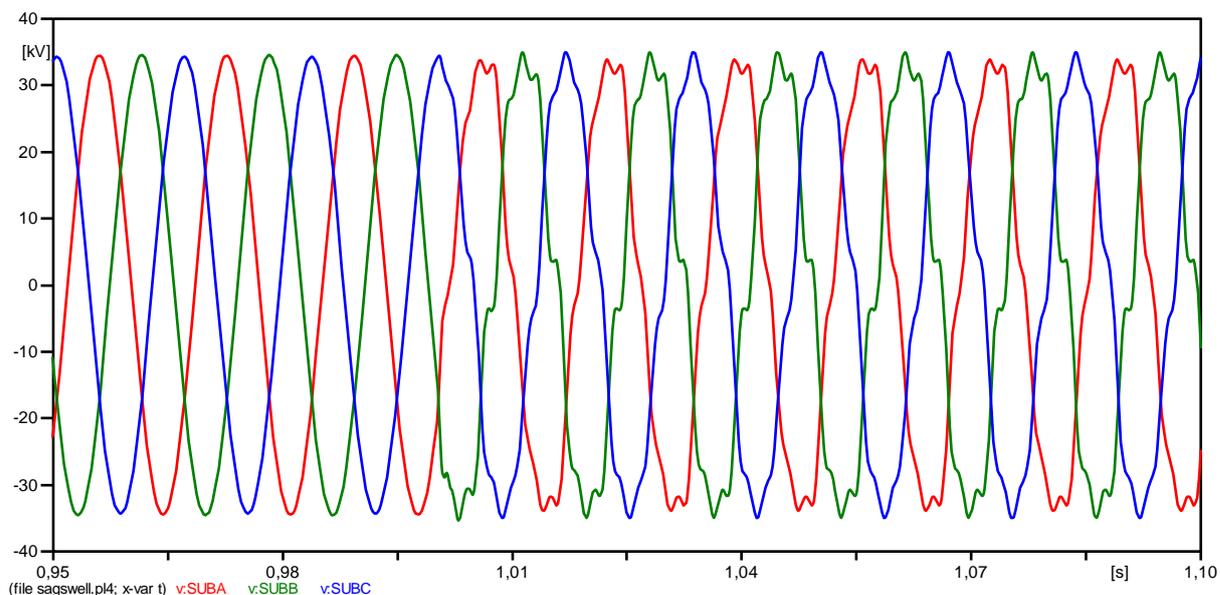
```

MODEL HARMONIC_a
OUTPUT SINALA
DATA
VA {DFLT:69000}
FREC {DFLT:60}
ALFA3
ALFA5
ALFA7
VAR
SINALA
EXEC
IF t<1 THEN
SINALA:= sqrt(2/3)*VA*sin(2*PI*FREC*t) -- Tensão Nominal
ELSIF t>=1 THEN
SINALA:= sqrt(2/3)*VA*(sin(2*PI*FREC*t)+ALFA3*sin(2*3*PI*FREC*t)+ALFA5*sin(2*5*PI*FREC*t)+ALFA7*sin(2*7*PI*FREC*t))
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 7- Gráfico do acontecimento do harmônico ocorrendo nas três fases simultaneamente.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.4 Swell com Harmônicos

Trata-se do acontecimento dos dois distúrbios, *swell* e harmônico, de forma simultânea, tendo as características de ambos, ou seja, uma sobretensão ou elevação da tensão elétrica contendo uma soma de ondas com frequências múltiplas a fundamental, causando a distorções harmônicas. O código implementado pode ser visto na Figura 8 possuindo uma tensão inicial de 69kV e frequência fundamental de 60Hz, com injeção de harmônicos de terceira, quinta e sétima ordem na fase A novamente. A Figura 8 demonstra o gráfico gerado pela implementação do código da Figura 9 nas três fases.

Figura 8- Código do swell com harmônico na fase A implementado na rotina MODELS.

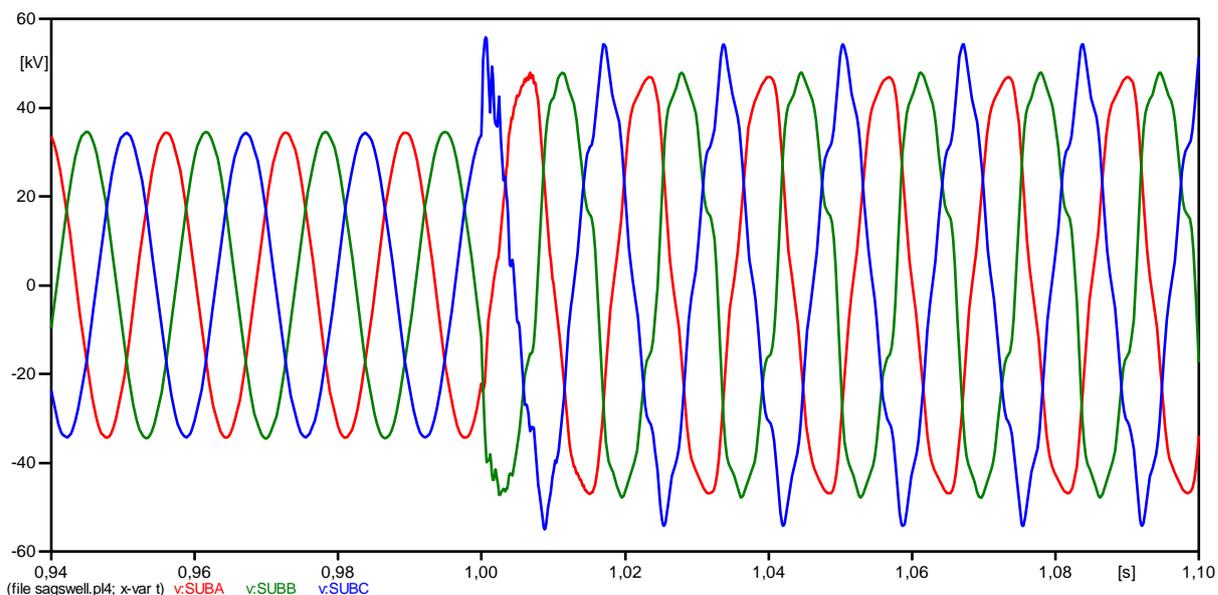
```

MODEL SWELL_HA
OUTPUT SINALA
DATA
AUMENTOV
VA {DFLT:69000}
FREC {DFLT:60}
ALFA3
ALFA5
ALFA7
VAR
SINALA
EXEC
IF t<1 THEN
SINALA:= sqrt(2/3)*VA*sin(2*PI*FREC*t) -- Tensão Nominal
ELSIF t>=1 THEN
SINALA:= sqrt(2/3)*VA*(sin(2*PI*FREC*t)+ALFA3*sin(2*3*PI*FREC*t)+ALFA5*sin(2*5*PI*FREC*t))*(1+AUMENTOV)
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 9- Gráfico do acontecimento do swell com harmônico ocorrendo nas três fases.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.5 Sag com Harmônicos

Pode-se haver situações em que ocorram uma subtensão ou afundamento da tensão elétrica (*sag*), e simultaneamente o aparecimento de harmônicas, em que ambos eventos em conjunto ocasionam outro tipo de distorção da onda. Na Figura 10, pode-se ver o código que possui como parâmetros iniciais, uma tensão inicial de 69 kV e frequência fundamental de 60 Hz, havendo a implementação de harmônicos de terceira, quinta e sétima ordem na fase A. O gráfico gerado com a compilação do código anterior em todas as fases é encontrado na Figura 11.

Figura 10- Código do sag com harmônico na fase A implementado na rotina MODELS.

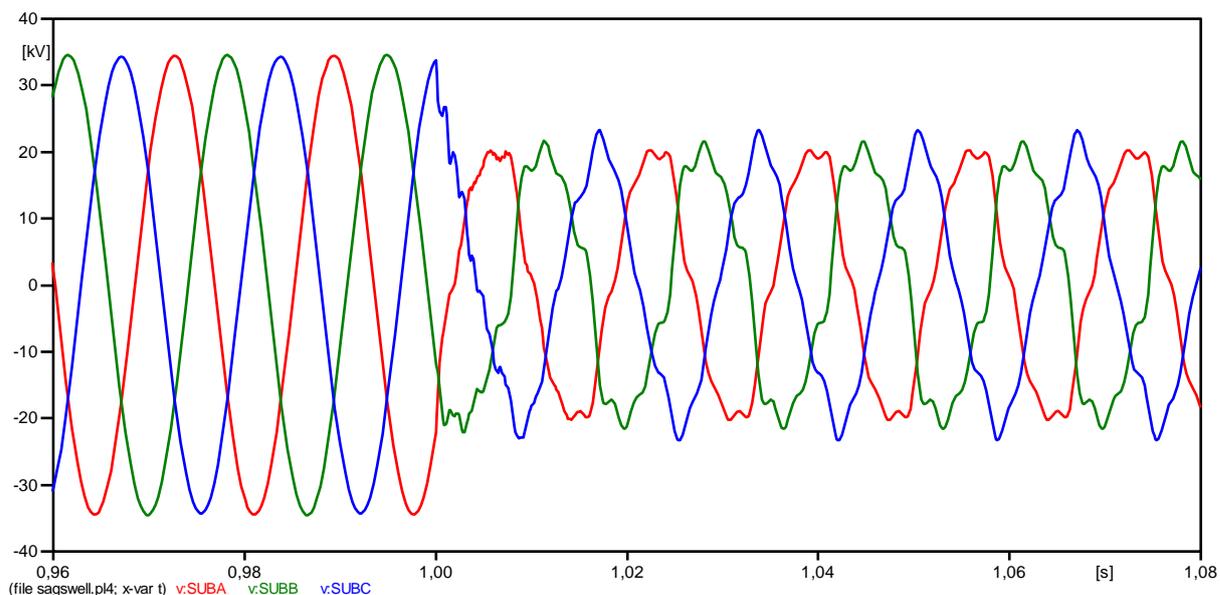
```

MODEL SAG_HA
DATA
QV
A3
A5
A7
VA {DFLT:69000}
FREQ {DFLT:60}
OUTPUT SINALA
VAR
SINALA
EXEC
IF T < 1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*VA*(sin(2*PI*FREQ*t)) -- Tensão Nominal
ELSIF T >= 1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*VA*(sin(2*PI*FREQ*t)+A3*sin(2*3*PI*FREQ*t)+A5*sin(2*5*PI*FREQ*t)+A7*sin(2*7*PI*FREQ*t))*(1-QV)
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 11- Gráfico do acontecimento do sag com harmônico ocorrendo nas três fases.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.6 Outage

Pela definição de BOOLEN (2000), um *outage* é uma interrupção que se dá pela retirada de um componente do sistema. Este fenômeno não se dá necessariamente por uma falha, chamada de “interrupção forçada”, mas pode ser também ocasionado por uma “interrupção programada”, geralmente feita por um operador para permitir uma manutenção preventiva em algum equipamento do sistema elétrico, como um transformador por exemplo. Em DUGAN et al., 1996, há a diferenciação de um *outage* como sendo uma interrupção por uma falha que duram um tempo inferior a um minuto e uma interrupção programada na qual possui tempo superior a um minuto.

A Figura 12 demonstra o código implementado na rotina MODELS do ATPDrawTM na fase A, possuindo uma tensão nominal e frequência nominal respectivamente de 69 kV e 60 Hz. A Figura 13 trata do gráfico gerado pela implementação do código da Figura 12 na fase A.

Figura 12- Código do outage na fase A implementado na rotina MODELS.

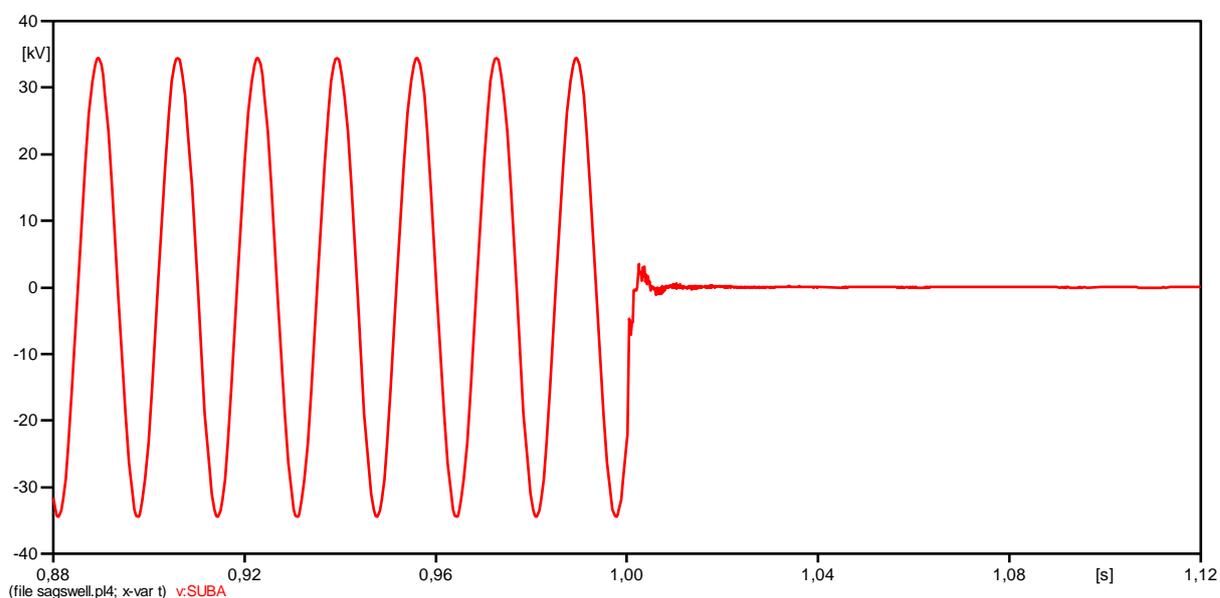
```

MODEL OUTAGEA
DATA
QUEDAV
TENSAO {DFLT:69000}
FREQ {DFLT:60}
OUTPUT SINALA
VAR
SINALA
EXEC
IF T < 1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t) -- Tensão Nominal
ELSIF T >= 1 THEN SINALA:= 0 -- Queda de Tensão
ENDIF
ENDEEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 13- Gráfico do acontecimento outage ocorrendo na fase A.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.7 Oscilação Transitória

Trata-se de um fenômeno que ocasiona a oscilação na forma de onda da tensão de maneira que não segue as características dos demais eventos, não se encaixando como uma elevação e nem um afundamento da tensão, não possuindo somas de ondas com frequências múltiplas da fundamental e nem uma interrupção. São oscilações que ocorrem com rápida duração abaixo de um minuto e que ocasionam distorções aleatórias nas ondas de tensão das três fases. Na Figura 14 pode-se ver o código implementado na rotina MODELS do ATPDrawTM responsável pela oscilação transitória na fase A, submetida a uma tensão nominal

de 69 kV e frequência de 60 Hz, e na Figura 15 é possível visualizar o gráfico do acontecimento da oscilação transitória ocorrendo nas três fases.

Figura 14- Código da oscilação transitória na fase A implementado na rotina MODELS.

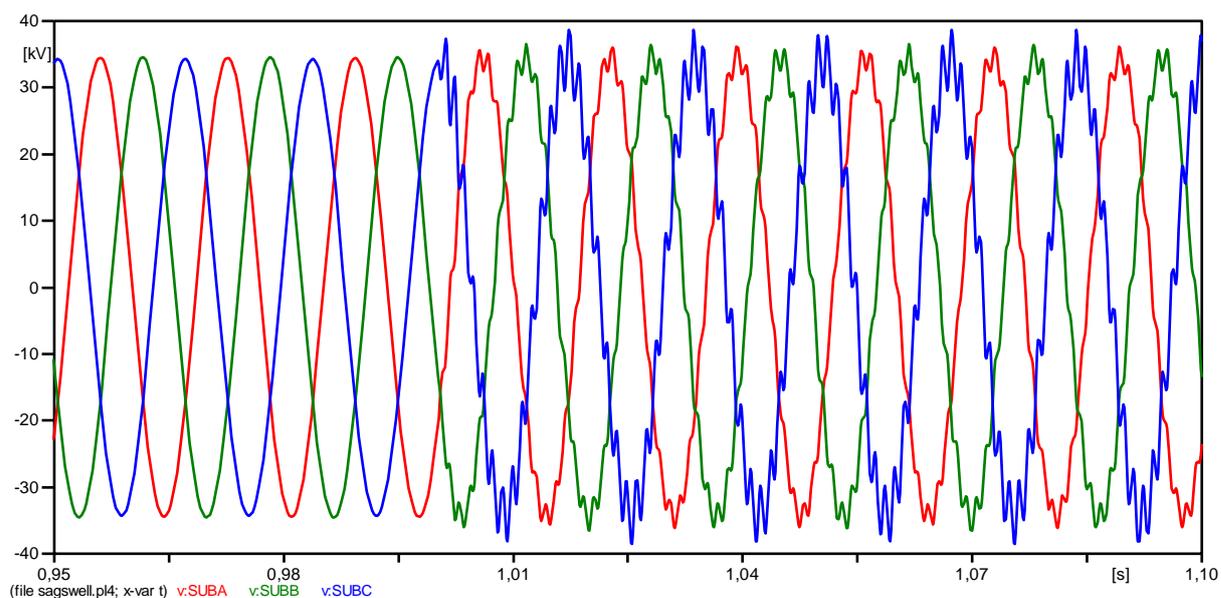
```

MODEL OSC_TRANA
DATA
TR
TENSAO {DFLT:69000}
FREQ {DFLT:60}
OUTPUT SINALA
VAR
SINALA
EXEC
IF T < 1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t)  -- Tensão Nominal
ELSIF T > 1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*TENSAO*(sin(2*PI*FREQ*t) + TR*sin(2*PI*800*t))
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 15- Gráfico do acontecimento da oscilação transitória ocorrendo nas três fases.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.8 Flicker

De acordo com GAO (2020), O distúrbio *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. Portanto, a detecção eficaz de indicadores essenciais, como os *Flickers*, é um pré-requisito para melhorar a qualidade do fornecimento de energia da rede

elétrica e para garantir a operação segura dos equipamentos de energia. A Figura 16 demonstra o código utilizado na rotina MODELS no ATPDraw™ na fase A tendo como tensão nominal e frequência nos valores de 69 kV e 60 Hz respectivamente. Após isto, obteve-se o gráfico gerado na Figura 17 nas três fases.

Figura 16 - Código do flicker na fase A implementado na rotina MODELS.

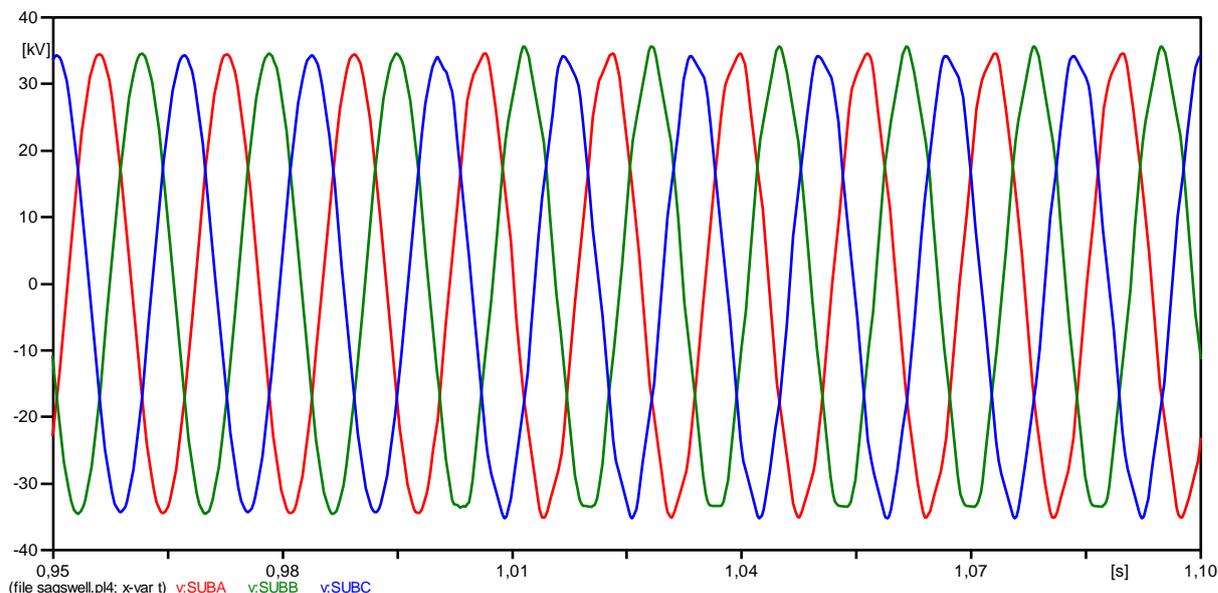
```

MODEL flicker_a
DATA
ALFA
BETA
TENSAO {DFLT:69000}
FREQ {DFLT:60}
OUTPUT SINALA
VAR
SINALA
EXEC
IF T<1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t) -- Tensão Nominal
ELSIF T>=1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*(1+(ALFA*(sin(BETA*2*PI*FREQ*t))))*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t) -- Queda de Tensão
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 17 - Gráfico do acontecimento do flicker ocorrendo nas três fases.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.9 Flutuation

O autor SANTOS (2013), define que as flutuações de tensão são mudanças aleatórias, repetitivas ou esporádicas do valor RMS da tensão (valor eficaz). De um modo geral, flutuações aleatórias e repetitivas podem estar relacionadas à operação de cargas não lineares, que

apresentam consumo de energia que varia com o tempo, enquanto flutuações esporádicas estão relacionadas à operação da rede ou da carga. Essas flutuações de tensão causarão uma série de interferências ao se propagar pela rede, afetando assim a qualidade da energia fornecida.

