

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Tese**

**Instalação Estratégica de Medidores de Qualidade de  
Energia Elétrica para Identificação de Variações de  
Tensão de Curta Duração Causadas por Curtos-Circuitos**

Caio Marco dos Santos Junqueira

Campina Grande, Paraíba, Brasil

© Caio Marco dos Santos Junqueira, Junho de 2021

Caio Marco dos Santos Junqueira

**Instalação Estratégica de Medidores de Qualidade de  
Energia Elétrica para Identificação de Variações de  
Tensão de Curta Duração Causadas por Curtos-Circuitos**

*Tese apresentada à Coordenação do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universi-  
dade Federal de Campina Grande, em cumprimento  
às exigências para a obtenção do Grau de Doutor  
em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Benemar Alencar de Sousa, D.Sc.

Núbia Silva Dantas Brito, D.Sc.

Orientadores

Campina Grande, Paraíba, Brasil

© Caio Marco dos Santos Junqueira, Junho de 2021

**Instalação Estratégica de Medidores de Tensão para  
Identificação de Variações de Tensão de Curta Duração  
Causadas por Curtos-Circuitos**

**CAIO MARCO DOS SANTOS JUNQUEIRA**

**TESE APROVADA EM 11/11/2021**

**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG  
Orientador(a)**

**NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG  
Orientador(a)**

**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG  
Examinador(a)**

**ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG  
Examinador(a)**

**KLEBER MELO E SILVA, D.Sc., UNB  
Examinador(a)**

**NELSON KAGAN, Dr., USP  
Examinador(a)**

**CAMPINA GRANDE - PB**

J95i

Junqueira, Caio Marco dos Santos.

Instalação estratégica de medidores de qualidade de energia elétrica para identificação de variações de tensão de curta duração causadas por curtos circuitos / Caio Marco dos Santos Junqueira. – Campina Grande, 2021.

135 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Núbia Silva Dantas Brito".

Referências.

1. Instalação Estratégica de Medidores. 2. Variações de Tensão de Curta Duração. 3. Estimação. 4. Redução do Espaço de Busca. 5. Transformada Wavelet Discreta Redundante. I. Souza, Benemar Alencar de. II. Brito, Núbia Silva Dantas. III. Título.

CDU 621.317.7:621.314.6(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

### REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS, NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM 11 DE NOVEMBRO DE 2021  
(Nº 338)

CANDIDATO: **CAIO MARCO DOS SANTOS JUNQUEIRA**. COMISSÃO EXAMINADORA: WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG, Presidente da Comissão, BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG, NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG, Orientadores, ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG, KLEBER MELO E SILVA, D.Sc., UNB, NELSON KAGAN, Dr., USP. TÍTULO DA TESE: **Instalação Estratégica de Medidores de Tensão para Identificação de Variações de Tensão de Curta Duração Causadas por Curtos-Circuitos**. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia. HORA DE INÍCIO: **09h00** – LOCAL: **Sala Virtual, em virtude da suspensão de atividades na UFCG decorrente do coronavírus e de conformidade com o Art. 8º da PORTARIA PRPG/GPR Nº 003, DE 18 DE MARÇO DE 2020**). Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, o candidato foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, obtendo conceito APROVADO. Face à aprovação, declara o presidente da Comissão, achar-se o examinado, legalmente habilitado a receber o Grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o mesmo faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, ÂNGELA DE LOURDES RIBEIRO MATIAS, e os membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande, 11 de Novembro de 2021.

ÂNGELA DE LOURDES RIBEIRO MATIAS  
Secretária

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG  
Presidente da Comissão e Examinador Interno

BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG  
Orientador

NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG  
Orientador

ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG  
Examinador Interno

KLEBER MELO E SILVA, D.Sc., UNB  
Examinador Externo

NELSON KAGAN, Dr., USP  
Examinador Externo

CAIO MARCO DOS SANTOS JUNQUEIRA  
Candidato

## 2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Doutorado do candidato **CAIO MARCO DOS SANTOS JUNQUEIRA**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **ANGELA DE LOURDES RIBEIRO MATIAS, SECRETÁRIO (A)**, em 16/11/2021, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Melo e Silva, Usuário Externo**, em 16/11/2021, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **NUBIA SILVA DANTAS BRITO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/11/2021, às 12:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 16/11/2021, às 14:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/11/2021, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/11/2021, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1932483** e o código CRC **884D8FB3**.

---

**Referência:** Processo nº 23096.072054/2021-93

SEI nº 1932483



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CNPJ nº 05.055.128/0001-76**  
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

## DECLARAÇÃO

Processo nº 23096.072054/2021-93

DECLARAMOS para fins de comprovação que, os Professores WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG, Presidente da Comissão e Examinador Interno, BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG e NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG, Orientadores, ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG, Examinador Interno, KLEBER MELO E SILVA, D.Sc., UNB, Examinador Externo, NELSON KAGAN, Dr., USP, Examinador Externo, participaram da Banca de Defesa Final da Tese de Doutorado, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG, intitulada **“Instalação Estratégica de Medidores de Tensão para Identificação de Variações de Tensão de Curta Duração Causadas por Curtos-Circuitos”** de autoria da doutoranda CAIO MARCO DOS SANTOS JUNQUEIRA, no dia 11 de novembro de 2021, as **09h00 – LOCAL: Sala Virtual, em virtude da suspensão de atividades na UFCG decorrente do coronavírus.**



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE JEAN RENE SERRES, COORDENADOR(A)**, em 30/11/2021, às 08:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1932516** e o código CRC **2CDE9946**.

Caro Professor  
AlexandreJean René Serres  
Coordenador do PPgEE/UFCEG

Eu, **Nelson Kagan, Dr., USP**, na qualidade de membro da comissão examinadora da defesa de tese intitulada **Instalação Estratégica de Medidores de Tensão para Identificação de Variações de Tensão de Curta Duração Causadas por Curtos-Circuitos**, de **Caio Marcos dos Santos Junqueira**, da qual participei por videoconferência, no dia 11 de novembro de 2021, declaro ter recebido cópia da ata, que consta nos autos do processo nº [23096.072054/2021-93](#) como documento nº 1932483, a qual li e, embora não tenha podido assinar, é para todos os efeitos como se eu tivesse, pois está em perfeita conformidade com o que foi deliberado pela comissão e, portanto, estou de pleno acordo com seus termos.



**Nelson Kagan, Dr., USP**

*À memória do meu avô, Estevam de Andrade Rocha,  
à minha avó, Joana Severo Rocha, e aos meus pais,  
Manoel Junqueira Neto e Francisca Lúcia dos Santos  
Junqueira que me proporcionaram todas as condições  
para que eu concretizasse este sonho.*

# Agradecimentos

Acima de tudo a Deus, que sempre tem me ajudado nessa caminhada na qual me encontro, permitindo superar os obstáculos da vida.

Aos professores orientadores Benemar Alencar de Souza e Núbia Silva Dantas Brito que têm acompanhado a pesquisa desde a graduação, tornando possível o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, além da amizade, compreensão, paciência, experiência e conhecimento.

Aos professores membros da banca Washington Luíz Araújo Neves, Alexandre Cunha Oliveira, Kleber Melo e Silva e Nelson Kagan pela contribuição para o trabalho com sugestões e conhecimentos.

Aos funcionários da COPELE, em especial Ângela, pela disposição e colaboração.

Aos meus amados avós, Estevão de Andrade Rocha e Joana Severo e pais, Francisca Lúcia dos Santos Junqueira e Manoel Junqueira Neto que sempre me ofereceram a melhor educação possível e sempre me incentivaram para que eu seguisse em busca dos meus sonhos.

Às minhas irmãs, Cora Coralina e Camila Junqueira e aos meus cunhados Everson Lucena e Bruno Barbosa, por me darem o exemplo da luta diária em busca dos objetivos da vida.

À Thaís Gomes, pela amizade, carinho e companheirismo de sempre; por estar sempre me incentivando e torcendo pelas minhas conquistas.

Ao meu querido sobrinho Benjamim, que tem me ensinado a dar valor às coisas simples da vida.

Aos meus amigos de caminhada, Huilman Sanca, Raphael Leite, Jamile Nascimento, Jeane Souza, Alana Campos, Renata Guedes, Hotoniones Bezerra, Ramayana Pereira, Melyna Simões, Rivanildo Soares, Luís Trovão e Matheus Lucena que compartilharam conhecimentos durante o período do doutorado.

A todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram de alguma maneira para esse momento tão importante da minha vida.

Finalmente ao CNPQ, que proporcionou o suporte financeiro para a realização deste

trabalho.

*“Sonhar grande  
e sonhar pequeno  
dá o mesmo  
trabalho”  
(Jorge Paulo Lemann)*

# Resumo

Um método para instalação estratégica de medidores de qualidade de energia elétrica (QEE) capazes de identificar variações de tensão de curta duração (VTCD) causadas por curtos-circuitos é proposto nesta tese. A técnica é dividida em duas partes principais: *off-line*, com a escolha da quantidade e localização dos medidores de QEE; *on-line*, com a estimação de tensão nas barras não-monitoradas e redução do espaço de busca do local do curto-circuito. A técnica é desenvolvida e validada em uma base de dados construída de forma automática, utilizando um sistema-teste e considerando o tipo de falta, local de falta, resistência de falta e carregamento do sistema. As tensões remanescentes em cada uma das barras são obtidas por uma metodologia de detecção e classificação via transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR), a qual é validada utilizando registros oscilográficos reais de um medidor de QEE e sinais simulados. A instalação estratégica de medidores considera, além do custo de instalação dos medidores, a presença de condições simétricas e de eventos unicamente identificáveis para a formulação de uma nova função objetivo, a qual apresenta um fator-peso para cada um dos três parâmetros que a compõem. A restrição do problema inclui a matriz de observabilidade, obtida pela base de dados construída, e o problema é resolvido via método de otimização por enxame de partículas binário (BPSO). A validação do método é realizada a partir de simulações estocásticas, utilizando o método de Monte Carlo em um conjunto de cenários de curto-circuito que representam um ano de simulações. O método apresentou bons resultados, evidenciando respostas rápidas de detecção para os mais diversos tipos de VTCD. Para a estimação, o método foi capaz de estimar tensões nas barras não-monitoradas com erros médios de 0,71 %, média de redução no espaço de busca para 16 % do alimentador e taxa de acerto de 97,55 % para uma solução com 5 medidores para o sistema-teste de 34 barras do IEEE.

**Palavras-chave:** instalação estratégica de medidores, variações de tensão de curta duração, estimação, redução do espaço de busca, transformada *wavelet* discreta redundante.

# Abstract

A method for strategic power quality (PQ) meter placement capable of identifying short duration voltage variations (SDVV) caused by short-circuits is proposed in this thesis. The technique is divided into two main parts: offline, with the choice of the number and location of the PQ meters; online, with the estimation of voltage at the non-monitored buses and search space reduction of the short-circuit location. The technique is developed and validated in a database built automatically, using a test system and considering the fault type, fault location, fault resistance, and loading. The remaining voltages at each of the buses are obtained by a detection and classification methodology via redundant discrete wavelet transform (RDWT), which is validated using real oscillographic records from a power quality meter and simulated signals. The strategic meter placement considers, in addition to the installation cost, the presence of symmetric conditions and uniquely identifiable events for the formulation of a new objective function, which presents a weight factor for each of the three parameters that compose it. The restriction of the problem includes the observability matrix, obtained by the database built and the problem is solved via the binary particle swarm optimization (BPSO) method. The method validation is performed from stochastic simulations, using the Monte Carlo method in a set of short-circuit scenarios that represent one year of simulations. The method presented good results, showing fast detection responses for the most diverse types of SDVV. For estimation, the method was able to estimate voltages at the non-monitored buses with mean errors of 0.71%, mean reduction of the search space to 16% of the feeder, and a success rate of 97.55% for a solution with 5 meters for the IEEE 34-bus test system.

**Keywords:** strategic meter placement, short duration voltage variations, estimation, search space reduction, redundant discrete wavelet transform.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Custo médio (em R\$) relacionados às VTCD por setor industrial . . . . .	32
Figura 2 – $V_{\text{int}}$ e $\Delta t$ para as normas ANEEL (2018), IEEE (2019) e EN-50160 (2019). . .	54
Figura 3 – Sinais reais de VTCD. . . . .	59
Figura 4 – Valor eficaz da fase A com a variação no número de amostras. . . . .	59
Figura 5 – Valor eficaz da fase A com a variação no número de registros por ciclo. . . .	60
Figura 6 – Energia dos coeficientes de aproximação para o sinal da Figura 3. . . . .	61
Figura 7 – $\xi_d$ com a variação do número de amostras por ciclo para a fase A do sinal da Figura 3. . . . .	62
Figura 8 – $\xi_d$ com a variação do tamanho da janela de cálculo para a fase A do sinal da Figura 3. . . . .	62
Figura 9 – Exemplo de curva de tolerância para subestações. . . . .	64
Figura 10 – Curva CBEMA. . . . .	65
Figura 11 – Curva ITI. . . . .	65
Figura 12 – Exemplo da região de sensibilidade de um afundamento de tensão. . . . .	68
Figura 13 – Zona afetada por um curto-circuito na fase A da barra 5. . . . .	69
Figura 14 – Zona exposta para um medidor na barra 3. . . . .	69
Figura 15 – Passos 1 e 2 para a formação da $V_{\text{rem}}$ . . . . .	70
Figura 16 – Exemplo do vetor $V_m$ para um sistema de 11 barras. . . . .	74
Figura 17 – Movimentação de partícula pelo método PSO. . . . .	78
Figura 18 – Curva sigmoide. . . . .	79
Figura 19 – Fluxograma do método BPSO . . . . .	80
Figura 20 – Zona exposta da barra 3 para $V_{3\text{rem}} \leq 0,3$ pu. . . . .	82
Figura 21 – Fluxograma do método proposto. . . . .	90
Figura 22 – Etapas para a construção da base de dados. . . . .	92
Figura 23 – Sistema-teste. . . . .	94
Figura 24 – Modelo de curto-circuito. . . . .	94
Figura 25 – Construção automática da base de dados. . . . .	96
Figura 26 – Metodologia para detecção e classificação de VTCD. . . . .	97

Figura 27 – Fluxograma da metodologia. . . . .	100
Figura 28 – Aquisição de dados reais. . . . .	104
Figura 29 – Comportamento da $\xi_d$ para falta evolutivo. . . . .	108
Figura 30 – Exemplo de falta consecutiva. . . . .	109
Figura 31 – Energia $\xi_c$ para falta consecutiva. . . . .	110
Figura 32 – Energia $\xi_d$ para falta consecutiva. . . . .	111
Figura 33 – Energia $\xi_d$ para o registro de transitório de tensão. . . . .	112
Figura 34 – Registros de VTCD na barra 19 utilizando a TWDR. . . . .	114
Figura 35 – Valores de $IE_n$ e $IEU_n$ com variação dos fatores de peso. . . . .	117
Figura 36 – Número de medidores com a variação de $f_2$ e $f_3$ . . . . .	118
Figura 37 – Tensões remanescentes em três barras não-monitoradas para um curto-circuito aleatório. . . . .	120
Figura 38 – Possíveis trechos sob falta para a solução (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) S4 (e) S5 (f) S6. . . . .	122
Figura 39 – Probabilidade acumulada em função do fator de comprimento. . . . .	137
Figura 40 – Escolha aleatória do local da falta. . . . .	138
Figura 41 – Escolha aleatória do local do tipo de falta. . . . .	139
Figura 42 – Escolha aleatória da resistência de falta. . . . .	140
Figura 43 – Escolha aleatória do carregamento do sistema. . . . .	141

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Síntese dos trabalhos sobre detecção de VTCD. . . . .	49
Tabela 2 – Síntese dos trabalhos sobre estimação de VTCD nas barras não-monitoradas. . . . .	50
Tabela 3 – Classificação das VTCD para a norma brasileira (ANEEL, 2018). . . . .	52
Tabela 4 – Classificação das VTCD para a norma americana (IEEE, 2019). . . . .	52
Tabela 5 – Classificação das VTCD para a norma europeia (EN-50160, 2004). . . . .	53
Tabela 6 – Testes sugeridos para afundamentos de tensão (IEC-61000-4-11, 2017). . . . .	66
Tabela 7 – Divisão das VTCD de acordo com níveis de sensibilidade. . . . .	67
Tabela 8 – $[V_{rem}]_{21 \times 11}$ para as posições de falta da Figura 15. . . . .	71
Tabela 9 – $[MO]_{21 \times 11}$ para as posições de falta da Figura 15. . . . .	75
Tabela 10 – $C_{LF}$ para os locais de falta da Figura 20. . . . .	83
Tabela 11 – Formação do $C_{cs}(I)$ . . . . .	86
Tabela 12 – Variação do fator-peso na instalação estratégica dos medidores. . . . .	88
Tabela 13 – Valores de $\xi_c$ , $\xi_d$ e duração com variação do número de amostras para os sinais da Figura 3. . . . .	105
Tabela 14 – Comparação entre os métodos para a fase A do sinal da Figura 3. . . . .	106
Tabela 15 – Comparação entre os métodos para a falta evolutiva da Figura 3. . . . .	107
Tabela 16 – Comparação entre os métodos para a falta consecutiva da Figura 30. . . . .	110
Tabela 17 – Divisão das VTCD de acordo com a sensibilidade da barra 19. . . . .	115
Tabela 18 – Instalação Estratégica de Medidores . . . . .	119
Tabela 19 – Erros relativos médios ( $\epsilon_r$ ) e desvio-padrão ( $\sigma$ ) para cada solução. . . . .	121
Tabela 20 – Resultados para a redução no espaço de busca . . . . .	123
Tabela 21 – Comparação entre o método proposto e outros métodos presentes na literatura . . . . .	125
Tabela 22 – Probabilidades de ocorrência do tipo de falta (Adaptado de Andrade (2011)). . . . .	139

# Lista de abreviaturas e siglas

ALM	Área de Localização do Medidor
ATP	Alternative Transients Program
A/D	Analógico-digital
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Afundamento de tensão
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
BPSO	<i>Binary Particle Swarm Optimization</i>
CBEMA	<i>Computer Business Equipment Manufacturer Association</i>
CEA	<i>Canadian Electrical Association</i>
CP	<i>Covering and Packing</i>
Ct	Custo
db4	Daubechies 4
EMRA	<i>Enhanced Monitoring Reach Area</i>
ET	Elevação de tensão
FER	Frequência Equivalente de Reclamação
FM	Falta monofásica
FB	Falta bifásica
FBT	Falta bifásica-terra
FTT	Falta trifásica-terra

GP	<i>Graph Theory</i>
IE	Índice de Estimação
IEU	Índice de Eventos Únicos
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INT	Interrupção de tensão
ITI	<i>Information Technology Industry</i>
kV	Quilovolt
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
min	Minimização
MIR	Matriz de Impedância da Rede
MLA	<i>Monitoring Location Area</i>
MO	Matriz de Observabilidade
MOA	Matriz de Observabilidade Aprimorada
MOI	<i>Monitoring Overlapping Index</i>
MOT	Matriz de Observabilidade Topológica
MRA	<i>Monitoring Reach Area</i>
MVR	<i>Multivariable Regression</i>
NPL	<i>National Power Laboratory</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
pu	Valor por unidade
QEE	Qualidade de Energia Elétrica

RH	Ressonância Magnética
RL	Resistência e Indutância
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPA	<i>Robot Process Automation</i>
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SM1	Sistema de Monitoramento 1
SM2	Sistema de Monitoramento 2
SRD	Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição
TMRA	<i>Topological Monitoring Reach Area</i>
TP	Transformador de Potencial
TWD	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta
TWDR	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta Redundante
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

# Lista de símbolos

$\%$	Porcentagem
$\phi$	Número de fases
$\Delta t$	Duração de um evento
$\Omega$	Ohms
$B$	Barra genérica do sistema
$B_x$	Barra genérica x
$B_y$	Barra genérica y
$C$	Tamanho da janela de cálculo
$Ch_A$	Chave da fase A
$Ch_B$	Chave da fase B
$Ch_C$	Chave da fase C
$Ch_G$	Chave de terra
$ca_1$	Coefficiente de aceleração 1
$ca_2$	Coefficiente de aceleração 2
$C_{cs}(I)$	Conjunto $I$ de condições simétricas
$c_j$	Coefficientes de aproximação na escala $j$
$C_{LF}$	Conjunto de locais de falta com tensão remanescente próxima ao valor registrado pelo medidor
$C_s$	Carregamento do sistema
$C_{smín}$	Carregamento mínimo do sistema
$C_{smáx}$	Carregamento máximo do sistema

$C_T$	Comprimento total do alimentador
$D_{cs}(I)$	Diferenças entre as tensões remanescentes nas barras não-monitoradas para o conjunto de condições simétricas $I$
$d_j$	Coefficientes de detalhe na escala $j$
$E_m$	Erros de medição
$\xi_c$	Energia dos coeficientes de aproximação
$\xi_d$	Energia dos coeficientes de detalhe
$F_C$	Fator de carga
$FC_{t_f}$	Fator de comprimento do trecho $t_f$
$f_1$	Fator-peso para detecção de VTCD
$f_2$	Fator-peso relacionado à minimização das diferenças entre as tensões remanescentes das barras não-monitoradas em condições simétricas
$f_3$	Fator-peso relacionado à identificação de eventos únicos
$F_o^*$	Nova função objetivo para a instalação estratégica de medidores
$F_o$	Função objetivo
$F_{pz}$	Taxa de ocorrência de falta no local $z$
$f_s$	Frequência de amostragem
$g$	Filtro passa-baixa
$G_{best}(t)$	Melhor experiência do grupo até o instante $t$
$H$	Variável de localização de falta
$h$	Filtro passa-alta
$I$	Condição simétrica
$i$	Número da partícula

$IE(V_m)$	Índice de Estimação para a solução $V_m$
$IEU(V_m)$	Índice de Eventos Únicos para a solução $V_m$
$it$	Número de iterações
$it_{máx}$	Número máximo de iterações
$k$	Número da amostra
$l$	Número de barras do sistema
$L_{Fp}$	Local p onde ocorreu o curto-circuito
$L_{t_f}$	Localização de um curto-circuito em um trecho $t_f$
$m$	Posição no vetor da partícula $i$
$M_3$	Medidor instalado na barra 3
$N$	Número de amostras por ciclo
$N_{part}$	Número de partículas
$n$	Número total de amostras
$nm$	Cada coluna das barras não-monitoradas
$NS_{cs}$	Número de conjuntos de condições simétricas
$p$	Local genérico de curto-circuito
$PA_{t_f-1}$	Probabilidade acumulada até o trecho $t_f - 1$
$P_{i_{best}}(t)$	Melhor experiência da partícula $i$ até o instante $t$
$q$	Número de cenários de curto-circuito
$R\$$	Real
$R$	uma linha da $[V_{rem}]$
$r_\alpha$	Variável aleatória $\alpha$ uniformemente distribuída no intervalo de 0 a 1

$R_f$	Resistência de falta
$R_{fA}$	Resistência de falta da fase A
$R_{fB}$	Resistência de falta da fase B
$R_{fC}$	Resistência de falta da fase C
$R_{fG}$	Resistência de falta de terra
$R_{f\text{máx}}$	Valor máximo de resistência
$R_{f\text{mín}}$	Valor mínimo de resistência
$T$	Colunas que representam as barras monitoradas
$TC_{cs}(I)$	Tamanho de $C_{cs}(I)$
$T_f$	Tipo de falta
$t_f$	Trecho sob falta
$t_{\text{final}}$	instante final do evento
$t_{\text{inicial}}$	instante inicial do evento
$V_i$	Amostra $i$ do sinal de tensão
$v_i(t)$	Velocidade da partícula $i$ no instante $t$
$V_{\text{int}}$	Intensidade de um evento
$V_{j*}$	Tensão estimada na barra $j$ por uma falta em um local desconhecido (*)
$V_{j,p}$	Tensão remanescente na barra $j$ causada por uma falta na posição $p$
$V_m$	Vetor de monitoramento
$V_r$	Vetor-redundância
$V_{\text{REF}}(I, T)$	Tensão de referência para as barras das colunas $T$ do conjunto $I$ .
$V_{\text{ref}}$	Tensão de referência

$V_{\text{rem}}$	Matriz de tensões remanescentes
$V_{\text{res}}$	Tensão remanescente ou residual
$V_{\text{rms}}$	Valor RMS de tensão
$x$	Sinal genérico
$x_I(\text{J})$	Linha referente à condição simétrica $J$ do conjunto $C_{\text{cs}}(I)$
$x_I(\text{K})$	Linha referente à condição simétrica $K$ do conjunto $C_{\text{cs}}(I)$
$x_i(t)$	Posição da partícula $i$ no instante $t$
$w$	Termo de inércia

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>29</b>
1.1	Motivação	31
1.2	Objetivos	33
1.3	Evolução da Pesquisa e Contribuições	33
1.4	Produção Bibliográfica	35
1.5	Organização do Texto	36
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>37</b>
2.1	Um breve histórico	37
2.2	Trabalhos mais relevantes	39
2.2.1	Métodos de detecção	39
2.2.2	Métodos de estimação de tensão nas barras não-monitoradas	43
2.3	Síntese Bibliográfica	48
<b>3</b>	<b>Variações de Tensão de Curta Duração</b>	<b>51</b>
3.1	Normas de Classificação	51
3.2	Características das VTCD	53
3.3	Métodos de detecção e classificação de VTCD	55
3.3.1	Valor RMS	55
3.3.2	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta (TWD)	55
3.3.3	Detecção e classificação de VTCD	58
3.3.4	Períodos transitórios	61
3.4	Sensibilidade dos equipamentos elétricos	63
3.5	Monitoramento de VTCD	65
3.6	Propagação de VTCD	67
3.6.1	Zona afetada	68
3.6.2	Zona exposta	69
3.6.3	Método das posições de falta	70
3.7	Considerações Finais	71
<b>4</b>	<b>Instalação Estratégica de Medidores de QEE</b>	<b>73</b>

4.1	Formulação do problema . . . . .	73
4.1.1	Vetor de Monitoramento ( $V_m$ ) . . . . .	74
4.1.2	Matriz de Observabilidade (MO) . . . . .	74
4.1.3	Função Objetivo e Restrições . . . . .	76
4.2	Otimização por Enxame de Partículas Binário (BPSO) . . . . .	77
4.3	Estimação de VTCD nas barras não-monitoradas . . . . .	81
4.4	Limitações na estimação de tensão . . . . .	83
4.5	Considerações finais . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Método Proposto . . . . .</b>	<b>85</b>
5.1	Índice de Estimação e Índice de Eventos Únicos . . . . .	85
5.2	Método Proposto . . . . .	87
5.3	Considerações Finais . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Metodologia Proposta . . . . .</b>	<b>91</b>
6.1	Construção da Base de Dados . . . . .	91
6.1.1	Simulações e Modelos . . . . .	92
6.1.2	Especificação das variáveis de simulação . . . . .	94
6.1.3	Automação da Construção da Base de Dados . . . . .	95
6.2	Detecção e Classificação utilizando a TWDR . . . . .	96
6.3	Instalação Otimizada de Medidores de QEE . . . . .	99
6.4	Resumo da Metodologia Proposta . . . . .	100
6.5	Considerações finais . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>103</b>
7.1	Detecção e Classificação de VTCD . . . . .	103
7.1.1	Sinais reais . . . . .	103
7.1.1.1	VTCD em uma fase isolada . . . . .	106
7.1.1.2	VTCD em um evento evolutivo . . . . .	107
7.1.1.3	VTCD em um evento consecutivo . . . . .	109
7.1.1.4	Transitórios de tensão . . . . .	111
7.1.1.5	Considerações finais para os sinais reais . . . . .	112
7.1.2	Base de dados de VTCD . . . . .	113
7.2	Estimação de Tensão nas Barras não-monitoradas . . . . .	116

7.2.1	Instalação estratégica de medidores (parte <i>off-line</i> ) . . . . .	116
7.2.2	Estimação de tensão nas barras não-monitoradas . . . . .	119
7.2.3	Redução do espaço de busca . . . . .	121
7.2.4	Comparação com a literatura . . . . .	124
7.3	Considerações Finais . . . . .	125
<b>8</b>	<b>Conclusões e Perspectivas de Continuação . . . . .</b>	<b>127</b>
	<b>Bibliografia . . . . .</b>	<b>131</b>
	<b>APÊNDICE A Simulações Estocásticas (Monte Carlo) . . . . .</b>	<b>136</b>
A.1	Trecho sob curto-circuito . . . . .	136
A.2	Localização do curto-circuito . . . . .	137
A.3	Tipo de curto-circuito . . . . .	138
A.4	Resistência de curto-circuito e carregamento do sistema . . . . .	139

# Capítulo 1

## Introdução

O sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE), uma das subdivisões do sistema elétrico de potência (SEP), é responsável por conectar os sistemas de transmissão ou unidades geradoras de pequeno porte ao consumidor final. O SDEE se assemelha aos sistemas de transmissão pela composição de equipamentos e condutores com o objetivo de controlar, medir e proteger as redes elétricas que o compõem. No entanto, o SDEE apresenta mais ramificações e maior extensão, para que seja possível distribuir a energia elétrica aos domicílios de todos os seus consumidores (ABRADEE, 2021).