A Figura 18 traz o código da rotina MODELS do ATPDraw™ na fase A, possuindo uma tensão nominal e frequência nominal respectivamente de 69 kV e 60 Hz. A Figura 19 trata do gráfico gerado pela implementação do código da Figura 18 nas três fases.

Figura 18 - Código do fluctuation na fase A implementado na rotina MODELS.

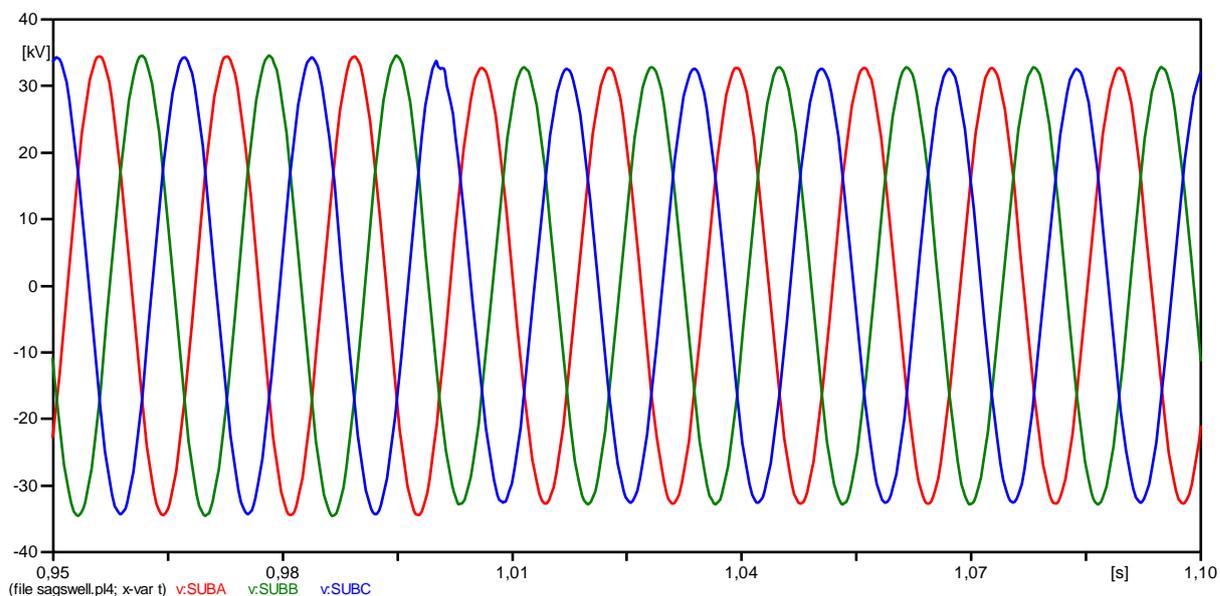
```

MODEL fluct_a
DATA
QUEDAV
TENSAO {DFLT:69000}
FREQ {DFLT:60}
OUTPUT SINALA
VAR
SINALA
EXEC
IF T<1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t) -- Tensão Nominal
ELSIF T>=1 THEN SINALA:= sqrt(2/3)*(1-QUEDAV)*TENSAO*sin(2*PI*FREQ*t) -- Queda de Tensão
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 19 - Gráfico do acontecimento do fluctuation ocorrendo nas três fases.

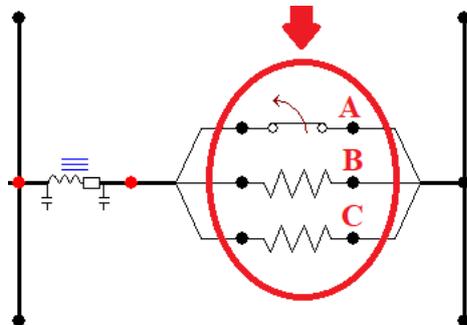


Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2 Rompimento de Condutores

Os rompimentos dos condutores foram realizados com a inserção de chaves monofásicas nas fases A em todos os barramentos do sistema utilizado no ATPDrawTM, e, para que não haja erro de compilação no *software* ATPDrawTM, foi adicionado um resistor de valor de $1 \times 10^{-5} \Omega$ em todos os barramentos nas fases B e C, conforme pode ser visto na Figura 20, onde o valor é tão baixo para não influenciar nos resultados. Além disso, foi programado para a chave na fase A estivesse fechada a partir do tempo -1s, ou seja, a chave vai se encontrar já fechada antes de iniciar a simulação, e a abertura da chave se deu no tempo de 1,010297s, simulando um ângulo de incidência do rompimento de 90° , como demonstrado na Figura 21.

Figura 20- Chave e resistores alocados em cada barramento.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 21- Parâmetros da chave inserida na fase A.

Component: TSWITCH

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	-1
T-op	s	1.010297
Imar	Amps	1000
3-ph	0/1	0

NODE	PHASE	NAME
From	A	X0002
To	A	X0003

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output
0 - No Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3 Chaveamentos de Cargas

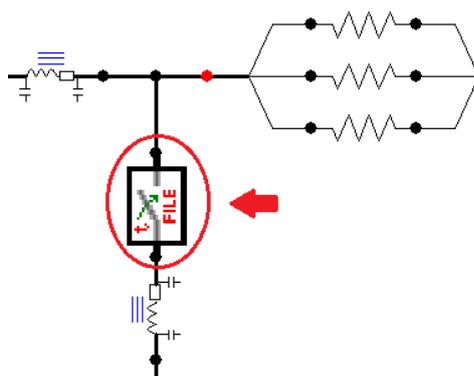
O sistema elétrico está submetido a diversos tipos de chaveamento de cargas, e esses eventos foram simulados com propósito de analisar se a retirada e colocação de uma certa carga no sistema não serão confundidas com um RC. No total foi utilizado quatro tipos de chaveamento, demonstrados abaixo, sendo que dependendo do sistema teste, nem todos foram utilizados, conforme será mostrado mais pra frente. Todos os códigos foram desenvolvidos baseados em Lopes (2020).

3.3.1 Chaveamento de Ramo Lateral (SWP)

Um ramal lateral do sistema está sujeito a sofrer variações de conexão e desconexão da rede elétrica, provocando mudanças nos sinais de tensão e corrente elétrica, mesmo que esse acontecimento ocorra longe do medidor de tensão (LOPES, 2020).

A fim de avaliar se a metodologia proposta neste trabalho consegue distinguir o chaveamento de ramos lateral se comparado com o RC, foi modelado no *software* ATPDraw™, naqueles sistemas que possuem ramos laterais, o chaveamento do mesmo, tendo a mudança de estado da chave no tempo de 1s, através de uma chave automatizada (Figura 22) e o código da mesma demonstrado na Figura 23.

Figura 22- Chave para o chaveamento de ramo lateral.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 23- Código da chave do ramo lateral.

```

MODEL SWP7
OUTPUT out1,out2,out3
VAR out1,out2,out3,indice

FUNCTION timeSW POINTLIST
$INCLUDE C:\Automatizados2020\Carga\ConfChaves\SWP7.txt

INIT
  indice:=1
  out1:=1
  out2:=out1
  out3:=out1
ENDINIT
EXEC
  IF t>timeSW(indice) then
C troca o estado da chave
    IF indice<=10 then
C mantém a saída entre 0 e 1
      out1:=(out1*-1)+1
      out2:=out1
      out3:=out1
C incrementa o índice
      indice:=indice+1
    ENDIF
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

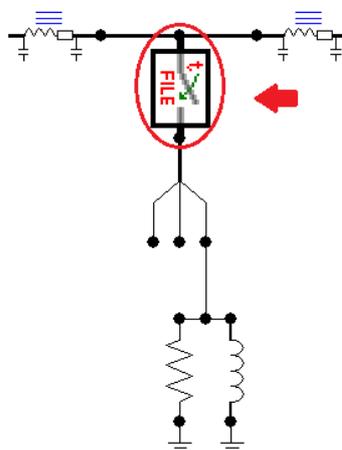
```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3.2 Chaveamento de Carga Concentrada (SWSL)

O chaveamento, ou seja, a adição e remoção de uma carga concentrada em uma das fases, pode ocasionar nos equipamentos de proteções uma falsa identificação de um rompimento de condutor, assim a importância da simulação deste chaveamento para teste de distinção de um RC é de extrema relevância. Na Figura 24 é mostrado a chave automatizada e o código da chave automatizada na Figura 25, onde há a mudança de estado da chave em 1s.

Figura 24- Chave para o chaveamento de carga concentrada.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 25- Código da chave de carga concentrada.

```

MODEL SWDL8
OUTPUT out1,out2,out3
VAR out1,out2,out3,indice

FUNCTION timesW POINTLIST
$INCLUDE C:\Automatizados2020\Carga\ConfChaves\SWDL8.txt

INIT
  indice:=1
  out1:=1
  out2:=out1
  out3:=out1
ENDINIT
EXEC
  IF t>timeSW(indice) then
  C troca o estado da chave
  IF indice<=10 then
  C mantém a saída entre 0 e 1
  out1:=(out1*-1)+1
  out2:=out1
  out3:=out1
  C incrementa o índice
  indice:=indice+1
  ENDIF
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

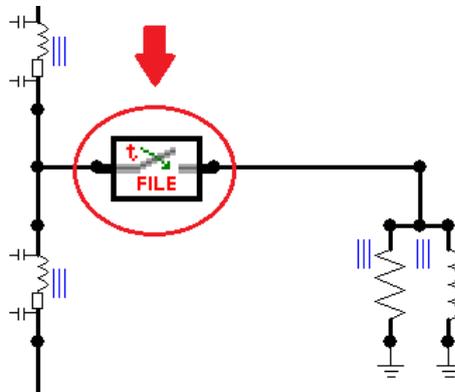
```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3.3 Chaveamento de Carga Distribuída (SWDL)

O chaveamento, ou seja, a adição e remoção de uma carga distribuída entre as três fases, pode ocasionar nos equipamentos de proteções uma falsa identificação de um rompimento de condutor, assim a importância de termos a simulação deste tipo de chaveamento para teste de distinção de um RC. Na Figura 26 é mostrado a chave automatizada e o código da chave automatizada na Figura 27, onde há a mudança de estado em 1s.

Figura 26- Chave para o chaveamento de carga distribuída.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 27- Código da chave de carga distribuída.

```

MODEL SWDL10
OUTPUT out1,out2,out3
VAR out1,out2,out3,indice

FUNCTION timeSW POINTLIST
$INCLUDE C:\Automatizados2020\Carga\ConfChaves\SWDL10.txt
INIT
  indice:=1
  out1:=1
  out2:=out1
  out3:=out1
ENDINIT
EXEC
  IF t>timeSW(indice) then
C troca o estado da chave
  IF indice<=10 then
C mantém a saída entre 0 e 1
    out1:=(out1*-1)+1
    out2:=out1
    out3:=out1
C incrementa o índice
    indice:=indice+1
  ENDIF
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

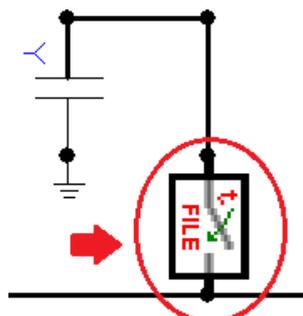
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3.4 Chaveamento de Capacitor (SWBC)

A maioria do acervo literário de detecção de uma falta de alta impedância mostra que o chaveamento de capacitores são um dos responsáveis pela detecção de forma errônea de um RC pelos dispositivos de proteção, já que os capacitores ocasionam a oscilação da frequência dos sinais de maneira transitória (LOPES, 2020).

O problema na diferenciação deste tipo de chaveamento com o RC, demonstra a importância na simulação deste evento no ATPDraw™, conforme exemplificado na Figura 28, e na Figura 29 tem-se o código da chave automatizada utilizada.

Figura 28- Chave para o chaveamento de capacitor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 29- Código da chave de capacitor.

```

MODEL SWBC1
OUTPUT out1,out2,out3
VAR out1,out2,out3,indice

FUNCTION timeSW POINTLIST
$INCLUDE C:\Automatizados2020\Carga\ConfChaves\SWBC1.txt

INIT
  indice:=1
  out1:=1
  out2:=out1
  out3:=out1
ENDINIT
EXEC
  IF t>timeSW(indice) then
C troca o estado da chave
    IF indice<=10 then
C mantem a saida entre 0 e 1
      out1:=(out1*-1)+1
      out2:=out1
      out3:=out1
C incrementa o indice
      indice:=indice+1
    ENDIF
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

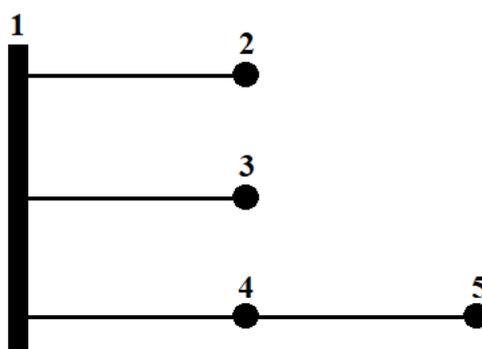
```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.4 Sistema Teste de 5 Barramentos

O sistema teste com 5 barramentos trifásicos, possui além do barramento da subestação, quatro barramentos de circuitos, com tensão base de 11,5 kV e possuindo uma carga total ativa de 15,3 kW e carga reativa total de 8,8 kVAr (LIMA; MINUSSI, 2012). Na Figura 30 apresenta-se o diagrama unifilar do alimentador de distribuição de energia elétrica de 5 barramentos.

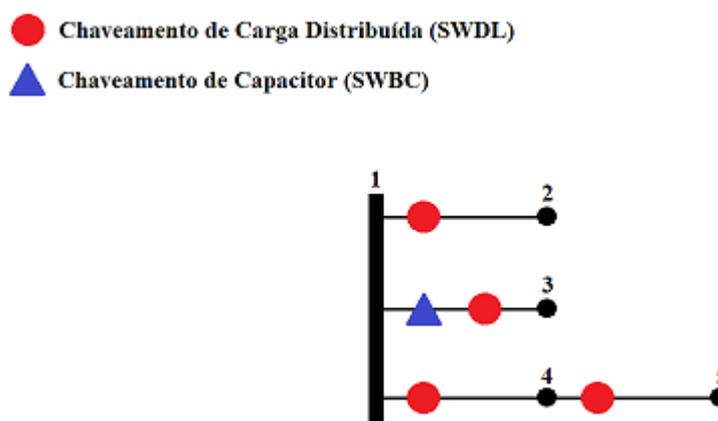
Figura 30- Sistema teste de 5 barramentos.



Fonte: Adaptado de LIMA; MINUSSI, 2012.

O sistema acima sofreu algumas modificações, onde além da adição das rotinas MODELS contendo os distúrbios de tensão (DT), houve a alocação das chaves de carga distribuída (SWDL), porém a carga neste caso teve uma mudança em relação ao sistema original, elas foram divididas para alocar a metade delas ao final da linha, a fim de evitar o erro na não identificação do RC causado pelos barramentos com pouca carga (algo que poderá ser visualizado melhor na seção de Resultados e Discussões). Foi adicionado a fim de teste, um chaveamento de capacitor (SWBC) no barramento 3. A Figura 31 resume a localização dessas chaves ao longo do sistema, e também pode ser verificado com maior detalhe no Anexo A.

Figura 31- Localização dos chaveamentos no sistema de 5 barramentos.



Fonte: Adaptado de LIMA; MINUSSI, 2012.

Por fim, foi simulado no ATPDrawTM os eventos demonstrados na Tabela 3, os RC excluindo o barramento da subestação (1), os distúrbios de tensão (DT), e os chaveamentos citados em dois estados (chave aberta e chave fechada), para que os dados gerados fossem salvos.

Tabela 3- Número de eventos simulados no sistema de 5 barramentos.

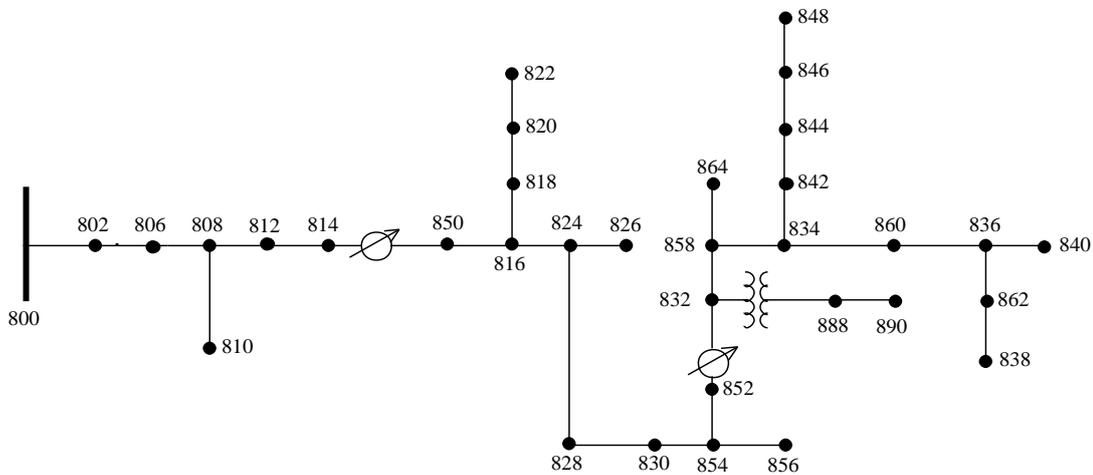
Eventos	Número de eventos simulados
RC	4
DT	9
SWDL	8
SWBC	2
Total:	23

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.5 Sistema Teste IEEE de 34 Barramentos

Toda caracterização dos sinais do RC e dos outros eventos foram realizadas no *software* ATPDrawTM utilizando o sistema teste de 34 barramentos do IEEE cujo diagrama unifilar está representado na Figura 32 (IEEE, 1992). Este sistema é um alimentador real localizado no Arizona, EUA, com uma tensão nominal de 24,9 kV. Suas principais características são seus equipamentos, como por exemplo, dois reguladores automáticos de tensão e transformadores, além de ser um sistema com cargas desbalanceadas e capacitores em paralelo.

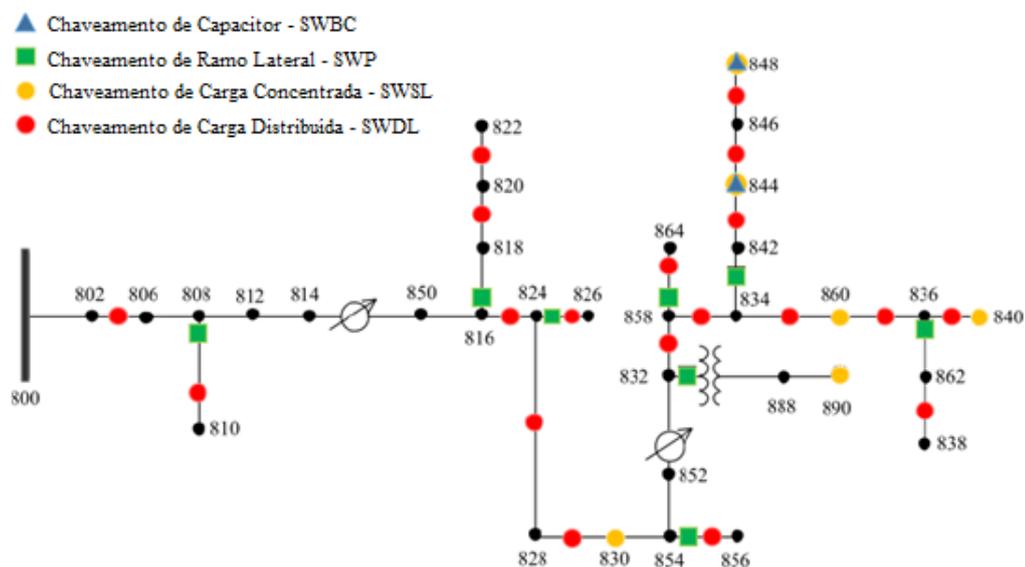
Figura 32- Sistema teste IEEE de 34 barramentos.



Fonte: Adaptado do IEEE, 1992.

O sistema acima sofreu modificações, onde além da adição das rotinas MODELS contendo os distúrbios de tensão (DT), houve a alocação das chaves para os chaveamentos (sem modificar a carga do sistema) de cargas concentradas (SWSL), chaveamentos de cargas distribuídas (SWDL), chaveamentos de ramos laterais (SWP) e chaveamento de capacitores (SWBC). A Figura 33 resume a localização dessas chaves ao longo do sistema, e também pode ser verificado com maior detalhe no Anexo B.

Figura 33- Localização dos chaveamentos no sistema IEEE de 34 barramentos.



Fonte: Adaptado do IEEE, 1992.

Assim, foi simulado no ATPDrawTM os eventos demonstrados na Tabela 4, os RC excluindo o barramento da subestação (800), os distúrbios de tensão (DT), e todos os chaveamentos citados em dois estados (chave aberta e chave fechada), para que os dados de tensão gerados fossem salvos.

Tabela 4- Número de eventos simulados no sistema IEEE 34 barramentos.