O SDEE tradicional é subdividido em: 1) alta tensão, porção do sistema que opera com tensões entre 69 kV e 230 kV e conecta-se ao sistema de transmissão, usualmente denominado de sistema de subtransmissão; 2) média tensão, porção do sistema que opera entre 1 kV e 69 kV, sendo constituída por três fios condutores aéreos, recebendo a denominação de rede primária; 3) baixa tensão, porção do sistema que opera com tensões abaixo de 1 kV, usualmente denominada de rede de baixa tensão (SRD, 2018).

No Brasil, predomina o uso de redes convencionais com condutores não-isolados, o que faz com que o SDEE fique sujeito a ocorrências (ou eventos) diversos que podem comprometer o seu desempenho e conseqüentemente, a Qualidade de Energia Elétrica (QEE). De acordo com o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), QEE é definida como fenômenos eletromagnéticos que caracterizam as tensões e correntes em determinado tempo e localização do sistema (IEEE, 2019).

Do ponto de vista da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no Módulo 8 (Qualidade de Energia Elétrica) dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), a QEE aborda: 1) a qualidade do produto energia elétrica, com a caracterização dos fenômenos e estabelecimento de indicadores e limites; 2) a qualidade do serviço prestado, relacionados aos indicadores de continuidade e tempo de atendimento; 3) a qualidade do tratamento de reclamações, com indicadores de frequência equivalente de reclamação (FER) (ANEEL, 2018).

Neste contexto, os eventos de QEE podem ser definidos como qualquer problema na tensão, corrente ou frequência que resulte na falha ou má operação dos equipamentos do consumidor (Dugan et al., 2004).

Na prática, uma das formas de minimizar os impactos da QEE no sistema consiste na aquisição de informações seguras e concisas dos eventos. Para isso, é necessário dispor de um sistema de monitoramento eficiente, com equipamentos capazes de detectar, classificar e identificar o local da causa do evento. Os referidos equipamentos (também denominados de medidores de QEE) processam dados sincronizados que são analisados por uma distribuidora de energia (concessionária) ou pelo próprio cliente. Dependendo da dimensão do sistema, a instalação de medidores em todos os locais possíveis resultaria em dados redundantes e custos proibitivos (Junqueira, 2017).

Dentre os diversos eventos que podem comprometer a QEE, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são um dos mais preocupantes em termos da percepção do consumidor (Mali et al., 2015). As VTCD podem ser provocadas por partida de motores, energização de transformadores, curtos-circuitos, energização e desenergização de sistemas. Resumidamente, as VTCD são variações no sinal de tensão transmitidas durante um curto período de tempo, sendo classificadas em: interrupção, afundamento de tensão e elevação de tensão. As VTCD podem resultar em vários problemas, como perdas financeiras relacionadas a danos e desligamentos, além da redução da vida útil dos equipamentos do consumidor. A sua principal causa, os curtos-circuitos, são muitas vezes difíceis de se prever, dificultando seu diagnóstico.

Nesse sentido, pesquisas visando a instalação de medidores de forma estratégica para identificação de VTCD causadas por curtos-circuitos são de grande relevância para o setor elétrico. Esse problema requer a busca por métodos que possibilitem o monitoramento adequado do fenômeno, porém, com custos viáveis para as concessionárias. De forma geral, o desenvolvimento de métodos de identificação de VTCD consiste nas seguintes etapas:

- Obtenção de registros reais de VTCD: mesmo escassos, os registros reais são essenciais para o desenvolvimento de modelos que representem as características das VTCD causadas por curtos-circuitos.
- Análise das características da VTCD: a presença de transitórios em instantes específicos,

assim como a duração do evento, auxiliam na identificação dos efeitos das VTCD nas cargas conectadas à rede;

- Escolha do modelo de curto-circuito: devido à dificuldade para a obtenção de dados reais, a escolha do modelo de curto-circuito constitui uma etapa crucial para o desenvolvimento e validação da identificação da VTCD.
- Construção da base de dados: essa é uma etapa essencial e requer que a base de dados considere características suficientes para o desenvolvimento do método de identificação de VTCD, abrangendo os parâmetros que influenciam diretamente no curto-circuito.
- Detecção da VTCD: essa etapa requer a execução de duas sub-etapas: (a) Escolha da ferramenta matemática para a detecção da VTCD; (b) Escolha dos locais onde serão instalados os medidores para a detecção de VTCD em toda a rede de distribuição.
- Classificação e Localização: por fim, a zona do curto-circuito deve ser selecionada, a partir da classificação da VTCD em cada fase e em cada medidor instalado.

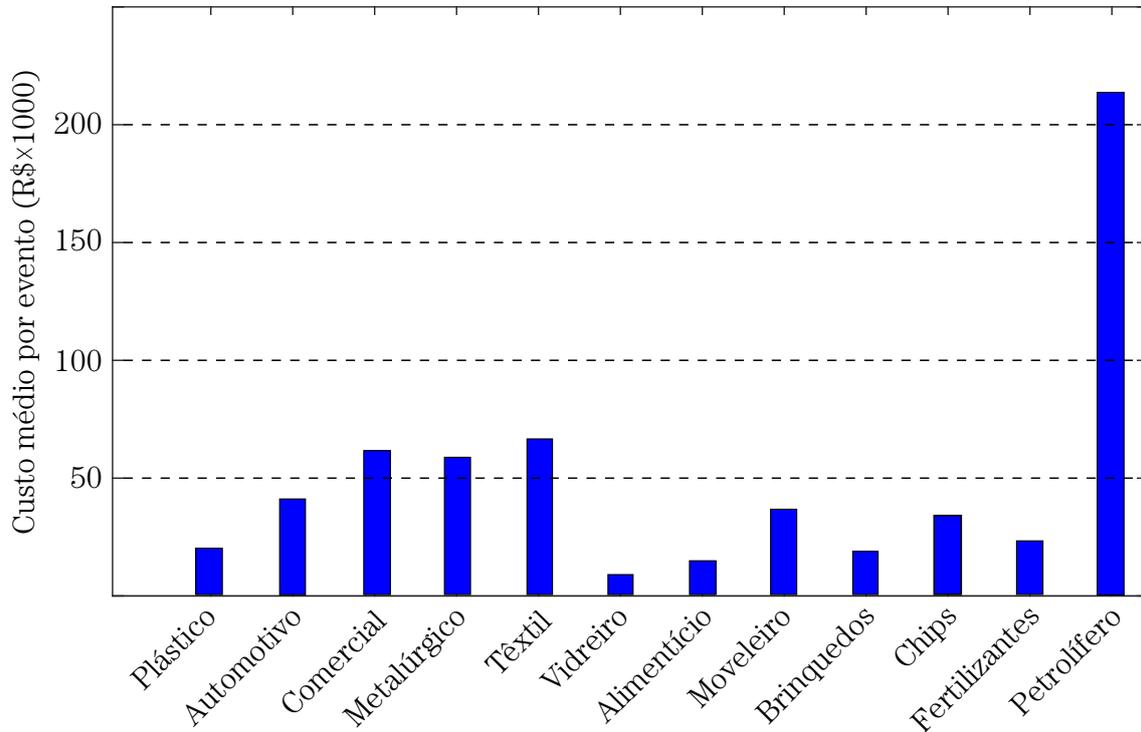
Todas essas etapas serão consideradas nesta tese, com foco especial no estudo da instalação estratégica de medidores de QEE para detecção de VTCD, estimação de tensão nas barras não-monitoradas e redução do espaço de busca do curto-circuito.

## 1.1 Motivação

A identificação de VTCD está relacionada tanto à segurança pública quanto aos aspectos operacionais e econômicos para as concessionárias. Em termos da segurança pública, um curto-circuito pode oferecer risco de choque elétrico à população, devido ao contato direto ou indireto com o cabo energizado. Em termos econômicos e operacionais, as VTCD afetam principalmente o setor industrial e como consequência, causam prejuízos devido aos desperdícios, custos de reinício de produção, baixa produção, danos ou redução da vida útil dos equipamentos do consumidor. Um trabalho recente, proposto por Motoki et al. (2021), apresentou os custos nos processos industriais provocados por VTCD em redes de média tensão. No total, 33 indústrias em 12 setores diferentes foram analisadas nos estados de São Paulo e Espírito Santo. Ao avaliar a sensibilidade dos equipamentos, o histórico de registros e o tempo de duração de cada evento,

obteve-se um custo médio em reais (R\$<sup>1</sup>) de perdas financeiras para cada setor industrial, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Custo médio (em R\$) relacionados às VTCD por setor industrial.



Fonte - Adaptado de Motoki et al. (2021).

Infelizmente, a maior causa das VTCD está relacionada aos curtos-circuitos, os quais ocorrem normalmente de maneira aleatória na rede elétrica. Portanto, a proposição de um método para identificação desses eventos possibilitará, sem dúvida, a melhoria dos indicadores de qualidade de produto e serviço utilizados pelo PRODIST. A ocorrência de uma VTCD prejudica os aspectos econômicos e operacionais, o que faz com que as concessionárias aumentem os investimentos em equipamentos, métodos e técnicas para melhorar esses indicadores. Neste contexto, o desenvolvimento de um método que possibilite a detecção e classificação da VTCD, além da localização das zonas de curto-circuito, é essencial para ambos os aspectos de segurança pública e econômicos. Com isso, é possível a redução de possíveis acidentes e a melhoria dos índices de QEE, conforme os limites estabelecidos pela ANEEL.

Usualmente, os métodos de detecção e classificação de VTCD, a partir de medidores instalados estrategicamente, baseiam-se no cálculo da matriz de impedância da rede durante um curto-circuito. No entanto, a presença de transitórios em instantes específicos, assim como

<sup>1</sup> No trabalho de Motoki et al. (2021) são apresentados os valores em dólar (US\$). Logo, foi realizada uma conversão para real (R\$), considerando a cotação do dia 01/06/2021 (US\$ 1 = R\$ 5,16).

a duração da VTCD, podem apresentar efeitos diferentes na rede. Além disso, a maior parte dos métodos utiliza poucos parâmetros que caracterizam os curtos-circuitos, dificultando o processo de detecção. Para a localização, por sua vez, a maioria dos métodos realiza inicialmente a instalação estratégica de medidores avaliando o custo do sistema de monitoramento e a capacidade de detectar os distúrbios analisados para que, em seguida, seja realizada a estimação das tensões nas barras não-monitoradas e identificação da zona na qual o curto-circuito ocorreu. Destaca-se que a estimação das tensões nas barras não-monitoradas e localização da zona de curto-circuito relacionam-se diretamente com o processo de escolha do sistema de monitoramento. Esta tese enquadra-se nesse contexto e propõe algumas estratégias visando minimizar os efeitos nocivos das VTCD.

## 1.2 Objetivos

Esta tese de doutorado tem como objetivo geral propor um método para instalação estratégica de medidores visando a detecção de VTCD e a localização da zona do curto-circuito e como objetivos específicos:

- Construir uma base de dados para simular diversos eventos de VTCD causadas por curtos-circuitos;
- Propor uma metodologia de detecção e classificação de VTCD no processo de instalação estratégica de medidores de QEE;
- Propor um novo método de instalação estratégica para estimar a tensão nas barras não-monitoradas e reduzir o espaço de busca do curto-circuito.

## 1.3 Evolução da Pesquisa e Contribuições

A pesquisa concernente a esta tese iniciou na dissertação de mestrado deste autor, na qual se propôs um algoritmo para instalação estratégica de detectores de afundamentos de tensão causados por curtos-circuitos, utilizando a transformada *wavelet* discreta (TWD). Apesar do algoritmo ter apresentado bons resultados com um número reduzido de medidores, as limitações

associadas a análise de curtos-circuitos apenas nas barras e a ausência de informações nas barras não-monitoradas tornaram-se evidentes.

Inicialmente, a pesquisa de doutorado consistiu em incluir faltas ao longo da linha e adaptar o método para detectar os demais eventos que compõem a classe das VTCD, ou seja, elevação de tensão e interrupção. Embora tenha sido possível obter o cálculo da intensidade e duração da VTCD via TWD, observaram-se erros relacionados ao processo de subamostragem, número de amostras por ciclo e tamanho da janela.

Para suprir a limitação da subamostragem da TWD, optou-se pela utilização da transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR). Inicialmente, realizou-se um estudo exploratório dessa transformada, avaliando o número de amostras por ciclo e o tamanho da janela que seriam necessário para a minimização dos erros de medição. Essa etapa foi concluída com a comparação entre a TWDR e outras ferramentas tradicionais para o cálculo de intensidade e duração da VTCD.

Em seguida, construiu-se uma base de dados automática de curtos-circuitos, para obtenção das tensões remanescentes em todas as barras do sistema analisado. Para isso, realizou-se uma análise do estado da arte, identificando os valores de cada parâmetro a serem escolhidos. O processo de automação da base de dados adotado, baseou-se no *Robot Process Automation* (RPA) ou em português, automação robótica de processos, que substitui as tarefas que poderiam ser executadas pelo usuário, com o objetivo de aumentar a produtividade.

Ao final, desenvolveu-se um método para identificação de VTCD, utilizando: i) área de alcance dos medidores instalados, visando a completa observabilidade do sistema; ii) estimação das tensões das barras não-monitoradas, a partir das informações da base de dados; iii) redução no número de eventos simétricos no processo de escolha dos locais dos medidores. Por fim, consideram-se como principais contribuições para o estado da arte:

1. Proposição da utilização de sinais senoidais com a detecção e classificação de VTCD via TWDR, para a instalação estratégica de medidores;
2. Escolha dos locais de medição a partir da análise dos erros de estimação nas barras não-monitoradas;
3. Redução no número de simetrias no processo de escolha dos medidores a serem instalados.

## 1.4 Produção Bibliográfica

Os resultados obtidos até o momento deram subsídios para as seguintes publicações:

- Publicados em periódicos :
  - **JUNQUEIRA, C. M. S.**; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A.; COELHO, R. A.; LIMA, E. M. An Algorithm for Optimal Meter Placement of Voltage Sag Monitors. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems (JCAE)*, 2019.
  - **JUNQUEIRA, C. M. S.**; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. A Method for SDVV Detection and Classification Using Redundant Discrete Wavelet Transform. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems (JCAE)*, 2021.
- Trabalhos correlatos publicados em periódicos:
  - LIMA, É. M.; **JUNQUEIRA, C. M. S.**; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A.; COELHO, R. A.; MEDEIROS, H. G. M. S. High Impedance Fault Detection Method Based on the Short-time Fourier Transform. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2018.
- Publicados em congressos:
  - **JUNQUEIRA, C. M. S.**; BRITO, N. S. D.; COELHO, R. A.; SOUZA, B. A. Uma Metodologia para Construção de Base de Dados de Variações de Tensão de Curta Duração. *VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2020.
  - **JUNQUEIRA, C. M. S.**; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. Procedimentos para Detecção e Classificação de Variações de Tensão de Curta Duração Utilizando a Transformada Wavelet Discreta. *XXII Congresso Brasileiro de Automática*, 2020.
- Trabalhos correlatos publicados em congressos:
  - LIMÕES, M. C. S.; SOUZA, L. L.; BRITO, N. S. D.; **JUNQUEIRA, C. M. S.**; SANTOS, E. N. A. Worksheet for Calculations in Distribution Electrical Power Using Microsoft Excel. *International Conference on Alive Engineering Education*, 2019.

- COELHO, R. A.; LIMA, E. M.; **JUNQUEIRA, C. M. S.**; MEDEIROS, H. G. M. S.; BRITO, N. S. D.; LIRA, G. R. S. Comparative Analysis of Power Definitions in Nonsinusoidal Conditions: A Case Study. *XX Congresso Brasileiro de Automática*, 2018.
- LIMA, E. M.; **JUNQUEIRA, C. M. S.**; COELHO, R. A.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. Modelagem Probabilística do Ruído em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. *XX Congresso Brasileiro de Automática*, 2018.

## 1.5 Organização do Texto

Esta tese está organizada em oito capítulos, incluindo este capítulo introdutório, conforme a seguir:

**Capítulo 2:** Revisão bibliográfica, contemplando os trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento da tese.

**Capítulo 3:** Conceitos básicos sobre as VTCD e suas características. Resumo das normas de classificação, métodos de detecção, sensibilidade dos equipamentos, monitoramento e propagação na rede.

**Capítulo 4:** Construção do problema de instalação estratégica de medidores e suas limitações.

**Capítulo 5:** Desenvolvimento do método proposto no trabalho para a instalação estratégica dos medidores.

**Capítulo 6:** Descrição da metodologia para o desenvolvimento e validação do método proposto.

**Capítulo 7:** Apresentação e análise dos resultados.

**Capítulo 8:** Conclusões e proposta de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Para demonstrar a relevância e a originalidade da pesquisa realizada, fez-se uma análise minuciosa do estado da arte referente ao tema, cujo resumo é apresentado neste capítulo. Ao final, foram selecionados os trabalhos considerados mais relevantes para a pesquisa, os quais estão relacionados à instalação estratégica de medidores para identificação de VTCD.

### 2.1 Um breve histórico

O processo de interligação dos SEP, apesar das suas vantagens reconhecidas, resultou no surgimento de novos problemas, como a propagação de distúrbios devido à sinergia entre os sistemas. Esse fato foi constatado pela primeira vez no blecaute ocorrido em Nova Iorque em 1965, o qual despertou o interesse das autoridades em investigar suas causas, visando prevenir a reincidência desses problemas.

Nas décadas seguintes, as concessionárias de energia passaram a se preocupar constantemente com as reclamações relacionadas às VTCD, geralmente causadas por curtos-circuitos localizados no sistema da concessionária. A principal razão advém dos equipamentos sensíveis às variações de tensão, os quais passaram a ser utilizados em todos os setores (residencial, comercial e industrial). Concomitantemente, diversos métodos de identificação de VTCD foram desenvolvidos, a partir de medições de tensão ao longo do sistema.

Inicialmente, os estudos propunham uma previsão estocástica de interrupções de longa duração, a partir da simulação de curtos-circuitos francos. Os métodos baseavam-se em possíveis eventos que a instalação de um cliente poderia ser submetida, a partir dos seguintes dados de entrada: taxa de falha por quilômetro do alimentador, comprimento do alimentador principal e atuação do sistema de proteção (Warren, 1992). Conforme se constatou, essas técnicas são utilizadas para prever a frequência e a duração de eventos de longa duração, apresentando incertezas relacionadas às características presentes nos eventos de curta duração (Bollen, 2000). Consequentemente, o estudo das características das VTCD causadas por curtos-circuitos e

desenvolvimento de métodos mais específicos ganharam destaque.

Na década de 1990, foram publicados os primeiros trabalhos referentes ao monitoramento de VTCD para análise do desempenho do sistema elétrico. Em Conrad et al. (1991), os autores avaliaram os registros de VTCD advindos de um medidor instalado em um cliente industrial, por um período de um ano. As características de intensidade e duração de cada registro foram utilizadas na elaboração de um diagrama de dispersão, o qual era dividido em regiões baseadas na classificação das VTCD e na causa do evento.

Em Conrad e Bollen (1997), o diagrama de dispersão passou a ser dividido em faixas de valores de intensidade e duração, formando uma tabela de densidade das VTCD. Com isso, foi possível identificar a taxa de ocorrência de VTCD em cada faixa que, combinada com a tolerância dos equipamentos utilizados na instalação do cliente, permitiu estimar o número de vezes que o equipamento funcionaria de forma inadequada. A tabela de densidade foi então utilizada no cálculo dos prejuízos financeiros causados pelas VTCD e passou a ser uma prática recomendável para os setores industrial e comercial (IEEE, 1997; IEEE, 1998).

Nesse ínterim, o crescimento dos sistemas elétricos em vários países, fez com que os estudos considerassem a instalação de centenas de medidores para análise. Como nem todas as subestações e alimentadores poderiam ser monitorados, devido principalmente ao custo, vários estudos visando selecionar os medidores requeridos começaram a ser realizados. Como exemplo, destacam-se os trabalhos de Dorr et al. (1997), desenvolvido pela *National Power Laboratory* (NPL) com 130 medidores instalados nos Estados Unidos e Canadá, por um período de 5 anos e Koval e Hughes (1997), desenvolvido pela *Canadian Electrical Association* (CEA), com 550 medidores instalados no Canadá por um período de 25 dias.

Para compreender os efeitos da propagação da VTCD ao longo da rede, alguns estudos começaram a apresentar resultados para um monitoramento estratégico, a partir da restrição de que qualquer VTCD deveria ser identificada por pelo menos um medidor instalado. Baseado neste critério, a instalação estratégica de medidores pode ser dividida em quatro áreas: *Monitor Reach Area* (MRA), *Covering and Packing* (CP), *Graph Theory* (GP) e *Multivariable Regression* (MVR). Devido à aplicação em sistemas de transmissão e distribuição e a maior flexibilidade na escolha do número e da localização dos medidores, a MRA, denominada nesta tese de Matriz de Observabilidade (MO), é atualmente a área mais explorada pelos pesquisadores para a resolução

do problema de instalação estratégica de medidores (Kazemi et al., 2013).

Neste contexto, apresenta-se na próxima seção uma análise crítica dos trabalhos considerados mais relevantes para a pesquisa desenvolvida, a qual foi dividida em duas categorias: instalação estratégica para (i) detecção de VTCD e (ii) estimação de tensão nas barras não-monitoradas. A revisão bibliográfica é concluída com uma síntese do capítulo, comparando os trabalhos mais relevantes com o método proposto nesta tese.