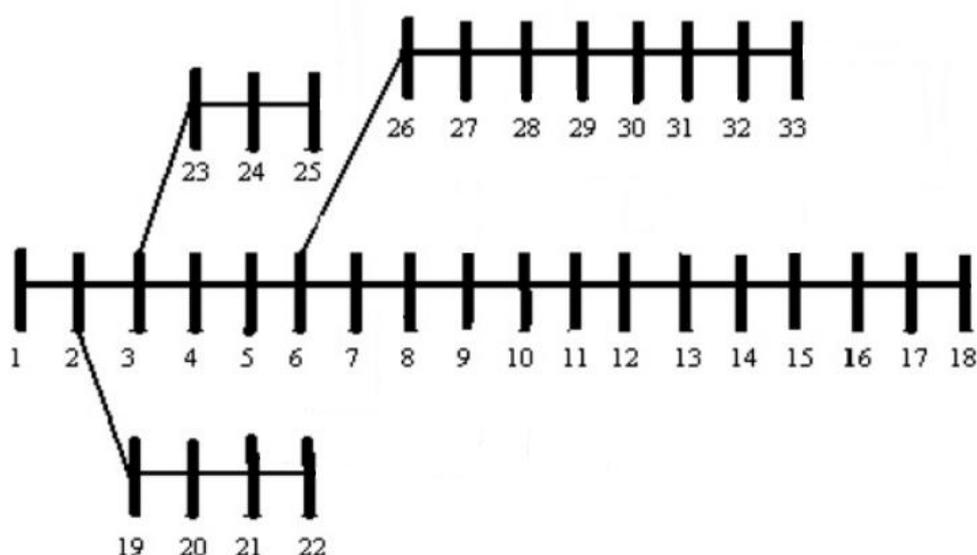
Eventos	Número de eventos simulados
RC	33
DT	9
SWP	16
SWSL	12
SWDL	38
SWBC	4
Total:	112

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.6 Sistema Teste de 33 Barramentos

A Figura 34 demonstra um sistema de distribuição trifásico balanceado com uma tensão nominal de 12,66 kV e possuindo 33 barramentos. A potência real total para a configuração básica é 3715 kW, 2300 kVAr e com uma perda de potência real de 202,67 kW (RAJARAM et al., 2015).

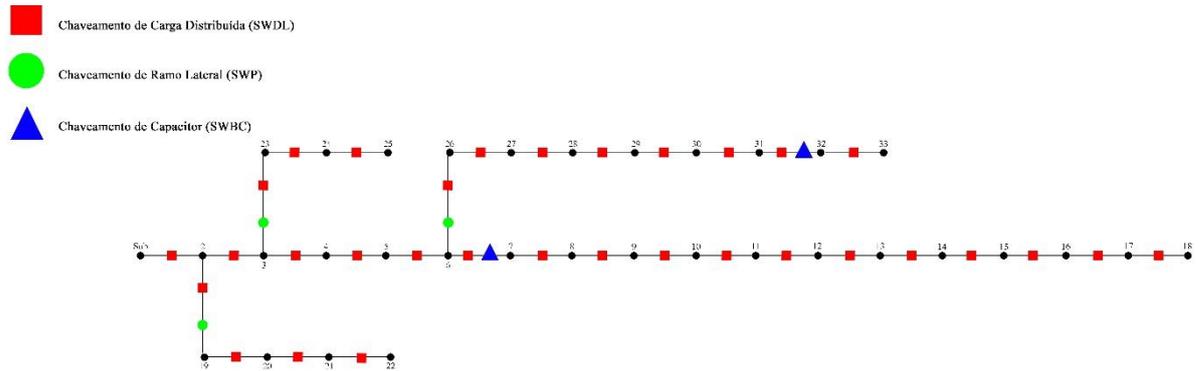
Figura 34 - Sistema teste de 33 barramentos.



Fonte: Adaptado de RAJARAM et al., 2015.

O sistema acima recebeu umas adições de elementos como a rotina MODELS contendo os DT, além do incremento das chaves de carga distribuída (SWDL) e a de ramais laterais (SWP). Houve também a alocação de banco de capacitores nos locais indicados na Figura 35 e conseqüentemente a instalação de chaveamentos para capacitor (SWBC). Abaixo, pode-se ver a Figura 35 com o resumo de todos os chaveamentos e no Anexo C, o detalhe de cada um no sistema.

Figura 35 - Localização dos chaveamentos no sistema de 33 barramentos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A quantidade de eventos simulados no *software* ATPDrawTM no sistema de 33 barramentos é demonstrada pela Tabela 5, cujo no RC temos todos os rompimentos excluindo o barramento subestação, todos os distúrbios de tensão e chaveamentos.

Tabela 5 - Número de eventos simulados no sistema 33 barramentos.

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

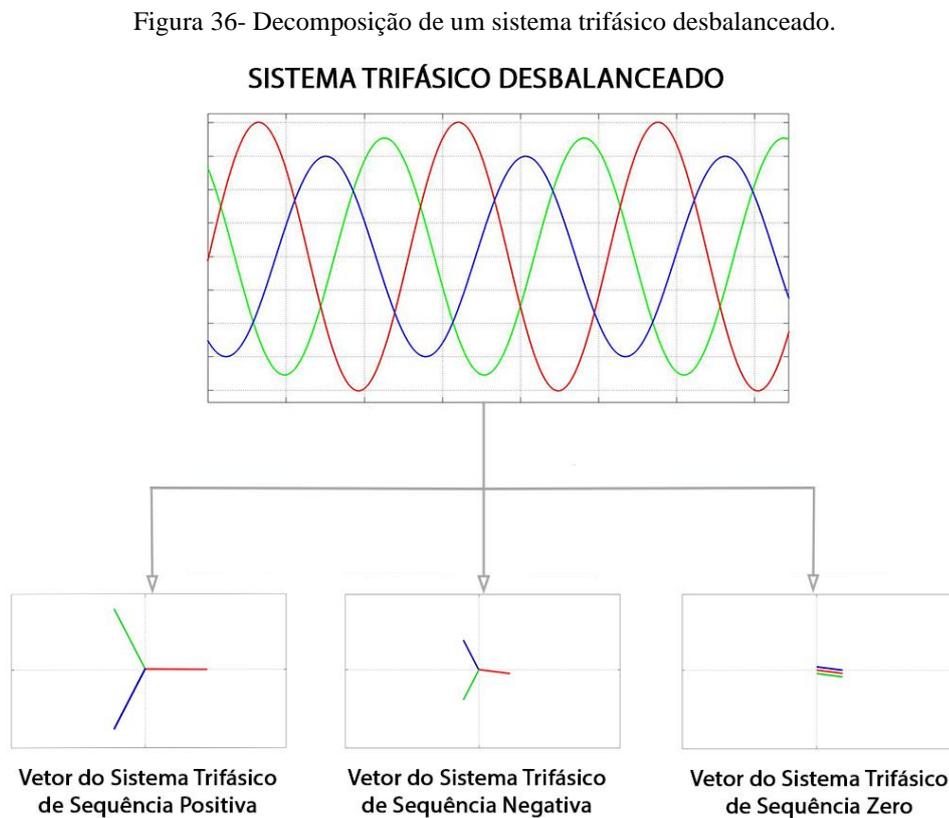
Fonte: Elaborado pelo Autor.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo serão expostos a parte de cálculo da TSN, o uso dos *softwares* OCTAVE e GAMS, como foram utilizados nos sistemas testes e a lógica usada em cada.

4.1 Tensão de Sequência Negativa

Um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto fasorialmente em três sistemas trifásicos equilibrados, conforme é mostrado na Figura 36 (STEVENSON, 1986):



Fonte: Adaptado de STEVENSON, 1986.

Existem diversas maneiras de se caracterizar o desequilíbrio de tensão, onde o grau de desequilíbrio é definido pela relação entre os módulos da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva, como descrito por IEEE (2019), que diz que o desequilíbrio de tensão de um SD trifásico deve ser inferior a 3%. Ainda em IEEE (2019), é possível determinar o fator de desequilíbrio usando apenas medições de valores RMS (Root Mean Square) de fase a fase sem ângulo. No entanto, as equações disponibilizadas em IEEE (2019) são utilizadas no cálculo do fator de desequilíbrio, e neste trabalho foi usado apenas o valor da tensão de

sequência negativa. Em Stevenson (1986) é possível determinar apenas o valor da TSN (V_{neg}), da tensão de sequência positiva (V_{pos}) e da tensão de sequência zero (V_{zero}), como mostrado através da Equação (1):

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

em que $\alpha = 1\angle 120^\circ$ e $\alpha^2 = 1\angle 240^\circ$

Através da Equação (1) é possível decompor os três fasores assimétricos em seus componentes simétricos (sequências zero, positiva e negativa). Como o foco deste trabalho foi investigar o comportamento da TSN, (1) foi decomposta e (2) mostra somente a TSN:

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

Portanto, a fim de fornecer um método de análise da potencialidade da TSN em identificar e distinguir o rompimento do condutor de outros eventos no SD, utilizando a menor quantidade de medidores no SD, foi utilizada a componente de sequência negativa dos sinais de tensão das fases a (V_a), b (V_b) e c (V_c).

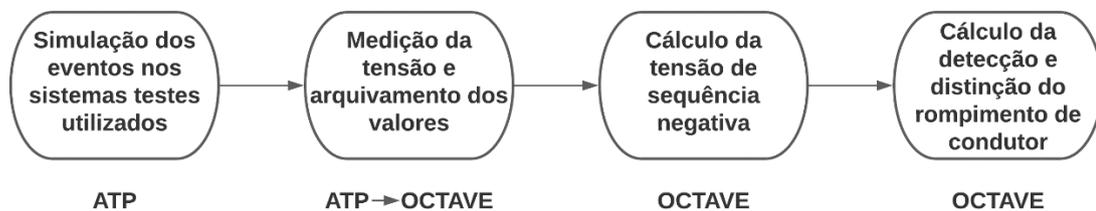
4.2 OCTAVE

O OCTAVE é um *software* de linguagem de alto nível, destinada principalmente a cálculos numéricos. Ele fornece uma interface de linha de comando conveniente para resolver problemas lineares e não lineares numericamente e para realizar outros experimentos numéricos. O *software* possui ferramentas abrangentes para resolver problemas comuns de álgebra linear numérica, encontrar as raízes de equações não lineares, integrar funções ordinárias, manipular polinômios e integrar equações diferenciais ordinárias e diferenciais algébricas. É facilmente extensível e personalizável por meio de funções definidas pelo usuário na própria linguagem do OCTAVE, ou usando módulos carregados dinamicamente escritos em C++, C, Fortran ou outras linguagens (EATON, 2020).

Após o registro dos dados de tensão, o processamento e cálculo dos dados da TSN foram realizados através do *software* OCTAVE, no qual para cada simulação, um ruído branco Gaussiano com uma relação de sinal-ruído (Signal-to-Noise Ratio - SNR) de 20, 40 e 50 dB foi

adicionado aos sinais de tensão trifásicos. É importante destacar que, normalmente em sistemas de distribuição o SNR é de 48 a 70 dB (TAN; RAMACHANDARAMURTHY, 2010), (TOMIC et al., 2007) e (NANDI et al., 2021). Os valores de SNR foram selecionados para avaliar a imunidade da abordagem proposta contra ruídos. Em seguida, o sinal foi filtrado por meio de um filtro Butterworth de segunda ordem com frequência de corte de 180 Hz. Posteriormente, as tensões trifásicas filtradas V_a , V_b e V_c , foram janeladas a cada ciclo (γ), com uma taxa de amostragem de 128 amostras por ciclo. Então, os fasores foram calculados usando a transformada rápida de Fourier. Todo este processo proposto até aqui está representado pela Figura 37:

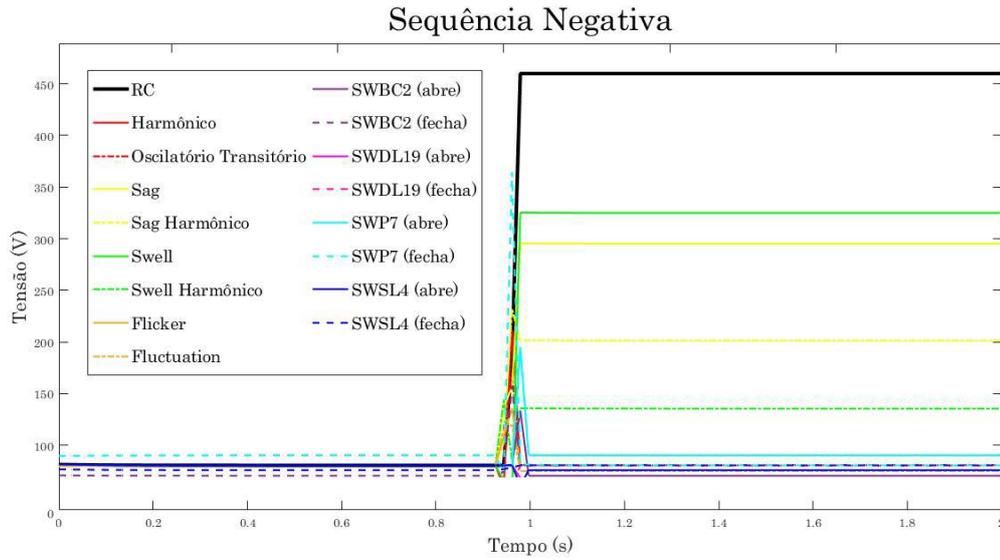
Figura 37- Metodologia da simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao obter os valores de pós-falta da tensão de sequência negativa, foi possível diferenciá-los dos demais eventos testados em cada sistema teste, como os distúrbios de tensão (DT): Sag, Swell, Harmônico, Sag-Harmônico, Swell-Harmônico, Outage, Oscilação Transitória, Flicker e Fluctuation, e dos chaveamentos de carga concentrada (SWSL), de carga distribuída (SWDL), de capacitores (SWBC) e de ramo lateral (SWP). Através da Figura 38, é possível visualizar esta diferenciação da TSN do RC em comparação com os demais eventos testados, como também observado em Silva et al. (2021). Para esta Figura 38, a TSN foi mensurada no barramento da subestação (800) do sistema IEEE de 34 barramentos, com os eventos ocorrendo em 1 segundo no barramento 848. Para melhor visualização, foi retirado da Figura 38 o valor da TSN do Outage, já que este possuiu um valor muito alto (19418,99 V).

Figura 38- Sequência negativa de tensão nos eventos simulados ocorrendo em 1 segundo.



Através da Figura 38, pode-se perceber uma distinção do valor da TSN do RC (traço em preto) em comparação com os demais eventos. No entanto, apenas com um medidor, houveram casos em que não foi possível realizar esta distinção. Então, a fim de empregar a menor quantidade de medidores no sistema, foi utilizado o software GAMS Studio®.

4.3 GAMS Studio

A fim de empregar a menor quantidade de medidores no sistema, foi utilizado o software GAMS Studio® que é um programa de editor de código em linguagem C++ e QT, que possui uma biblioteca vasta, permitindo um sistema de modelagem de alto nível para programação matemática e otimização. Assim, o Gcode 8.4 (Min No. PMU Placement for Maximizing the Observability) da biblioteca do GAMS, foi adaptado para os sistemas testes utilizado, fornecendo a máxima observabilidade do sistema utilizando o menor número de medidores de tensão. Para isso, foi definida uma variável binária α_i , onde os estados dos barramentos i são observáveis (1) ou não (0). Desta forma, o problema de otimização será (SOUROUDI, 2017):

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

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

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

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

onde i, j são índices de barramento, x_i é uma variável binária que indica se tem Unidade de Medição Fasorial (PMU) (1) ou não (0), Ω_B é o conjunto de todos os barramentos da rede, α_i é uma variável inteira (observabilidade) cujo valor mínimo é definido como 1 para tornar toda a rede observável, e N_{PMU} é o número de dispositivos de medição disponíveis. Desta forma, o GAMS realiza a otimização da função objetivo (Equação 3), sujeito às restrições impostas através das Equações 4, 5 e 6.

4.3.1 Sistema teste de 5 barramentos

Através do uso do *software* GAMS e adaptando o código Gcode 8.4 para o sistema de 5 barramentos, pode-se ver com a Tabela 6 o resultado do barramento que segundo o código é a alocação ideal dos PMUs para o sistema de 5 barramentos.

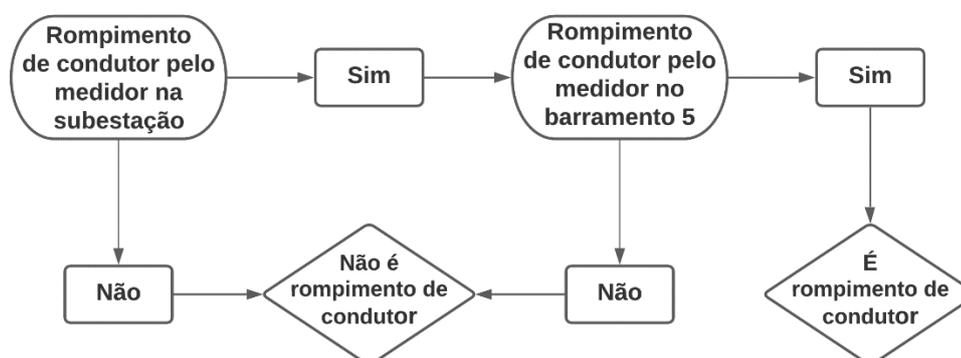
Tabela 6- Alocação ideal dos PMUs através do GAMS para um sistema de 5 barramentos.

Barramentos	N_{PMU}	
	1	2
1	1	
2		
3		
4		
5		1
Total de barramentos observados	4	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme analisado a Tabela 6, O Gcode 8.4 recomendou o uso de 2 PMUs para a total observação dos 5 barramentos presente no sistema teste, portanto foi utilizado ao final dos testes um medidor na subestação (barramento 1) e no barramento 5. A Figura 39 demonstra um fluxograma da lógica utilizada para a distinção e detecção do RC em relação aos demais eventos simulados.

Figura 39- Fluxograma da lógica utilizada no sistema teste de 5 barramentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

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

Assim, serão mostrados os resultados no capítulo seguinte, para os casos citados abaixo no sistema teste de 5 barramentos:

- Caso I: Sistema teste sem modificação e medidor alocado na subestação (1);
- Caso II: Sistema teste modificado com a divisão da carga e alocação de metade dela nos finais dos barramentos e medidor colocado na subestação (1);
- Caso III: Sistema teste sem modificação e medidor alocado no barramento 5;
- Caso IV: Sistema teste modificado e o medidor alocado no barramento 5;
- Caso V: Sistema teste modificado e com um medidor alocado na subestação (1) e um medidor alocado no barramento 5;

4.3.2 Sistema teste IEEE de 34 barramentos

Utilizando o código do Gcode 8.4 e através de um processo iterativo com a exclusão do barramento da subestação, pois já possui um medidor nela, e dos barramentos monofásicos B, pois os rompimentos ocorreram na fase A, a resposta otimizada é fornecida e a Tabela 7 mostra a alocação ideal dos PMUs para o sistema IEEE de 34 barramentos.

Tabela 7- Alocação ideal dos PMUs através do GAMS para um sistema IEEE de 34 barramentos.

Barramentos	N _{PMU}									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
806							1	1	1	1
812						1	1			
814								1	1	1
816			1	1	1	1	1			
820								1	1	1
824								1	1	1
830					1	1				
832		1		1						
836	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
842										1
846				1	1	1	1	1	1	1
854							1	1	1	1
858			1		1	1	1	1	1	1
888									1	1
Total de barramentos observados	4	8	12	15	18	21	23	26	28	29

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado através da Tabela 7, para obter um sistema totalmente observado, o *software* GAMS recomendou a instalação de 10 PMUs, porém um dos objetivos deste trabalho é a redução de custos de implementação e manutenção das PMUs. Portanto, inicialmente foi instalado um medidor na subestação, então foi realizado todo o processo descrito através da Figura 37 e analisado se os resultados eram satisfatórios para a detecção e distinção do RC em comparação com os demais eventos. Posteriormente, foi instalado um segundo medidor, sendo ele no barramento 836 que foi o medidor mais recomendado somando todas as iterações de otimização do *software* GAMS. A lógica seguida foi a mesma da Figura 39, porém invés do medidor no barramento 5, como visto na Tabela 7, o medidor foi acoplado no barramento 836.

Então, foi definido que quando os dois medidores reconhecerem o RC realmente será um RC, quando apenas um dos dois medidores reconhecer o RC, conclui-se que não será RC.

Definida esta lógica que será utilizada no último caso, será visto no próximo capítulo 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 836;

- Caso IV: Sistema teste sem os barramentos críticos e o medidor alocado no barramento 836;
- Caso V: Sistema teste sem os barramentos críticos e com um medidor alocado na subestação (800) e um medidor alocado no barramento 836;

4.3.3 Sistema teste de 33 barramentos

Novamente, fazendo o uso do *software* GAMS e seu Gcode 8.4, reescrevendo-o para analisar o sistema de 33 barramentos, foi obtida a resposta demonstrada na Tabela 8, que contém a alocação ideal dos PMUs para o sistema de 33 barramentos.

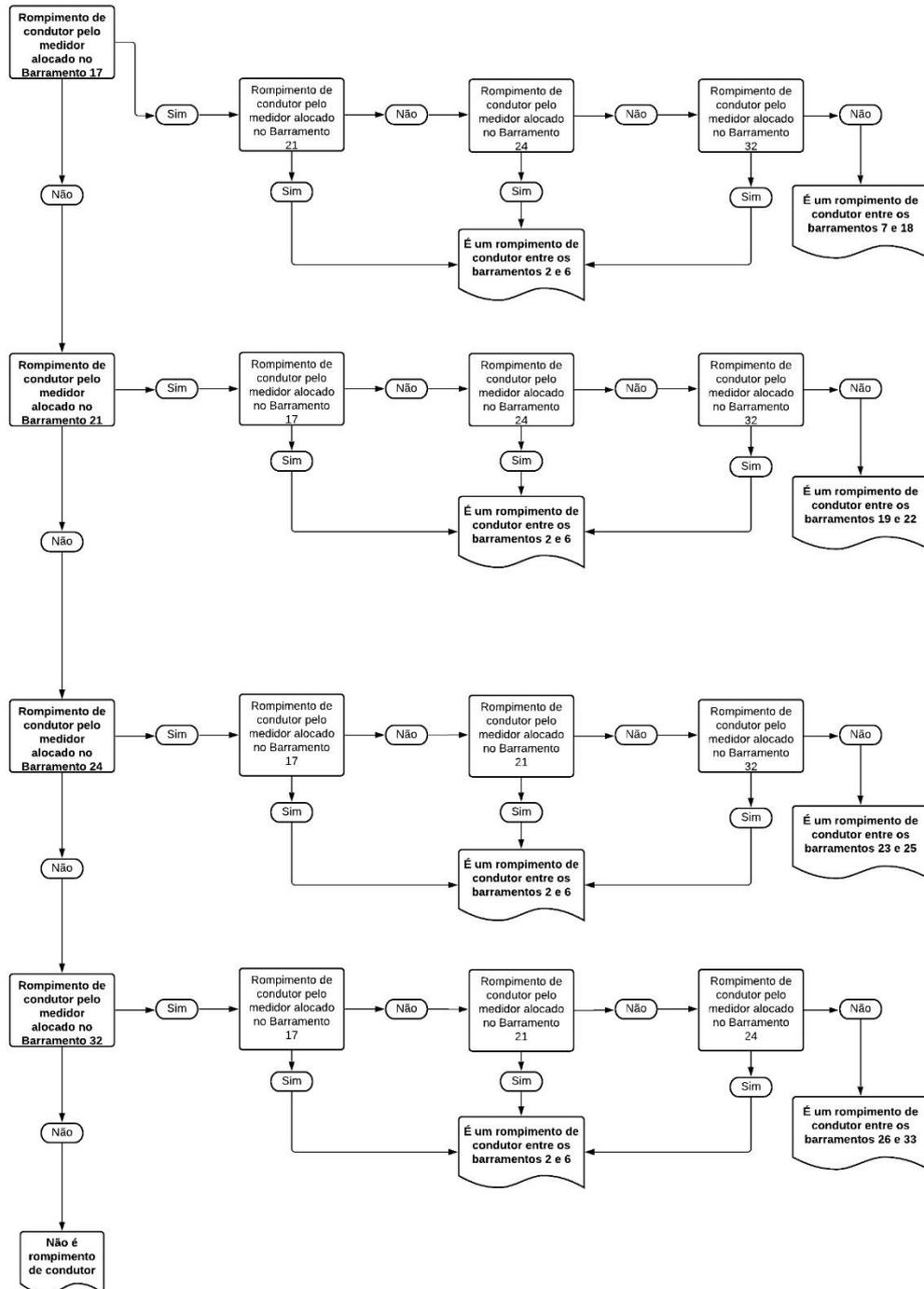
Tabela 8 - Alocação ideal dos PMUs através do GAMS para um sistema de 33 barramentos.

Barramentos	NPMU										
	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
Total de barramentos observados	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	33

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 8, o código do Gcode 8.4 sugeriu a instalação de 11 PMUs, porém com testando o uso dos medidores no *software* ATPDraw™, colocando um a um os medidores que foram mais recomendados pelo código Gcode 8.4, foi visto que a alocação de quatro medidores era satisfatória para os resultados almejados. Portanto utilizou-se estes medidores nos primeiros quatro barramentos mais recomendados, ou seja, barramentos 17, 21, 24 e 32. A Figura 40 traz um fluxograma da lógica utilizada para este sistema.

Figura 40 - Fluxograma da lógica utilizada no sistema teste de 33 barramentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, pode-se ver através do fluxograma que a lógica utilizada consegue identificar aproximadamente o local em que o RC está ocorrendo. Se apenas um dos medidores identificar o RC, este estará ocorrendo no ramal que está instalado. Se dois ou mais medidores acusarem o RC, este estará ocorrendo entre os barramentos “comum” dos ramais, ou seja, entre os barramentos 2 e 6. Se nenhum medidor identificar o RC, logo não está acontecendo um RC. Definida esta lógica, no próximo capítulo estará exposto os resultados encontrados para os seguintes casos no sistema teste de 33 barramentos:

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

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de analisar a eficiência da metodologia proposta, as subseções a seguir, demonstram os resultados obtidos em cada sistema teste utilizados neste trabalho.

5.1 Sistema teste de 5 barramentos

Conforme visto na seção de metodologia, ao final da subseção 4.3.1, para o sistema teste de 5 barramentos, foram testados 5 casos que se diferem entre si na maneira que foram modelados e nos resultados encontrados, conforme pode ser visto nas subseções a seguir:

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

Inicialmente, com o medidor alocado na subestação do sistema original, simulou-se o RC nos 4 barramentos restantes e os valores encontrados foram: mínimo de 12.856 V, máximo de 54.816 V, média 23.346 V e desvio padrão de 20.980 V. Os valores mínimos e máximos são definidos como os limites do RC, ou seja, quando um evento estiver entre estes valores, serão identificados como um RC. 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.

Após essa definição, os demais distúrbios de tensão foram simulados, assim como os chaveamentos do sistema, tendo seus valores máximos e mínimos expostos na Tabela 9.

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

Evento	Mínimo (V)	Máximo (V)
RC	12,856	54,816
DT	19,064	451,029
SWBC	8,274	12,335
SWSL	10,161	77,953

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os valores das TSN, pode-se analisar quais eventos se encontram entre o valor mínimo e máximo do RC, e conseqüentemente estes eventos são classificados como RC de forma errônea, diminuindo a eficiência da distinção do RC em relação aos demais eventos simulados. O cálculo da eficiência se dá através da Equação 7.

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

onde o *Total* é a quantidade de eventos e os *Errors* é a quantidade de eventos que ficaram entre os limites máximo e mínimo de RC, ou seja, que seriam identificados como RC.

Assim, pode-se ver a eficiência na distinção do RC em comparação com os demais eventos através da Tabela 10, após a adição do SNR (Relação Sinal-Ruído) de 20 dB nos sinais das três fases.

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

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	4	55,56%
SWBC	2	0	100,00%
SWSL	8	2	75,00%
TOTAL	19	6	68,42%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, pela Tabela 10, pode-se perceber que nem todos os eventos simulados foram distinguidos de um RC, onde, por exemplo, os distúrbios de tensão, quase que a metade, foram confundidos com um rompimento, dando sua eficiência de 55,56%. Com a adição da identificação que em sua totalidade teve êxito do RC nos barramentos, obtendo a eficiência geral do sistema neste caso na Tabela 11.

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

Nº de casos	23
Erros	6
Eficiência	73,91%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela baixa eficiência encontrada, viu-se que foi necessário a adição de carga nos finais dos barramentos, já que pela própria literatura exposta na seção de fundamentação teórica, viu-se que a TSN não possui uma grande variação em barramentos com pouca carga durante o acontecimento de um RC. Assim metade da carga de cada linha foi dívida, para que metade

esteja no final da linha e a outra metade nos barramentos, o que será debatido na próxima subseção.

5.1.2 Caso II: Sistema teste modificado

Havendo a modificação no sistema teste de 5 barramentos conforme explicado na seção de modelagem e simulação, na subseção 3.4, teve-se a simulação dos eventos, com o medidor na subestação, dos distúrbios de tensão, chaveamentos de cargas e capacitor, além dos rompimentos nos quatro barramentos restantes (excluindo o da subestação). Obteve-se então os valores máximos e mínimos das simulações, conforme pode ser visto na Tabela 12.

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

Evento	Mínimo (V)	Máximo (V)
RC	53,004	635,525
DT	11,960	636,129
SWBC	3,888	6,515
SWSL	6,683	143,979

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a Tabela 12 e comparando-a com a Tabela 9, pode-se ver que houve um aumento significativo dos valores mínimos e máximos, principalmente em relação aos valores de RC, onde o uso destes, definiram os valores limites para detecção de um RC, sendo um RC qualquer evento que estiver dentro do intervalo de 53,004 V á 635,525 V, e pela Equação 7, obteve-se a Tabela 13, a eficiência do sistema na distinção do RC em relação aos demais eventos.

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

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	4	55,56%
SWBC	2	0	100,00%
SWSL	8	1	87,50%
TOTAL	19	5	73,68%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os 73,68% não representam alguma melhora muito significativa em relação ao caso I, portanto não é satisfatória, o que pode ser visto também na Tabela 14 com a eficiência geral do sistema, 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.

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

N° de casos	23
Erros	5
Eficiência	78,26%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.3 Caso III: Sistema teste sem modificação e medidor alocado no barramento 5

Pela seção da metodologia, viu-se que para o sistema teste de 5 barramentos, o *software* GAMS recomendou a alocação do medidor no barramento 5, então primeiramente, foi realizado as simulações dos eventos propostos com o medidor no barramento 5 e no sistema original, ou seja, aquele sem a divisão da carga e alocação da mesma nos barramentos. Assim, foi-se encontrado os valores máximos e mínimos, conforme visto na Tabela 15.

Tabela 15- Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso III do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Mínimo (V)	Máximo (V)
RC	12,843	4973,381
DT	19,057	451,892
SWBC	8,265	12,322
SWSL	10,725	78,081

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, há a definição dos novos limites com os valores mínimos e máximos de RC, 12,843 V e 4973,381 V respectivamente, pode-se então calcular a eficiência na distinção do RC em comparação com os demais eventos, como visto na Tabela 16. E na Tabela 17, é mostrado a eficiência geral do sistema para este caso.

Tabela 16- Distinção do RC com os demais eventos no caso III do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	9	0,00%
SWBC	2	0	100,00%
SWSL	8	3	62,50%
TOTAL	19	12	36,84%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17- Eficiência do sistema geral do caso III do sistema teste de 5 barramentos.

N° de casos	23
Erros	12
Eficiência	47,83%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, pela eficiência e a porcentagem da distinção do RC encontradas, conclui-se que o caso III foi o pior dos casos demonstrados até aqui. Porém, novamente foi testado o mesmo método com o sistema modificado, a fim de visualizar se haverá melhora nos valores encontrados neste caso.

5.1.4 Caso IV: Sistema teste modificado e o medidor alocado no barramento 5

Com o sistema modificado conforme já foi explicado, e o medidor instalado no barramento 5, obteve-se os valores mínimos e máximos do RC, distúrbios de tensão, chaveamentos de cargas e de capacitores. Os valores estão expostos na Tabela 18.

Tabela 18- Valores máximos e mínimos da TSN em cada evento no caso IV do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Mínimo (V)	Máximo (V)
RC	202,255	3453,992
DT	11,936	637,258
SWBC	3,872	6,489
SWSL	6,685	144,100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tem-se em vista que o valor mínimo do RC mudou drasticamente no sistema modificado em relação ao sistema original, assim pode-se concluir que o valor da eficiência e distinção do RC em relação aos outros eventos será superior com os novos valores de limite no medidor, onde o mínimo é de 202,255 V e o máximo de 3453,992 V. Esta porcentagem de distinção pode ser vista na Tabela 19.

Tabela 19- Distinção do RC com os demais eventos no caso IV do sistema teste de 5 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	1	88,89%
SWBC	2	0	100,00%
SWSL	8	0	100,00%
TOTAL	19	1	94,74%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a Tabela 19, tem-se uma porcentagem de distinção quase totalmente satisfatória, tendo apenas um erro na diferenciação do *outage* com um RC. Apesar de se obter um promissor resultado, de acordo com a Tabela 20, ainda não se chegou aos 100% da distinção dos eventos para um RC e então usou-se o método proposto pelo fluxograma da Figura 39, e os resultados são mostrados e discutidos na subseção seguinte.

Tabela 20- Eficiência do sistema geral do caso IV do sistema teste de 5 barramentos.

N° de casos	23
Erros	1
Eficiência	95,65%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.5 Caso V: Sistema teste modificado e 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 39, utilizando dois medidores, um na subestação tendo seus limites indo de 53,004 V a 635,525 V, e outro no barramento 5 com limite mínimo de 202,255 V e máximo de 3453,992 V. Assim, fez-se o uso da seguinte lógica:

- quando os dois medidores reconhecerem o RC, a conclusão será que realmente é um RC;
- quando apenas um dos dois medidores reconhecerem o RC, a conclusão será que não é RC;
- quando os dois reconhecerem um não RC, a conclusão será que não é RC.

Por fim, tem-se então a tabela com a distinção do RC com os demais eventos na Tabela 21 e na Tabela 22 a eficiência final do sistema com o método proposto.

Tabela 21- Distinção do RC com os demais eventos no caso V do sistema teste de 5 barramentos.

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

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22- Eficiência do sistema geral do caso V do sistema teste de 5 barramentos.

Nº de casos	23
Erros	0
Eficiência	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, obteve-se o total êxito na distinção e detecção do RC, porém para que isso ocorra, foi necessária uma divisão de carga nos barramentos, já que não há uma componente expressiva de TSN em barramentos com pouca ou nenhuma carga.

5.1.6 Resumo dos resultados obtidos para cada caso do sistema de 5 barramentos

A Tabela 23 demonstra o resumo dos resultados obtidos em cada caso no sistema teste de 5 barramentos. Todos os valores encontrados estão no Anexo E.

Tabela 23- Resumo dos Resultados encontrados por caso do sistema teste de 5 barramentos.

Casos	Tipo de sistema	Valor mínimo da TSN na subestação (V)	Valor mínimo da TSN no barramento 5 (V)	Porcentagem de distinção do RC	Eficiência geral do sistema
I	Original	12,856	-	68,42%	73,91%
II	Modificado	53,004	-	73,68%	78,26%
III	Original	-	12,843	36,84%	47,83%
IV	Modificado	-	202,225	94,74%	95,65%
V	Modificado	53,004	202,225	100,00%	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, visualizando a Tabela 23, os maiores valores na porcentagem de distinção do RC e da eficiência geral do sistema foram aqueles que o tipo de sistema utilizado foi o modificado com a divisão da carga de cada barramento e o remanejamento de metade dela para o final do respectivo barramento, não modificando o valor total de carga do sistema e apenas sua localização no sistema. Em JAHAMAYA et al., 2017, os autores demonstraram que a TSN é muito mais significativa nos barramentos com uma carga elevada do que aqueles barramentos com a carga leve. Assim pode-se concluir que o método proposto neste trabalho será muito mais eficiente, sem a necessidade de fazer modificações no sistema, naqueles sistemas que possuem muito mais barramentos com carga elevada em relação aos barramentos de carga leve.

5.2 Sistema teste IEEE de 34 barramentos

Os resultados dos cinco casos estudados para o sistema teste IEEE de 34 barramentos estão expostos nas próximas subseções, onde cada um possuiu eficiência distintas na detecção e distinção do RC em comparação com os demais eventos.

5.2.1 Caso I: Sistema teste com todos os barramento e medidor alocado na subestação

Primeiramente, com o medidor de tensão na subestação (barramento 800), foi simulado o RC para todos os barramentos, porém foi excluído o barramento da subestação e os barramentos monofásicas da fase B, obtendo-se os seguintes valores: valor mínimo de 80,580 V, valor médio de 1030,788 V, desvio padrão de 757,739 V e valor máximo de 2088,364 V.

Este mínimo valor da TSN foi obtido para a simulação do RC no barramento 862, que foi selecionado como um limite para a distinção do RC em comparação com os demais eventos.

Semelhantemente ao processo de obtenção dos valores da TSN para o RC, foram obtidos os valores da TSN para todos os distúrbios de tensão (DT) e para os chaveamentos. A Tabela 24 mostra os valores máximos e mínimos encontrados para os eventos de DT e de chaveamento.

Tabela 24- Valores máximos e mínimos da TSN no caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Evento	Mínimo (V)	Máximo (V)
RC	80,580	2088,364
DT	97,433	19418,996
SWBC	83,163	119,394
SWP	63,524	299,356
SWSL	70,797	85,837
SWDL	11,758	589,973

Fonte: Elaborado pelo autor.

Se a TSN dos eventos de DT e dos chaveamentos forem maiores do que o limite, ou seja, o valor mínimo da TSN para o RC (80,58 V), significa que este evento foi classificado incorretamente como um RC. Com esses valores mínimos e máximos do RC, pode-se analisar cada um dos eventos, e observado quais deles seriam detectados como RC, e assim determinar a eficiência na detecção, através da Equação 7.

A Tabela 25 mostra a porcentagem de distinção do RC em comparação com os demais eventos simulados, com SNR de 20 dB adicionado aos sinais. Com esses dados, conclui-se que uma distinção bem-sucedida entre o RC e os outros eventos ocorre quando o TSN calculado após o evento é inferior ao valor TSN mínimo estabelecido para o RC.

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

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	8	11,11%
SWBC	4	4	0,00%
SWP	16	9	43,75%
SWSL	12	6	50,00%
SWDL	38	29	23,68%
TOTAL	79	56	29,11%

Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, através da Tabela 25 pode-se perceber que, considerando as 33 simulações de RC e 79 simulações para os demais eventos, houveram casos em que não foi possível distinguir o RC. O pior caso foi o SWBC, pois através da Tabela 24, observou-se que os valores das 4 simulações vão de 83,163 V á 119,394 V, logo todas simulações detectariam erroneamente estes eventos como RC e não como um SWBC. Assim pode-se definir juntamente com os acertos na detecção do RC em cada um dos 33 barramentos, a eficiência geral através da Tabela 26.

Tabela 26- Eficiência do sistema geral do caso I do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Nº de casos	112
Erros	56
Eficiência	50,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme visto na Tabela 26, a eficiência obtida não teve resultados satisfatórios e portanto, a fim 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, como mostrado na próxima subseção.

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

Através da simulação anterior, foi visto que os menores valores da tensão de sequência negativa no RC foram em barramentos monofásicos de fase B e aqueles que possuíam pouca ou nenhuma carga. Estes barramentos serão considerados críticos aqui nesta subseção. Salienta-se que algumas referências alertam que faltas localizadas na extremidade do alimentador ou em ramos laterais apresentam menor probabilidade 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). Portanto, a sensibilidade da TSN também varia com esses parâmetros.

Então a mesma análise anterior foi realizada novamente, porém excluindo estes barramentos chamados de críticos na análise do RC, sendo eles os barramentos: 810, 826, 838 e 856 (monofásicos de fase B), e os barramentos: 822, 840, 862 e 864 (com pouca ou nenhuma carga). Assim, novamente com o medidor apenas na subestação (800), foram feitas as mesmas simulações nos *softwares* ATPDraw e OCTAVE, e observou-se uma mudança em relação ao valor máximo e mínimo da TSN do RC, sendo: valor máximo de 2088,364 V e valor mínimo

de 149,549 V. Desta forma, quando no medidor localizado na subestação mensurar um valor de TSN superior à 149,549 V ele irá detectar como um RC.

Com este novo valor mínimo da TSN do RC, pode-se analisar em comparação com os demais eventos e assim determinar uma nova eficiência na detecção, através da Equação 7. A Tabela 27 mostra a porcentagem da distinção do RC com os demais eventos simulados.

Tabela 27- Distinção do RC com os demais eventos no caso II do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	3	66,67%
SWBC	4	0	100,00%
SWP	16	2	87,50%
SWSL	12	0	100,00%
SWDL	38	3	92,11%
TOTAL	79	8	89,87%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme visto na Tabela 27, houve um incremento na eficiência na distinção do RC em comparação com os demais eventos. Com os barramentos críticos a porcentagem de distinção era de 29,11% e sem os barramentos críticos é de 89,87%, sendo que das 79 simulações, apenas 8 eventos foram identificados erroneamente como RC.

Assim, viu-se que com a retirada dos barramentos críticos, houve um incremento na eficiência, com quase todos os eventos sendo distinguidos de um RC. Porém em alguns casos, não se obteve um êxito na distinção. Além disso, muitos barramentos foram considerados críticos, diminuindo a “zona de detecção” dos RC, e em sistema real os barramentos críticos estão presentes. Portanto, a fim de mensurar a potencialidade deste método, a Tabela 28 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 28- Eficiência do sistema geral do caso II do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Nº de casos	112
Erros	16
Eficiência	85,71%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conclui-se nesta subseção que, embora a metodologia apresentada até esta subseção seja simples e prática de ser implementada, ela apresenta alguns inconvenientes no que diz respeito à distinção do RC em comparação com os demais eventos. Pode-se perceber 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. Além disso, as bibliografias apresentadas na seção 2 deste trabalho, mostra que diversos trabalhos utilizam vários pontos de medição, por exemplo, em (CARRITE et al., 2018), para superar este desafio, vários relés de detecção são instalados em barramentos que fornecem cargas críticas para o SD e também os autores consideram uma variedade de condições de carregamento para entender o impacto de uma condição de RC. Semelhantemente, em (BHANDIA et al., 2020) e em (WANG et al., 2019), os autores propõem esquemas de detecção e distinção de RC, também utilizando diversos pontos de medição ao longo do SD. Assim, a fim de aumentar a eficiência na distinção do RC dos demais eventos, a próxima seção mostra um estudo de otimização aplicado a locação de um medidor em outro local do SD.

5.2.3 Caso III: Sistema teste com todos os barramentos e o medidor alocado no barramento 836;

Conforme foi visto na seção 4.3.2, o *software* GAMS, recomendou pela primeira iteração a locação do medidor no barramento 836. Então 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 TSN pelo *software* OCTAVE, onde em cada simulação foi inserido um ruído branco gaussiano com SNR de 20 dB adicionado ao sinal das três fases. 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 foram janeladas em cada ciclo (γ) com taxas de amostragem de 128 amostras por ciclo e então, os fasores foram calculados utilizando a transformada de Fourier. Os resultados somente para este medidor no barramento 836 são mostrados na Tabela 29.