## 2.2 Trabalhos mais relevantes

### 2.2.1 Métodos de detecção

A MO consiste na utilização das tensões remanescentes em todos os locais possíveis de instalação dos medidores, baseado em um conjunto de eventos que causam VTCD. O primeiro trabalho com MO foi proposto em Olguin e Bollen (2003), no qual a matriz de impedância da rede (MIR) foi utilizada para o cálculo das tensões remanescentes nas barras durante os eventos de curto-circuito. Segundo o método, se um afundamento de tensão (única VTCD analisada) estiver dentro da MO de um medidor, o evento é detectado por ele. O trabalho apresentou um problema de otimização com função objetivo baseada no custo mínimo do sistema de monitoramento e restrição de que qualquer afundamento de tensão fosse detectado pelos registros dos medidores instalados. Os autores observaram um aumento no número de medidores com a redução no limiar de detecção do afundamento de tensão, diretamente relacionado com a mudança na MO dos medidores instalados. Apesar da relevância dos resultados, a base de dados considerou apenas afundamentos de tensão causados por faltas sólidas monofásicas localizadas nas barras do sistema, o que pode dificultar a aplicação prática do método em relação aos curtos-circuitos reais.

Em Almeida (2007), o autor propôs um método para detecção de afundamentos de tensão e elevação de tensão em sistemas de transmissão, a partir do cálculo das tensões remanescentes obtidos pela MIR. A base de dados considerou faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas, aplicadas a cada 10% do comprimento da linha. O autor utilizou o conceito da MO, obtida pela fixação de valores das tensões remanescentes que se deseja que os medidores sejam sensibilizados. O método foi avaliado em três sistemas de transmissão com portes diferentes, analisando de forma

separada, a diferença no número de medidores necessários para cada tipo de falta. Destaca-se, no entanto, que a variação no parâmetro de resistência de falta não foi abordado, o que pode comprometer diretamente na identificação da MO de cada medidor instalado.

Em Juarez et al. (2009), os autores propuseram um método de detecção de afundamentos de tensão baseado na modificação da MO. No trabalho, expressões analíticas da MIR foram utilizadas para identificar as regiões que um medidor conseguiria detectar apenas afundamentos de tensão para todos os tipos de falta. Os autores comprovaram que a utilização da MO tradicional para a instalação estratégica de medidores, considerando apenas curtos-circuitos localizados nas barras, não garantiam a detecção de afundamentos de tensão ao longo da linha. Uma nova MO foi proposta pelos autores, apresentando os locais ao longo da linha dos sistemas de transmissão que causam afundamentos de tensão nas barras do sistema. Como resultado, o novo método apresentou um número maior de medidores quando comparado à MO utilizada nos trabalhos anteriores. Apesar das contribuições importantes, o trabalho não informou se o parâmetro de resistência de falta tem influência nos locais de falta utilizados para o processo de escolha do sistema de monitoramento.

Em Ibrahim et al. (2012a), os autores apresentaram uma base de dados de afundamentos de tensão causados por curtos-circuitos monofásicos localizados nas barras, a partir do cálculo das tensões remanescentes obtidas pela MIR. O método considerou as limitações dos trabalhos anteriores e apresentou o conceito de TMRA (*Topological Monitor Reach Area*), denominada nesta tese de Matriz de Observabilidade Topológica (MOT), na qual a topologia do sistema é levada em consideração na escolha dos locais de instalação dos medidores. O trabalho foi um dos primeiros a apresentar uma solução para sistemas de transmissão e distribuição. Além disso, o conceito de *Monitor Overlapping Index* (MOI) foi apresentado para diferenciar duas soluções com o mesmo número de medidores. Uma solução com menor MOI, indica menores redundâncias de informações, sendo considerada uma solução mais confiável. Na validação dos resultados, os autores perceberam que dependendo do local ao longo da linha e mesmo com a sobreposição das áreas de observabilidade dos medidores escolhidos, podem vir a ocorrer regiões limites que não detectam afundamentos de tensão. Apesar dos resultados, a base de dados foi composta apenas por faltas monofásicas localizadas nas barras.

Solano et al. (2015) apresentaram um método de instalação estratégica de medidores para

detecção de afundamentos de tensão, considerando o impacto das reconfigurações dinâmicas das linhas de distribuição. Os autores utilizaram a MIR para o cálculo das tensões remanescentes nas barras e o conceito de MOT para a construção de uma nova matriz que incluía a geração distribuída de fontes fotovoltaicas e eólicas. A base de dados de curto-circuito foi composta por todos os tipos de falta, localizados apenas nas barras do sistema. Um caso-base (MOT tradicional) e quatro casos obtidos a partir da variação das fontes de geração distribuída foram analisados para validação do método. Ao final, os autores concluíram que a presença da geração distribuída faz com que o método forneça como resposta um número maior de medidores, o qual depende do nível de intensidade das fontes geradoras. Devido à base de dados considerar faltas apenas nas barras, nenhum dos casos apresentou detecção completa do sistema de monitoramento para os curtos-circuitos analisados.

Martins et al. (2019) apresentaram um método baseado na MO para a instalação estratégica de medidores para detecção de VTCD, a partir das tensões remanescentes da MIR nas barras do sistema. Os autores propuseram um problema com dois objetivos: minimizar o número de medidores e maximizar o número de locais de faltas identificáveis. Para isso, foi considerada a ambiguidade de resultados obtidos pelos medidores, a qual foi denominada de simetria de eventos. As incertezas de medição de  $\pm 0,05$  pu foram utilizadas para determinar as condições de simetria dos medidores instalados. A base de dados foi composta por faltas ao longo da linha, variação nos tipos de falta e nos valores de resistência. Os autores identificaram que soluções com um número maior de medidores tendem a apresentar respostas com um número menor de simetrias obtidas da medição, facilitando a identificação do local de falta. Apesar dos resultados apresentados, os autores destacaram que o número reduzido de eventos, baseados nos parâmetros de falta escolhidos, podem resultar em um sistema de monitoramento com baixa confiabilidade.

Em Junqueira et al. (2019), os autores apresentaram uma análise de sensibilidade para a escolha da quantidade e localização dos medidores em SDEE, com o objetivo de detectar afundamentos de tensão. Os autores utilizaram os conceitos da MOT e apresentaram pela primeira vez o uso dos sinais senoidais para o cálculo das tensões remanescentes, a partir da ferramenta matemática da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD). A base de dados utilizada considerou a variação da resistência de falta, tipo de falta e carregamento do sistema. Além

disso, foram analisadas as mudanças nos limiares de detecção e resposta à escolha dos locais dos medidores para um sistema em expansão. Como resultado, os autores observaram que, dependendo dos valores dos parâmetros de falta utilizados, o número de soluções e a localização dos medidores apresentariam respostas diferentes. A área de observabilidade diminuiu com a redução do limiar de detecção, sendo necessário uma quantidade maior de medidores para garantir a observabilidade do sistema. Para a expansão do sistema, considerou-se a existência de medidores antes da expansão, obtendo um novo resultado para o sistema de monitoramento. Apesar do uso de um número maior de parâmetros, os autores não consideraram faltas ao longo das linhas de distribuição.

Bottura (2019) apresentou um método de instalação estratégica de medidores para detectar afundamentos, elevações de tensão e ressonância harmônica na rede. O autor utilizou uma matriz de cobertura, utilizando a MIR para o cálculo das tensões remanescentes e para construção da MO. Uma nova matriz de cobertura foi apresentada, considerando as características das tensões remanescentes e a cobertura da ressonância harmônica do sistema. Para a detecção de VTCD, o autor realizou uma análise da diferença dos limiares de detecção e considerou apenas a variação do tipo de falta na construção da base de dados de curtos-circuitos localizados nas barras do sistema. Para a ressonância harmônica, o autor considerou a variação do conjunto de bancos de capacitores instalados no sistema. Ao final, o autor propôs um método que amplia a quantidade de distúrbios de QEE analisados por um conjunto de medidores instalados estrategicamente. Apesar dos bons resultados obtidos, a base de dados não considerou a variação da resistência e do local da falta, comprometendo diretamente a detecção de VTCD pelos medidores instalados.

Em Jiang et al. (2020), os autores avaliaram as incertezas relacionadas às resistências de falta para elaborar um novo método de instalação estratégica de medidores, com o objetivo de detectar apenas afundamentos de tensão. O método baseou-se na MO, a partir da utilização da MIR para o cálculo das tensões remanescentes nas barras do sistema. Os autores identificaram que dependendo da resistência de falta, os medidores escolhidos poderiam não detectar afundamentos de tensão. A partir da relação entre tensão remanescente e resistência de falta, os autores apresentaram oito diferentes tipos de curva, relacionadas às faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas. Com as informações de cada uma das curvas, foi definida uma matriz com a mesma dimensão da MO para representar um conjunto de intervalos de resistência para cada

local de falta simulado. Os índices de observabilidade local e global foram definidos para indicar a probabilidade do conjunto de medidores detectar um afundamento de tensão para um local ou um conjunto de locais de falta, respectivamente, considerando as incertezas relacionadas às resistências de falta. Ao final, os autores confirmaram que os métodos tradicionais que utilizam a MO, considerando apenas curtos-circuitos sólidos, conseguiram detectar cerca de 67% dos afundamentos de tensão que foram analisados. Apesar das contribuições na formulação do problema, os autores utilizaram uma base de dados reduzida e com registros apenas das fases sob falta.

Šipoš et al. (2021) utilizaram o conceito de MO com as tensões remanescentes obtidas via MIR, para propor uma nova função objetivo ao problema de instalação estratégica de medidores para detectar apenas afundamentos de tensão. O conceito de área exposta foi utilizado para adicionar um coeficiente de peso relacionado à razão entre o comprimento de exposição de um medidor e o comprimento total do sistema. A nova função objetivo foi composta pela função custo e pelo somatório dos coeficientes de peso para a solução do conjunto de medidores. Os autores avaliaram curtos-circuitos monofásicos e trifásicos, localizados nas barras e a cada 1% do comprimento das linhas, sem variação na resistência de falta. Apesar dos bons resultados obtidos para o sistema de transmissão de 39 barras do IEEE com um número reduzido de medidores como solução, os autores apresentaram apenas duas análises isoladas para a instalação estratégica dos medidores: faltas monofásicas e faltas trifásicas.

### **2.2.2 Métodos de estimação de tensão nas barras não-monitoradas**

Uma das limitações encontradas na detecção de VTCD é que não há informações de tensões remanescentes nas barras não-monitoradas. Para superá-la, Olguin (2005) utilizou a formulação de Olguin e Bollen (2003) para a construção da MO e escolha dos medidores de acordo com o custo do sistema de monitoramento. O autor apresentou pela primeira vez, um método de estimação de tensão nas barras não-monitoradas, baseado nas informações advindas dos medidores instalados estrategicamente. Para isso, um conjunto de locais possíveis de falta, obtidos pela combinação dos registros dos medidores instalados e analisados na MO, foi utilizado para a estimação das tensões. Para cada possível local de falta, um fator de peso relacionado à taxa de probabilidade de ocorrência neste local, foi associado. Os autores identificaram que

quanto maior o número de medidores instalados, uma redução no número de possíveis locais de falta tende a ocorrer, o que facilitaria na identificação das tensões nas barras não-monitoradas. A base de dados considerou curtos-circuitos monofásicos localizados nas barras e a cada 15 km das linhas de um sistema de transmissão. Dois sistemas de monitoramento (SM1 e SM2) foram escolhidos para validação do método, o qual baseou-se na restrição de que pelo menos um (SM1) ou dois (SM2) medidores fossem capazes de detectar qualquer afundamento de tensão no sistema. Os autores avaliaram um conjunto de 81 curtos-circuitos aleatórios para a conclusão do processo de estimação. Apesar da relevância dos resultados obtidos, a escolha dos medidores limitou-se ao custo do sistema de monitoramento, além disso, a base de dados reduzida, pode comprometer diretamente nas situações reais de curto-circuito.

Em Juarez e Hernandez (2007), os autores utilizaram a formulação matemática apresentada em Olguin (2005) para desenvolver um novo método de estimação das tensões, a partir dos registros advindos dos medidores instalados. As tensões remanescentes obtidas via MIR foram utilizadas para identificar as regiões-limite que provocariam afundamentos de tensão nas barras do sistema. A base de dados considerou a variação nas posições de falta e no tipo de falta que ocorrem na rede. Os autores utilizaram soluções de instalação estratégica dos medidores com limiares de detecção entre 0,6 pu e 0,9 pu, capazes de garantir a detecção completa de afundamentos de tensão na rede. Para validação do método de estimação, curtos-circuitos aleatórios que consideraram a taxa de faltas por ano e uma probabilidade de falta distribuída uniformemente ao longo de cada linha foram utilizados. Ao final, os autores apresentaram os erros de estimação para cada conjunto de medidores escolhidos para monitoramento, os quais chegaram até 8,88%. Apesar dos resultados relevantes, além de não considerar os efeitos das resistências de falta no processo de estimação, o trabalho limitou-se à estimação da frequência de afundamentos de tensão nas barras não-monitoradas, via classificação em seis faixas de tensão.

Em Mora (2012), o autor utilizou os procedimentos do trabalho de Olguin (2005) para avaliar a diferença no número e na posição de medidores, de acordo com a variação do limiar de detecção, resistência de falta, tipo de falta e carregamento do sistema. Um algoritmo de localização de faltas que omite as capacitâncias *shunt* para simplificação e redução na utilização de métodos iterativos foi utilizado para o desenvolvimento de uma nova MO, denominada de *Enhanced MRA* (EMRA) ou Matriz de Observabilidade Aprimorada (MOA). Com isso, o autor

demonstrou que o uso da MOA reduz o número de possíveis locais de falta (úteis no processo de estimação) em relação ao MO tradicional. Para a estimação do número de afundamentos de tensão, o autor analisou 1000 curtos-circuitos aleatórios obtidos pelo método de Monte Carlo, considerando: distribuição uniforme para o trecho de falta e local da falta, distribuição de acordo com a probabilidade de ocorrência para o tipo de falta e distribuição normal para as resistências de falta. Para a estimação das tensões nas barras não-monitoradas, o autor adicionou uma nova matriz no processo de escolha dos locais de instalação dos medidores, denominada de *Monitor Location Area* (MLA) ou Área de Localização do Medidor (ALM), definida como sendo a área que os medidores identificam a ocorrência de apenas um local de falta. Apesar dos bons resultados obtidos para a estimação de tensão nas barras não-monitoradas, o trabalho apresentou soluções e análises de forma isolada para cada conjunto de parâmetros de curto-circuito.

Xiu e Liao (2014) apresentaram um método de instalação estratégica de medidores utilizando a MO, capaz de garantir a observabilidade em termos da localização da falta e, conseqüentemente, da estimação das tensões nas barras não-monitoradas. Os autores identificaram que a presença de linhas multilaterais em SDEE poderia tornar impossível a determinação de locais de falta para algumas situações. O método utilizou a MIR para o cálculo das tensões remanescentes nas barras, baseando-se no custo e na análise do conjunto dos locais de falta que eram unicamente observáveis para cada conjunto de medidores escolhidos para o monitoramento. Para a construção do problema de otimização, a base de dados considerou a variação no local de falta, no tipo de falta e na resistência de falta. Para aumentar a confiabilidade do método, os autores utilizaram a diferença entre os valores medidos e calculados para cada local possível de falta e adotaram um limiar de 0,01 pu, acima do qual o local de falta seria considerado como "falso local de falta". A instalação estratégica de medidores foi avaliada para os seguintes cenários: custos iguais e diferentes para cada medidor instalado, variação no número de medidores para cada tipo de falta e mudança na estimação nos locais de falta com a variação do número de medidores. Apesar dos bons resultados obtidos, o autor validou o método apenas para os cenários da base de dados utilizada, o que pode comprometer a estimação do local e das tensões nas barras não-monitoradas, devido à aleatoriedade dos parâmetros de curto-circuito em uma situação real.

Davarinejad et al. (2018) propuseram um método de instalação estratégica de medidores

para identificar o menor custo de monitoramento para o maior nível de observabilidade de faltas em SDEE, a fim de determinar as tensões nas barras não-monitoradas. Os autores apresentaram o conceito de similaridade de medições, o qual foi definido como sendo duas ou mais situações de curto-circuito que resultariam nas mesmas tensões remanescentes nos medidores instalados, considerando os erros de medição. Além disso, os autores utilizaram dois parâmetros para a escolha dos locais dos medidores: "par cego" (*blind-pair*), o conjunto de locais de falta que resultam nas mesmas tensões remanescentes em uma determinada barra; "ponto cego" (*blind-spot*), um local de falta que não é unicamente identificável pelo conjunto de medidores. Um índice de nível de observabilidade, o qual considera a soma absoluta das diferenças entre os afundamentos de tensão dos medidores instalados e os desvios-padrão, foi utilizado para a formulação de uma nova função objetivo. A formação da MO considerou uma base de dados com faltas apenas nas barras e para todos os tipos. Para validação do local de falta, os autores consideraram primeiramente a detecção do tipo de falta determinados por relés e outros dispositivos detectores de falta. Em seguida, com as informações dos registros dos medidores, um erro relativo é calculado pela diferença entre o valor medido e os valores simulados. O índice é calculado após a simulação de uma falta e o local que apresentar o menor erro, é considerado o local mais provável de ocorrência da falta. O trabalho apresentou diferentes configurações para o sistema de monitoramento baseado nos erros de medição e as reduções nos prejuízos por interrupções causadas no sistema. Porém, o método foi validado apenas para curtos-circuitos francos localizados nas barras.

Diferente dos trabalhos que apresentaram uma instalação estratégica de medidores para detecção de VTCD ou observabilidade de falta, Hernández e Milanović (2019) modelaram um problema de otimização baseado na correlação dos índices de afundamentos de tensão entre diferentes barras, obtidos pela utilização da MIR, para a estimação da quantidade de eventos nas barras não-monitoradas. Os autores definiram a área de correlação de uma determinada barra como sendo o número de barras que apresentam tensões remanescentes similares com a barra de interesse para os curtos-circuitos analisados. Os autores modelaram a MO a partir de simulações estocásticas de curto-circuito pelo método de Monte Carlo, considerando a taxa de faltas por ano, tipo de falta de acordo com probabilidade de ocorrência e distribuição uniforme para resistência de falta e do local da falta. Os autores consideraram o custo e a relação entre a

matriz de impedância e a correlação entre as barras como o critério de seleção do número mínimo de medidores para que qualquer barra não-monitorada estivesse relacionada com uma barra monitorada. A estimação de afundamentos de tensão nas barras não-monitoradas foi obtida pela relação direta do somatório de todas as impedâncias de transferência de uma barra monitorada pelo somatório de todas as impedâncias de transferência da barra não-monitorada. Os autores validaram o trabalho considerando a análise de três cenários: caso A com 3 medidores, caso B com 6 medidores e caso C com 9 medidores. Os resultados obtidos mostraram que o aumento no número de medidores reduzem os erros absolutos na detecção de afundamentos de tensão nas barras não-monitoradas, quando comparados às pseudomedições consideradas como tensões remanescentes reais. Apesar da base de dados considerar três parâmetros de curto-circuito, o trabalho apresentou respostas de estimação da frequência de afundamentos de tensão e não houve análise das tensões remanescentes nas barras não-monitoradas.

Sun et al. (2020) apresentaram um algoritmo de instalação estratégica de medidores para a localização de faltas na presença da geração distribuída. As tensões remanescentes foram obtidas por modificação da MIR, considerando a superposição de injeção de corrente nas barras advindas de duas contribuições: corrente de falta e corrente das unidades de geração distribuída instaladas. Para a construção do problema de otimização, os autores apresentaram uma função objetivo composta por uma parcela relacionada à minimização dos custos do sistema de monitoramento. Além disso, outra parcela relacionada à minimização do número de linhas que, a depender do tipo de falta, provocariam erros no cálculo das correntes de falta injetadas nas barras do sistema, foi adicionada. Os registros coletados pelos medidores escolhidos foram utilizados para o cálculo dos erros residuais em relação aos curtos-circuitos analisados, identificando as linhas candidatas para o local da falta. Os autores utilizaram o valor mínimo da similaridade do cosseno entre os vetores de tensão das barras monitoradas para identificação da linha e do local sob falta. O algoritmo considerou a variação do número de unidades de geração distribuída e uma base de dados de curtos-circuitos com a variação do tipo de falta, local de falta e resistência de falta. Para validação, os autores apresentaram os impactos da resistência de falta, taxa de amostragem, erros de sincronização dos registros dos medidores e erros das impedâncias de linha. Apesar da redução dos erros de estimação do local de falta em relação a outros trabalhos, os autores apresentaram resultados de forma isolada para cada parâmetro de falta. Ademais,

os erros e as variâncias de localização de falta concentraram-se na faixa de 0% a 25%, que dependendo do curto-circuito analisado, pode comprometer na estimação das tensões nas barras não-monitoradas do sistema.

## 2.3 Síntese Bibliográfica

A execução da etapa de revisão bibliográfica revelou várias questões referentes à identificação de VTCD via instalação estratégica de medidores, algumas das quais foram decisivas para o desenvolvimento desta pesquisa, por exemplo:

- A identificação de VTCD deve ser avaliada considerando as características dos sinais reais de tensão, visto que algumas delas podem não estar presentes nas simulações (detecção);
- O método deve considerar o número máximo de distúrbios de QEE (detecção);
- A base de dados deve considerar a maior quantidade de parâmetros que caracterizem os curtos-circuitos que causam VTCD (detecção e estimação nas barras não-monitoradas);
- O método deve possibilitar uma flexibilização na escolha dos medidores para estimação de tensão nas barras não-monitoradas (estimação nas barras não-monitoradas);
- O método deve considerar a presença de eventos simétricos entre os medidores instalados (estimação nas barras não-monitoradas).

Baseando-se em todas essas constatações, desenvolveu-se nesta tese, um método que utiliza a TWDR para a identificação da intensidade e duração da VTCD, a fim de facilitar a aplicação *online*. Os trabalhos anteriores apresentaram resultados da instalação estratégica de medidores para detecção e estimação de tensão nas barras não-monitoradas utilizando a MIR. Porém, uma das principais dificuldades na identificação das VTCD é o cálculo da intensidade e duração, principalmente para eventos muito curtos. Logo, optou-se pela utilização da TWDR, a qual utiliza os sinais senoidais de tensão, considerando a presença de transitórios em instantes específicos e o tempo de decaimento e subida da intensidade de tensão. Destaca-se ainda, a base de dados construída para o desenvolvimento do método proposto, que utilizou quatro

parâmetros com um número significativo de casos, visando aumentar a confiabilidade do sistema de monitoramento.

Uma síntese das principais características dos métodos estudados e do método proposto para detecção de VTCD a partir da instalação estratégica de medidores, está apresentada na Tabela 1. Da mesma forma, uma síntese dos métodos de estimação de tensão nas barras não-monitoradas avaliados em comparação com o método proposto é apresentado na Tabela 2, o qual utiliza a simetria entre os registros de possíveis soluções para identificação de uma solução ótima que considera a minimização do custo do sistema de monitoramento e dos erros de estimação, além da redução no espaço de busca do local de ocorrência do curto circuito. Destaca-se que o método de identificação é formado pela combinação do método de detecção com o método de estimação de tensão nas barras não monitoradas.

Tabela 1 – Síntese dos trabalhos sobre detecção de VTCD.

Métodos	Técnica	Distúrbio	Base de dados				Comentários
			$T_f$ <sup>1</sup>	$R_f$ <sup>2</sup>	$t_f$ <sup>3</sup>	$C_s$ <sup>4</sup>	
Olguin e Bollen (2003)	MIR + MO	AT <sup>5</sup>	-	-	-	-	Faltas FM <sup>6</sup> apenas nas barras
Almeida (2007)	MIR + MO	AT e ET <sup>7</sup>	✓	-	✓	-	$R_f$ não considerada
Juarez et al. (2009)	MIR + MO	AT	✓	-	✓	-	$R_f$ não considerada
Ibrahim et al. (2012a)	MIR + MOT	AT	✓	-	-	-	Faltas FM apenas nas barras
Solano et al. (2015)	MIR + MOT	AT	✓	-	-	-	Faltas apenas nas barras
Martins et al. (2019)	MIR + MOT	AT, ET e INT <sup>8</sup>	✓	✓	✓	-	Número reduzido de curtos-circuitos
Junqueira et al. (2019)	TWD + MOT	AT, ET e INT	✓	✓	-	✓	Faltas apenas nas barras
Bottura (2019)	MIR + MO	AT, ET e RH <sup>9</sup>	✓	-	-	-	Faltas apenas nas barras
Jiang et al. (2020)	MIR + MO	AT	✓	✓	✓	-	Número reduzido de curtos-circuitos
Šipoš et al. (2021)	MIR + MO	AT	✓	-	✓	-	$R_f$ não considerada
<b>Método proposto</b>	<b>TWDR + MO</b>	<b>AT, ET e INT</b>	✓	✓	✓	✓	<b>Variação de quatro parâmetros de falta</b>

<sup>1</sup> Tipo de falta

<sup>2</sup> Resistência de falta

<sup>3</sup> Trecho sob falta

<sup>4</sup> Carregamento do sistema

<sup>5</sup> Afundamentos de tensão

<sup>6</sup> Faltas monofásica

<sup>7</sup> Elevações de tensão

<sup>8</sup> Interrupção de tensão

<sup>9</sup> Ressonância harmônica

Tabela 2 – Síntese dos trabalhos sobre estimação de VTCD nas barras não-monitoradas.