Tabela 29- Valores máximos e mínimos da TSN no caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Evento	Mínimo	Máximo
RC	757,574	13753,941
DT	653,308	19457,766
SWBC	801,522	988,278
SWP	773,661	1060,474
SWSL	752,919	1047,538
SWDL	661,379	924,128

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como feito anteriormente, definiu-se como um RC todo evento que com valor da TSN inferior ao mínimo (757,57 V). A Tabela 30 mostra a porcentagem da eficiência da distinção do RC em comparação com os demais eventos realizados através da Equação 7.

Tabela 30- Distinção do RC com os demais eventos no caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	7	22,22%
SWBC	4	4	0,00%
SWP	16	16	0,00%
SWSL	12	11	8,33%
SWDL	38	36	5,26%
TOTAL	79	74	6,33%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser visto através da Tabela 30, a eficiência na distinção do RC com os demais eventos não atingiu níveis satisfatórios, em consequência do valor baixo do limite da TSN estabelecida para o RC (757,57 V). Portanto a eficiência geral para esse caso se encontra na Tabela 31.

Tabela 31- Eficiência do sistema geral do caso III do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Nº de casos	112
Erros	74
Eficiência	33,93%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.4 Caso IV: Sistema teste sem os barramentos críticos e o medidor alocado no barramento 836

Então, com o objetivo de melhorar os resultados, foi excluído novamente os barramentos determinados como críticos neste sistema. Desta forma, obteve-se um novo limite inferior da TSN do RC de 1110,930 V, e os valores mínimos e máximos dos eventos testados são mostrados na Tabela 32.

Tabela 32- Valores máximos e mínimos da TSN no caso IV do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Evento	Mínimo	Máximo
RC	1110,930	13753,941
DT	653,308	19457,766
SWBC	801,522	988,278
SWP	773,661	1212,938
SWSL	752,919	1047,538
SWDL	661,379	924,128

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que houve um aumento do limite inferior da TSN do RC e consequente, este irá permitir uma maior distinção entre os eventos em comparação, visto que a grande maioria do valor máximo de cada evento se encontra abaixo deste limite. Então a Tabela 33 mostra a porcentagem da eficiência de distinção do RC sem os barramentos críticos.

Tabela 33- Distinção do RC com os demais eventos no caso IV do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	1	88,89%
SWBC	4	0	100,00%
SWP	16	1	93,75%
SWSL	12	0	100,00%
SWDL	38	0	100,00%
TOTAL	79	2	97,47%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, verifica-se a funcionalidade da utilização do software GAMS, pois houve um incremento na porcentagem da eficiência da distinção do RC em comparação com os demais eventos aqui testados. Novamente, a fim de mensurar a potencialidade deste método, utilizou-se o limite da TSN do RC estabelecido sem os barramentos críticos e analisou-se a eficiência com o SD operando com todos os barramentos. Estes resultados podem ser vistos na Tabela 34.

Tabela 34- Eficiência do sistema geral do caso IV do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Nº de casos	112
Erros	10
Eficiência	91,07%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados encontrados, tem-se que quando considerado o SD com todos os barramentos e fazendo uma comparação da porcentagem da eficiência da distinção do RC em comparação com os demais eventos, obteve-se 29,11% de eficiência com o medidor na subestação (barramento 800) e somente 6,33% com o medidor no barramento 836. E ainda, analisando o SD sem os barramentos críticos, a porcentagem da eficiência da distinção com o medidor na subestação foi de 89,87% contra 97,47% de eficiência com o medidor no barramento 836. Apesar de atingir um resultado satisfatório de eficiência geral do SD, houveram eventos que não foi possível distinguir-se do RC. Desta forma, para tentar chegar a 100% de distinção foi simulado os dois medidores operando em conjunto no SD, sendo o medidor alocado na subestação e o outro medidor alocado no barramento 836.

5.2.5 Caso V: Sistema teste sem os barramentos críticos e com um medidor alocado na subestação e um medidor alocado no barramento 836

Esta análise foi realizada conforme foi mostrado na seção de metodologia, de maneira análoga ao da Figura 39, com a ressalva dos medidores estarem na subestação e no barramento 836, e utilizado os limites mínimos para cada um dos medidores sem os barramentos críticos de 149,54 V para o barramento da subestação e 1110,93 V para o barramento 836. Tem-se a seguinte lógica:

- quando os dois medidores reconhecerem o RC, a conclusão será que realmente é um RC;
- quando apenas um dos dois medidores reconhecerem o RC, a conclusão será que não é RC;
- quando os dois reconhecerem um não RC, a conclusão será que não é RC.

Assim, a Tabela 35, apresenta a porcentagem de distinção do RC com os demais eventos testados.

Tabela 35- Distinção do RC com os demais eventos no caso V do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	0	100,00%
SWBC	4	0	100,00%
SWP	16	0	100,00%
SWSL	12	0	100,00%
SWDL	38	0	100,00%
TOTAL	79	0	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode-se perceber através da Tabela 35, houve total distinção do RC em comparação com os demais eventos testados quando utilizado apenas os dois medidores operando em conjunto no sistema teste de 34 barramentos do IEEE. Porém, apesar da total 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 chegue a 100%, conforme a Tabela 36.

Tabela 36- Eficiência do sistema geral do caso V do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Nº de casos	112
Erros	8
Eficiência	92,86%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.6 Resumo dos resultados obtidos para cada caso do sistema IEEE de 34 barramentos

A Tabela 37 mostra resumidamente a porcentagem da eficiência na distinção do RC em comparação com os demais eventos testados neste trabalho. No Anexo F, encontra-se todos os valores simulados.

Tabela 37- Resumo dos Resultados encontrados por caso do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Casos	Nº de barramentos	Valor mínimo da TSN na subestação (V)	Valor mínimo da TSN no barramento 836 (V)	Porcentagem de distinção do RC	Eficiência geral do sistema
I	33	80,580	-	29,11%	50,00%
II	25	149,549	-	89,87%	85,71%
III	33	-	757,574	6,33%	33,93%
IV	25	-	1110,930	97,47%	91,07%
V	25	149,549	1110,930	100,00%	92,86%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a análise dos cinco casos apresentados nesta subseção, foi possível verificar como os barramentos críticos afetam a capacidade da TSN 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 TSN para o RC em casos de cargas elevadas. Este fator também foi observado por (CARRITE et al., 2018) (BHANDIA et al., 2020) e (JAYAMAHA et al., 2017). No entanto salienta-se que foi possível atingir 100% de distinção do RC com apenas dois medidores no sistema teste. Por exemplo, os autores de (VIEIRA et al., 2018) propuseram um método para detectar o RC através de medidores inteligentes colocados em vários pontos estratégicos ao longo do alimentador, fazendo com que o SD deva ser uma rede inteligente para que a proposta funcione, gerando altos custos de implementação. Os autores de (VELAYUDHAM et al., 2017)

também apresentam uma proposta semelhante para a localização do RC utilizando a TSN. Novamente o sistema deve ser uma rede inteligente para que a proposta funcione, pois os autores utilizam os dados gravados na unidade de medição inteligente do lado de alta tensão e localizam as seções com falha aplicando a relação entre a distância da falha e os grupos de medição. Em (BHANDIA et al., 2020), seis pontos de medição são usados em todo o sistema teste do alimentador de 34 barramentos do IEEE, dispostos em locais considerados pelos autores como críticos. Apesar do número de medidores instalados no SD, essa técnica é sensível à determinação correta de um valor limiar para o RC e níveis de gravidade dos eventos, pois um pequeno desajuste pode levar a uma classificação incorreta. Em (WANG et al., 2019), os autores propõem um esquema baseado em distúrbios naturais desequilibrados, que requer a instalação de apenas dois dispositivos: um monitor de distúrbios de tensão no barramento principal e um monitor de corrente monofásica no condutor neutro do transformador. Entretanto, o desempenho do método pode ser afetado pela frequência da ocorrência dos distúrbios, no qual, apesar de usar apenas dois dispositivos no SD, segundo os autores, ele é configurado como um método limitado.

Então pode-se perceber que o método de análise apresentado para o sistema IEEE de 34 barramentos proporcionou uma análise da potencialidade da TSN para a detecção e distinção do RC em sistemas de distribuição. Com relação aos pontos de medição dispostos ao longo do SD, vale ressaltar que, na metodologia proposta neste trabalho, foi utilizado inicialmente apenas um ponto de medição (barramento da subestação) e posteriormente mais um ponto de medição otimizado através do software GAMS, diferenciando-se dos trabalhos que estão sendo apresentados, tornando a metodologia mais simples, fácil de ser implementada e com um menor custo de implementação e manutenção.

5.3 Sistema teste de 33 barramentos

Nas próximas subseções, serão expostos os resultados dos cinco casos analisados no sistema teste de 33 barramentos, havendo discrepância em cada caso dos valores da eficiência e na distinção em relação aos demais eventos simulados. Neste sistema, não foi utilizado o medidor na subestação, já que o mesmo, nas simulações, mostrou não ser eficiente pelo estilo do sistema, que possui ramais extensos e com vários barramentos. Além disso, como já foi visto no sistema teste de 5 barramentos e no sistema teste IEEE de 34 barramentos, os barramentos que possuem pouca ou nenhuma carga não sofrem grandes modificações nos valores de tensão

de sequência negativa na ocorrência do RC. Portanto, no sistema teste de 33 barramentos, foram considerados os barramentos 18, 22, 25 e 33 como críticos e seus valores ignorados para análise, afetando a eficiência do sistema no final, já que possuirá estes quatro erros dos barramentos críticos.

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

Primeiramente, houve a instalação do medidor no barramento 17, já que este foi um dos barramentos recomendados pelo *software* GAMS. As simulações foram realizadas no *software* ATPDrawTM e os valores processados no OCTAVE para o cálculo da TSN e adição dos ruídos brancos gaussianos de 20 dB. O valor mínimo e máximo encontrados para o RC ao longo de todo o sistema de 33 barramentos (excluindo os valores dos barramentos críticos 18, 22, 25 e 33) definiram os limites do RC, de maneira análoga aos sistemas estudados anteriores, onde caso este medidor registre um valor de TSN entre estes limites, o sinal irá ser identificado como um RC. O valor máximo e mínimo encontrados foram respectivamente de 5863,968 V e 43,380 V, sendo que o barramento em que ocorreu o RC e teve o maior valor foi o barramento 10 e o de menor valor o barramento 24.

Os valores mínimos e máximos dos demais eventos simulados podem ser vistos na Tabela 38, em que se pode ter a noção do quanto os valores variam.

Tabela 38 - Valores máximos e mínimos da TSN no caso I do sistema teste de 33 barramentos.

Evento	Mínimo	Máximo
RC	43,380	5863,968
DT	110,325	489,760
SWBC	106,611	121,902
SWP	68,299	191,618
SWDL	61,410	150,339

Fonte: Elaborado pelo autor.

Obtendo-se os valores dos demais eventos, e sabendo que se estes estiverem entre os valores mínimo e máximo do RC, serão classificados de forma errônea como um RC,

diminuindo a taxa de distinção para o caso I, e os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 39.

Tabela 39 - Distinção do RC com os demais eventos no caso I do sistema teste de 33 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	9	00,00%
SWBC	4	4	00,00%
SWP	6	6	00,00%
SWDL	64	64	00,00%
TOTAL	83	83	00,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme visto na Tabela 39, a eficiência na distinção do RC com os demais eventos foi a pior possível, em consequência do valor baixo do limite da TSN estabelecida para o RC (43,38 V), cujo todos os demais eventos ficavam acima deste valor. Portanto a eficiência geral para esse caso se encontra na Tabela 40, em que houve além dos erros de distinção, os quatro erros na identificação do RC nos barramentos críticos.

Tabela 40 - Eficiência do sistema geral do caso I do sistema teste de 33 barramentos.

Nº de casos	115
Erros	87
Eficiência	24,35%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela baixa eficiência obtida, utilizou-se o medidor em outro local, recomendado pelo GAMS, no sistema teste de 33 barramentos, demonstrado no caso a seguir.

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

Havendo a alteração da localidade do medidor de tensão para o barramento 21 do sistema teste de 33 barramentos, almeja-se alcançar resultados melhores que o caso I, então foi realizada a simulação dos eventos, com o medidor neste barramento, dos distúrbios de tensão, chaveamentos de cargas e capacitor, além dos rompimentos nos barramentos não críticos. Obteve-se então os valores máximos e mínimos das simulações, conforme pode ser visto na Tabela 41.

Tabela 41 - Valores máximos e mínimos da TSN no caso II do sistema teste de 33 barramentos.

Evento	Mínimo	Máximo
RC	37,876	5999,641
DT	113,253	516,019
SWBC	111,911	121,669
SWP	77,199	1915,906
SWDL	75,043	138,243

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Tabela 41, percebeu-se que o valor mínimo de RC segue abaixo do valor mínimo dos demais eventos, o que já evidencia que novamente o resultado da distinção dos demais eventos em relação ao RC será baixa, conforme visto na Tabela 42.

Tabela 42 - Distinção do RC com os demais eventos no caso II do sistema teste de 33 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	9	00,00%
SWBC	4	4	00,00%
SWP	6	6	00,00%
SWDL	64	64	00,00%
TOTAL	83	83	00,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, como no caso I, viu-se que não houve a distinção de nenhum evento, ou seja, caso ocorra qualquer dos eventos simulados, este será pelo medidor no barramento 21 acusado como um RC. Portanto pela Tabela 43, pode-se ver que a eficiência geral do sistema, novamente foi baixa.

Tabela 43 - Eficiência do sistema geral do caso II do sistema teste de 33 barramentos.

Nº de casos	115
Erros	87
Eficiência	24,35%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, pela baixa eficiência, testou-se o uso do medidor no barramento 24, afim de aumentar a eficiência geral do sistema, tanto para distinção quanto para a detecção.

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

Seguindo os barramentos mais recomendados nas interações do Gcode 8.4 do *software* GAMS, foi alocado um medidor no barramento 24, cujo os valores mínimos e máximos de todos os eventos testados estão expostos na Tabela 44.

Tabela 44 - Valores máximos e mínimos da TSN no caso III do sistema teste de 33 barramentos.

Evento	Mínimo	Máximo
RC	38,775	6172,054
DT	116,256	504,118
SWBC	114,208	125,250
SWP	73,722	1936,717
SWDL	76,727	145,756

Fonte: Elaborado pelo autor.

Então, como nos casos anteriores, segue-se tendo valores mínimos do RC menor que os mínimos dos demais eventos, já evidenciando uma baixa porcentagem de distinção do RC em relação aos demais eventos e conseqüentemente do sistema geral também, conforme pode ser visto na Tabela 45 e Tabela 46.

Tabela 45 - Distinção do RC com os demais eventos no caso III do sistema teste de 33 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	9	00,00%
SWBC	4	4	00,00%
SWP	6	6	00,00%
SWDL	64	64	00,00%
TOTAL	83	83	00,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 46 - Eficiência do sistema geral do caso III do sistema teste de 33 barramentos.

Nº de casos	115
Erros	87
Eficiência	24,35%

Fonte: Elaborado pelo autor.

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

Para o último caso do uso individual do medidor em um barramento do sistema teste de 33 barramentos, foi feita a simulação com o medidor no barramento 32, conforme sugerido pelo *software* GAMS, e os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 47, com os valores mínimos e máximos de cada evento testado.

Tabela 47 - Valores máximos e mínimos da TSN no caso IV do sistema teste de 33 barramentos.

Evento	Mínimo	Máximo
RC	34,545	6019,535
DT	110,915	472,080
SWBC	103,356	127,680
SWP	97,960	1571,026
SWDL	73,231	174,506

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que não houve um aumento do limite inferior da TSN do RC e consequente, este não irá permitir uma maior distinção entre os eventos em comparação, visto que a grande maioria do valor mínimo de cada evento se encontra acima deste limite. Então a Tabela 48 mostra a porcentagem da eficiência de distinção do RC sem os barramentos críticos.

Tabela 48 - Distinção do RC com os demais eventos no caso IV do sistema teste de 33 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	9	00,00%
SWBC	4	4	00,00%
SWP	6	6	00,00%
SWDL	64	64	00,00%
TOTAL	83	83	00,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, o uso de um medidor apenas no sistema é ineficiente, conforme é visto na Tabela 49, já que a eficiência geral do sistema novamente ficou abaixo dos 25%, sendo então necessário o uso de uma metodologia adaptada, o que será explicado no próximo caso.

Tabela 49 - Eficiência do sistema geral do caso IV do sistema teste de 33 barramentos.

Nº de casos	115
Erros	87
Eficiência	24,35%

Fonte: Elaborado pelo autor.

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

Como foi visto nos casos anteriores, o uso de apenas um medidor é incapaz de identificar e distinguir o RC dos demais eventos. Pensando nisso e analisando os valores encontrados dos RC para cada caso, percebeu-se que as maiores variações da TSN do pós-falta em relação ao pré-falta foram naqueles barramentos que estavam no mesmo ramal em que o medidor estava instalado. Pensando nisso, foi utilizado a lógica contida no fluxograma da Figura 40, em que cada medidor identificaria o rompimento do ramal que este estivesse instalado. Assim, a Tabela 50, resume a função de cada medidor.

Tabela 50 - Função do medidor de cada barramento no caso V do sistema teste de 33 barramentos.

Medidor	Função
Barramento 17	Identificar o RC entre os barramentos 7 e 18.
Barramento 21	Identificar o RC entre os barramentos 19 e 22.
Barramento 24	Identificar o RC entre os barramentos 23 e 25.
Barramento 32	Identificar o RC entre os barramentos 26 e 33.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, para que seja possível esta lógica, foi utilizado o valor mínimo e máximo da TSN do RC dos barramentos que estão no mesmo ramal do medidor (excluindo os barramentos críticos), assim, obtêm-se novos limites para cada medidor, conforme a Tabela 51, já que estes utilizarão apenas o valor mínimo e o valor máximo da TSN do RC dos seus ramais.

Tabela 51 - Valores mínimos e máximos da TSN do RC para cada medidor utilizado no sistema teste de 33 barramentos.

Barramentos	Mínimo	Máximo
17	5733,68	5863,97
21	5999,41	5999,64
24	6171,68	6172,05
32	5474,33	6019,53

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 41 demonstra as zonas de atuação de cada medidor, funcionando da seguinte maneira:

- Zona protegida pelo medidor 17: Quando houver um rompimento dentro desta zona, o medidor que indicará o RC é o medidor 17;
- Zona protegida pelo medidor 21: Quando houver um rompimento dentro desta zona, o medidor que indicará o RC é o medidor 21;
- Zona protegida pelo medidor 24: Quando houver um rompimento dentro desta zona, o medidor que indicará o RC é o medidor 24;
- Zona protegida pelo medidor 32: Quando houver um rompimento dentro desta zona, o medidor que indicará o RC é o medidor 32;
- Zona protegida comum: Quando houver um rompimento dentro desta zona, dois ou mais medidores irão indicar o acontecimento de um RC.

Figura 41 - Zonas de atuação de cada medidor no sistema teste de 33 barramentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Resumidamente, temos a seguinte lógica:

- Quando somente o medidor do barramento 17 mensura uma TSN que fique entre o valor mínimo e máximo demonstrado na Tabela 51, o mesmo concluirá que há um RC ocorrendo entre os barramentos 7 e 18 (Zona protegida pelo medidor 17);
- Quando somente o medidor do barramento 21 mensura uma TSN que fique entre o valor mínimo e máximo demonstrado na Tabela 51, o mesmo concluirá que há um RC ocorrendo entre os barramentos 19 e 22 (Zona protegida pelo medidor 21);

- Quando somente o medidor do barramento 24 mensura uma TSN que fique entre o valor mínimo e máximo demonstrado na Tabela 51, o mesmo concluirá que há um RC ocorrendo entre os barramentos 23 e 25 (Zona protegida pelo medidor 24);
- Quando somente o medidor do barramento 32 mensura uma TSN que fique entre o valor mínimo e máximo demonstrado na Tabela 51, o mesmo concluirá que há um RC ocorrendo entre os barramentos 26 e 32 (Zona protegida pelo medidor 32);
- Quando dois ou mais medidores mensuram uma TSN que fique entre o valor mínimo e máximo demonstrado na Tabela 51, os mesmos concluirão que há um RC ocorrendo entre os barramentos 2 e 6 (Zona protegida comum).

Ciente desta lógica, pode-se obter a porcentagem de distinção de RC em relação aos demais eventos, conforme a Tabela 52:

Tabela 52 - Distinção do RC com os demais eventos no caso V do sistema teste de 33 barramentos.

Evento	Total de Simulações	Total de Erros	Porcentagem de distinção de RC
DT	9	0	100,00%
SWBC	4	0	100,00%
SWP	16	0	100,00%
SWSL	12	0	100,00%
SWDL	38	0	100,00%
TOTAL	79	0	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, obteve-se o total êxito na distinção do RC em relação aos demais eventos, porém para que isso ocorra, foi necessária uma divisão de “zonas”, já que o sistema teste de 33 barramentos possui ramais de grandes extensões, sendo necessário a instalação de um medidor em cada um desses. Assim, chega-se à eficiência final do caso V, demonstrada pela Tabela 53.

Tabela 53 - Eficiência do sistema geral do caso V do sistema teste de 33 barramentos.

Nº de casos	115
Erros	4
Eficiência	96,52%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conclui-se então que o caso V foi o que obteve melhor eficiência geral e na distinção do RC em relação ao demais eventos, além de que neste método, é possível identificar a zona em que está ocorrendo o RC, diminuindo gastos e tempo na busca pela localidade do mesmo.

5.3.6 Resumo dos resultados obtidos para cada caso do sistema de 33 barramentos

A Tabela 54 traz resumidamente os valores da porcentagem da eficiência na distinção do RC em comparação com os demais eventos testados neste trabalho, além da eficiência geral. No Anexo G, encontra-se todos os valores simulados.

Tabela 54 - Resumo dos Resultados encontrados por caso do sistema teste IEEE de 33 barramentos.

Casos	Valor mínimo da TSN no barramento 17 (V)	Valor mínimo da TSN no barramento 21 (V)	Valor mínimo da TSN no barramento 24 (V)	Valor mínimo da TSN no barramento 32 (V)	Porcentagem de distinção do RC	Eficiência geral do sistema
I	43,38	-	-	-	0,00%	24,35%
II	-	37,88	-	-	0,00%	24,35%
III	-	-	38,77	-	0,00%	24,35%
IV	-	-	-	34,54	0,00%	24,35%
V	5733,68	5999,41	6171,68	5474,33	100,00%	96,52%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Viu-se que em sistemas que possuem ramais de grandes extensões e cargas, o uso individual de medidores é ineficiente, já que o mesmo não possui a capacidade de mensurar a TSN de um ramal distante. Portanto, é necessário o uso de um medidor em cada ramal, que

apesar de elevar os custos no orçamento, este método permite além da eficiência na distinção e na detecção do RC em relação ao demais eventos, apontar a localidade aproximada em que houve o RC.

6 CONCLUSÕES

Devido a atual demanda de energia elétrica e, conseqüentemente, a crescente expansão dos SDs, além das constantes mudanças neste cenário, este trabalho foi pautado na proposta de um modelo de detecção e distinção entre o RC e diversos outros tipos de eventos que podem ocorrer no SD. Para os testes foram utilizados o sistema teste de 5 barramentos, de 33 barramentos e o IEEE de 34 barramentos, onde em cada sistema, cinco casos foram criados a fim de analisar a capacidade da TSN em detectar o RC e distingui-lo de eventos comuns.

Os resultados mostraram a capacidade da TSN em detectar corretamente o RC. Além disso, a utilização da TSN mostrou-se ser uma alternativa economicamente viável quando aliada à metodologia de análise empregada neste trabalho que utilizou dois pontos medição, no sistema teste de 5 barramentos (na subestação e no barramento 5) e no sistema teste IEEE de 34 barramentos (na subestação e no barramento 836 do sistema teste), e quatro pontos de medição para o sistema teste de 33 barramentos, sendo simples e prática de ser implementada.

Pode ser visto, principalmente no sistema teste de 5 barramentos, que em sistemas que predominam a presença de barramentos com pouca carga, o uso da TSN não se torna tão eficiente, já que durante a ocorrência do RC, a componente da TSN não sofre um aumento em seu valor de maneira significativa, prejudicando a detecção do RC e a sua distinção em relação aos demais eventos. A fim de mitigar este problema, na modelagem do sistema neste trabalho, foi necessário a adição de carga em cada barramento, evidenciando que a metodologia utilizada é muito eficiente nos sistemas que possuem barramentos com carga instalada.

No sistema teste IEEE de 34 barramentos, foi visto uma eficiência satisfatória, sem a necessidade de bruscas mudanças, tendo a distinção plena do RC dos demais eventos e os únicos erros foram na identificação do RC nos barramentos que possuíam pouca carga, problema também demonstrado no sistema teste de 5 barramentos. Portanto, a técnica de distinção e detecção do RC utilizada neste trabalho é recomendada em sistema maiores e que possuem carga significativa.

Por último, no sistema teste de 33 barramentos, foi visto que por se tratar de um sistema que possui ramais extensos e com grande cargas, houve a necessidade de instalar um medidor em cada ramal e adaptar a metodologia utilizada, para que desta forma, a eficiência geral do sistema, ou seja, a capacidade de distinguir o RC de outros eventos somados com a capacidade na detecção do RC, foi muito satisfatória, havendo apenas erros na detecção dos RC ocorridos nos barramentos que possuíam pouca carga, problema análogo aos sistemas testes de 5 barramentos e o IEEE de 34 barramentos.

Assim, os objetivos deste trabalho foram alcançados, já que em todos sistemas testes os valores de distinção e de detecção do RC tiveram números satisfatórios, ou seja, pelo menos acima de 90%, ficando apenas como ponto negativo a modificação do sistema necessária no de 5 barramentos, já que este não atingiria uma eficiência interessante sem a adição das cargas nos barramentos, pois a TSN não se manifesta de forma significativa em barramentos com pouca ou nenhuma carga.

Portanto, o uso da TSN para detecção e distinção do RC em relação aos demais eventos é bastante eficiente, sendo que para cada sistemas de distribuição que faça o uso desta metodologia, deve-se realizar um estudo para definir qual a lógica que deve ser utilizada para que resulte numa maior eficiência, já que para cada sistema, devido as suas características e suas topologias, a lógica de uso dos medidores mudam, por exemplo, conforme visto nesse trabalho, nos sistemas de 5 barramentos e o IEEE de 34 barramentos, quando dois medidores acusarem um RC, a conclusão será que está ocorrendo realmente um RC, enquanto no sistema de teste 33 barramentos, por se tratar de um sistema com ramais extensos e com grandes cargas, diferente dos sistemas anteriores, o RC será identificado quando apenas um medidor ou mais o acusarem. Quando um medidor acusar o RC, este estará ocorrendo no ramal em que o mesmo está instalado, e quando mais que um medidor acusar um RC, ele estará ocorrendo no ramal em “comum” (ramal que interliga os demais ramais).

Por fim, a TSN é uma técnica promissora e pode ser utilizada como uma primeira triagem em conjunto com outras técnicas para compor um método confiável de detecção de RC.

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.

ADAMS, Matthew.; "35 Distribution". Disponível em: <gams.com>

ADEWOLE, A. C.; RAJAPAKSE, A.; OUELLETTE, D.; FORSYTH, P.; “Residual current-based method for open phase detection in radial and multi-source power systems”. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, pp. 1-11.

ALVARENGA, Rafael F.; “Detecção de distúrbios de tensão elétrica em sistemas de distribuição utilizando sistemas imunológicos artificiais de seleção negativa”. 2017, pp. 1-57.

BELANÇON, Marcos Paulo.; “Brazil electricity needs in 2030: trends and challenges”. Energy, 2020, pp. 1-17.

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.

BOLLEN, M. H. J.; “Understanding power quality problems”. New York, 2000. Disponível em:<<https://docs.google.com/file/d/0B5vXY4-Kg5GeY3ltZ041VkJZDVW8/edit>>. Acesso em: 07 jul. 2021.

BUENO, Daniela M.; “Uma nova proposta para detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição de média tensão”. 2019, pp. 1-78.

CARDOSO, F. S.; CAMPOS, R. W.; “Adaptação de algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão que dispensa os parâmetros da linha”. 2021, pp. 1-6.

CARLETO, Nivaldo.; “SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS”. Ed. NT, 2019, pp. 9-10.

CARRITE, R. M.; CHEUNG, K.; MALIK, M.; “Alternative approaches and dynamic analysis considerations for detecting open phase conductors in three phase power systems”. Electric Power Systems Research, 2018, pp. 1-7.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W.; “Electrical power systems quality”. New York: McGraw-Hill, 1996, p.265.

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/>>

FLEMING, Bill; “Elemento direcional de impedância de sequência-negativa”. Apresentado na 10th Annual ProTest User Group Meeting Pasadena, California 24–26 de fevereiro de 1998, traduzido para o português em agosto de 2017, pp. 1-12.

GAO, H.; XU, P.; TAO, J.; HUANG, S.; WANG, R.; ZHOU, Q.; “Voltage Flicker Detection Based on Probability Resampling”. *Energies*, vol. 13, no. 13, 2020, pp. 1-12.

GIMENEZ, J. J.; ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R.; “A method for the approximate location of high impedance faults using neural networks”. *IEEE latin america transactions*, vol. 19, no. 3, março de 2021, pp. 1-8.

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

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

IEEE. (1992); “IEEE PES distribution systems analysis subcommittee radial test feeders”. 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.

IEEE. (2020); “Methods for Detecting and Analyzing an Open Phase Condition of a Power Circuit to a Nuclear Plant Station Service or Startup Transformer (IEEE)”. Power System Relaying and Control Committee Report of Working Group K11 of the Substation Protection Subcommittee, pp. 4-32.

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.

KHERGADE, A. V.; SATPUTALEY, R. J.; BORGHATE, V. B.; RAGHAVA, B.; “Harmonics Reduction of Adjustable Speed Drive using Transistor Clamped H-bridge Inverter based DVR with Enhanced Capacitor Voltage Balancing”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, pp. 1-1.

LEÃO, A. P.; TOSTES, M. E. L.; VIEIRA, J. P. A.; BEZERRA, U. H.; SANTOS, M. C.; SOUSA, A. L.; HERINGER, W. R.; CORDEIRO, M. A. M.; PAVE, J. C. H.; PINHEIRO, L. P. A.; “Características de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição em galhos de ipê roxo”. 2020, pp. 1-8.

LEITE, Marino P.; “Identificação e localização de faltas de alta impedância utilizando medidores inteligentes”. 2017, pp. 1-110.

LIMA, E. M.; LUCENA, M. C.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A.; “Uma proposta para automação de bases de dados simuladas de faltas de alta impedância”. 2020, pp. 1-7.

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.

LIMA, Fernando Parra dos A.; “Análise de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica baseada em sistemas imunológicos artificiais”. 2013, pp. 1-170.

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

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.; “ENGENHARIA ELÉTRICA: Desenvolvimento e Inovação Tecnológica”. Ed. Atena, 2021, p. 127.

NETO, Renato de Arruda P.; “Sistemas para detecção de falta de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica”. 2005, pp. 1-114.

PAIXÃO, J. L.; JUNIOR, J. O.; RODRIGUES, M. F.; "Estudo de Operação Ilhada de uma PCH com Checagem de Sincronismo Remoto através da Técnica de PLL". Brazilian Journal of Development, 2021, pp. 1-20.

RAJARAM, R.; SATHISH KUMAR, K.; RAJASEKAR, N.; “Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG)”. Energy Reports, 2015, 1, pp. 116–122.

RIBEIRO, Livia F.; “Metodologia de detecção de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas em redes de distribuição a partir dos sinais trifásicos de tensão da saída da subestação” 2020, pp. 1-118.

SALES, Ayllon Gustavo B.; “Classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando sistemas imunológicos artificiais”. 2017, pp. 1-60.

SANTOS, Wellington Pascoalini. “Análise da Incidência de Flicker em Rede Elétrica Causada pela Inserção de Geradores Eólicos Residenciais”. 2013, vol. 2, no. 2, pp. 1-7.

SILVA, Hélio Rubens J.; “Análise de uma nova proposta para identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição”. 2020, pp. 1-104.

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.

SOROUDI, Alireza. “Power System Optimization Modeling in GAMS”. Ed. Springer, 2017, pp. 213-216.

STEIN, Henrique.; “Uma nova proposta para detecção de faltas de alta impedância envolvendo a ruptura do condutor”. 2019, pp. 1-94.

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

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.

TOUMI, T.; ALLALI, A.; ABDELKHALEK, O.; ABDELKADER, A. B.; MEFTOUHI, A.; SOUMEUR, M. A.; “PV Integrated single-phase dynamic voltage restorer for sag voltage, voltage fluctuations and harmonics compensation”. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 547-554.

VELAYUDHAM, T.; GANESH, S.; KANIMOZHI, R.; “Locating Ground Fault in Distribution Systems Using Smart meter,” *International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA 2017)*, 2017, pp. 104- 109.

VIEIRA, F. L.; FILHO, J. M. C.; SILVEIRA, P. M.; GUERRERO, C. A. V.; LEITE, M. P.; “High impedance fault detection and location in distribution networks using smart meters,”. *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2018, pp. 1–6.

WANG, X.; DING, T.; XU, W.; “An open conductor condition monitoring scheme using natural voltage and current disturbances,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, vol. 34, no. 3, pp. 1193–1202.

APÊNDICE A: TRABALHOS PUBLICADOS

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

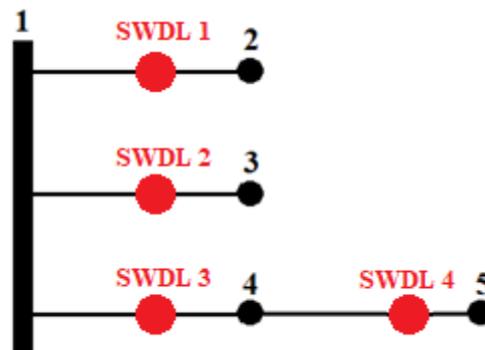
DILLI, M. Á.; NASCIMENTO, H. M. A.; SILVA, J. C.; “Conductor break detection in distribution system through negative sequence voltage”. Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones - RIELAC, 2021, pp. 1-14.

APÊNDICE B: CAPÍTULO DE LIVRO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO

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

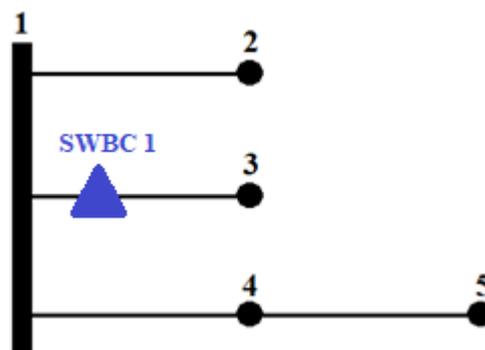
ANEXO A: LOCALIZAÇÃO DAS CHAVES NO SISTEMA TESTE DE 5 BARRAMENTOS

Figura 42- Localização das chaves SWDL no sistema teste de 5 barramentos.



Fonte: Adaptado de LIMA; MINUSSI, 2012.

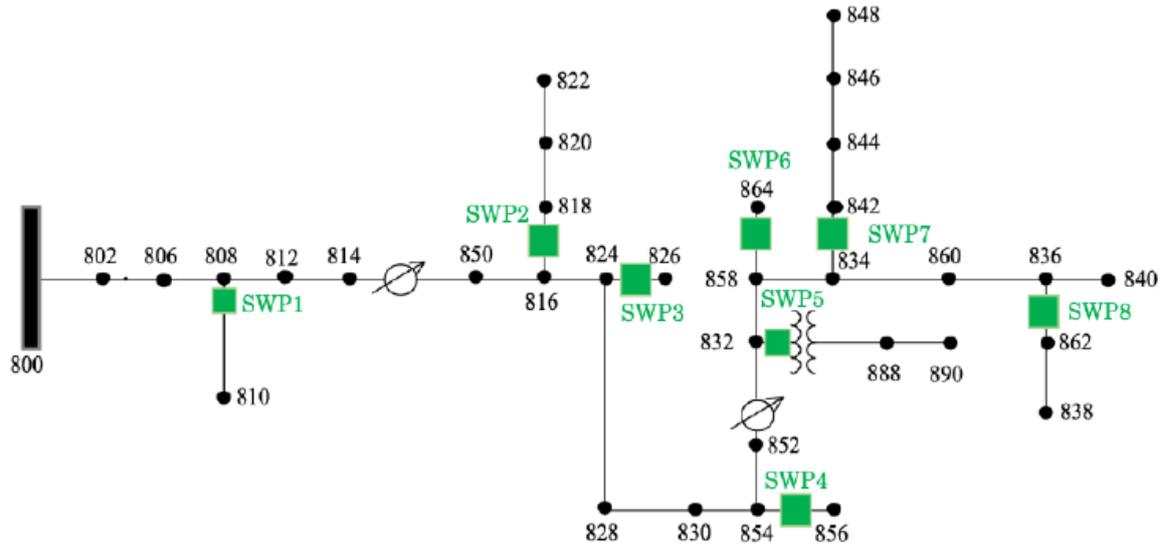
Figura 43- Localização da chave SWBC no sistema teste de 5 barramentos.



Fonte: Adaptado de LIMA; MINUSSI, 2012.

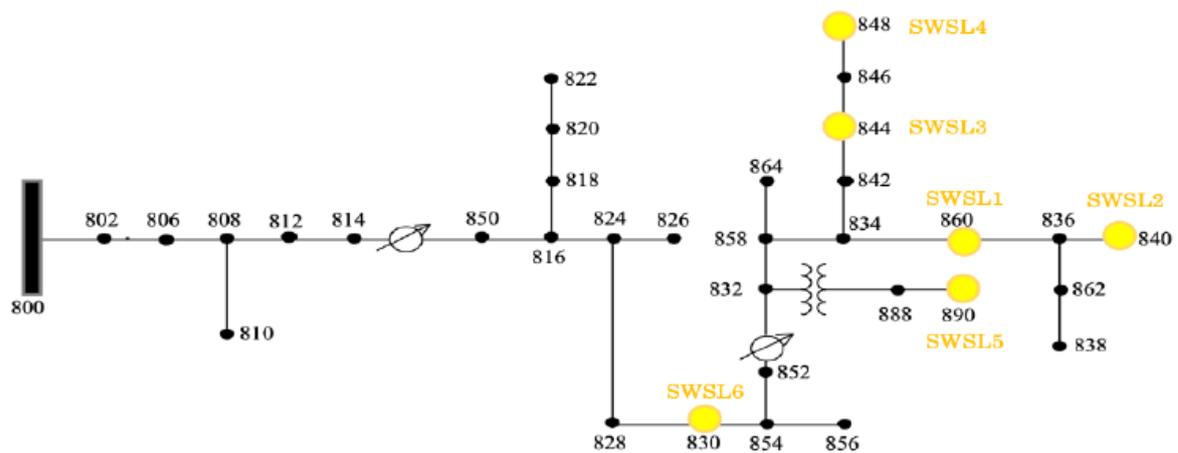
ANEXO B: LOCALIZAÇÃO DAS CHAVES NO SISTEMA TESTE IEEE DE 34 BARRAMENTOS

Figura 44- Localização das chaves SWP no sistema teste IEEE de 34 barramentos.



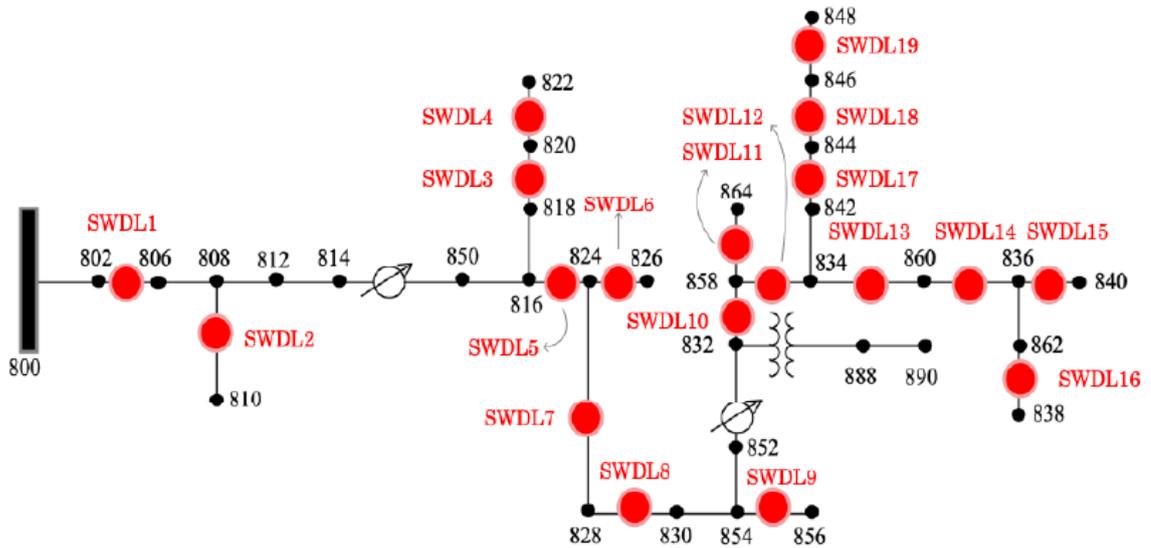
Fonte: Adaptado do IEEE, 1992.

Figura 45- Localização das chaves SWSL no sistema teste IEEE de 34 barramentos.



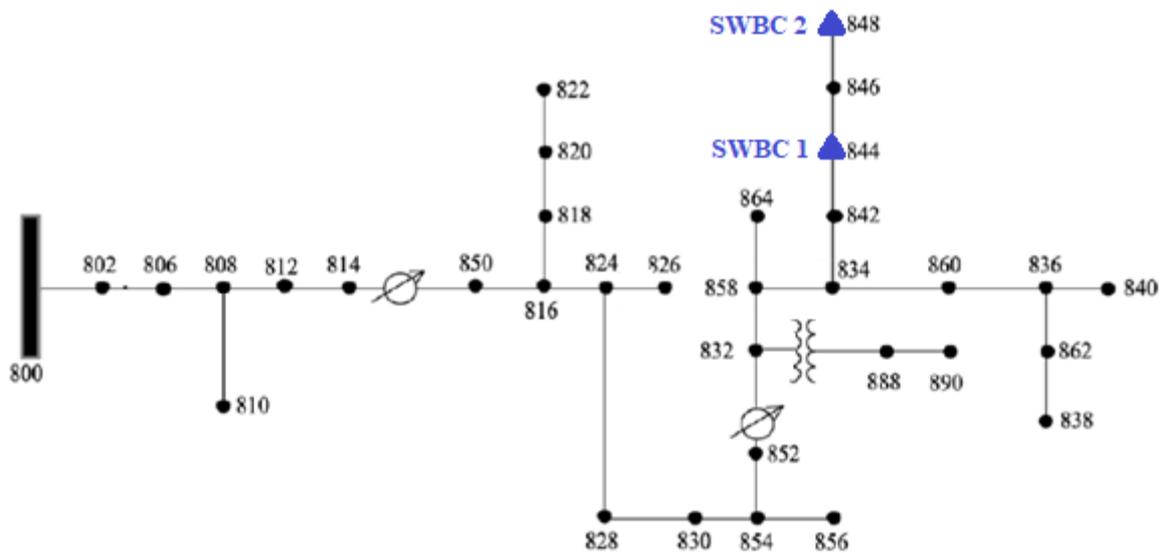
Fonte: Adaptado do IEEE, 1992.