Métodos	Técnica	Base de dados				Escolha dos medidores		
		$T_f$	$R_f$	$t_f$	$C_s$	Cus. <sup>10</sup>	Est. <sup>11</sup>	Loc. <sup>12</sup>
Olguin (2005)	MIR + MO	-	-	✓	-	✓	-	-
Juarez e Hernandez (2007)	MIR + MO	✓	-	✓	-	✓	-	-
Mora (2012)	MIR + MO ALM	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Xiu e Liao (2014)	MIR + MO	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
Davarinejad et al. (2018)	MIR + MO	✓	-	-	-	✓	-	✓
Hernández e Milanović (2019)	MIR + MO	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
Sun et al. (2020)	MIR + MO	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
<b>Método proposto</b>	<b>TWDR + MO</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

<sup>10</sup> Custo do sistema de monitoramento<sup>11</sup> Estimação de tensão nas barras não-monitoradas<sup>12</sup> Localização do curto-circuito

## Capítulo 3

# Variações de Tensão de Curta Duração

Este capítulo apresenta as informações mais importantes em relação às VTCD para o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, apresentam-se as normas de classificação e as características de intensidade e duração das VTCD. Em seguida, a sensibilidade dos equipamentos, o processo de monitoramento, as técnicas de detecção e a propagação das VTCD são apresentados. O capítulo é concluído com a descrição do método das posições de falta.

### 3.1 Normas de Classificação

As VTCD são os eventos da área de QEE mais frequentes nos SDEE, responsáveis por causarem prejuízos financeiros relacionados a danos, desligamentos e redução da vida útil dos equipamentos do consumidor (Chan et al., 2011). As VTCD são definidas como alterações na intensidade do sinal senoidal de tensão por um curto período de tempo, cuja classificação varia conforme a norma utilizada.

Na norma brasileira (ANEEL, 2018), a intensidade de um evento ( $V_{\text{int}}$ ) é definida como a razão entre o nível de tensão remanescente ou residual ( $V_{\text{res}}$ ) e o nível da tensão de referência ( $V_{\text{ref}}$ ). O parâmetro  $V_{\text{int}}$  pode ser expresso em valor por unidade (pu) ou em porcentagem (%), de acordo com as Equações (1) e (2), respectivamente. Dependendo do valor de  $V_{\text{int}}$ , a VTCD pode ser classificada em termos de intensidade em: interrupção de tensão, afundamento de tensão e elevação de tensão.

$$V_{\text{int}} = \frac{V_{\text{res}}}{V_{\text{ref}}} \text{ (pu) ou} \quad (1)$$

$$V_{\text{int}}(\%) = \frac{V_{\text{res}}}{V_{\text{ref}}} \times 100 \text{ (\%)}. \quad (2)$$

A duração das VTCD consiste na identificação do período em que as tensões remanescentes atingem valores fora dos limiares do funcionamento normal de operação. Isso significa que a

duração ( $\Delta t$ ) das VTCD é a diferença entre o instante final ( $t_{\text{final}}$ ) e o instante inicial ( $t_{\text{inicial}}$ ) do evento, conforme apresentada na Equação (3). Dependendo do valor de  $\Delta t$ , as VTCD podem ser classificadas em momentânea ou temporária. Resumidamente, a norma brasileira classifica as VTCD conforme apresentado na Tabela 3.

$$\Delta t = t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}. \quad (3)$$

Tabela 3 – Classificação das VTCD para a norma brasileira (ANEEL, 2018).

Classificação	Denominação	Duração ( $\Delta t$ )	Intensidade ( $V_{\text{int}}$ )
	Interrupção	$\Delta t \leq 3$ s	$V_{\text{int}} \leq 0,1$ pu
Momentâneo	Afundamento de tensão	$16,6 \text{ ms} \leq \Delta t \leq 3$ s	$0,1 \text{ pu} \leq V_{\text{int}} \leq 0,9$ pu
	Elevação de tensão	$16,6 \text{ ms} \leq \Delta t \leq 3$ s	$V_{\text{int}} \geq 1,1$ pu
	Interrupção	$3 \text{ s} \leq \Delta t \leq 3$ min	$V_{\text{int}} \leq 0,1$ pu
Temporário	Afundamento de tensão	$3 \text{ s} \leq \Delta t \leq 3$ min	$0,1 \text{ pu} \leq V_{\text{int}} \leq 0,9$ pu
	Elevação de tensão	$3 \text{ s} \leq \Delta t \leq 3$ min	$V_{\text{int}} \geq 1,1$ pu

Na norma americana (IEEE, 2019), as VTCD são denominadas de *short duration root-means-square (RMS) variation* e os termos *sag*, *swell* e *interruption* referem-se aos afundamentos de tensão, elevações de tensão e interrupções de tensão, respectivamente. A norma americana define a intensidade e a duração da mesma forma que a norma brasileira, porém, a classificação é realizada conforme apresentada na Tabela 4<sup>1</sup>.

Tabela 4 – Classificação das VTCD para a norma americana (IEEE, 2019).

Classificação	Denominação	Duração ( $\Delta t$ )	Intensidade ( $V_{\text{int}}$ )
Instantâneo	Afundamento de tensão	$8,8 \text{ ms} \leq \Delta t \leq 500$ ms	$0,1 \leq V_{\text{int}} \leq 0,9$ pu
	Elevação de tensão	$8,8 \text{ ms} \leq \Delta t \leq 500$ ms	$1,1 \text{ pu} \leq V_{\text{int}} \leq 1,8$ pu
	Interrupção	$8,8 \text{ ms} \leq \Delta t \leq 3$ s	$V_{\text{int}} \leq 0,1$ pu
Momentâneo	Afundamento de tensão	$500 \text{ ms} \leq \Delta t \leq 3$ s	$0,1 \text{ pu} \leq V_{\text{int}} \leq 0,9$ pu
	Elevação de tensão	$500 \text{ ms} \leq \Delta t \leq 3$ s	$1,1 \text{ pu} \leq V_{\text{int}} \leq 1,4$ pu
	Interrupção	$3 \text{ s} \leq \Delta t \leq 1$ min	$V_{\text{int}} \leq 0,1$ pu
Temporário	Afundamento de tensão	$3 \text{ s} \leq \Delta t \leq 1$ min	$0,1 \text{ pu} \leq V_{\text{int}} \leq 0,9$ pu
	Elevação de tensão	$3 \text{ s} \leq \Delta t \leq 1$ min	$1,1 \leq V_{\text{int}} \leq 1,2$ pu

Na norma europeia (EN-50160, 2019), as VTCD são denominadas de *rapid voltage changes* e os termos *dip*, *overvoltage* e *interruption* referem-se aos afundamentos de tensão, elevações de tensão e interrupções de tensão, respectivamente. A duração do evento segue o mesmo princípio

<sup>1</sup> Termos traduzidos para a língua portuguesa

das normas brasileira e americana, porém, a intensidade é definida como a diferença entre  $V_{\text{ref}}$  e  $V_{\text{res}}$  em relação à  $V_{\text{ref}}$ , sendo em valor por unidade ou em porcentagem, conforme apresentada nas Equações (4) e (5), respectivamente. A classificação em termos de intensidade e duração da norma europeia é apresentada na Tabela 5 <sup>2</sup>.

$$V_{\text{int}} = \frac{V_{\text{ref}} - V_{\text{res}}}{V_{\text{ref}}}(\text{pu}) \text{ ou} \quad (4)$$

$$V_{\text{int}}(\%) = \frac{V_{\text{ref}} - V_{\text{res}}}{V_{\text{ref}}} \times 100(\%). \quad (5)$$

Tabela 5 – Classificação das VTCD para a norma europeia (EN-50160, 2004).

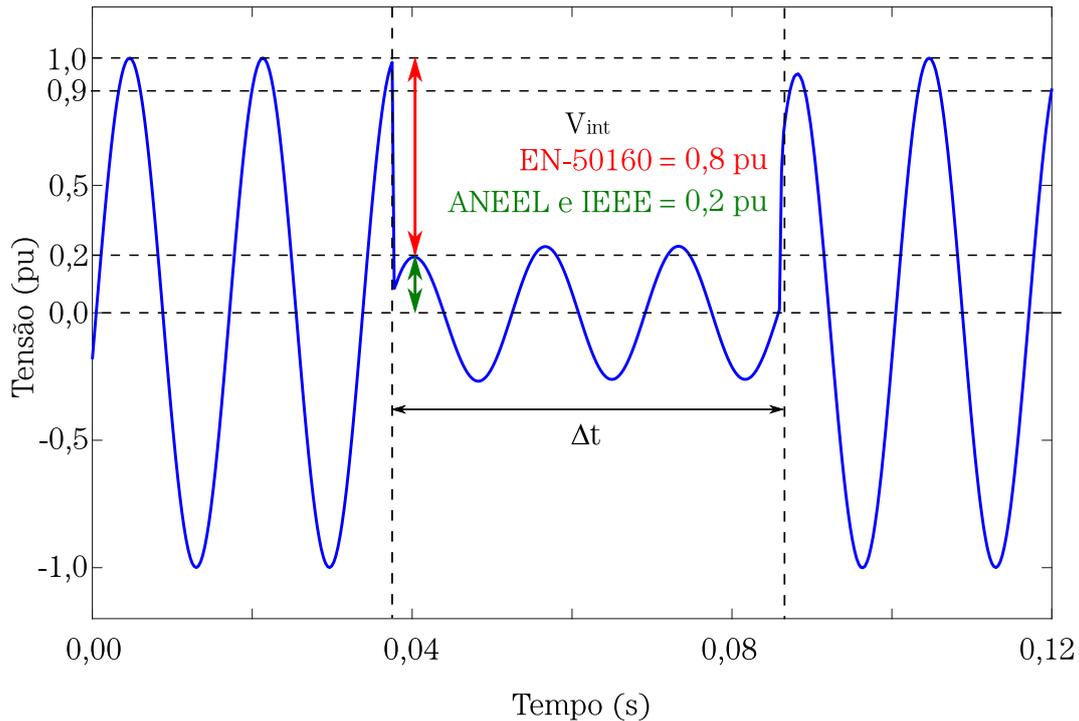
Classificação	Denominação	Duração ( $\Delta t$ )	Intensidade ( $V_{\text{int}}$ )
Curta duração	Interrupção	$\Delta t \leq 3\text{min}$	$V_{\text{int}} \leq 0,01\text{pu}$
	Afundamento de tensão	$10 \text{ ms} \leq \Delta t \leq 1 \text{ min}$	$0,01 \leq V_{\text{int}} \leq 0,9 \text{ pu}$
	Elevação transitória	Não definido	$V_{\text{int}} \geq 1,1\text{pu}$
Temporário	Interrupção	$\Delta t \geq 3\text{min}$	$V_{\text{int}} \leq 0,01\text{pu}$
	Elevação temporária	Não definido	$V_{\text{int}} \geq 1,1\text{pu}$

Para exemplificar a classificação em termos de intensidade e duração das normas brasileira, americana e europeia, apresenta-se na Figura 2, um sinal senoidal de tensão após um curto-circuito entre 38 ms e 88 ms, período no qual ocorre um afundamento de tensão.

## 3.2 Características das VTCD

Usualmente, as VTCD são decorrentes de curtos-circuitos, energização de transformadores, chaveamentos de cargas pesadas, como também, sistemas de energização e desenergização. Na prática, as interrupções de tensão provocam danos maiores ao cliente e sua origem está normalmente relacionada à própria instalação do cliente. As elevações e os afundamentos de tensão são mais frequentes e podem ser provocados por falhas a alguns quilômetros de distância do local no qual foram observados (Bollen, 2000). Durante o evento de um curto-circuito, por exemplo, podem ocorrer em algumas regiões: i) um afundamento de tensão na fase sob falta; ii) uma interrupção de tensão nas linhas à jusante da falta; iii) uma elevação de tensão nas linhas sãs (Dugan et al., 2004).

<sup>2</sup> Termos traduzidos para a língua portuguesa

Figura 2 –  $V_{\text{int}}$  e  $\Delta t$  para as normas ANEEL (2018), IEEE (2019) e EN-50160 (2019).

Fonte - Autoria própria.

As VTCD são caracterizadas por sua intensidade, duração e presença de componentes de alta frequência em instantes específicos. Durante um evento que provocou VTCD, o sinal de tensão apresenta períodos transitórios até atingir um valor remanescente. No caso particular de um curto-circuito, os períodos transitórios estão relacionados ao início e ao final de uma falta, por exemplo.

A intensidade das VTCD pode apresentar valores diferentes quando a duração do evento é próxima a um ciclo do sinal. Durante esse período, os equipamentos de medição identificam tensões remanescentes que dependem do instante no qual a amostra é registrada. Na prática, a duração das VTCD está diretamente relacionada à sua causa. No caso da ocorrência de curtos-circuitos, o término do evento se dá quando o sistema de proteção atua. Dependendo do equipamento de proteção utilizado, o tempo de extinção se dá normalmente entre (Bollen, 2000):

- 200 ms e 2000 ms para SDEE protegidos por relés de sobrecorrente;
- 50 ms e 500 ms para os sistemas de transmissão protegidos por relés de distância;
- 100 ms e 300 ms para os sistemas de transmissão protegidos por relés diferenciais.

### 3.3 Métodos de detecção e classificação de VTCD

Na busca por análises cada vez mais precisas dos efeitos no sistema decorrentes das VTCD, a análise do estado da arte mostra que o uso cada vez maior de ferramentas matemáticas nos equipamentos de medição, as quais incluem as características das VTCD, tem se tornado essencial para reduzir o tempo no qual os equipamentos do consumidor estão sob condições anormais de operação. Nesse contexto, destacam-se aqui, o uso da TWD e o método tradicional baseado no valor RMS.

#### 3.3.1 Valor RMS

O valor RMS é uma ferramenta matemática utilizada para quantificar intensidades variantes no tempo. No contexto dos SEP, grandezas variáveis podem ser representadas por seu valor RMS, sendo equivalente a uma intensidade contínua capaz de transferir a mesma potência para uma carga. Em termos de forma de onda de tensão, o valor RMS de tensão ( $V_{\text{rms}}$ ) é calculado conforme a Equação (6):

$$V_{\text{rms}}(k) = \sqrt{\frac{C}{N} \sum_{i=k-\frac{N}{C}+1}^k V_i^2}, \quad (6)$$

sendo:  $N$ , o número de amostras por ciclo;  $C$ , o tamanho da janela de cálculo;  $V_i$ , a amostra  $i$  do sinal de tensão; e  $k$ , a amostra do valor eficaz.

De acordo com a Equação (6), algumas aproximações podem ser aplicadas para o cálculo do valor eficaz, isto é, o cálculo a cada ciclo ( $k = N, 2N, 3N \dots$ ), para cada meio ciclo ( $k = \frac{N}{2}, N, 3\frac{N}{2} \dots$ ) ou amostra por amostra ( $k = 1, 2, 3 \dots$ ). Além disso, o tamanho da janela pode ser de um ciclo ( $C = 1$ ) ou meio ciclo ( $C = 2$ ), visto que para valores menores de  $C$ , oscilações com frequência duas vezes maior que a do sinal original são produzidas (Bollen, 2000). Por fim, o número de amostras por ciclo também pode ser modificado de acordo com a taxa de amostragem do conversor analógico/digital (A/D) utilizado pelo medidor de QEE.

#### 3.3.2 Transformada *Wavelet* Discreta (TWD)

Normalmente, os medidores de QEE medem o parâmetro de tensão, a partir do cálculo do valor eficaz, considerando um valor a cada ciclo e uma janela de cálculo de um ciclo do sinal.

Quando se deseja incluir a presença de transitórios para a classificação de distúrbios no SDEE, uma alternativa proposta recentemente foi o uso da TWD.

A formulação matemática da TWD foi inicialmente introduzida na versão contínua, porém, a sua popularidade se deu após o desenvolvimento da versão discreta, onde se destacam os trabalhos de Daubechies (1992) e Mallat (1989), com este último propondo um algoritmo rápido e eficiente para o cálculo da TWD via uso de filtros passa-baixa e passa-alta, os quais estão representados nas Equações (7) e (8):

$$c_j = \sum_n g(n - 2k)c_{j-1}(n), \quad (7)$$

$$d_j = \sum_n h(n - 2k)c_{j-1}(n), \quad (8)$$

sendo:  $c_j$  e  $d_j$ , os coeficientes de aproximação e detalhe da escala  $j$ , respectivamente;  $g(k)$  e  $h(k)$ , os filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente;  $k$ , o número da amostra;  $n$ , o número total de amostras (Costa, 2010).

Dependendo da *wavelet*-mãe escolhida, o número de coeficientes  $g(k)$  e  $h(k)$  pode ser modificado. Atualmente, uma das *wavelet*-mãe mais utilizadas tem sido a Daubechies 4 (db4), em particular na detecção e classificação de eventos transitórios (Santos, 2016), a qual possui quatro coeficientes para cada filtro. As Equações (7) e (8), reescritas em termos dos coeficientes da primeira escala ( $j=1$ ) da db4 na forma matricial, são apresentadas nas Equações (9) e (10):

$$\begin{bmatrix} c_1(1) \\ c_1(2) \\ c_1(3) \\ \vdots \\ c_1(k/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(3) & g(4) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & g(1) & g(2) \\ g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g(1) & g(2) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(k) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} d_1(1) \\ d_1(2) \\ d_1(3) \\ \vdots \\ d_1(k/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(3) & h(4) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & h(1) & h(2) \\ h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h(1) & h(2) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(k) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

sendo:  $g(1) = -h(4) = 0,483$ ;  $g(2) = h(3) = 0,836$ ;  $g(3) = -h(2) = 0,224$ ;  $g(4) = h(1) = -0,129$ ;  $k$ , o número de amostras do sinal  $x$ .

Infere-se então, que a TWD representa um processo de filtragem digital, seguido de uma operação de subamostragem por um fator de dois. Como resultado, o número de amostras dos coeficientes de detalhe e aproximação ( $\frac{k}{2}$ ) é igual à metade das amostras do sinal original ( $k$ ). Na primeira escala, os coeficientes de aproximação ( $c_1$ ) apresentam um espectro de frequência de 0 a  $\frac{f_s}{4}$ , enquanto que os coeficientes de detalhe apresentam um espectro de  $\frac{f_s}{4}$  a  $\frac{f_s}{2}$ , sendo  $f_s$ , a frequência de amostragem do sinal (Costa, 2010).

Quando se deseja manter o mesmo número de amostras do sinal original, uma opção é o uso da TWDR, a qual não utiliza o processo de subamostragem. A TWDR é uma transformada invariante no tempo e pode ser aplicada a qualquer número de amostras, enquanto que a TWD requer preferencialmente, que o número de amostras seja uma potência de dois.

O processo de obtenção dos coeficientes de aproximação ( $c'_1$ ) e de detalhe ( $d'_1$ ) da TWDR ocorre de modo semelhante ao da TWD, diferenciando apenas na matriz dos filtros:

$$\begin{bmatrix} c'_1(1) \\ c'_1(2) \\ c'_1(3) \\ c'_1(4) \\ \vdots \\ c'_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g'(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & g'(1) & g'(2) & g'(3) \\ g'(3) & g'(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & g'(1) & g'(2) \\ g'(2) & g'(3) & g'(4) & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & g'(1) \\ g'(1) & g'(2) & g'(3) & g'(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & g'(1) & g'(2) & g'(3) & g'(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ \vdots \\ x(k) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} d'_1(1) \\ d'_1(2) \\ d'_1(3) \\ d'_1(4) \\ \vdots \\ d'_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h'(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & h'(1) & h'(2) & h'(3) \\ h'(3) & h'(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & g'(1) & h'(2) \\ h'(2) & h'(3) & h'(4) & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & h'(1) \\ h'(1) & h'(2) & h'(3) & h'(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h'(1) & h'(2) & h'(3) & h'(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ \vdots \\ x(k) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

sendo:  $g'(1) = -h'(4) = 0,341$ ;  $g'(2) = h'(3) = 0,593$ ;  $g'(3) = -h'(2) = 0,158$ ;  $g'(4) = h'(1) = -0,091$ .

Análise do estado da arte mostrou que os coeficientes de detalhe são utilizados na detecção de sinais de alta frequência. Entretanto, constatou-se que na prática, eles podem ser confundidos com ruídos normalmente encontrados no sistema elétrico. Com o objetivo de minimizar a influência dos ruídos, alguns autores (Costa, 2010; Santos, 2016) têm utilizado o conceito de energia dos coeficientes de detalhe. Outro fato importante que se constatou é que a energia dos coeficientes de aproximação está diretamente relacionada à intensidade do sinal, podendo ser utilizada na detecção das VTCD. Matematicamente, a energia dos coeficientes de aproximação ( $\xi_c$ ) e detalhe ( $\xi_d$ ) da primeira escala, são descritos conforme a seguir.

$$\xi_c(k) = \frac{C}{N} \sum_{i=k-\frac{N}{C}+1}^k c_1'^2(i). \quad (13)$$

$$\xi_d(k) = \frac{C}{N} \sum_{i=k-\frac{N}{C}+1}^k d_1'^2(i). \quad (14)$$

sendo:  $N$ ,  $C$ ,  $i$  e  $k$ , os mesmos parâmetros descritos no cálculo da valor eficaz.

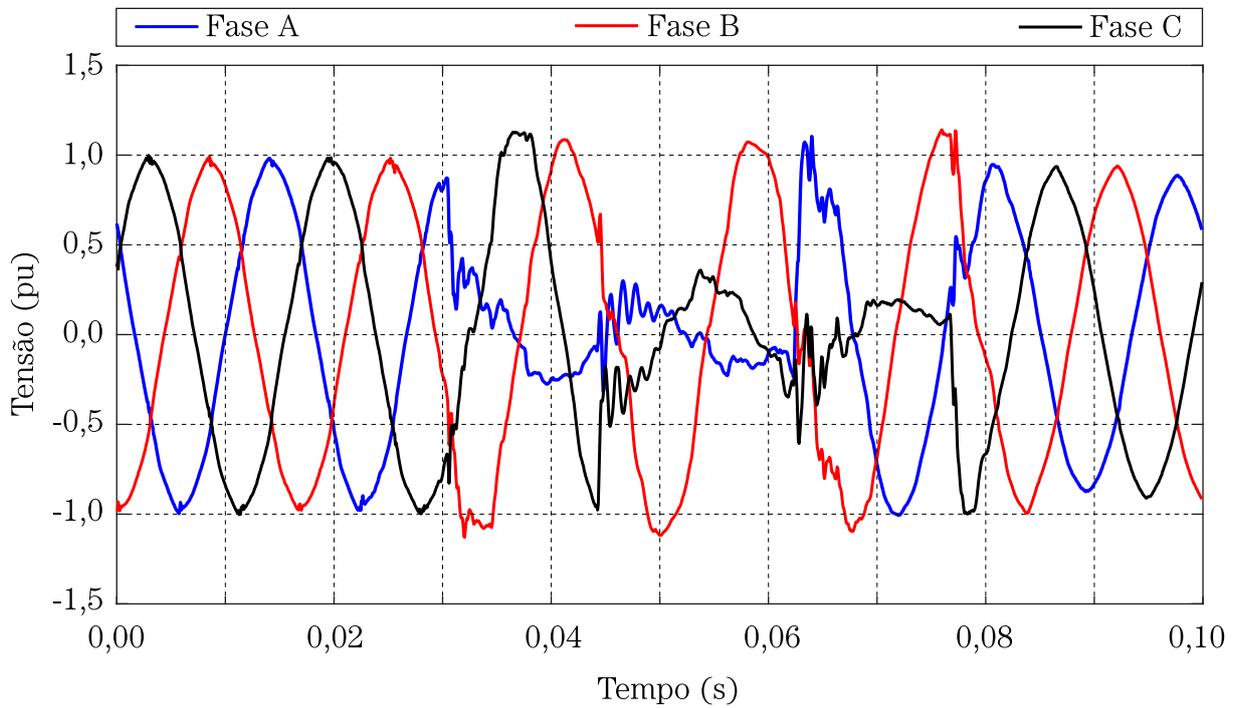
### 3.3.3 Detecção e classificação de VTCD

É fato que a detecção e a classificação das VTCD está relacionada com os parâmetros da ferramenta matemática utilizada. Assim, dependendo da escolha da quantidade de registros por ciclo, do tamanho da janela de cálculo e do número de amostras por ciclo, respostas distintas de intensidade e duração para as VTCD podem ser obtidas (Thakur e Singh, 2012).