Figura 46- Localização das chaves SWDL no sistema teste IEEE de 34 barramentos.



Fonte: Adaptado do IEEE, 1992.

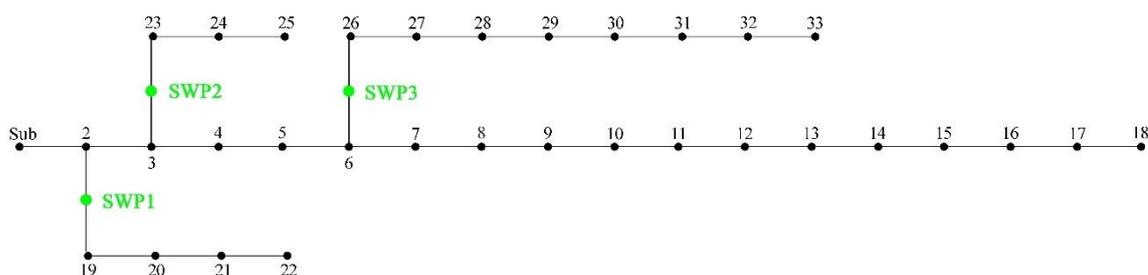
Figura 47- Localização das chaves SWBC no sistema teste IEEE de 34 barramentos.



Fonte: Adaptado do IEEE, 1992.

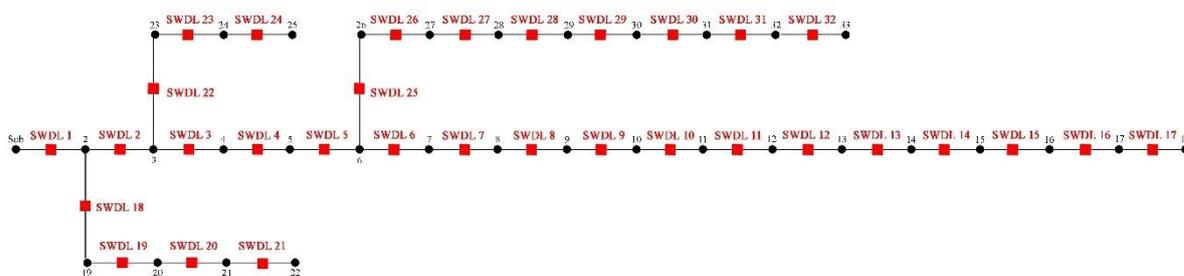
ANEXO C: LOCALIZAÇÃO DAS CHAVES NO SISTEMA TESTE DE 33 BARRAMENTOS

Figura 48 - Localização das chaves SWP no sistema teste de 33 barramentos.



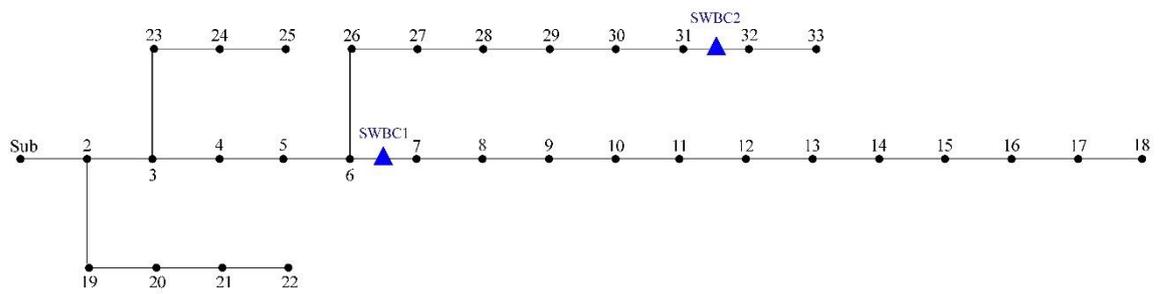
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 - Localização das chaves SWDL no sistema teste de 33 barramentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 - Localização das chaves SWBC no sistema teste de 33 barramentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

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

Tabela 55- Valor da TSN no RC do sistema teste original de 5 barramentos.

Barramentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
2	12,856328	12,856195	12,843112	12,8431644
3	12,8564882	12,856596	12,8429861	12,8431644
4	12,8560705	54,816124	12,8431292	4964,21436
5	12,8564262	12,856409	12,843112	4973,38086
média	12,856328	23,346331	12,8430853	2490,82031
std	0,00018405	20,979862	6,630E-05	2861,32422
máx	12,8564882	54,816124	12,8431292	4973,38086
min	12,8560705	12,856195	12,8429861	12,8431644

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 56- Valor da TSN no RC do sistema teste modificado de 5 barramentos.

Barramentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
2	6,51395988	635,52527	6,48926735	632,966736
3	6,51429224	203,09111	6,48944712	202,254807
4	6,51457739	173,09055	6,48991776	3453,97656
5	6,5141387	53,00354	6,48933554	3453,99243
media	6,51424217	266,17761	6,48949194	1935,79761
std	0,00026158	254,62782	0,00029339	1761,84766
máx	6,51457739	635,52527	6,48991776	3453,99243
min	6,51395988	53,00354	6,48926735	202,254807

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 57- Valor da TSN nos DTs do sistema teste original de 5 barramentos.

Eventos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
Flicker	12,85618591	19,06447792	12,84306717	19,05672454
Fluctuation	12,85624790	30,68915939	12,84294891	30,72714233
Harmônicos	12,85649014	20,18229866	12,84307575	20,18524933

Oscilação Transitória	12,85628414	20,68043137	12,84319973	20,66684914
Outage	12,85624790	460,6140747	12,84312916	461,5213623
Sag	12,85590076	52,45935059	12,84314728	52,54276657
Sag com Harmônicos	12,85628414	54,73725891	12,84302998	54,82851410
Swell	12,85607052	51,21751785	12,84313679	51,28865814
Swell com Harmônicos	12,85657024	50,01894379	12,84319210	50,09762192
media	12,85625352	84,40705702	12,84310299	84,54609871
std	0,000200231	141,8881287	8,07653E-05	142,1788785
máx	12,85657024	460,6140747	12,84319973	461,5213623
min	12,85590076	19,06447792	12,84294891	19,05672454

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 58- Valor da TSN nos DTs do sistema teste modificado de 5 barramentos.

Eventos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
Flicker	6,411106110	11,96037292	6,384863377	11,93576050
Fluctuation	6,410957336	35,72943115	6,385055542	35,76681137
Harmônicos	6,513988972	17,06323814	6,489316463	17,04333496
Oscilação Transitória	6,514289856	12,81512165	6,489467621	12,77998543
Outage	6,514463425	636,1289063	6,489447117	637,2576294
Sag	6,514333725	65,87510681	6,489333630	65,96458435
Sag com Harmônicos	6,514367580	65,22718811	6,489219189	65,30172729
Swell	6,514501095	61,80568314	6,489410400	61,89205551
Swell com Harmônicos	6,514501095	66,50873566	6,489316463	66,62148285
media	6,49138991	108,1237538	6,466158867	108,2848191
std	0,04555909	199,4228437	0,046035824	199,7896046
máx	6,514501095	636,1289063	6,489467621	637,2576294
min	6,410957336	11,96037292	6,384863377	11,9357605

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 59- Valor da TSN nos chaveamentos do sistema teste original de 5 barramentos.

Chaveamentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWBC1 (abre)	12,85695934	8,273855209	12,84295177	8,264917374
SWBC1 (fecha)	0,000640872	12,33487415	0,000836788	12,32163429
SWSL1 (abre)	12,85690594	77,95296478	12,84275436	78,08111572
SWSL1 (fecha)	14,78837681	22,70279694	14,7738924	22,47915268

SWSL2 (abre)	12,85677814	30,58457947	12,84297085	30,62128639
SWSL2 (fecha)	13,64295578	11,87930584	13,62834835	11,88236618
SWSL3 (abre)	12,85707951	11,78079128	12,84292126	12,14903641
SWSL3 (fecha)	13,08045673	12,40131187	13,07146931	12,41664124
SWSL4 (abre)	12,85697269	10,16102028	12,84283733	10,72519588
SWSL4 (fecha)	13,03028011	12,43580437	13,02571392	12,42606449
media	11,88274097	21,05072975	11,8714695	21,13674164
std	4,219295025	21,10388374	4,215225697	21,09383392
máx	14,78837681	77,95296478	14,7738924	78,08111572
min	0,000640872	8,273855209	0,000836788	8,264917374

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 60- Valor da TSN nos chaveamentos do sistema teste modificado de 5 barramentos.

Chaveamentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 5	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWBC1 (abre)	6,514311314	3,888246536	6,489156246	3,872092724
SWBC1 (fecha)	0,000670491	6,514778137	0,000271267	6,489159584
SWSL1 (abre)	6,513811588	143,9793091	6,489196777	144,0997925
SWSL1 (fecha)	8,615015984	48,20851135	8,582584381	48,8477478
SWSL2 (abre)	6,514005661	51,26773071	6,488983154	51,28142548
SWSL2 (fecha)	7,282893658	20,59914589	7,255271435	20,76609802
SWSL3 (abre)	6,514070988	11,29300022	6,488936901	11,58180904
SWSL3 (fecha)	6,619496822	6,682853222	6,595932484	6,684641838
SWSL4 (abre)	6,514106274	15,51817989	6,489349842	16,72351074
SWSL4 (fecha)	6,678944111	7,541162491	6,662658215	7,543065548
media	6,17673254	31,54929543	6,154233932	31,78893471
std	2,268865824	43,05121613	2,260648251	43,04907227
máx	8,615015984	143,9793091	8,582584381	144,0997925
min	0,000670491	3,888246536	0,000271267	3,872092724

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO F: VALORES DA TSN NO SISTEMA TESTE IEEE DE 34 BARRAMENTOS

Tabela 61- Valor da TSN no RC do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Barramentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 836	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
802	80,58419037	2066,979004	780,3618164	12900,25977
806	80,58338928	2067,352051	780,3623047	12902,03906
808	80,58309937	2073,712402	780,3613281	12932,87695
810	80,58964539	80,58599854	780,3563843	780,3554077
812	80,58309937	2081,658936	780,3624878	12970,36523
814	80,58309937	2088,365234	780,361145	13001,2793
816	80,58341217	2087,855957	780,3623047	13001,41504
818	80,58339691	538,2675781	780,3625488	1307,995117
820	80,5835495	443,7429504	780,3622437	1110,930176
822	80,57855988	80,5813446	780,3609009	780,3532104
824	80,58370972	1492,341309	780,3623047	12694,62402
826	80,59039307	80,58457947	780,3499146	780,3538818
828	80,5834198	1492,411865	780,3625488	12695,7207
830	80,58385468	1470,265381	780,3612671	12702,78516
832	80,58356476	1431,446777	780,3604126	12715,9707
834	80,58340454	870,2939453	780,3627319	11557,29785
836	80,58325195	149,5455933	780,3624878	13641,85254
838	80,58986664	80,58457947	780,3410034	780,3518066
840	80,57701874	103,5798492	780,3615112	757,5740967
842	80,58370972	654,3441162	780,3626099	2944,234131
844	80,58386993	636,7606201	780,3624878	2899,776611
846	80,58340454	322,6025085	780,3622437	1961,230835
848	80,57717896	322,315979	780,3603516	1960,008423
850	80,58355713	2087,694336	780,3621216	13000,98926
852	80,58340454	1438,651855	780,3608398	12723,75391
854	80,58263397	1435,174438	780,3606567	12671,53906
856	80,59039307	80,58550262	780,3484497	780,3529663
858	80,58325195	887,5561523	780,3624878	11574,66602
860	80,58356476	287,5422668	780,3624878	13753,94141
862	80,57656097	80,58137512	780,3624878	780,3535156
864	80,57701874	80,58132935	780,3613892	780,3529663
888	80,58323669	560,2647095	780,3627319	1519,695923
890	80,5835495	560,3815918	780,362793	1519,602661
media	80,58330536	915,6119385	780,3604126	7238,9375
std	0,003404986	775,6150513	0,004774831	5847,077148
máx	80,59039307	2088,365234	780,362793	13753,94141
min	80,57656097	80,58132935	780,3410034	757,5740967

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 62- Valor da TSN nos DTs do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Eventos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 836	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
Flicker	80,57556152	108,2748718	780,3165894	792,6998291
Fluctuation	80,57617188	97,43257141	780,3178711	653,3082275
Harmônicos	80,57526398	146,0369720	780,3181152	972,9312134
Oscilação Transitória	80,57495117	125,6777039	780,3178101	779,2774658
Outage	80,57602692	19418,99609	780,317627	19457,76367
Sag	80,57556152	216,651062	780,3171387	897,7354736
Sag com Harmônicos	80,57587433	111,1788788	780,3174438	4174,010254
Swell	80,57601929	225,9661560	780,3180542	863,9525757
Swell com Harmônicos	80,5761795	190,2920227	780,3169556	946,9370117
media	80,57569122	2919,257324	780,3175659	4013,22998
std	0,000454478	7275,835938	0,000442242	6919,630371
máx	80,5761795	19418,99609	780,3181152	19457,76367
min	80,57495117	111,1788788	780,3169556	779,2774658

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 63- Valor da TSN no SWBC do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Chaveamentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 836	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWBC1 (abre)	80,58325195	97,33404541	780,3626099	912,6259155
SWBC1 (fecha)	75,662117	83,16338348	641,6908569	801,5224609
SWBC2 (abre)	80,58278656	107,2428818	780,3630981	988,2802734
SWBC2 (fecha)	70,50684357	119,3941422	615,6477661	873,3212891
media	76,83374786	101,7836151	704,5160522	893,9375
std	4,813747883	15,34542179	88,22329712	77,92172241
máx	80,58325195	119,3941422	780,3630981	988,2802734
min	70,50684357	83,16338348	615,6477661	801,5224609

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 64- Valor da TSN no SWP do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Chaveamentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 836	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWP1 (abre)	80,58324432	64,43728638	780,3630371	806,9089966
SWP1 (fecha)	34,01177216	74,86021423	833,7957153	778,5985107
SWP2 (abre)	80,58372498	299,3561401	780,3625488	1001,853088
SWP2 (fecha)	714,6923218	115,931839	1784,272827	910,7966309
SWP3 (abre)	80,58343506	81,45149231	780,3635254	914,100647
SWP3 (fecha)	91,87549591	63,52371216	1082,753906	781,6866455
SWP4 (abre)	80,58374023	73,44395447	780,3626099	789,0214844
SWP4 (fecha)	62,67866516	79,41624451	787,5447388	773,661499
SWP5 (abre)	80,58356476	85,96589661	780,3629761	1048,094238
SWP5 (fecha)	49,87984848	84,96981812	759,3413086	792,5
SWP6 (abre)	80,58358002	82,76733398	780,3632813	779,5737915
SWP6 (fecha)	87,21325684	80,65620422	780,9460449	782,0819702
SWP7 (abre)	80,58309937	137,5542603	780,3626099	1212,937744
SWP7 (fecha)	90,28469086	223,3034973	572,9763184	1060,474243
SWP8 (abre)	80,58342743	76,54534912	780,362854	923,1359863
SWP8 (fecha)	71,13091278	67,18602753	1111,80249	784,7062378
media	115,4021835	105,7105865	872,2711182	883,7582397
std	160,5166168	65,06923676	273,292511	134,5495911
máx	714,6923218	299,3561401	1784,272827	1212,937744
min	34,01177216	63,52371216	572,9763184	773,661499

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 65-Valor da TSN no SWSL do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Chaveamentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 836	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWSL1 (abre)	80,58400726	70,84645844	780,3629761	794,9986572
SWSL1 (fecha)	75,95141602	79,55644226	766,3980103	778,4585571
SWSL2 (abre)	80,58341217	76,17192078	780,3624878	786,0344238
SWSL2 (fecha)	78,48901367	80,06729126	773,7817383	779,4453125
SWSL3 (abre)	80,58356476	75,84463501	780,3623047	1002,939087
SWSL3 (fecha)	48,88145447	73,34540558	697,819519	765,2833252
SWSL4 (abre)	80,58357239	70,79854584	780,362793	795,0496216
SWSL4 (fecha)	75,90369415	79,58230591	766,8690796	778,5070801
SWSL5 (abre)	80,58325958	85,83758545	780,3629761	1047,537964
SWSL5 (fecha)	49,99483109	85,09751892	759,4321289	792,741394
SWSL6 (abre)	80,58309937	72,70309448	780,3627319	752,9193115
SWSL6 (fecha)	90,34754181	82,06297302	645,2615356	764,9276733
media	75,2557373	77,65951538	757,6448364	819,9035034

std	12,58839989	5,194954395	42,35240173	97,23595428
máx	90,34754181	85,83758545	780,3629761	1047,537964
min	48,88145447	70,79854584	645,2615356	752,9193115

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 66- Valor da TSN no SWDL do sistema teste IEEE de 34 barramentos.

Chaveamentos	Medidor na Subestação		Medidor no barramento 836	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWDL1 (abre)	80,58370972	51,01849365	780,3625488	789,7653809
SWDL1 (fecha)	51,0141716	75,55001831	764,6461792	770,0799561
SWDL2 (abre)	80,58402252	65,54638672	780,3626099	808,0844116
SWDL2 (fecha)	36,65597916	74,58821106	838,0005493	779,4549561
SWDL3 (abre)	80,58401489	120,1836395	780,3630981	774,4892578
SWDL3 (fecha)	198,4185028	85,07139587	831,737793	802,3672485
SWDL4 (abre)	80,58339691	253,5760803	780,3626099	894,6940308
SWDL4 (fecha)	589,9733887	112,7320862	1463,90332	882,3444824
SWDL5 (abre)	80,58294678	65,86589813	780,3624878	807,3789063
SWDL5 (fecha)	39,56629181	76,44651031	840,236145	784,7519531
SWDL6 (abre)	80,58294678	81,9967804	780,3624878	914,8118896
SWDL6 (fecha)	93,11254883	63,37687683	1085,644165	782,4973755
SWDL7 (abre)	80,58356476	78,76382446	780,3622437	771,6342773
SWDL7 (fecha)	80,44985962	81,31051636	749,5685425	777,0845947
SWDL8 (abre)	80,58309937	88,60410309	780,3622437	777,2431641
SWDL8 (fecha)	104,1397095	81,28672791	782,725647	785,2530518
SWDL9 (abre)	80,58309937	77,01097107	780,3624878	795,1724854
SWDL9 (fecha)	69,49377441	78,79550171	813,7358398	780,6871338
SWDL10 (abre)	80,58341217	82,39368439	780,362793	765,4904175
SWDL10 (fecha)	93,74214935	81,73042297	733,4020386	779,5075684
SWDL11 (abre)	80,58388519	82,87966919	780,3629761	777,9658203
SWDL11 (fecha)	87,6359024	80,92816162	777,40625	781,9180908
SWDL12 (abre)	80,58325195	62,58865356	780,3625488	817,1104736
SWDL12 (fecha)	39,73579025	76,60539246	822,4924927	771,6032104
SWDL13 (abre)	80,58385468	152,2475281	780,3626099	894,3331909
SWDL13 (fecha)	339,099762	106,8001404	883,1836548	661,378418
SWDL14 (abre)	80,58358002	85,64094543	780,3625488	680,8112793
SWDL14 (fecha)	146,7935333	88,71053314	398,1887207	758,4514771
SWDL15 (abre)	80,58325195	90,47561646	780,362793	866,0639648
SWDL15 (fecha)	111,8723679	73,70842743	1002,20752	799,090271
SWDL16 (abre)	80,58403015	77,54675293	780,3629761	924,1275635
SWDL16 (fecha)	74,06503296	67,12792969	1117,978638	786,9140625
SWDL17 (abre)	80,58339691	91,01963806	780,362793	769,1856689

SWDL17 (fecha)	113,0744629	82,36488342	770,3786011	787,4871216
SWDL18 (abre)	80,5835495	49,637146	780,3630371	868,2313232
SWDL18 (fecha)	11,75839901	72,93791199	918,7340698	762,2651367
SWDL19 (abre)	80,58370972	74,48320007	780,3624878	895,5690918
SWDL19 (fecha)	62,50979996	69,44976044	1050,257935	785,5686035
media	101,9525833	85,81580353	828,192688	800,2859497
std	96,08255768	33,35919571	156,0717468	56,51249695
máx	589,9733887	253,5760803	1463,90332	924,1275635
min	11,75839901	49,637146	398,1887207	661,378418

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO G: VALORES DA TSN NO SISTEMA TESTE DE 33 BARRAMENTOS

Tabela 67 - Valor da TSN no RC do sistema teste de 33 barramentos.

Barramentos	Medidor no barramento 17		Medidor no barramento 21	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
2	111,9562378	5826,673828	115,0403748	5980,579102
3	111,9563904	5825,532227	115,041069	820,0276489
4	111,9557419	5805,123535	115,041069	482,4279785
5	111,9566116	5800,462891	115,0411072	468,6520081
6	111,9561768	5803,322266	115,0409546	451,7472229
7	111,956604	5851,407715	115,040947	105,1109238
8	111,9566422	5841,280273	115,0409164	64,34064484
9	111,956749	5851,639648	115,0407791	57,85248566
10	111,9566422	5863,967773	115,0408936	51,99673462
11	111,9569016	5851,634277	115,0410156	47,09505844
12	111,9567871	5838,393555	115,040802	41,48883057
13	111,9569321	5820,655762	115,0408707	37,87571335
14	111,9568481	5733,676758	115,0408554	57,64550781
15	111,9570541	5785,211914	115,0409012	68,77919769
16	111,9566956	5803,892578	115,041008	81,74782562
17	111,9569626	5845,604492	115,0408401	94,79719543
18	111,9581528	111,957077	115,0410385	115,0407181
19	111,956871	48,24502945	115,040863	5999,414551
20	111,9569626	69,67807007	115,0405655	5999,559082
21	111,9571915	91,08325958	115,0406876	5999,641113
22	111,9571304	111,9567261	115,0430908	115,0415192
23	111,9567795	121,9535751	115,0411606	108,7672119
24	111,9567261	43,3801384	115,0407486	41,5579567
25	111,9571609	111,9572601	115,0410538	115,0411148
26	111,9570236	263,9022217	115,0410767	165,2135773
27	111,9569321	246,5839081	115,0405045	153,0137329
28	111,9571304	231,3665924	115,0409546	142,6908417
29	111,9569016	195,5732117	115,040863	119,3575745
30	111,9571304	48,11047363	115,0410767	47,99259186
31	111,9570236	47,44136047	115,0407944	66,99127197
32	111,9570847	93,04956055	115,0407333	100,302536
33	111,9571609	111,9572601	115,0409012	100,3025665
media	111,9568558	2971,770996	115,0409622	884,4404297
std	0,000400544	2896,151123	0,000428852	1969,639893
máx	111,9581528	5863,967773	115,0430908	5999,641113
min	111,9557419	43,3801384	115,0403748	37,87571335

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 68 - Valor da TSN no RC do sistema teste de 33 barramentos.

Barramentos	Medidor no barramento 24		Medidor no barramento 32	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
2	117,8835449	6137,291992	112,3897934	5853,261719
3	117,8835449	6136,060547	112,3899918	5852,102539
4	117,8840866	540,2282715	112,3897018	5831,717773
5	117,8842163	525,0628662	112,3897476	5827,040527
6	117,8841171	506,5292969	112,3898239	5829,92334
7	117,8839798	124,5089645	112,390358	182,1518555
8	117,8839035	74,79492188	112,3902969	114,9061813
9	117,8841629	65,86891937	112,390358	98,55918884
10	117,8838882	58,48987961	112,3899155	84,26405334
11	117,8839417	52,21942902	112,3902664	72,43417358
12	117,8840714	45,05051422	112,3902206	59,9690094
13	117,8840027	38,77468872	112,3902893	49,47159576
14	117,8837585	53,88265228	112,3902206	34,54481888
15	117,8841629	66,59233856	112,3903732	49,96651459
16	117,8840714	81,09346771	112,3903732	67,84586334
17	117,8843994	95,58976746	112,3900681	85,54640198
18	117,8849258	117,8846283	112,3912354	112,3905106
19	117,8841248	50,70422363	112,3901749	48,34157181
20	117,8840332	73,31134033	112,3902206	69,88232422
21	117,8838577	95,87994385	112,3903809	91,40348053
22	117,8848648	117,884079	112,3910141	112,3909607
23	117,8840256	6171,678223	112,3905945	122,9187164
24	117,8837585	6172,053711	112,3902206	43,55732727
25	117,8848038	117,8846283	112,3910141	112,3905106
26	117,8840256	192,0359497	112,3901596	5877,180664
27	117,8840332	178,3837128	112,3902054	5881,722656
28	117,8839798	166,6934509	112,3903885	5890,709961
29	117,8841782	139,8390961	112,3902206	5882,946289
30	117,8839417	46,42798615	112,3899155	5634,938477
31	117,8840714	63,86325073	112,3900681	5474,326172
32	117,8839722	101,7952118	112,3905258	6019,534668
33	117,8841553	101,7953339	112,3917847	112,3913422
media	117,884079	890,9423218	112,3903122	2236,897705
std	0,000310646	2025,519775	0,000439467	2822,230469
máx	117,8849258	6172,053711	112,3917847	6019,534668
min	117,8835449	38,77468872	112,3897018	34,54481888

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 69 - Valor da TSN nos DTs do sistema teste de 33 barramentos.

Eventos	Medidor no barramento 17		Medidor no barramento 21	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
Flicker	111,9565506	110,3252106	115,0418472	113,2526779
Fluctuation	111,9565506	127,0313339	115,0409927	131,1604767
Harmônicos	111,9565506	124,3227005	115,0415649	127,5111542
Oscilação Transitória	111,9565506	123,5807571	115,0416183	126,9434967
Outage	111,9565506	489,760376	115,0416031	516,0189819
Sag	111,9566116	169,20047	115,0416946	174,4216309
Sag com Harmônicos	111,9566345	162,6272125	115,0415268	167,7376404
Swell	111,9565506	232,4703217	115,0416031	237,4091492
Swell com Harmônicos	111,9565506	173,263504	115,0412598	177,9836121
media	111,9565659	190,2868805	115,0415344	196,9376678
std	3,2481E-05	118,405777	0,000252448	125,6078873
máx	111,9566345	489,760376	115,0418472	516,0189819
min	111,9565506	110,3252106	115,0409927	113,2526779

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 70 - Valor da TSN nos DTs do sistema teste de 33 barramentos.

Eventos	Medidor no barramento 24		Medidor no barramento 32	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
Flicker	117,8841553	116,2557907	112,3898544	110,9154053
Fluctuation	117,8842468	133,4254913	112,3899841	126,5987701
Harmônicos	117,8841782	130,5762634	112,3896866	124,9170227
Oscilação Transitória	117,8839188	129,9558105	112,3899612	124,0270004
Outage	117,8845215	504,1176453	112,3901138	472,0802307
Sag	117,8846436	177,8138123	112,3897705	169,0384064
Sag com Harmônicos	117,8842697	170,4341431	112,3898849	162,1411133
Swell	117,8842468	245,290863	112,3899612	235,3329773
Swell com Harmônicos	117,8843079	181,7002411	112,3897705	173,8731079
media	117,8842773	198,8411255	112,3898849	188,7693481
std	0,000209131	121,1399307	0,000132447	112,8874512
máx	117,8846436	504,1176453	112,3901138	472,0802307
min	117,8839188	116,2557907	112,3896866	110,9154053

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 71 - Valor da TSN no SWBC do sistema teste de 33 barramentos.

Chaveamentos	Medidor no barramento 17		Medidor no barramento 21	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWBC1 (abre)	111,956604	106,6111603	115,0409775	111,9110718
SWBC1 (fecha)	111,1766586	121,9015656	114,3259277	121,6694183
SWBC2 (abre)	111,9568405	107,1096039	115,0407104	112,0873108
SWBC2 (fecha)	111,2466736	120,8209763	114,3562851	121,3616791
media	111,5841942	114,1108265	114,6909752	116,75737
std	0,431107003	8,386175853	0,404183728	5,496178685
máx	111,9568405	121,9015656	115,0409775	121,6694183
min	111,1766586	106,6111603	114,3259277	111,9110718

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 72 - Valor da TSN no SWBC do sistema teste de 33 barramentos.

Chaveamentos	Medidor no barramento 24		Medidor no barramento 32	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWBC1 (abre)	117,8839417	114,2078705	112,3902969	107,2730103
SWBC1 (fecha)	117,1453552	125,2501907	111,6463928	121,7378616
SWBC2 (abre)	117,8838196	114,4101563	112,3901138	103,3563385
SWBC2 (fecha)	117,1768417	124,908844	111,5283432	127,6795502
media	117,5224895	119,6942654	111,9887867	115,0116901
std	0,417496396	6,220462869	0,466017067	11,56792187
máx	117,8839417	125,2501907	112,3902969	127,6795502
min	117,1453552	114,2078705	111,5283432	103,3563385

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 73 - Valor da TSN no SWP do sistema teste de 33 barramentos.

Chaveamentos	Medidor no barramento 17		Medidor no barramento 21	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWP1 (abre)	111,9570084	125,48069	115,0407028	1915,905518
SWP1 (fecha)	114,4749756	108,6891785	3,04703E-05	1607,680542
SWP2 (abre)	111,9569016	154,7064972	115,0408936	152,7588043
SWP2 (fecha)	119,3293533	96,68724823	122,1819229	104,0480194
SWP3 (abre)	111,956871	191,6181793	115,0408707	162,7914276
SWP3 (fecha)	124,0222092	68,29855347	125,0931168	77,19880676
media	115,6162198	124,2467244	98,73292286	670,0638529
std	5,018400702	43,81778899	48,56077063	851,8261821
máx	124,0222092	191,6181793	125,0931168	1915,905518
min	111,956871	68,29855347	3,04703E-05	77,19880676

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 74 - Valor da TSN no SWP do sistema teste de 33 barramentos.

Chaveamentos	Medidor no barramento 24		Medidor no barramento 32	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWP1 (abre)	117,8838501	131,8424377	112,390358	125,6744385
SWP1 (fecha)	120,5346756	114,7057953	114,9184036	109,4223938
SWP2 (abre)	117,8837585	1936,716675	112,3905945	154,4820251
SWP2 (fecha)	3,12928E-05	1651,281372	119,7940903	97,95980072
SWP3 (abre)	117,8840714	173,6772766	112,3902969	1571,025635
SWP3 (fecha)	128,6970978	73,722435	2,91245E-05	1558,882446
media	100,4805808	680,3243319	95,31396207	602,9077899
std	49,40304695	867,9508178	46,78284408	745,4498442
máx	128,6970978	1936,716675	119,7940903	1571,025635
min	3,12928E-05	73,722435	2,91245E-05	97,95980072

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 75 - Valor da TSN no SWDL do sistema teste de 33 barramentos.

Chaveamentos	Medidor no barramento 17		Medidor no barramento 21	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWDL1 (abre)	111,9570541	73,00578308	115,0409241	75,04273987
SWDL1 (fecha)	0,432879537	100,9216614	0,274394006	103,7136002
SWDL2 (abre)	111,9569702	115,9290161	115,0408936	118,5733719
SWDL2 (fecha)	112,6232529	110,7848358	115,6858902	114,264946
SWDL3 (abre)	111,9571304	118,7734528	115,0408554	120,5124969
SWDL3 (fecha)	113,0857925	107,8213425	116,1012039	112,1222229
SWDL4 (abre)	111,9568405	114,5583725	115,0407181	116,9377975
SWDL4 (fecha)	112,367218	110,1219177	115,4140396	113,8516617
SWDL5 (abre)	111,956871	115,3385925	115,0408707	117,0744553
SWDL5 (fecha)	112,4066772	110,967598	115,3981857	115,0028915
SWDL6 (abre)	111,9564514	125,5980911	115,0408096	122,8598328
SWDL6 (fecha)	113,8154373	105,4165497	116,4916687	112,5754852
SWDL7 (abre)	111,9569016	127,423584	115,0409164	122,7925415
SWDL7 (fecha)	113,9176407	103,8008041	116,4798355	112,6031494
SWDL8 (abre)	111,9566956	116,6717529	115,0407333	117,042717
SWDL8 (fecha)	112,5026016	110,141037	115,3934021	114,9857788
SWDL9 (abre)	111,9569321	117,3878555	115,040947	117,0262985
SWDL9 (fecha)	112,551918	109,6641541	115,3897324	114,9824905
SWDL10 (abre)	111,9566956	117,2818604	115,040741	116,9561768
SWDL10 (fecha)	112,5520859	108,075737	115,4092712	114,0085144
SWDL11 (abre)	111,9567184	118,9799347	115,0409851	117,4464188
SWDL11 (fecha)	112,7211838	107,1963654	115,4951248	113,9958496
SWDL12 (abre)	111,9569321	120,2043457	115,0406494	117,4279633

SWDL12 (fecha)	112,8035583	106,2454224	115,491951	114,0016098
SWDL13 (abre)	111,9568787	130,5657654	115,0410538	120,1170807
SWDL13 (fecha)	113,8495865	98,13128662	116,0171509	112,2925949
SWDL14 (abre)	111,9570541	118,588913	115,0407944	116,7153931
SWDL14 (fecha)	112,6004105	110,1580811	115,3144226	115,6212616
SWDL15 (abre)	111,9570084	120,1540756	115,0408936	116,9935379
SWDL15 (fecha)	112,7503738	107,9831543	115,3838501	114,9711456
SWDL16 (abre)	111,9568176	121,1235962	115,0409164	116,9910812
SWDL16 (fecha)	112,8268967	107,6474915	115,3837357	114,9660568
SWDL17 (abre)	111,9570847	127,0530472	115,0408554	118,2541656
SWDL17 (fecha)	113,3935547	103,2651138	115,6251221	114,2793884
SWDL18 (abre)	111,9570389	115,2661896	115,0409851	136,8091125
SWDL18 (fecha)	112,5642929	111,1758423	116,992363	102,4450912
SWDL19 (abre)	111,9571152	115,264389	115,0408401	137,0092926
SWDL19 (fecha)	112,5650101	111,1743011	117,0066833	102,3235168
SWDL20 (abre)	111,9570541	115,263031	115,0409546	137,5236359
SWDL20 (fecha)	112,5642395	111,1732635	117,0463791	102,047699
SWDL21 (abre)	111,9569931	115,2624359	115,041008	137,5168762
SWDL21 (fecha)	112,5638046	111,172287	117,0465088	102,0475616
SWDL22 (abre)	111,9570847	116,2338333	115,040947	118,8449707
SWDL22 (fecha)	112,6950684	110,0327606	115,7577515	113,5504608
SWDL23 (abre)	111,9568405	130,9416809	115,0406723	131,8616333
SWDL23 (fecha)	115,1758957	105,4315796	118,159935	110,4103165
SWDL24 (abre)	111,9570847	130,8855591	115,041008	131,8117828
SWDL24 (fecha)	115,1670837	105,4270172	118,1519165	110,4006271
SWDL25 (abre)	111,956604	115,5587921	115,0407104	117,2091446
SWDL25 (fecha)	112,4451599	110,5045624	115,4333115	114,665062
SWDL26 (abre)	111,9573669	115,5447998	115,0410156	117,1999207
SWDL26 (fecha)	112,443779	110,5125351	115,4320374	114,6687546
SWDL27 (abre)	111,9572678	115,2375641	115,0409164	117,0116882
SWDL27 (fecha)	112,393219	111,0048294	115,3875656	115,0122833
SWDL28 (abre)	111,9567566	119,8599854	115,0410461	119,7871017
SWDL28 (fecha)	113,0608444	107,3421936	115,9437485	113,0146255
SWDL29 (abre)	111,9569016	150,3394928	115,0411148	138,2432861
SWDL29 (fecha)	117,8049927	61,41003418	120,1923294	79,39350891
SWDL30 (abre)	111,9568787	120,9572449	115,040947	120,4288483
SWDL30 (fecha)	113,1856003	107,8138809	116,0330887	113,666008
SWDL31 (abre)	111,9567566	124,7235107	115,0410156	122,6651764
SWDL31 (fecha)	113,7012711	105,944046	116,4509506	112,968811
SWDL32 (abre)	111,9569626	116,0749207	115,0409164	117,5232391
SWDL32 (fecha)	112,5379028	109,2324677	115,5195236	113,7156677
media	110,7920465	112,8710253	113,7908082	115,9184128
std	14,04842591	11,89961742	14,44548222	10,6559983
máx	117,8049927	150,3394928	120,1923294	138,2432861

min 0,432879537 61,41003418 0,274394006 75,04273987

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 76 - Valor da TSN no SWDL do sistema teste de 33 barramentos.

Chaveamentos	Medidor no barramento 24		Medidor no barramento 32	
	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)	Pré-Falta (V)	Pós-Falta (V)
SWDL1 (abre)	117,8837585	76,72650146	112,3900681	73,23104095
SWDL1 (fecha)	0,316455096	106,4796906	0,540853322	101,3721771
SWDL2 (abre)	117,8841476	121,9890747	112,3902054	116,3005142
SWDL2 (fecha)	118,586235	116,7212982	113,0599976	111,297287
SWDL3 (abre)	117,8839645	124,2556686	112,3902206	119,119812
SWDL3 (fecha)	119,0293961	114,2465515	113,523735	108,3605957
SWDL4 (abre)	117,8839951	120,0918579	112,3902054	114,9627686
SWDL4 (fecha)	118,2859421	116,4332733	112,8021469	110,5892334
SWDL5 (abre)	117,8837585	120,2444229	112,390358	115,7257538
SWDL5 (fecha)	118,2749329	117,6529541	112,841774	111,4626617
SWDL6 (abre)	117,8839951	126,9841614	112,3905029	125,2762451
SWDL6 (fecha)	119,4584045	114,5153503	114,1862793	106,0557861
SWDL7 (abre)	117,8839417	126,9047546	112,3905869	125,1654968
SWDL7 (fecha)	119,4441605	114,5510864	114,1707153	106,1166687
SWDL8 (abre)	117,8839417	120,2065506	112,3906631	115,6686859
SWDL8 (fecha)	118,2682877	117,638916	112,8349533	111,4611053
SWDL9 (abre)	117,8840637	120,1862946	112,3906021	115,640831
SWDL9 (fecha)	118,2649231	117,6368103	112,8307877	111,4656219
SWDL10 (abre)	117,8839951	120,1106186	112,3906631	115,5232849
SWDL10 (fecha)	118,2810898	116,6013336	112,8382034	110,3260498
SWDL11 (abre)	117,8840332	120,6799011	112,3902206	116,3268585
SWDL11 (fecha)	118,3751144	116,5415497	112,9474564	110,0993347
SWDL12 (abre)	117,8836975	120,6577759	112,3905945	116,2948074
SWDL12 (fecha)	118,3708115	116,5487213	112,9422379	110,114975
SWDL13 (abre)	117,883667	123,787323	112,3906631	120,703186
SWDL13 (fecha)	118,9378357	114,4720306	113,5776138	106,9111176
SWDL14 (abre)	117,8838196	119,8210754	112,3906631	115,1298676
SWDL14 (fecha)	118,1846085	118,3491898	112,7458267	112,3713379
SWDL15 (abre)	117,8837585	120,1481628	112,390358	115,5822449
SWDL15 (fecha)	118,2587585	117,6279144	112,8232651	111,4693146
SWDL16 (abre)	117,8839417	120,1448059	112,3902817	115,5772552
SWDL16 (fecha)	118,2572021	117,6236725	112,8222122	111,4651337
SWDL17 (abre)	117,883812	121,6141815	112,3905258	117,6504669
SWDL17 (fecha)	118,5197372	116,7711411	113,1170883	110,0978012
SWDL18 (abre)	117,883667	121,3008118	112,3903732	115,6418839

SWDL18 (fecha)	118,5248718	117,123703	113,0007401	111,6805267
SWDL19 (abre)	117,8843613	121,2999725	112,390358	115,6408157
SWDL19 (fecha)	118,5246506	117,1236725	113,0008163	111,6805267
SWDL20 (abre)	117,8839417	121,297493	112,3905106	115,6386108
SWDL20 (fecha)	118,5238647	117,1214981	112,9995728	111,6783142
SWDL21 (abre)	117,8841629	121,2968216	112,3905258	115,6379242
SWDL21 (fecha)	118,5237427	117,12146	113,0003128	111,6776962
SWDL22 (abre)	117,8841171	123,5062714	112,3905106	116,603302
SWDL22 (fecha)	118,746315	115,0239944	113,1304932	110,5438232
SWDL23 (abre)	117,8843002	145,7563782	112,3902054	131,0836029
SWDL23 (fecha)	121,8543015	105,5751648	115,6223526	106,2348633
SWDL24 (abre)	117,8840637	145,6732941	112,3902206	131,0289307
SWDL24 (fecha)	121,8455734	105,5828552	115,6141586	106,2299728
SWDL25 (abre)	117,8842697	120,40271	112,3908081	116,161438
SWDL25 (fecha)	118,3116684	117,2780685	112,8955688	110,8281479
SWDL26 (abre)	117,8840332	120,3911285	112,3903732	116,3005524
SWDL26 (fecha)	118,3098984	117,2832794	112,9040298	110,7149429
SWDL27 (abre)	117,8839417	120,1714783	112,3902206	116,7262115
SWDL27 (fecha)	118,2626572	117,6678009	112,9113235	110,8162842
SWDL28 (abre)	117,8838501	123,4104004	112,3902206	124,2696838
SWDL28 (fecha)	118,8612289	115,2686386	113,7876816	104,794693
SWDL29 (abre)	117,8839798	145,0227051	112,3903809	174,5060272
SWDL29 (fecha)	123,3362198	77,91648865	119,6244888	74,34277344
SWDL30 (abre)	117,8841782	124,1538925	112,3905945	129,008728
SWDL30 (fecha)	118,9626999	115,9035034	114,1799011	103,1202393
SWDL31 (abre)	117,8838501	126,7658463	112,3903732	136,9601898
SWDL31 (fecha)	119,4158707	114,9476013	115,0028305	98,53842163
SWDL32 (abre)	117,8841248	120,7724762	112,3901443	120,2288361
SWDL32 (fecha)	118,4019394	116,2328415	113,2444077	106,6999359
media	116,559477	118,489951	111,219016	113,7489566
std	14,79409089	10,27920594	14,09905709	12,55817422
máx	123,3362198	145,7563782	119,6244888	174,5060272
min	0,316455096	76,72650146	0,540853322	73,23104095

Fonte: Elaborado pelo autor.