Para ilustrar esse fato, apresentam-se na Figura 3, três sinais reais obtidos de um medidor de QEE, com frequência fundamental de 60 Hz e uma taxa de amostragem de 15360 Hz (256 amostras por ciclo). Os sinais representam um curto-circuito que se inicia na fase A e em seguida, evolui para a fase B. Como resultado, a fase C apresenta uma elevação de tensão até o final do evento. Na Figura 4, são apresentados os valores eficazes para a fase A, registrados a cada ciclo e considerando dois números de amostras por ciclo: 8 amostras por ciclo e 256 amostras por ciclo. Para atender ao teorema da amostragem e evitar o efeito *aliasing* durante a reconstrução do sinal de 8 amostras por ciclo, é necessária a utilização de um filtro digital passa-baixa com frequência de corte de até 240 Hz ( $f_s/2$ ). Logo, foi utilizado um filtro passa-baixa FIR com

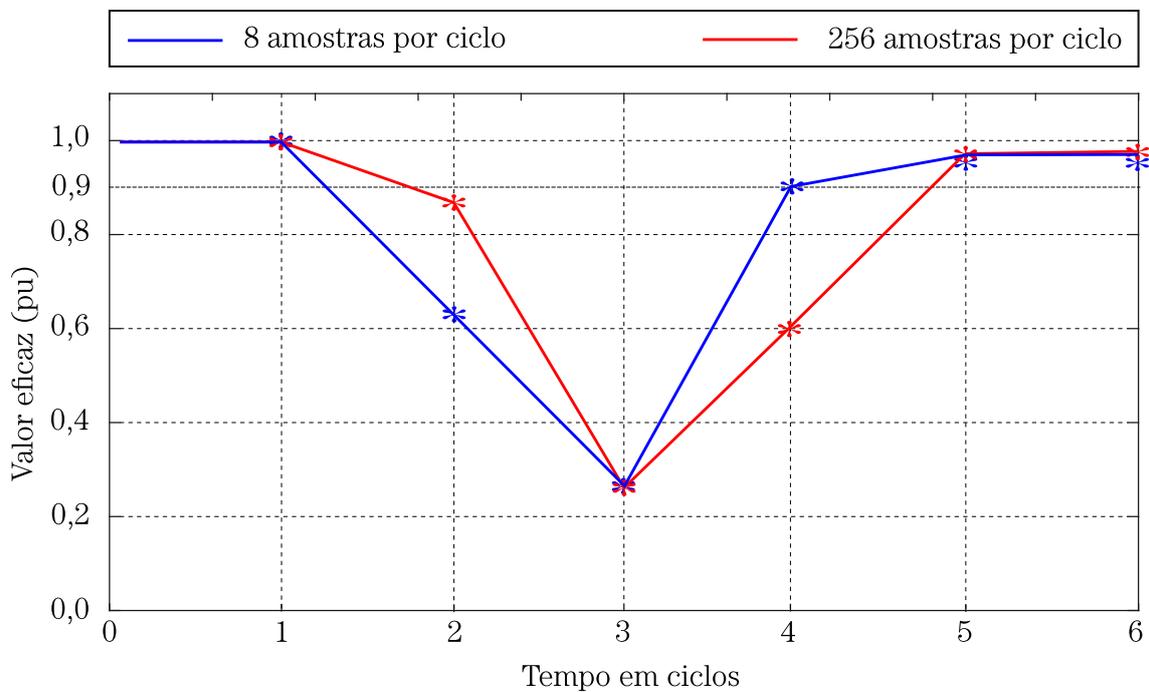
256 coeficientes, frequência de corte de 180 Hz e banda de passagem de 100 Hz no sinal de 256 amostras por ciclo. Em seguida, o sinal foi reamostrado para 8 amostras por ciclo.

Figura 3 – Sinais reais de VTCD.



Fonte - Autoria própria.

Figura 4 – Valor eficaz da fase A com a variação no número de amostras.

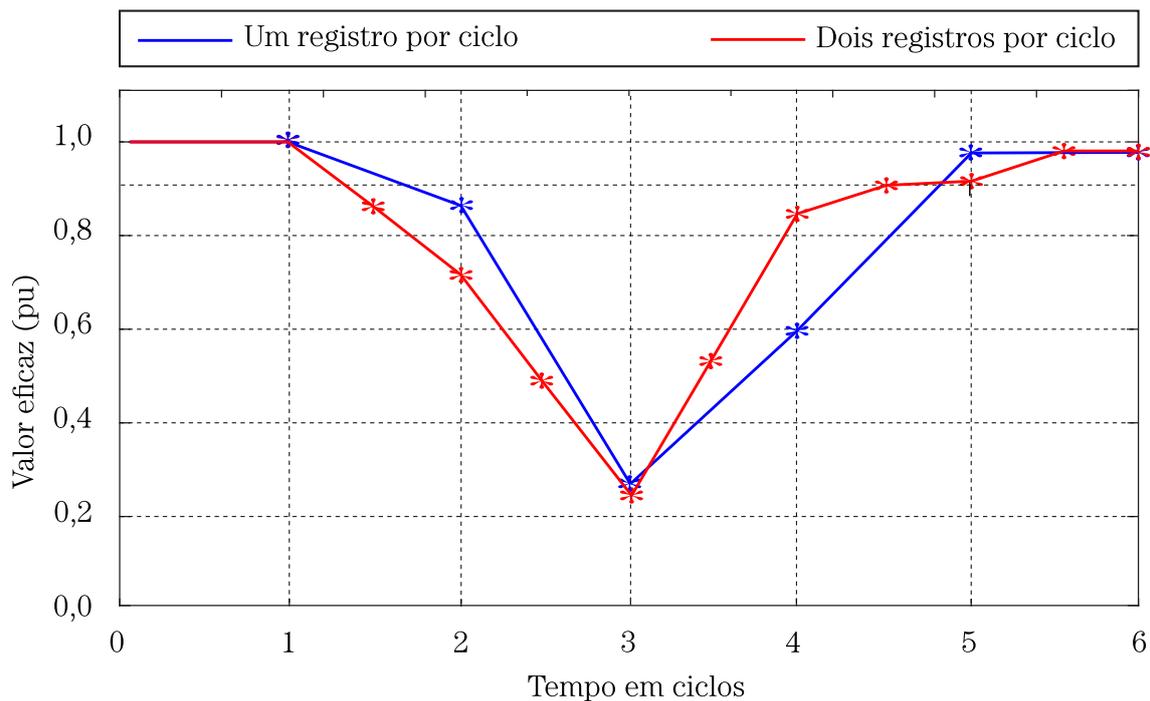


Fonte - Autoria própria.

Os valores eficazes apresentados na Figura 4 apresentam a mesma duração (3 ciclos),

porém, com tensões remanescentes diferentes. Uma das limitações desse tipo de registro é que a duração do sinal será sempre múltiplo de um ciclo e as tensões remanescentes podem apresentar erros maiores à medida que a duração e o número de amostras por ciclo diminuem (Junqueira et al., 2020a). Visando obter uma resposta mais precisa, o IEEE (2019) recomendou o uso do valor eficaz, com janela de um ciclo e um valor registrado a cada meio ciclo do sinal. Para ilustrar, apresenta-se na Figura 5, o valor eficaz da fase A da Figura 3 para valores registrados a cada ciclo e segundo recomendação do IEEE (2019).

Figura 5 – Valor eficaz da fase A com a variação no número de registros por ciclo.

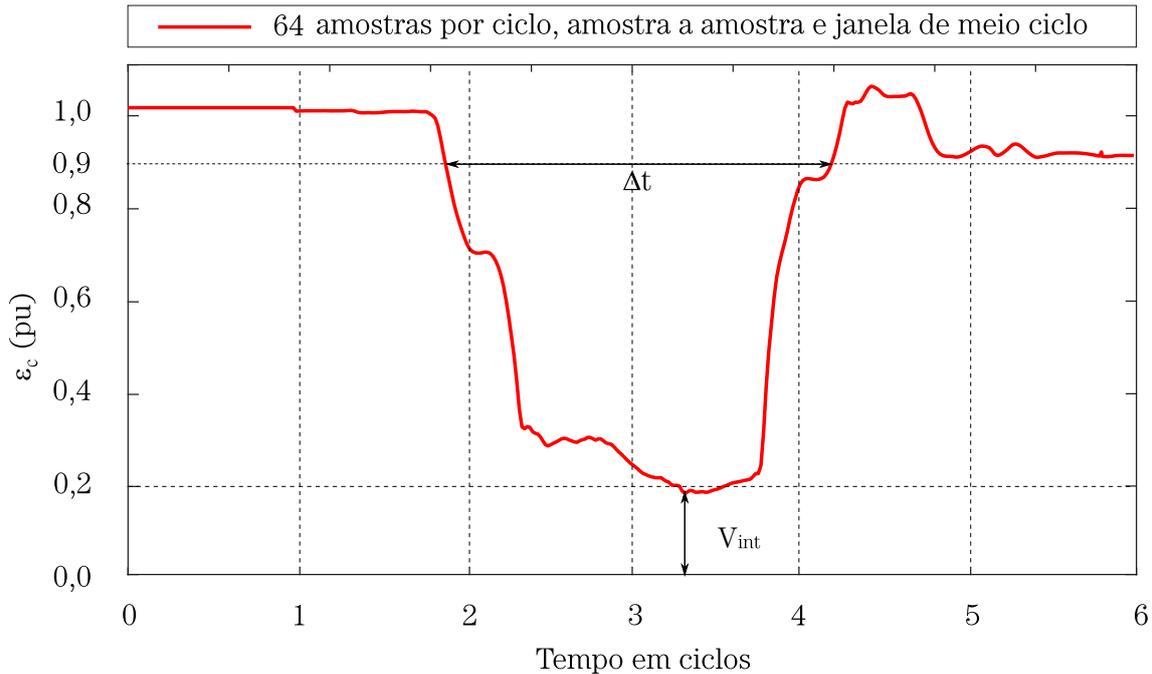


Fonte - Autoria própria.

Como se vê, os sinais apresentados na Figura 5, apresentam intensidade e durações diferentes dependendo do número de registros. De forma geral, um número de dois registros por ciclo apresenta uma resposta mais rápida para detectar o início e o final de uma VTCD, além de ser mais sensível à variação de tensão (Thakur e Singh, 2012).

Para aplicações de distúrbios transitórios de curta duração em tempo real, como as VTCD, alguns autores (Santos, 2016; Lima, 2021) propuseram o uso de ferramentas matemáticas considerando o esforço computacional e mantendo as características principais do distúrbio. Como exemplo, apresenta-se na Figura 6, a energia dos coeficientes de aproximação do sinal da fase A, considerando 64 amostras por ciclo, uma janela com meio ciclo e calculada amostra por amostra.

Figura 6 – Energia dos coeficientes de aproximação para a fase A do sinal da Figura 3.



Fonte - Autoria própria.

Outro fato importante a ser destacado diz respeito às informações obtidas pelo sistema de monitoramento, as quais podem apresentar erros relacionados aos transformadores de potencial (TP) ou aos próprios medidores que compõem esse sistema. Nesse contexto, induz-se que a minimização desses erros no cálculo da intensidade e da duração das VTCD, pode auxiliar na tomada de decisão dos operadores e na identificação dos prejuízos causados aos consumidores.

### 3.3.4 Períodos transitórios

Durante instantes específicos de um distúrbio transitório, como os curtos-circuitos, observa-se a presença de frequências mais elevadas que a fundamental, as quais podem estar relacionados com o início, evolução da falta ou atuação dos sistemas de proteção. Além disso, a detecção dessas frequências durante os períodos transitórios podem ser influenciados diretamente pelos parâmetros utilizados pela ferramenta matemática escolhida. Como exemplo, apresentam-se nas Figuras 7 e 8, a energia dos coeficientes de detalhe da fase A do sinal da Figura 3 (obtidos por filtros passa-alta) com a variação no número de amostras e no tamanho da janela de cálculo.

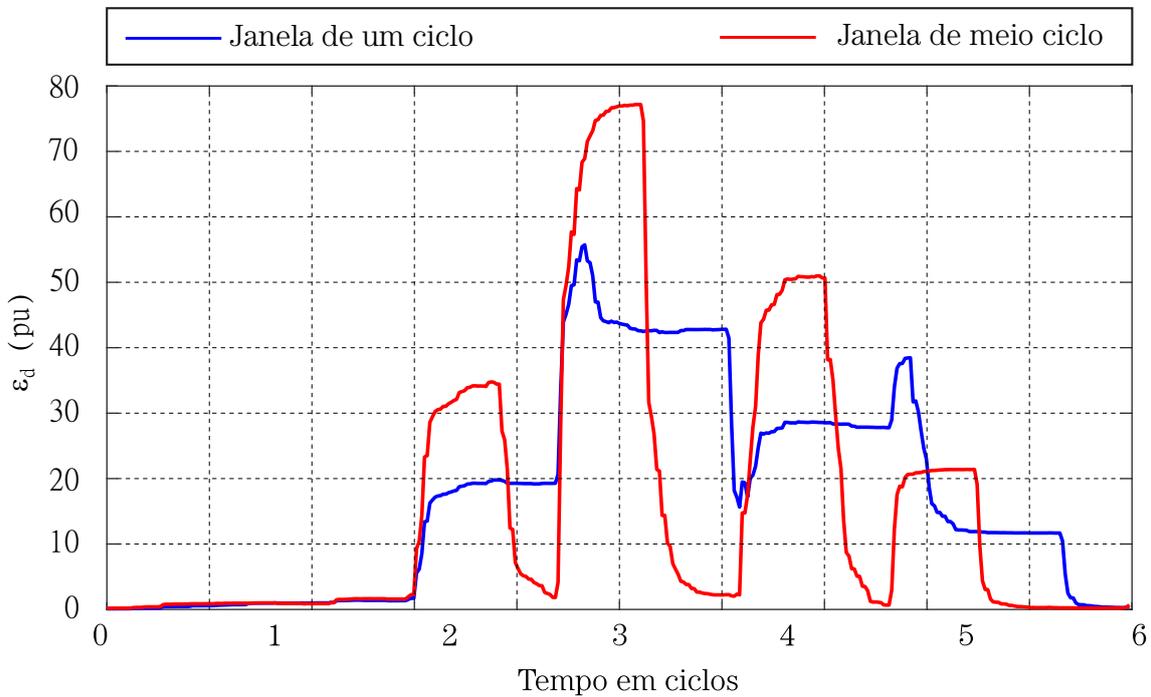
Como se vê, os valores obtidos para  $\xi_d$  da Figura 7 apresentam variações durante instantes específicos do curto-circuito, as quais estão relacionadas à utilização dos filtros passa-alta e dependendo do número de amostras por ciclo, podem apresentar resultados diferentes. No caso

Figura 7 –  $\xi_d$  com a variação do número de amostras por ciclo para a fase A do sinal da Figura 3.



Fonte - Autoria própria.

Figura 8 –  $\xi_d$  com a variação do tamanho da janela de cálculo para a fase A do sinal da Figura 3.



Fonte - Autoria própria.

de um sinal com 64 amostras por ciclo, por exemplo, o filtro é sensibilizado por frequências entre 960 Hz ( $\frac{f_s}{4}$ ) e 1920 Hz ( $\frac{f_s}{2}$ ) para a primeira escala de  $\xi_d$ . A análise de registros oscilográficos e

simulação em *softwares* de transitórios eletromagnéticos realizadas em Junqueira et al. (2020a), indicou o uso dessa faixa de frequência para a identificação de períodos transitórios durante os curtos-circuitos.

Observa-se também que o cálculo da  $\xi_d$  da Figura 8 para a janela de um ciclo apresenta um aumento nas primeiras amostras, seguido de um período de um ciclo com valores elevados. Na prática, isso pode dificultar a detecção de eventos transitórios intercalados por durações menores que um ciclo, como a falta evolutiva da Figura 3. Além disso, o uso da janela de meio ciclo resultou em um número maior de períodos transitórios (quatro períodos), os quais são relacionados pela ocorrência da falta na fase A (a primeira e a última elevação), seguido da influência da evolução da falta para a fase B (a segunda e a terceira elevação).

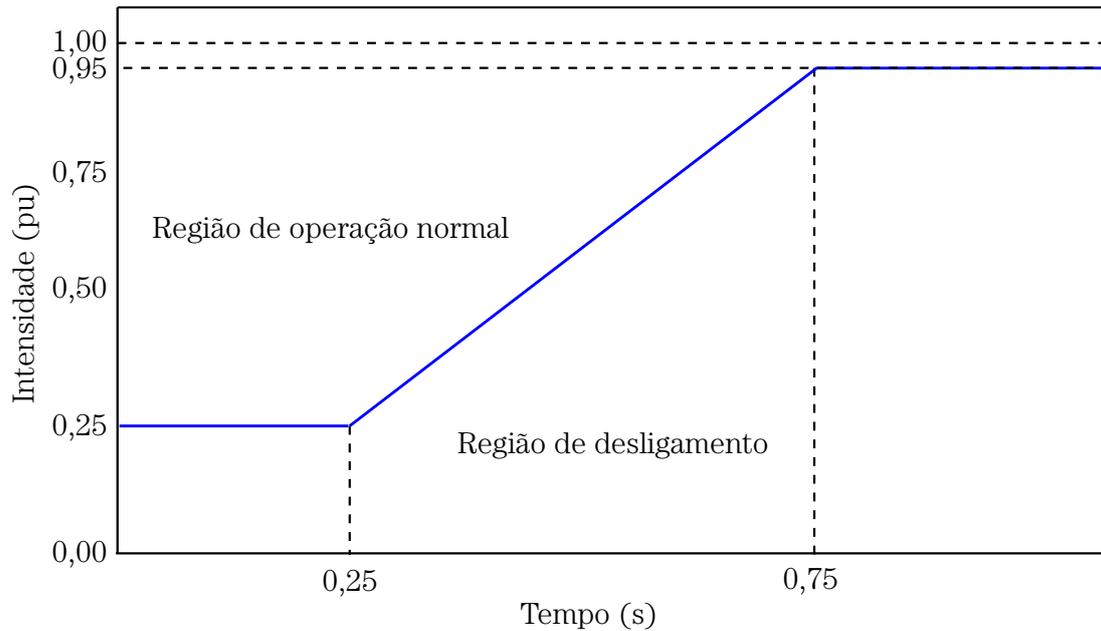
### 3.4 Sensibilidade dos equipamentos elétricos

Na prática, os equipamentos elétricos são produzidos para operarem com uma tensão de amplitude constante e igual ao valor de referência. Entretanto, quando a tensão está acima ou abaixo dos valores limites, a operação do equipamento pode ser interrompida, resultando em prejuízos financeiros ao consumidor.

Para identificar a sensibilidade dos equipamentos em relação às VTCD, uma série de testes é realizada para obtenção de curvas de tolerância. Um exemplo desse tipo de curva é apresentado na Figura 9, a qual representa uma subestação que alimenta uma linha de transmissão (Bollen, 2000). Como se vê, a região de operação normal é limitada a um valor de 0,25 pu por no máximo 0,25 s e a subestação deve operar normalmente com tensão mínima de 0,95 pu. Nesse sentido, qualquer valor abaixo da curva de tolerância, pode provocar desligamentos aos equipamentos do consumidor.

O conceito de curvas de tolerância de tensão foi proposto pela primeira vez por Thomas Key, em 1978, com o objetivo de analisar a tolerância de vários computadores de instalações militares em relação às VTCD. Nessa época, a curva foi denominada de CBEMA (*Computer Business Equipment Manufacturer Association*), a qual apresentava os limites mínimos e máximos que a tensão de alimentação poderia variar, sem que os computadores sofressem desligamentos ou algum dano (Figura 10). A curva analisava tanto a intensidade quanto a duração e era dividida

Figura 9 – Exemplo de curva de tolerância para subestações.



Fonte - Bollen (2000).

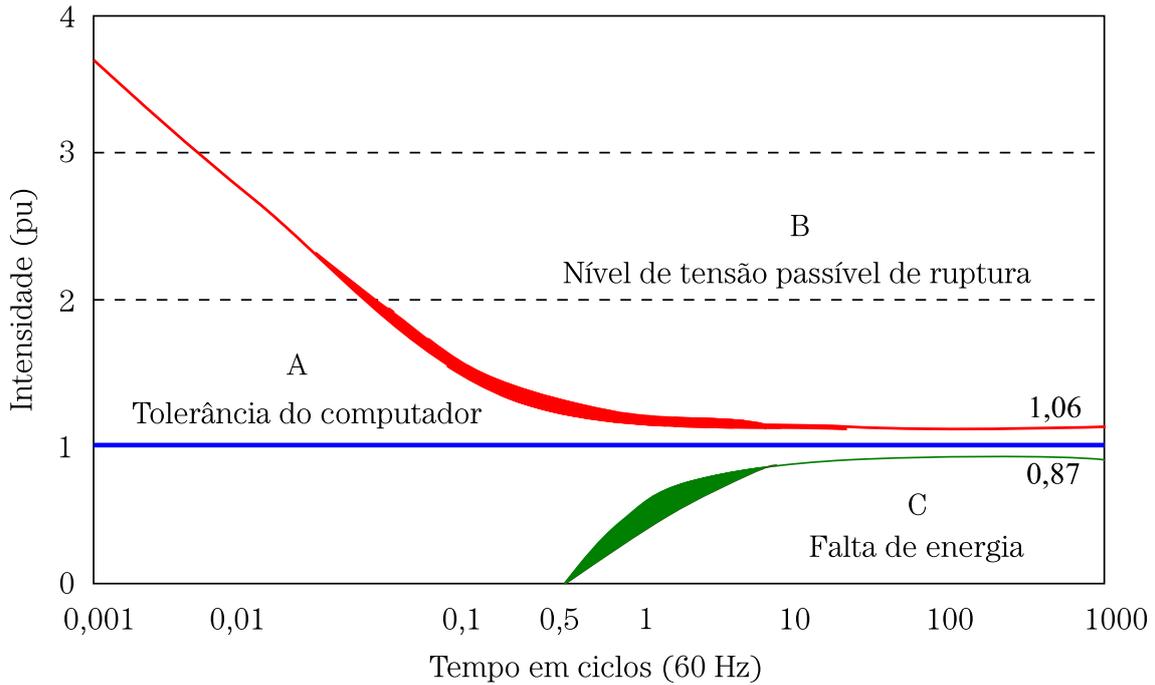
em três regiões:

- Região A - região de operação normal: os equipamentos não sofrem alteração no seu funcionamento;
- Região B - região de susceptibilidade: probabilidade de ocorrência de danos permanentes;
- Região C - região de sensibilidade: probabilidade de ocorrência de desligamentos.

Em 2000, algumas modificações foram realizadas na faixa de amplitude em relação à CBEMA como, por exemplo, a duração em segundos. A nova curva recebeu o nome de ITI (*Information Technology Industry*) e passou a ser a mais indicada na análise de sensibilidade de equipamentos eletrônicos, a qual é apresentada na Figura 11.

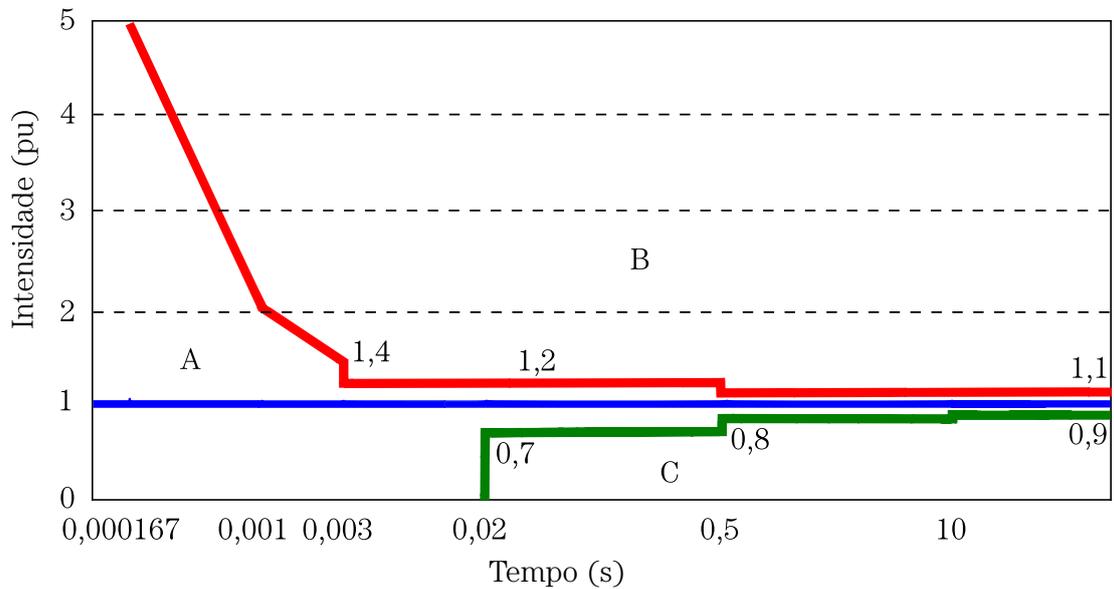
Apesar de não tratar do conceito de curva de tolerância, a IEC-61000-4-11 (2017) é a única norma que descreve como os testes de sensibilidade em relação aos afundamentos de tensão devem ser realizados. Essa norma define ainda, alguns valores de intensidade e duração para os testes. Um resumo das recomendações sugeridas pela IEC-61000-4-11 (2017) para realização dos testes é apresentado na Tabela 6.

Figura 10 – Curva CBEMA.



Fonte - ANSI/IEEE (1987).

Figura 11 – Curva ITI.



Fonte - ITIC (2000).

### 3.5 Monitoramento de VTCD

No Brasil, o monitoramento das VTCD é realizado por equipamentos, usualmente conhecidos por qualímetros, os quais são regulados pela ANEEL, conforme as seguintes premissas ANEEL (2018):

Tabela 6 – Testes sugeridos para afundamentos de tensão (IEC-61000-4-11, 2017).

Classe	Testes	
	Intensidade	Duração
1	De acordo com os requisitos dos equipamentos	
2	0 pu	meio ciclo
	0 pu	um ciclo
	0,7 pu	25 ciclos (50 Hz) ou 30 ciclos (60 Hz)
3	0 pu	meio ciclo
	0 pu	um ciclo
	0,4 pu	10 ciclos (50 Hz) ou 12 ciclos (60 Hz)
	0,7 pu	25 ciclos (50 Hz) ou 30 ciclos (60 Hz)
	0,8 pu	250 ciclos (50 Hz) ou 300 ciclos (60 Hz)

- Eventos simultâneos são agregados compondo um único evento (agregação de fases);
- Eventos consecutivos, menores que três minutos, no mesmo medidor, compõem um único evento (agregação temporal);
- Afundamentos de tensão e interrupções de tensão são tratados de forma diferente das elevações de tensão;
- O afundamento de tensão ou a interrupção com o menor  $V_{res}$  entre as fases caracterizarão o evento em um intervalo menor que três minutos;
- A elevação de tensão com o maior  $V_{res}$  caracterizará o evento em um intervalo menor que 3 minutos;
- A duração ocorrerá entre o início da primeira fase sob VTCD e o final da última fase sob VTCD.

Para se obter uma estimativa do desempenho do SEP em relação às VTCD, os distúrbios são registrados por equipamentos de medição por um período de tempo estabelecido. Para cada evento, um medidor registra as informações de intensidade e duração do sinal de tensão da rede. Um registro pode ser realizado considerando um único medidor, como também, vários medidores instalados e sincronizados.

O registro das VTCD é realizado considerando o uso de uma tabela que estratifica o fenômeno de acordo com a intensidade e duração. Para a ANEEL (2018), a tabela apresenta nove regiões de sensibilidade para diversas cargas instaladas no SDEE (Tabela 7). Para ilustrar,

apresenta-se na Figura 12, um exemplo de um afundamento de tensão, com as informações de  $V_{int}$ , da duração ( $\Delta t$ ) e a região de sensibilidade que o evento se encontra para a norma brasileira.

Tabela 7 – Divisão das VTCD de acordo com níveis de sensibilidade.

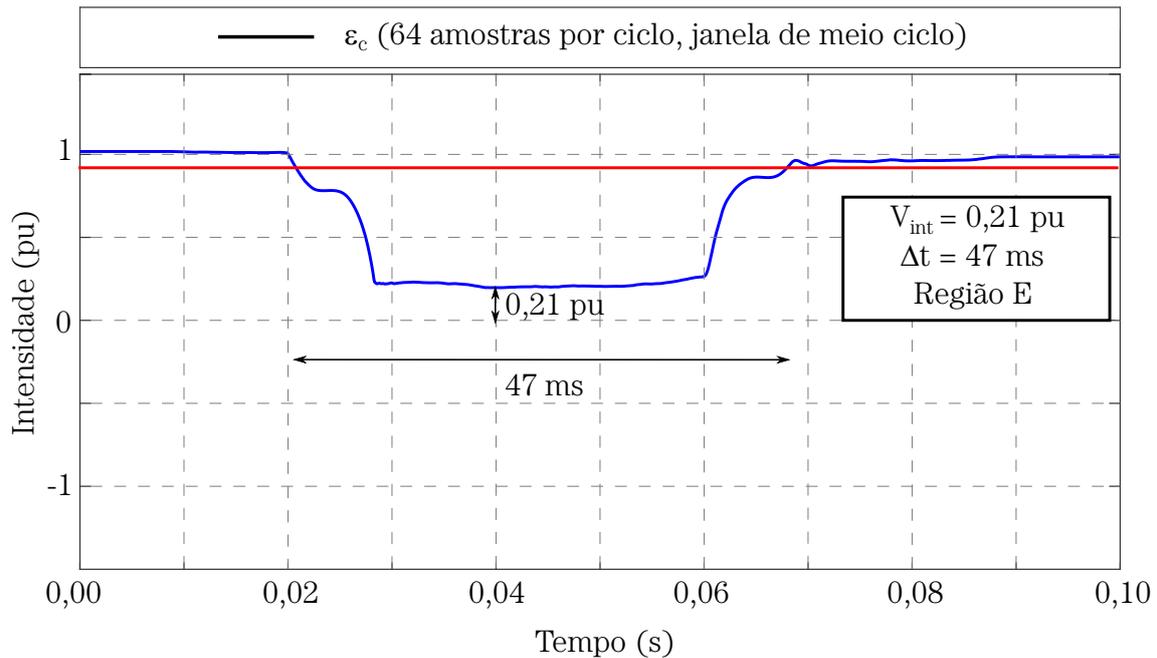
Intensidade (pu)	Duração						
	$16,67\text{ms} \leq t \leq 100\text{ms}$	$100\text{ms} \leq 300\text{ms}$	$300\text{ms} \leq 600\text{ms}$	$600\text{ms} \leq 1\text{s}$	$1\text{s} \leq 3\text{s}$	$3\text{s} \leq 1\text{min}$	$1\text{min} \leq 3\text{min}$
$V_{int} \geq 1,15$	Região H			Região I			
$1,10 \leq V_{int} \leq 1,15$							
$0,85 \leq V_{int} \leq 0,90$	Região A			Região G			
$0,80 \leq V_{int} \leq 0,85$							
$0,70 \leq V_{int} \leq 0,80$	Região B	Região D		Região F			
$0,60 \leq V_{int} \leq 0,70$							
$0,50 \leq V_{int} \leq 0,60$	Região C	Região D		Região F			
$0,40 \leq V_{int} \leq 0,50$							
$0,30 \leq V_{int} \leq 0,40$	Região E			Região F			
$0,20 \leq V_{int} \leq 0,30$							
$0,10 \leq V_{int} \leq 0,20$	Região E			Região F			
$V_{int} \leq 0,10$							

O monitoramento de um SDEE é importante para resolver os problemas relacionados às VTCD, entretanto, na prática, é difícil prever quando e onde irão acontecer a maioria dos eventos. Logo, um estudo detalhado do sistema é necessário para entender a origem e as consequências das VTCD.

### 3.6 Propagação de VTCD

Um dos modos para analisar as VTCD causadas por curtos-circuitos em um SDEE, é via estudo da propagação, a partir de um conjunto de cenários. Como exemplo, considera-se que uma tensão remanescente em uma barra  $B$  pode ser obtida durante um curto-circuito no local  $p$ . Com isso, é possível formar uma matriz de tensões remanescentes  $[V_{rem}]_{q \times l}$ , sendo:  $q$ , o número de cenários de curto-circuito;  $l$ , o número de barras do sistema. Cada posição da

Figura 12 – Exemplo da região de sensibilidade de um afundamento de tensão.



Fonte - Autoria própria.

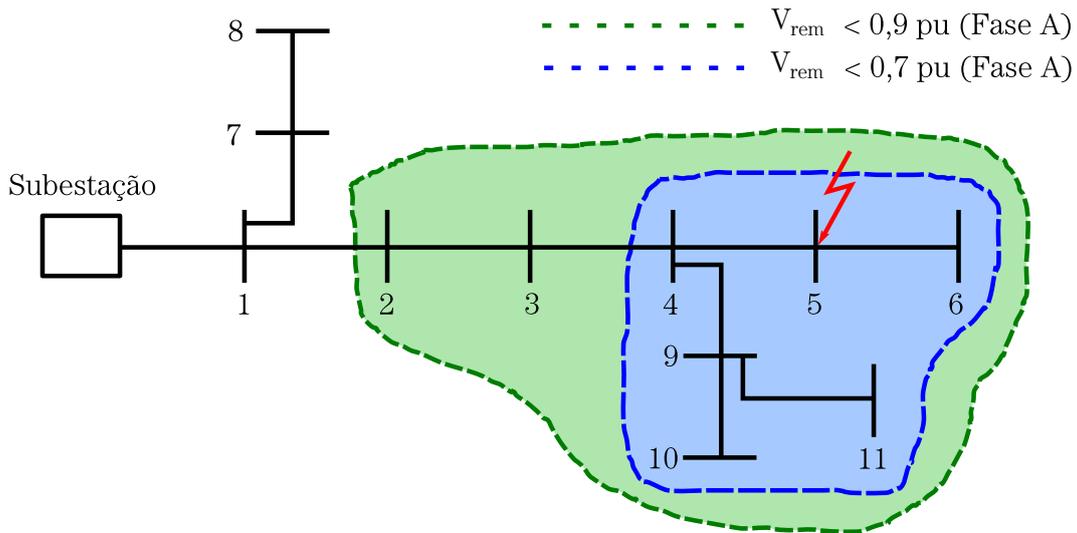
matriz é representada por uma tensão remanescente de uma barra para um cenário específico de curto-circuito (Olguin, 2005). Essas informações são úteis para identificar zonas que auxiliam a análise das VTCD no sistema, as quais são apresentadas a seguir.

### 3.6.1 Zona afetada

As zonas afetadas são definidas como as barras nas quais as tensões remanescentes excedem os limiares de detecção das VTCD, durante um curto-circuito em determinada localização (Olguin, 2005). Como exemplo, apresenta-se na Figura 13, um sistema de 11 barras após a ocorrência de um curto-circuito na fase A da barra 5. As zonas afetadas são destacadas em verde e azul, representando as barras nas quais as tensões remanescentes na fase A apresentaram valores menores que 0,9 pu e 0,7 pu, respectivamente.

Matematicamente, a zona afetada é obtida a partir da matriz  $[V_{rem}]_{q \times l}$ , analisando todas as colunas referentes à linha que representa um curto-circuito específico. Para o exemplo da Figura 13, a análise é realizada para a linha de  $[V_{rem}]_{q \times l}$  que representa o curto-circuito na barra 5 e as colunas referentes às barras destacadas na zona verde, apresentam tensões remanescentes menores que 0,9 pu.

Figura 13 – Zona afetada por um curto-circuito na fase A da barra 5.

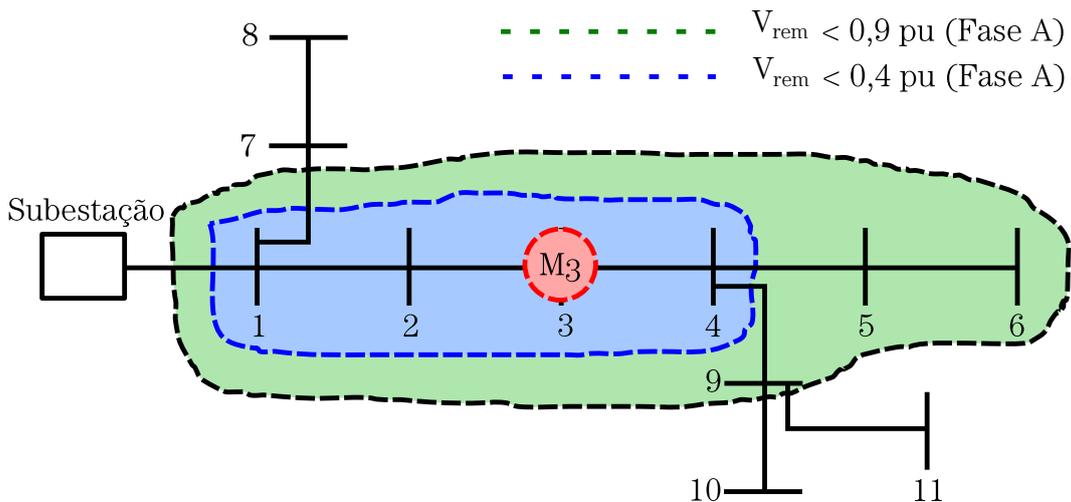


Fonte - Autoria própria.

### 3.6.2 Zona exposta

As zonas expostas são definidas como as regiões nas quais a ocorrência de um curto-circuito, causam VTCD em determinada barra do sistema (Olguin, 2005). Para ilustrar, apresenta-se na Figura 14, o mesmo sistema da Figura 13, destacando as zonas nas quais uma falta monofásica na fase A causa afundamentos de tensão com valores menores que 0,9 pu (verde) e 0,4 pu (azul), em um medidor instalado na barra 3 ( $M_3$ ).

Figura 14 – Zona exposta para um medidor na barra 3.



Fonte - Autoria própria.

Matematicamente, a zona exposta é também obtida a partir da  $[V_{rem}]_{q \times l}$ , via análise das tensões remanescentes da coluna que representa uma barra específica. Para o exemplo da Figura

12, a análise da coluna da  $[V_{rem}]_{q \times l}$  referente à barra 3 para todos cenários de curto-circuito avaliados, indicariam as zonas expostas para um medidor instalado nessa barra.

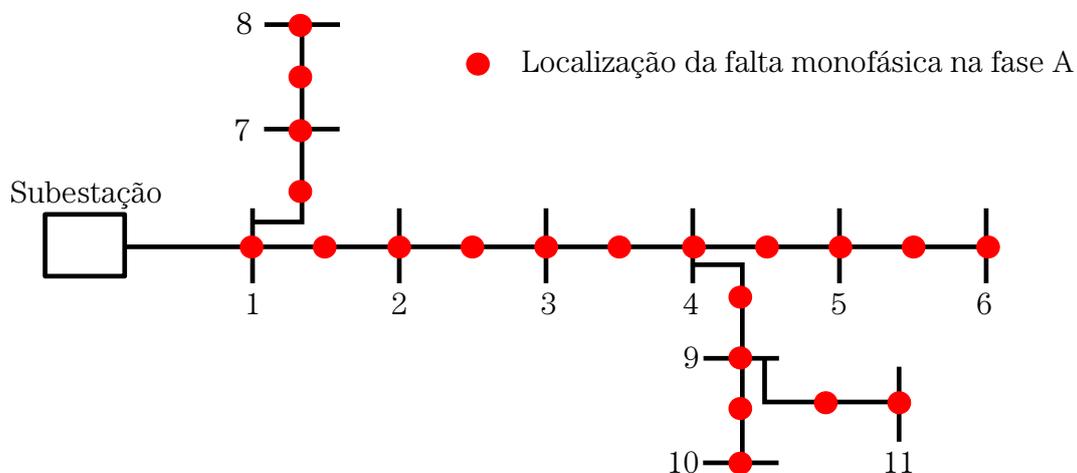
### 3.6.3 Método das posições de falta

Devido à dificuldade de obter registros reais de eventos, uma prática usual é o uso de registros simulados. No caso das VTCD causadas por curtos-circuitos, o IEEE (2014) adota o método das posições de falta, sendo a precisão da análise diretamente relacionada ao número de eventos simulados. Para o estudo das VTCD, um modo de fazer essa análise é via  $[V_{rem}]$ , na qual três passos principais são necessários:

1. Determinar o sistema elétrico a ser analisado;
2. Escolher os parâmetros de curto-circuito;
3. Registrar as tensões remanescentes em todas as barras do sistema.

Como exemplo, considera-se o mesmo sistema da Figura 14 (passo 1). As localizações de falta escolhidas foram em todas as barras e no meio das linhas (passo 2), como apresentado na Figura 15. Para cada local de falta, uma tensão remanescente pode ser obtida para todas as barras (passo 3). Com isso, é possível identificar as zonas que ocorreram VTCD, como apresentado na Tabela 8.

Figura 15 – Passos 1 e 2 para a formação da  $[V_{rem}]$ .



Fonte - Autoria própria.

Tabela 8 –  $[V_{\text{rem}}]_{21 \times 11}$  para as posições de falta da Figura 15.

Posição de falta	Tensões remanescentes nas barras										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Barra 1	0,60	0,44	0,30	0,26	0,01	0,01	0,39	0,32	0,01	0,01	0,01
Linha 1-2	0,63	0,37	0,25	0,22	0,01	0,01	0,22	0,18	0,01	0,01	0,01
Barra 2	0,67	0,22	0,26	0,01	0,01	0,01	0,31	0,24	0,01	0,01	0,01
Linha 2-3	0,71	0,32	0,28	0,01	0,01	0,01	0,35	0,31	0,01	0,01	0,01
Barra 3	0,72	0,37	0,12	0,01	0,01	0,01	0,38	0,33	0,01	0,01	0,01
Linha 3-4	0,74	0,42	0,30	0,01	0,01	0,01	0,42	0,37	0,01	0,01	0,01
Barra 4	0,77	0,49	0,35	0,15	0,01	0,01	0,46	0,40	0,01	0,01	0,01
Linha 4-5	0,79	0,53	0,41	0,28	0,01	0,01	0,50	0,46	0,01	0,01	0,01
Barra 5	0,81	0,59	0,47	0,33	0,12	0,01	0,58	0,52	0,01	0,01	0,01
Linha 5-6	0,85	0,64	0,52	0,40	0,19	0,01	0,62	0,58	0,01	0,01	0,01
Barra 6	0,86	0,69	0,60	0,45	0,26	0,14	0,67	0,61	0,01	0,01	0,01
Linha 1-7	0,63	0,48	0,30	0,25	0,22	0,17	0,42	0,38	0,13	0,12	0,12
Barra 7	0,68	0,40	0,35	0,31	0,27	0,20	0,12	0,01	0,15	0,14	0,10
Linha 7-8	0,74	0,47	0,42	0,35	0,30	0,21	0,18	0,01	0,17	0,16	0,12
Barra 8	0,76	0,51	0,48	0,43	0,39	0,36	0,22	0,12	0,19	0,18	0,14
Linha 4-9	0,71	0,58	0,45	0,34	0,31	0,27	0,55	0,52	0,01	0,01	0,01
Barra 9	0,77	0,63	0,52	0,40	0,28	0,21	0,61	0,57	0,12	0,01	0,01
Linha 9-10	0,91	0,78	0,70	0,64	0,40	0,35	0,80	0,76	0,19	0,01	0,01
Barra 10	0,93	0,84	0,78	0,73	0,47	0,42	0,85	0,82	0,25	0,12	0,01
Linha 9-11	0,95	0,91	0,83	0,76	0,51	0,48	0,91	0,87	0,33	0,18	0,01
Barra 11	0,96	0,92	0,87	0,81	0,58	0,54	0,94	0,91	0,36	0,22	0,12

A partir da Tabela 8, é possível formar uma matriz com tensões remanescentes na forma  $[V_{\text{rem}}]_{21 \times 11}$ , sendo: 21, o número de locais de falta e 11, o número de barras do sistema. Apesar de utilizar apenas o local de falta como parâmetro, as informações das três fases, a resistência de falta, o tipo de falta, o carregamento do sistema e o limiar de detecção também podem ser adicionados. Um detalhe importante é que a presença da geração distribuída, o tipo de sistema, a influência dos reguladores de tensão e os capacitores *shunt* podem modificar as zonas expostas e afetadas. Logo, os valores encontrados na  $[V_{\text{rem}}]$  dependem diretamente das características do sistema e dos curtos-circuitos.

### 3.7 Considerações Finais

Este capítulo teve como principal objetivo apresentar uma visão geral sobre as VTCD, destacando as características peculiares apresentadas durante a sua ocorrência. Também foi descrita a utilização dos métodos do valor RMS e da TWDR para detecção e classificação da VTCD. Por fim, foi discutido como a intensidade e duração podem apresentar valores diferentes de acordo com o número de amostras por ciclo e tamanho da janela de cálculo.

Foram apresentadas as curvas de tolerância utilizadas para identificar as regiões de desligamento ou danos e como o monitoramento é realizado de acordo com os níveis de sensibilidade. O capítulo foi concluído com uma explanação da propagação das VTCD, com destaque para alguns conceitos importantes e necessários para a formação da MO.

## Capítulo 4

# Instalação Estratégica de Medidores de QEE

Este capítulo descreve os conceitos mais importantes sobre o procedimento adotado nesta tese para realizar a instalação estratégica de medidores de QEE para identificação de VTCD em SDEE. Inicialmente, o problema de otimização é formulado, apresentando os parâmetros que são úteis durante o processo de escolha da quantidade e da localização dos medidores. Em seguida, os fundamentos do método de otimização selecionado são apresentados. O capítulo é concluído com o processo de estimação nas barras não-monitoradas e suas limitações.

### 4.1 Formulação do problema

Os medidores de QEE são equipamentos que capturam os sinais de tensão de transformadores dos potencial (TP) e de corrente dos transformadores de corrente (TC), os quais adequam o nível do sinal para as suas entradas. Em seguida, os sinais analógicos são convertidos em digitais por cartões de aquisição de dados, utilizando uma taxa de amostragem e resolução adequadas para cada aplicação (Eldery et al., 2004). Logo após, o sinal digital é processado e enviado para o centro de operação, para caso necessário, ações sejam tomadas.

De acordo com Dugan et al. (2004), o custo total relacionado à instalação de um medidor é calculado considerando os custos do TP, do TC, dos cartões de aquisições de dados, do processador de sinais digitais, do sistema de comunicação, do *software*, da interface gráfica e do sistema de operação. Portanto, a instalação de medidores em locais específicos constitui uma ação importante para reduzir o custo do sistema de monitoramento.

Para resolver o problema de instalação estratégica de medidores, elaborou-se a seguinte formulação: deseja-se instalar um número mínimo de medidores para identificar VTCD causadas por curtos-circuitos, de modo que o sistema de medição e monitoramento tenha os seguintes objetivos:

- Detectar a presença de VTCD;
- Classificar o evento de acordo com a Tabela 3;
- Estimar a tensão nas barras não-monitoradas;
- Reduzir o espaço de busca do local do curto-circuito.

A formulação matemática para resolver o problema baseou-se no trabalho de Olguin e Bollen (2003), no qual discutiram-se as seguintes questões: quantos medidores precisam ser instalados no sistema e em quais locais devem ser instalados. A resposta a essas questões requer as definições apresentadas a seguir.

#### 4.1.1 Vetor de Monitoramento ( $V_m$ )

O vetor de monitoramento ( $V_m$ ) é um vetor que representa a resposta do problema de instalação estratégica de medidores e indica o número e a localização dos medidores (Olguin e Bollen, 2003). O vetor  $V_m$  é definido matematicamente conforme a Equação (15):

$$V_m(i) = \begin{cases} 1, & \text{para a instalação do medidor na barra } i. \\ 0, & \text{para a não-instalação do medidor na barra } i. \end{cases} \quad (15)$$

Apresenta-se na Figura 16, um exemplo do vetor  $V_m$  para o sistema de 11 barras das Figura 13, no qual sugere-se a instalação de medidores nas barras 1, 5 e 9.

Figura 16 – Exemplo do vetor  $V_m$  para um sistema de 11 barras.

1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Fonte - Autoria própria.

#### 4.1.2 Matriz de Observabilidade (MO)

A MO tem o objetivo de mapear o desempenho de um sistema elétrico com relação às VTCD (Olguin, 2005). A MO é uma matriz binária baseada na  $[V_{rem}]_{q \times l}$  apresentada no capítulo anterior. A partir da escolha dos limiares de detecção, cada elemento da MO é formulado conforme a Equação (16):

$$MO(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{quando um curto-circuito do cenário } i \text{ faz com que} \\ & \text{uma VTCD na barra } j \text{ seja detectada.} \\ 0, & \text{quando um curto-circuito do cenário } i \\ & \text{não causa uma VTCD na barra } j. \end{cases} \quad (16)$$

Para ilustrar, apresenta-se na Tabela 9, o processo de formação da MO a partir da  $[V_{rem}]_{21 \times 11}$  da Tabela 8, considerando um limiar fixo de 0,9 pu. Os valores para cada elemento da MO é apresentado entre parênteses, com destaques em vermelho e azul para detecção ou não detecção, respectivamente, de afundamentos de tensão em cada barra do sistema.

Tabela 9 –  $[MO]_{21 \times 11}$  para as posições de falta da Figura 15.

Tensões remanescentes nas barras										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,60 (1)	0,44 (1)	0,30 (1)	0,26 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,39 (1)	0,32 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,63 (1)	0,37 (1)	0,25 (1)	0,22 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,22 (1)	0,18 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,67 (1)	0,22 (1)	0,26 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,31 (1)	0,24 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,71 (1)	0,32 (1)	0,28 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,35 (1)	0,31 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,72 (1)	0,37 (1)	0,12 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,38 (1)	0,33 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,74 (1)	0,42 (1)	0,30 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,42 (1)	0,37 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,77 (1)	0,49 (1)	0,35 (1)	0,15 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,46 (1)	0,40 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,79 (1)	0,53 (1)	0,41 (1)	0,28 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,50 (1)	0,46 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,81 (1)	0,59 (1)	0,47 (1)	0,33 (1)	0,12 (1)	0,01 (1)	0,58 (1)	0,52 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,85 (1)	0,64 (1)	0,52 (1)	0,40 (1)	0,19 (1)	0,01 (1)	0,62 (1)	0,58 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,86 (1)	0,69 (1)	0,60 (1)	0,45 (1)	0,26 (1)	0,14 (1)	0,67 (1)	0,61 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,63 (1)	0,48 (1)	0,30 (1)	0,25 (1)	0,22 (1)	0,17 (1)	0,42 (1)	0,38 (1)	0,13 (1)	0,12 (1)	0,12 (1)
0,68 (1)	0,40 (1)	0,35 (1)	0,31 (1)	0,27 (1)	0,20 (1)	0,12 (1)	0,01 (1)	0,15 (1)	0,14 (1)	0,10 (1)
0,74 (1)	0,47 (1)	0,42 (1)	0,35 (1)	0,30 (1)	0,21 (1)	0,18 (1)	0,01 (1)	0,17 (1)	0,16 (1)	0,12 (1)
0,76 (1)	0,51 (1)	0,48 (1)	0,43 (1)	0,39 (1)	0,36 (1)	0,22 (1)	0,12 (1)	0,19 (1)	0,18 (1)	0,14 (1)
0,71 (1)	0,58 (1)	0,45 (1)	0,34 (1)	0,31 (1)	0,27 (1)	0,55 (1)	0,52 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,77 (1)	0,63 (1)	0,52 (1)	0,40 (1)	0,28 (1)	0,21 (1)	0,61 (1)	0,57 (1)	0,12 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,91 (0)	0,78 (1)	0,70 (1)	0,64 (1)	0,40 (1)	0,35 (1)	0,80 (1)	0,76 (1)	0,19 (1)	0,01 (1)	0,01 (1)
0,93 (0)	0,84 (1)	0,78 (1)	0,73 (1)	0,47 (1)	0,42 (1)	0,85 (1)	0,82 (1)	0,25 (1)	0,12 (1)	0,01 (1)
0,95 (0)	0,91 (0)	0,83 (1)	0,76 (1)	0,51 (1)	0,48 (1)	0,91 (0)	0,87 (1)	0,33 (1)	0,18 (1)	0,01 (1)
0,96 (0)	0,92 (0)	0,87 (1)	0,81 (1)	0,58 (1)	0,54 (1)	0,94 (0)	0,91 (0)	0,36 (1)	0,22 (1)	0,12 (1)

A primeira linha da MO da Tabela 9, composta apenas por valores iguais a 1 (um), informa que para este evento de curto-circuito, todas as barras do sistema apresentaram um afundamento de tensão. A primeira coluna da MO da Tabela 9 indica que a barra 1 não consegue detectar afundamento de tensão para os últimos quatro cenários de curto-circuito. Para as outras linhas e colunas da MO, segue-se o mesmo raciocínio.

### 4.1.3 Função Objetivo e Restrições

Para o problema de instalação estratégica de medidores, o objetivo consiste em determinar o número mínimo de medidores a serem utilizados em determinado sistema. A análise do estado da arte realizada no Capítulo 2, mostrou que predomina o uso da função objetivo ( $F_o$ ) baseada apenas no custo do sistema de monitoramento, a qual pode ser definida conforme a Equação (17):

$$F_o(V_m) = \min \sum_{i=1}^n Ct(i)V_m(i), \quad (17)$$

sendo:  $n$ , o número de barras;  $Ct(i)$ , o custo de instalação de um medidor na barra  $i$ .

A função  $F_o(V_m)$  pode se adaptar a algumas situações específicas de instalação dos medidores. Uma delas se relaciona ao fato do sistema já possuir medidores instalados, o que necessitaria de uma adaptação do  $V_m$  que garantisse o valor 1 naquela posição. Outra exemplo, seria a dificuldade de instalação em determinados locais, o que poderia ser corrigido por meio de uma penalização no custo de instalação do medidor nesse local específico.

Para garantir a completa observabilidade dos medidores no processo de detecção das VTCD, pelo menos um medidor deve ser capaz de registrar os valores fora dos limiares escolhidos para cada evento de curto-circuito. Para isso, Olguin (2005) definiu um vetor restrição, denominado de vetor-redundância ( $V_r$ ), conforme a Inequação (18):

$$V_r = [MO]_{q \times l} \times [V_m]_{q \times 1}^t \geq [1]_{q \times 1}, \quad (18)$$

sendo:  $[V_m]_{q \times 1}^t$ , o vetor transposto de  $[V_m]_{q \times 1}$ .

De acordo com a Inequação (18), se o vetor  $V_r$  for composto por valores maiores ou iguais a 1 (um), pelo menos um dos medidores representados por  $V_m$ , é capaz de detectar VTCD para os cenários de curto-circuito analisados. Um exemplo do vetor  $V_r$  considerando o  $V_m$  da Figura 16 e a matriz MO da Tabela 9, é apresentado na Equação (19). Como se vê na Equação, todos os cenários de curto-circuito sensibilizaram pelo menos um dos medidores instalados nas posições do vetor  $V_m$ . Uma das formas de obter a solução desse problema, é via busca exaustiva de todas as situações possíveis de instalação dos medidores. Para o sistema de 11 barras, por exemplo, o número de combinações distintas é de 2048 ( $2^{11}$ ) possibilidades.

Na prática, o método da busca exaustiva é inviável, visto que resulta em uma tarefa demorada e susceptível a erros. Portanto, os problemas reais dessa categoria requerem a utilização de métodos de otimização numérica capazes de fornecer soluções adequadas, sem a necessidade de busca por todo o espaço de soluções.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

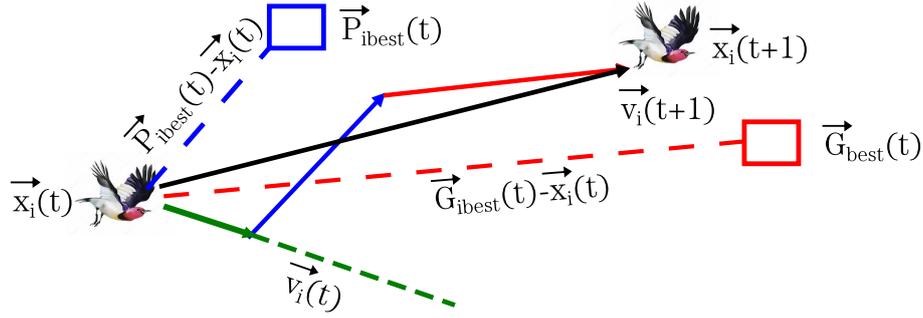
## 4.2 Otimização por Enxame de Partículas Binário (BPSO)

Para resolver o problema de otimização desta tese, selecionou-se uma versão do método de otimização por enxame de partículas ou, em inglês, *Particle Swarm Optimization* (PSO), o qual foi proposto em 1995 no trabalho de Kennedy e Eberhart (1995) e se baseia no comportamento de um conjunto de pássaros, abelhas ou peixes. Cada indivíduo, também chamado de partícula, é representado por um vetor referente à sua posição atual ( $\vec{x}_i(t)$ ) e sua velocidade atual ou variação da posição ( $\vec{v}_i(t)$ ).

A movimentação de uma partícula para a próxima posição ( $\vec{x}_i(t+1)$ ) depende de três parâmetros principais: a variação da posição ( $\vec{v}_i(t)$ ); a melhor experiência da partícula ( $\vec{P}_{i_{\text{best}}}(t)$ ); e a melhor experiência do grupo de partículas ( $\vec{G}_{\text{best}}(t)$ ). O processo de movimentação de uma partícula pelo método PSO é apresentado na Figura 17.

Matematicamente, o método PSO é descrito a partir das Equações (20) e (21).

Figura 17 – Movimentação de partícula pelo método PSO.



Fonte - Autoria própria.

$$\vec{v}_i(t+1) = w\vec{v}_i(t) + c_{a1}r_1(\vec{P}_{i_{best}}(t) - \vec{x}_i(t)) + c_{a2}r_2(\vec{G}_{best}(t) - \vec{x}_i(t)), \quad (20)$$

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1), \quad (21)$$

sendo:  $c_{a1}$  e  $c_{a2}$ , os coeficientes de aceleração;  $w$ , o termo de inércia;  $r_\alpha$ , uma variável aleatória  $\alpha$  uniformemente distribuída no intervalo de 0 a 1.

Os valores de  $c_{a1}$  e  $c_{a2}$  indicam a importância dos conjuntos  $\vec{P}_{i_{best}}(t)$  e  $\vec{G}_{best}(t)$ , respectivamente, para o processo de movimentação de uma partícula. O termo de inércia ( $w$ ) representa um parâmetro essencial no método PSO, devido ao fato de estar diretamente relacionado com a convergência e o espaço de busca da solução (Khanesar et al., 2007). Na prática, a escolha de  $c_{a1}$ ,  $c_{a2}$  e  $w$ , os quais influenciam diretamente no cálculo da velocidade, depende do problema a ser analisado.

O método BPSO, uma versão do método PSO, é utilizado quando o espaço de solução consiste em vetores compostos por 1 (um) ou 0 (zero). A principal diferença entre os métodos BPSO e o PSO é o cálculo da velocidade, o qual no método BPSO é computado via função sigmoide e a nova posição por probabilidade. A formulação matemática para o método BPSO é apresentada nas Equações (22), (23) e (24).

$$v_{i,m}(t+1) = wv_{i,m}(t) + c_{a1}r_1(P_{i_{best}}(t) - x_i(t)) + c_{a2}r_2(G_{best}(t) - x_i(t)), \quad (22)$$

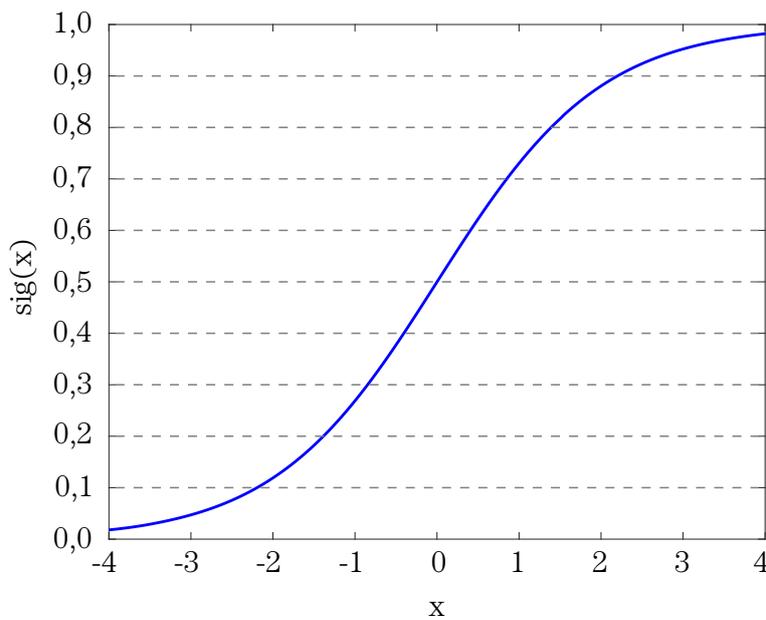
$$v'_{i,m}(t+1) = \text{sig}(v_{i,m}(t+1)) = \frac{1}{1 + e^{-v_{i,m}(t)}}, \quad (23)$$

$$x_{i,m}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{se } r_3 < \frac{1}{1+e^{-v_{i,m}(t)}} \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (24)$$

sendo:  $i$ , o número da partícula;  $m$ , a posição no vetor da partícula  $i$ .

A curva sigmoide é uma função matemática utilizada nos campos da economia e em rotinas computacionais, no qual seu nome advém da forma em "S" do seu gráfico. De acordo com a Figura 18, percebe-se que a função sigmoide varia em uma faixa de 0 (zero) a 1 (um). A medida que a velocidade de uma partícula aumenta, a função sigmoide se aproxima de 1 e a probabilidade da Equação (24) ser igual a 1 (um), também aumenta. De maneira análoga, quando a velocidade da partícula diminui, a função sigmoide se aproxima de 0 e maior será a probabilidade da Equação (24) ser igual a 0 (zero).

Figura 18 – Curva sigmoide.

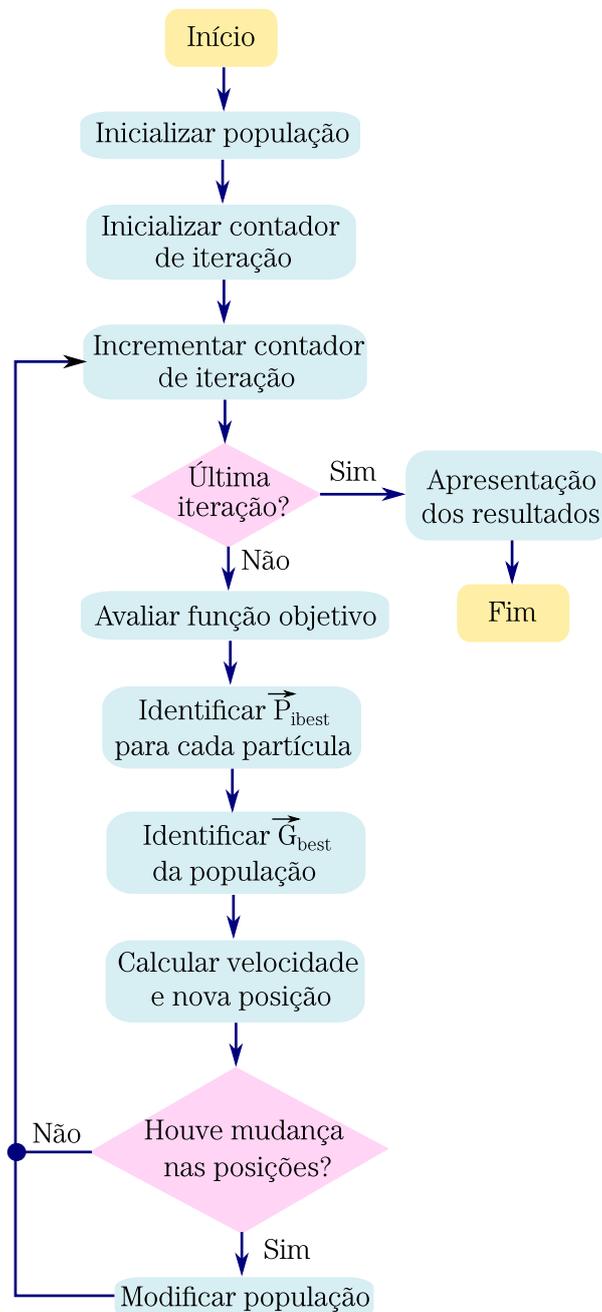


Fonte - Autoria própria.

O método BPSO é resumido no fluxograma da Figura 19 e descrito do seguinte modo: inicialmente, um número de partículas é escolhido e a primeira população é formada com vetores binários aleatórios. Como forma do método de otimização apresentar um resultado final, é necessária a utilização de um critério de parada. Caso o problema tenha uma função objetivo com valor ótimo conhecido, o critério de parada ocorre quando esse valor é obtido. Para o problema de instalação estratégica de medidores, essa informação não está disponível e uma forma alternativa de critério de parada é utilizada.

Um contador de iteração é inicializado com a função de critério de parada do processo de otimização. Em seguida, para cada partícula da população, a função objetivo é calculada para a obtenção dos valores dos conjuntos  $\vec{P}_{i_{best}}$  e  $\vec{G}_{best}$  até a iteração atual. Após o cálculo da velocidade e posição, o método avalia se houve mudança nas posições das partículas. Caso positivo, a nova população é utilizada para o reinício do processo, incrementando o contador de iteração. Ao final, a última geração é utilizada para a identificação dos resultados obtidos pelo método BPSO.

Figura 19 – Fluxograma do método BPSO.



Fonte - Autoria própria.

O problema de otimização desta tese consiste em avaliar a instalação ou não instalação de um medidor em determinada barra do sistema. Esse procedimento pode ser efetuado aplicando uma analogia considerando valores iguais a 1 (um) ou 0 (zero), respectivamente, para o vetor de monitoramento ( $V_m$ ). Esse fato aliado à simplicidade matemática (Equações (22), (23) e (24)), motivou vários autores a aplicarem o método BPSO como o método de otimização para resolver o problema de instalação estratégica de medidores (Ibrahim et al., 2012b; Davarinejad et al., 2018; Bertho et al., 2016; Junqueira et al., 2019). Além disso, Junqueira (2017) observou que o conhecimento dos parâmetros associados à velocidade de convergência, resultou em boas soluções para o problema. Por tudo isso, selecionou-se o método BPSO para resolver a etapa de instalação estratégica de medidores.

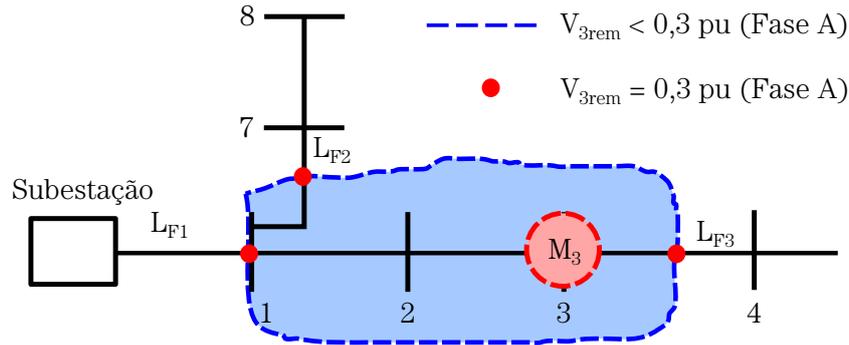
### 4.3 Estimação de VTCD nas barras não-monitoradas

A instalação estratégica de medidores tem como objetivo identificar o número de medidores que assegurem a observabilidade de VTCD em um sistema, sem a necessidade de investigar todas as possíveis soluções. A ideia é obter soluções ótimas ou sub-ótimas que atendam as restrições do problema. Neste ponto, é importante destacar que a escolha dos locais de instalação dos medidores não permite determinar as tensões remanescentes e conseqüentemente, a ocorrência de VTCD nas barras não-monitoradas, tornando-se necessária a sua estimação, a qual pode ser realizada baseando-se em dados determinísticos ou estocásticos, a partir da combinação das informações advindas de um ou mais medidores instalados. Destaca-se que essa técnica não é utilizada para encontrar o local exato do curto-circuito, mas para obter uma aproximação das tensões remanescentes nas barras não-monitoradas (Olguin, 2005).

Pela dificuldade de instalação de medidores em alguns locais ou pela limitação dos recursos financeiros, a estimação de VTCD em barras não-monitoradas representa uma informação importante para o sistema de monitoramento. Para demonstrar esse fato, apresenta-se na Figura 20, uma parte do sistema da Figura 13, com a zona exposta da barra 3 para  $V_{3rem} \leq 0,3$  pu. Assume-se que um medidor é instalado na barra 3 e é obtido, após um evento de curto-circuito aleatório, uma tensão remanescente de 0,3 pu. A partir dessa informação, três possíveis locais de falta ( $L_{F1}$ ,  $L_{F2}$  e  $L_{F3}$ ) estão relacionados com o valor registrado pelo medidor.

De forma geral, via análise da matriz  $[V_{rem}]_{q \times l}$ , um conjunto de possíveis locais de falta

Figura 20 – Zona exposta da barra 3 para  $V_{3rem} \leq 0,3$  pu.



Fonte - Autoria própria.

podem ser identificados pelas tensões remanescentes registradas na barra 3. Matematicamente, esse conjunto pode ser expresso pela Equação (25) (Mora, 2012):

$$L_{Fp} \in C_{LF} \Leftrightarrow V_{3rem} = 0,3 \pm E_m, \quad (25)$$

sendo:  $L_{Fp}$ , o local p que a falta ocorreu;  $C_{LF}$ , o conjunto de locais de falta com uma tensão remanescente próxima ao valor registrado pelo medidor;  $E_m$ , são os erros de medição relacionados ao processo de registro de uma tensão remanescente pelo medidor.

Um modo de estimar a intensidade da tensão nas barras não-monitoradas é via média ponderada das tensões remanescentes nos locais de falta que pertencem à  $C_{LF}$ , como apresentado em Olguin (2005) e Mora (2012). Este cálculo leva em consideração a taxa de ocorrência de cada local de falta como um fator de peso. Para o problema da Figura 20, tem-se:

$$V_{j^*} = \frac{1}{\sum_1^3 F_{pz}} \sum_1^3 F_{pz} \times V_{j,p}, \quad (26)$$

sendo:  $V_{j^*}$ , a tensão estimada na barra  $j$  por uma falta em um local desconhecido (\*);  $F_{pz}$ , a taxa de ocorrência de falta no local  $z$ ;  $V_{j,p}$ , a tensão remanescente na barra  $j$  causada por uma falta na posição  $p$ . Considerando a mesma taxa de ocorrência para cada local de falta no problema com 21 locais de falta (Capítulo 3), tem-se que  $F_{p1} = F_{p2} = F_{p3} = \frac{1}{22}$  e  $V_{3^*} = 0,3$  pu, o mesmo valor registrado pelo medidor.

## 4.4 Limitações na estimação de tensão

Mesmo com as informações das tensões remanescentes nas barras monitoradas e a análise da matriz  $[V_{\text{rem}}]_{q \times l}$ , a estimação da tensão nas barras não-monitoradas e o possível local de falta podem apresentar erros consideráveis relacionados às simetrias (valores similares de registros) para o conjunto de medidores instalados (Martins et al., 2019). Como exemplo, considere os locais de falta da Figura 20 e um medidor instalado na barra 3. As linhas da matriz  $[V_{\text{rem}}]_{q \times l}$  referentes aos locais de falta  $L_{F1}$ ,  $L_{F2}$  e  $L_{F3}$  são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 –  $C_{LF}$  para os locais de falta da Figura 20.

Local da falta	Tensões remanescentes nas barras (Fase A)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$L_{F1}$	0,60	0,44	0,30	0,26	0,01	0,01	0,39	0,32	0,01	0,01	0,01
$L_{F2}$	0,72	0,42	0,30	0,01	0,01	0,01	0,42	0,37	0,01	0,01	0,01
$L_{F3}$	0,63	0,48	0,30	0,25	0,22	0,17	0,42	0,38	0,13	0,12	0,12

Como se vê, os locais de falta  $L_{F1}$ ,  $L_{F2}$  e  $L_{F3}$  são simétricos em relação ao medidor instalado na barra 3. Ao considerar os  $E_m$ , o número de condições simétricas pode se tornar bem maior. Ademais, as tensões remanescentes da matriz  $[V_{\text{rem}}]_{q \times l}$  para as barras não-monitoradas, utilizadas para a estimação, apresentam diferentes resultados. Isso é indesejável no processo de estimação de tensão, visto que os resultados estimados podem indicar detecções erradas de VTCD nos locais em que não há medidores instalados.

Para superar essa limitação, é necessário reformular o processo de escolha dos medidores para reduzir o número de simetrias, auxiliando no processo de estimação e na busca pelo local da falta. Neste contexto, esta tese propõe um novo método de instalação estratégica de medidores para minimizar os erros de estimação e reduzir o espaço de busca do local da falta, o qual será apresentado no próximo capítulo.

## 4.5 Considerações finais

Este capítulo teve como principal objetivo apresentar a formulação matemática para a construção do problema de instalação estratégica de medidores. Foram explicitados a função objetivo tradicional e as restrições do problema de otimização. Adicionalmente, apresentou-se o método de otimização selecionado para a escolha da quantidade e localização dos medidores a

serem instalados. Ao final, foram apresentadas as características da estimação de tensão nas barras não-monitoradas, assim como as suas limitações, as quais serão utilizadas no capítulo seguinte para o desenvolvimento de uma nova função objetivo para o problema.

# Capítulo 5

## Método Proposto

Este capítulo apresenta o método proposto para a instalação estratégica de medidores de QEE. Inicialmente, são apresentados os índices de estimação e de eventos únicos, baseados nas limitações do processo de estimação de tensão nas barras não-monitoradas apresentadas no Capítulo 4. Em seguida, o problema é reformulado, passando a utilizar os dois índices na função objetivo, com seus respectivos fatores-peso. Ao final, são apresentadas as considerações finais do capítulo, destacando a contribuição do autor para o estado da arte.

### 5.1 Índice de Estimação e Índice de Eventos Únicos

O método proposto nesta tese explora as limitações apresentadas no Capítulo 4 para elaborar uma nova formulação do problema de instalação estratégica de medidores de QEE. Para isso, um primeiro índice, denominado de Índice de Estimação (IE), é adicionado à função objetivo tradicional (Equação (17)). Este índice baseia-se na identificação de eventos simétricos em relação ao conjunto de medidores instalados. O IE é utilizado para minimizar as diferenças entre as tensões remanescentes de  $[V_{\text{rem}}]_{q \times l}$ , analisando as colunas que representam as barras não-monitoradas.

Inicialmente, um conjunto de medidores é escolhido para o sistema de monitoramento e as condições simétricas são analisadas a partir da  $[V_{\text{rem}}]_{q \times l}$ . As condições simétricas são representadas por:

$$R \in C_{\text{cs}}(I) \Leftrightarrow [V_{\text{rem}}]_{R \times T} = V_{\text{REF}}(I, T), \quad (27)$$

sendo:  $R$ , uma linha da  $[V_{\text{rem}}]$ ;  $C_{\text{cs}}(I)$ , o conjunto  $I$  de condições simétricas;  $[V_{\text{rem}}]_{R \times T}$ , as tensões remanescentes da linha  $R$ ;  $T$ , as colunas que representam as barras monitoradas;  $V_{\text{REF}}(I, T)$ , as tensões remanescentes de referência para as barras das colunas  $T$  do conjunto  $I$ . Para cada  $C_{\text{cs}}(I)$ , o valor de referência é considerado o primeiro valor do conjunto.

Para exemplificar a formação do conjunto  $C_{cs}(I)$ , apresenta-se na Tabela 11, os conjuntos de eventos simétricos formados pela  $[V_{rem}]_{21 \times 11}$  da Tabela 9 (Capítulo 3), considerando a instalação de um medidor na barra 3. O primeiro valor de referência ( $V_{3rem} = 0,30$  pu), utilizado para identificar as condições simétricas, refere-se ao valor da primeira linha da  $[V_{rem}]_{21 \times 11}$ . Em seguida, uma varredura é realizada pelas linhas da  $[V_{rem}]_{21 \times 11}$  para identificação dos eventos simétricos em relação ao primeiro valor de referência. Com isso, é possível formar o primeiro conjunto de condições simétricas ( $C_{cs}(1)$ ) com as linhas 1, 6 e 12. O procedimento se repete até a formação de mais dois grupos de eventos simétricos:  $C_{cs}(2)$  ( $V_{3rem} = 0,35$  pu), com as linhas 7 e 13; e  $C_{cs}(3)$  ( $V_{3rem} = 0,52$  pu), com as linhas 10 e 17.

Tabela 11 – Formação do  $C_{cs}(I)$ .

$C_{cs}(I)$	Linha $R$	Tensões remanescentes nas barras (Fase A)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$C_{cs}(1)$	1	0,60	0,44	<b>0,30</b>	0,26	0,01	0,01	0,39	0,32	0,01	0,01	0,01
	6	0,72	0,42	<b>0,30</b>	0,01	0,01	0,01	0,42	0,37	0,01	0,01	0,01
	12	0,63	0,48	<b>0,30</b>	0,25	0,22	0,17	0,42	0,38	0,13	0,12	0,12
$C_{cs}(2)$	7	0,74	0,49	<b>0,35</b>	0,15	0,01	0,01	0,46	0,40	0,01	0,01	0,01
	13	0,68	0,40	<b>0,35</b>	0,31	0,27	0,20	0,12	0,01	0,15	0,14	0,10
$C_{cs}(3)$	10	0,85	0,64	<b>0,52</b>	0,40	0,19	0,01	0,62	0,58	0,01	0,01	0,01
	17	0,77	0,63	<b>0,52</b>	0,40	0,28	0,21	0,61	0,57	0,12	0,01	0,01

Para formar o índice IE, utilizam-se os conjuntos  $C_{cs}$  para identificar as diferenças entre as tensões remanescentes nas barras não-monitoradas. Para isto, o erro médio quadrático, uma ferramenta utilizada para medir a qualidade da estimativa ou os erros de previsão, é calculado para cada conjunto de condições simétricas. Matematicamente, essas diferenças ( $D_{cs}$ ) são definidas como:

$$D_{cs}(I) = \sum_{J=1}^{TC_{cs}(I)-1} \sum_{K=J+1}^{TC_{cs}(I)} ([V_{rem}]_{x_I(K) \times nm} - [V_{rem}]_{x_I(J) \times nm})^2 \quad \forall TC_{cs}(I) > 1, \quad (28)$$

sendo:  $TC_{cs}(I)$ , o tamanho de  $C_{cs}(I)$ ;  $x_I(K)$ , a linha referente à condição simétrica  $K$  do conjunto  $C_{cs}(I)$ ;  $x_I(J)$ , a linha referente à condição simétrica  $J$  do conjunto  $C_{cs}(I)$ ; nm, cada coluna das barras não-monitoradas. Logo, o índice de estimativa (IE) é definido como:

$$IE = \sum_{I=1}^{NS_{cs}} \frac{D_{cs}(I)}{TC_{cs}(I)}, \quad (29)$$

sendo:  $NS_{cs}$ , o número de conjuntos de condições simétricas. Como exemplo, apresenta-se a seguir, a utilização das Equações (28) e (29) para a formação das diferenças de condições simétricas  $D_{cs}(1)$ ,  $D_{cs}(2)$  e  $D_{cs}(3)$  e do índice IE da Tabela 11.

$$D_{cs}(1) = ([V_{rem}]_{6 \times nm} - [V_{rem}]_{1 \times nm})^2 + ([V_{rem}]_{12 \times nm} - [V_{rem}]_{1 \times nm})^2 + \\ + ([V_{rem}]_{12 \times nm} - [V_{rem}]_{6 \times nm})^2 = 0,0807 + 0,1154 + 0,9300 = 1,1261,$$

$$D_{cs}(2) = ([V_{rem}]_{13 \times nm} - [V_{rem}]_{7 \times nm})^2 = 0,4533,$$

$$D_{cs}(3) = ([V_{rem}]_{17 \times nm} - [V_{rem}]_{10 \times nm})^2 = 0,0669,$$

$$IE = \frac{1,1261}{3} + \frac{0,1154}{2} + \frac{0,9300}{2} = 0,898.$$

O índice IE pode identificar soluções com elevadas diferenças nas barras não-monitoradas entre as condições simétricas, o que complicaria o processo de estimação de tensão. Logo, o índice IE depende diretamente do número e da localização dos medidores escolhidos para o monitoramento das VTCD.

Um segundo índice, denominado de Índice de Eventos Únicos (IEU), foi formulado baseando-se no número de eventos que apresentam soluções únicas ou sem simetria para o conjunto de medidores instalados. Este índice é definido como:

$$IEU = \sum_{I=1}^{TC_{cs}} 1 \quad \forall TC_{cs}(I) = 1. \quad (30)$$

O índice IEU pode identificar os eventos de curto-circuito que resultam em medições únicas para as tensões remanescentes nas barras monitoradas. Assim como o índice IE, o índice IEU depende do sistema de monitoramento de VTCD, a partir da escolha do número e da localização dos medidores. Como exemplo, apresentam-se as Tabelas 9 e 11, contendo 21 cenários de curto-circuito e 7 condições simétricas, respectivamente. Portanto, para esse caso, o número de eventos únicos é igual a 14, ou seja:

$$IEU = 14.$$

## 5.2 Método Proposto

O método proposto inclui os dois índices apresentados na seção anterior (IE e IEU) para elaborar a formulação de uma nova função objetivo para o problema de instalação estratégica de

medidores. Visando propor escolhas apropriadas para cada situação, fatores-peso são adicionados a cada parcela da função objetivo, a qual é formada por duas funções de minimização (função custo e função relacionado ao índice IE) e uma de maximização (função relacionada ao índice IEU). Visando compor um único problema, a função relacionada ao índice IEU é modificada para uma função de minimização. Matematicamente, a nova função objetivo para resolver o problema de instalação estratégica de medidores ( $F_o^*$ ) foi definida conforme a Equação (31):

$$F_o^*(V_m) = \min(f_1 F_o(V_m) + f_2 IE(V_m) + f_3 (q - IEU(V_m))), \quad (31)$$

sendo:  $f_1$ , o fator-peso para detecção de VTCD;  $f_2$ , o fator-peso relacionado à minimização das diferenças entre as tensões remanescentes nas barras não-monitoradas em condições simétricas;  $f_3$ , o fator-peso relacionado à identificação de eventos únicos obtidos pelos medidores instalados;  $IE(V_m)$ , o índice de estimação para a solução  $V_m$ ;  $IEU(V_m)$ , o índice de eventos únicos para a solução  $V_m$ .

Com a mudança da Equação (17) para a Equação (31), a nova função objetivo proporciona uma flexibilidade maior no número e localização dos medidores com a escolha dos fatores-peso, os quais dependem da aplicação. Para as soluções que priorizam o custo do sistema de monitoramento, o fator  $f_1$  tende a apresentar valor mais elevado. Para as soluções que priorizam as estimações nas barras não-monitoradas, o fator  $f_2$  tende a apresentar valor mais elevado. Por fim, para as soluções que priorizam a identificação de eventos únicos, o fator  $f_3$  tende a apresentar valor mais elevado.

Para ilustrar a instalação estratégica dos medidores com a variação dos fatores-peso, apresentam-se na Tabela 12, três casos para a matriz  $[V_{rem}]_{21 \times 11}$  do sistema de 11 barras. Os casos representam soluções ótimas avaliadas via busca exaustiva e que atendem à restrição da Equação (18).

Tabela 12 – Variação do fator-peso na instalação estratégica dos medidores.

Caso	$f_1$	$f_2$	$f_3$	Número de Medidores	Localização (Barras)	Custo	IE	IEU	$F_o^*$
1	1,00	0,00	0,00	1	11	1	7,60	2	1,00
2	0,50	0,50	0,00	1	4	1	0,11	13	0,55
3	0,50	0,00	0,50	2	3 e 8	2	0,00	21	1,00

O método proposto é apresentado no fluxograma da Figura 21 e descrito conforme a seguir. Inicialmente, os parâmetros do método BPSO como: número de iterações ( $it$ ), número de partículas ( $N_{part}$ ),  $w$ ,  $c_1$  e  $c_2$  são fornecidos. Em seguida, cada partícula é inicializada de forma aleatória com vetores binários, os quais representam o vetor de monitoramento ( $V_m$ ). Na primeira iteração, a melhor experiência da partícula  $i$  ( $P_{i_{best}}$ ) é a própria posição atual, enquanto que a melhor experiência do grupo é considerada igual ao conjunto  $G_{best}$ . De acordo com as Equações (22), (23) e (24), o método BPSO executa a primeira movimentação para a obtenção de novas partículas com os seus respectivos vetores  $V_m$ .

Para cada conjunto de medidores ( $V_m$ ), valores referentes ao custo (Equação 17), aos índices IE (Equação (29)) e IEU (Equação (30)) são obtidos a partir da análise da matriz  $[V_{rem}]$ . Com os valores escolhidos de  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ , a função objetivo ( $F_o^*$ ) é calculada (Equação 31). Se um conjunto de medidores atende à restrição do problema (Equação (18)), esse conjunto é considerado uma solução possível para o problema. Se o número de iterações ( $it$ ) for menor que o número máximo ( $it_{máx}$ ), o método BPSO executa uma nova movimentação, considerando as mudanças nos conjuntos  $P_{i_{best}}$  e  $G_{best}$ . Quando o processo de otimização atinge  $it_{máx}$ , a solução final  $G_{best}$  para a última iteração é escolhida para medição estratégica.

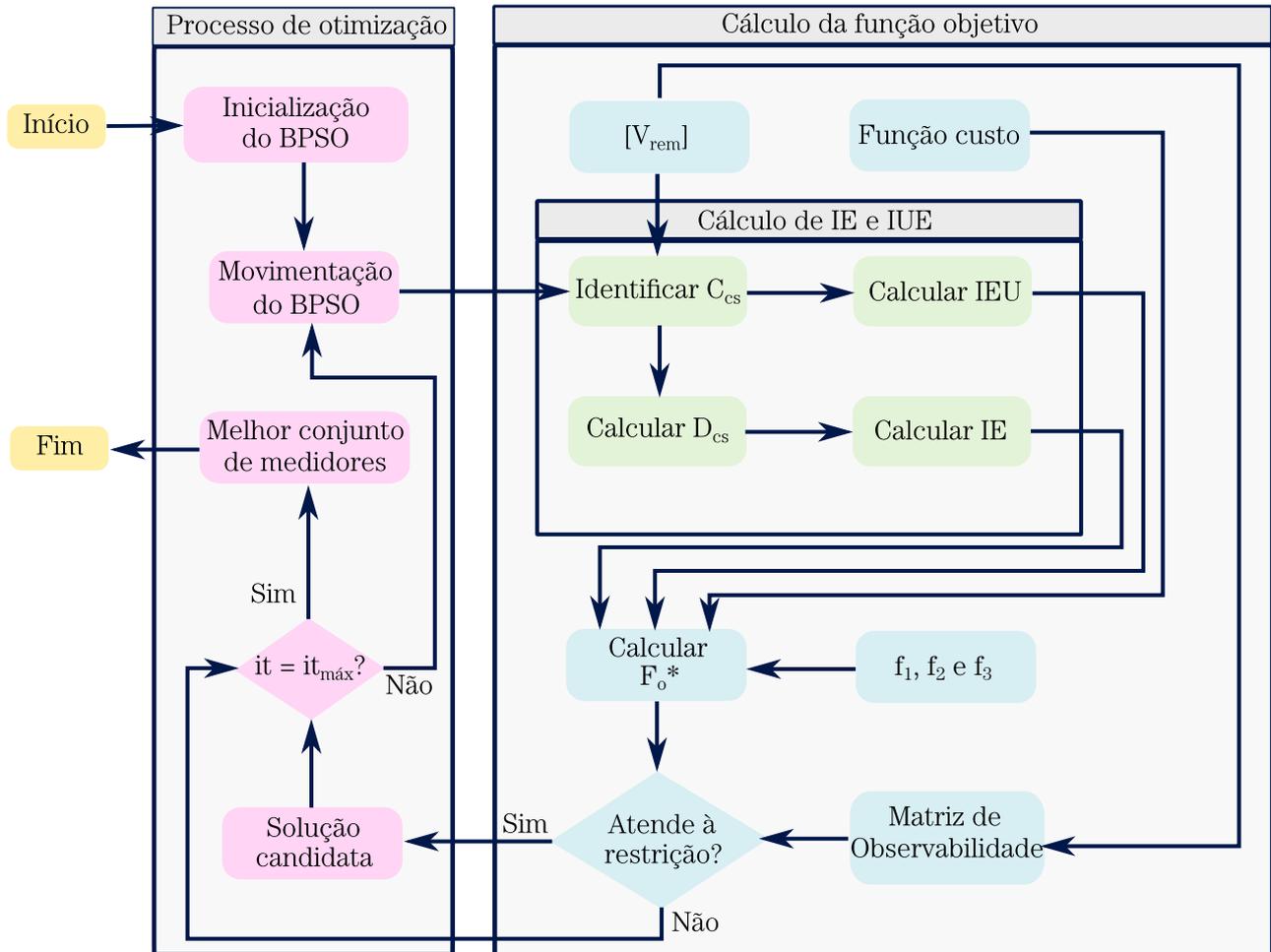
### 5.3 Considerações Finais

Neste capítulo, apresentou-se de forma detalhada o desenvolvimento do método proposto nesta tese. A análise de eventos simétricos ou unicamente identificáveis confirmou a hipótese, evidenciada no Capítulo 4, da reformulação da função objetivo do problema de instalação estratégica de medidores.

A utilização dos índices de estimação e de eventos únicos foi descrita e sugerida para dar mais flexibilidade na escolha dos locais de instalação dos medidores. O método independe do sistema analisado e apresenta fatores-peso de acordo com a necessidade do problema. Os resultados da validação serão apresentados no Capítulo 7.

**Contribuições:** a principal contribuição do autor para a literatura é a reformulação da função objetivo do problema de instalação estratégica de medidores, a qual utiliza a análise prévia dos erros de estimação nas barras não-monitoradas e reduz o número de simetrias do

Figura 21 – Fluxograma do método proposto.



Fonte - Autoria própria.

sistema de monitoramento.

# Capítulo 6

## Metodologia Proposta

Apresenta-se neste capítulo, um resumo da metodologia adotada para o desenvolvimento e validação do método proposto. Inicialmente, apresenta-se o processo de construção da base de dados de curtos-circuitos em SDEE. Em seguida, apresentam-se todos os passos requeridos para a execução das etapas de detecção e classificação de uma VTCD, além dos parâmetros utilizados para a instalação estratégica dos medidores. Ao final, a aplicação da metodologia é descrita e as considerações finais são destacadas.

### 6.1 Construção da Base de Dados

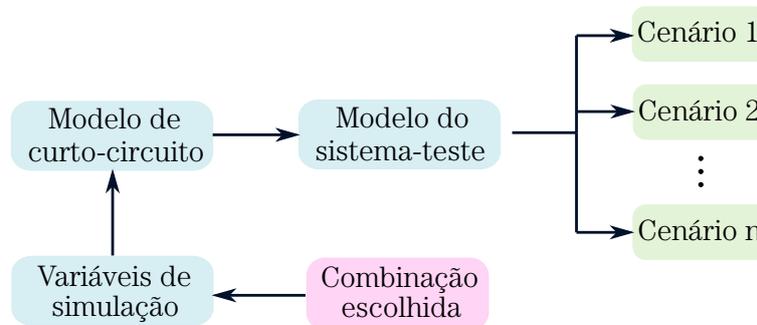
A construção de uma base de dados robusta é de fundamental importância para a validação do método proposto nesta tese, principalmente pela dificuldade de obtenção de uma grande quantidade de registros oscilográficos relacionados aos curtos-circuitos. Para isso, os cenários consideram diferentes localizações, resistências de falta, tipo de falta e parâmetros relacionados ao sistema propriamente dito, como a topologia e o carregamento.

A construção da base de dados baseou-se nas metodologias propostas por Souza (2005), Santos (2016) e Lima (2021), que consiste nos seguintes passos:

- Seleção do sistema-teste;
- Seleção dos *softwares* de aplicação;
- Seleção dos modelos de curto-circuito;
- Seleção das variáveis de simulação para a geração de diversos cenários;
- Geração dos sinais;
- Obtenção das tensões remanescentes nas barras do sistema;

Um resumo do processo de construção dos cenários é apresentado na Figura 22, no qual cada cenário utiliza a combinação das variáveis de simulação para a aplicação no sistema-teste. A base de dados contempla todas as combinações dos parâmetros de curto-circuito adotadas nesta tese.

Figura 22 – Etapas para a construção da base de dados.



Fonte - Autoria própria.

### 6.1.1 Simulações e Modelos

O sistema-teste escolhido foi o alimentador IEEE de 34 barras, cujo diagrama unifilar está apresentado na Figura 23. O sistema opera com trechos em 24,9 kV e trechos em 4,16 kV, com todos os dados sobre as características espaciais e elétricas presentes em IEEE (2010). A modelagem do sistema-teste foi realizada conforme apresentada a seguir.

- Características da subestação: a subestação foi modelada considerando um modelo de Thevenin, ou seja, uma fonte de tensão senoidal de 69 kV, com as três fases conectadas em delta ( $\Delta$ ), seguidos de impedâncias em série. Um transformador foi utilizado com as seguintes características:
  - Potência do transformador: 2500 kVA;
  - Primário do transformador de 69 kV conectado em  $\Delta$ ;
  - Secundário do transformador de 24,9 kV conectado em estrela (Y) aterrado;
  - Resistência percentual: 1%;
  - Reatância percentual: 8%.
- Características das linhas: as linhas foram modeladas a parâmetros concentrados devido ao comprimento das linhas de distribuição do sistema (valor máximo de 14,7 km). Além

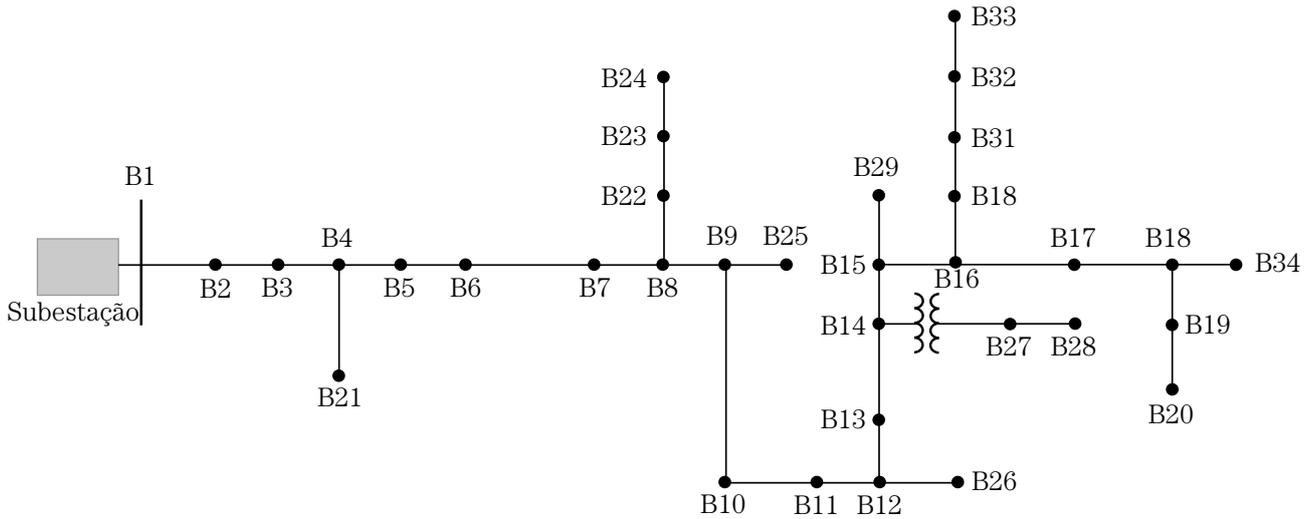
disso, foi utilizado o modelo  $\pi$  nominal, o qual considera a impedância série (resistência e reatância) e a admitância *shunt* dividida em duas partes (uma no início e outra no final da linha). Como informações extras, destacam-se:

- Linhas monofásicas e trifásicas assimétricas;
  - Todos os trechos com cabos de alumínio com alma de aço;
  - Parâmetros distribuídos constantes com a frequência;
  - Trechos com cabos de 1/0 e 6/1 AWG (*American Wire Gauge*).
- Características das cargas: cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas foram modeladas ao longo do alimentador. As cargas utilizaram um modelo RL em série conectado ao barramento (cargas concentradas) ou divididos em duas partes iguais (cargas distribuídas). Para cada uma das cargas são informados o modelo e as potências ativa (em kW) e reativa (em kvar). Um cálculo para a identificação dos valores de resistência e reatância é realizado por fase para serem utilizados no ATP. As modificações no carregamento se relacionaram à multiplicação dos valores dessas resistências e reatâncias das cargas pelo fator de carregamento. Dentre as informações extras, destacam-se:
    - Cargas concentradas trifásicas desequilibradas;
    - Cargas distribuídas monofásicas, bifásicas e trifásicas;
    - Modelos de potência constante, corrente constante e impedância constante;
    - Cargas conectadas em Y e em  $\Delta$ .

O modelo adotado para a criação de cada cenário de curto-circuito visou inserir todos os parâmetros utilizados no escopo desta tese. Baseando-se nesse modelo, cada registro gerado apresenta uma combinação diferente dos parâmetros de localização da falta, resistência de falta, tipo de falta e carregamento do sistema. O modelo de curto-circuito entre duas barras ( $Bx$  e  $By$ ), apresentado na Figura 24, é composto por:

- Resistências de falta de fase ( $R_{fA}$ ,  $R_{fB}$  e  $R_{fC}$ ) e de terra ( $R_{fG}$ );
- Chaves comuns de fase ( $Ch_A$ ,  $Ch_B$ ,  $Ch_C$ ) e de terra ( $Ch_G$ ) para a seleção do tipo de falta do curto-circuito;

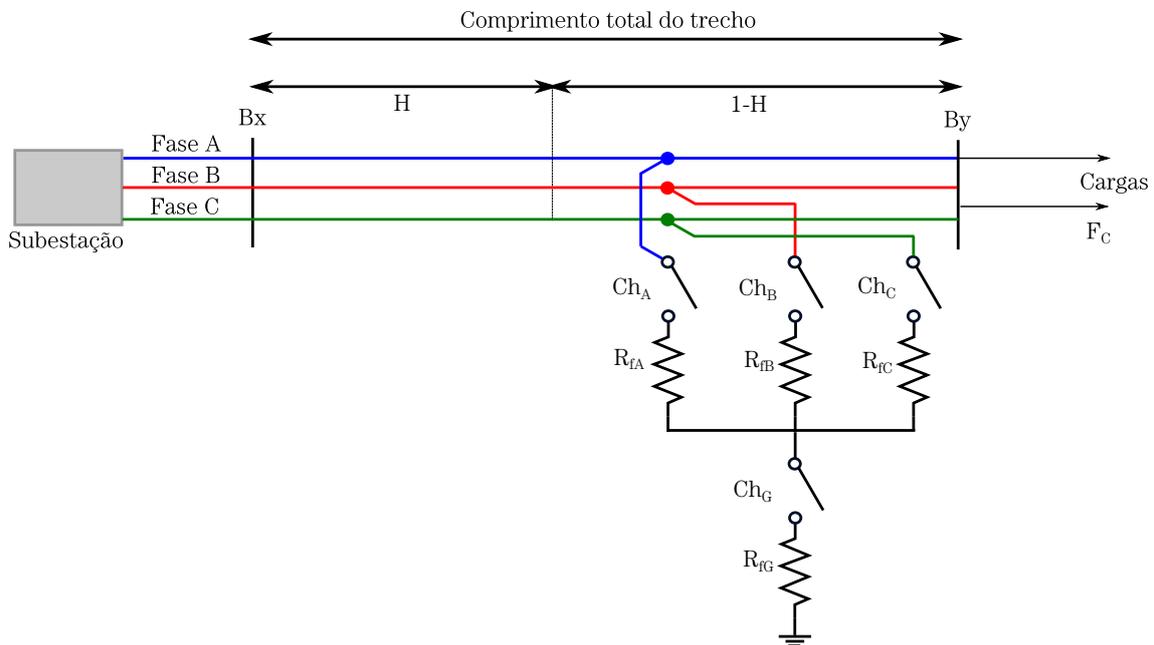
Figura 23 – Sistema-teste.



Fonte - Autoria própria.

- Variável de localização de falta ( $H$ );
- Fator de carga ( $F_C$ ).

Figura 24 – Modelo de curto-circuito.



Fonte - Autoria própria.

### 6.1.2 Especificação das variáveis de simulação

Uma etapa fundamental na construção da base de dados é a especificação de cada variável de simulação para determinar a sua abrangência de detalhes. Em relação aos parâmetros do

sistema, consideraram-se os carregamentos de 70% a 100%, com passo de 10%. Com relação aos parâmetros de curto-circuito, a resistência é determinada de acordo com a análise do sistema em relação às VTCD. De acordo com simulações prévias, resistências de falta com valores maiores que  $15 \Omega$ , quando adicionados aos  $15 \Omega$  de resistência de terra, não provocaram VTCD nas barras do alimentador. Desta forma, adotou-se este valor como limiar máximo de resistência de falta. Os tipos de falta foram escolhidos de acordo com o número de fases do local da falta. Como o sistema-teste apresenta linhas monofásicas e trifásicas, os tipos de falta foram: falta fase-terra para as linhas monofásicas; falta monofásica (FM), falta bifásica (FB), falta bifásica-terra (FBT) e falta trifásica-terra (FTT) para as linhas trifásicas.

Idealmente, todos os pontos do sistema deveriam ser considerados para a escolha dos pontos de falta. Entretanto, isso tornaria o processamento inviável, haja visto os elevados tempos de processamento e capacidade de armazenamento de dados requeridos. Neste sentido, propõe-se um modo alternativo que possibilite a aplicação do método, sem comprometer o seu desempenho e que não identifique variações elevadas de tensões remanescentes entre dois locais consecutivos. Nesta sentido, consideraram-se cenários de curtos-circuitos localizados em todas as barras e a cada 250 metros das linhas para o sistema de 34 barras.

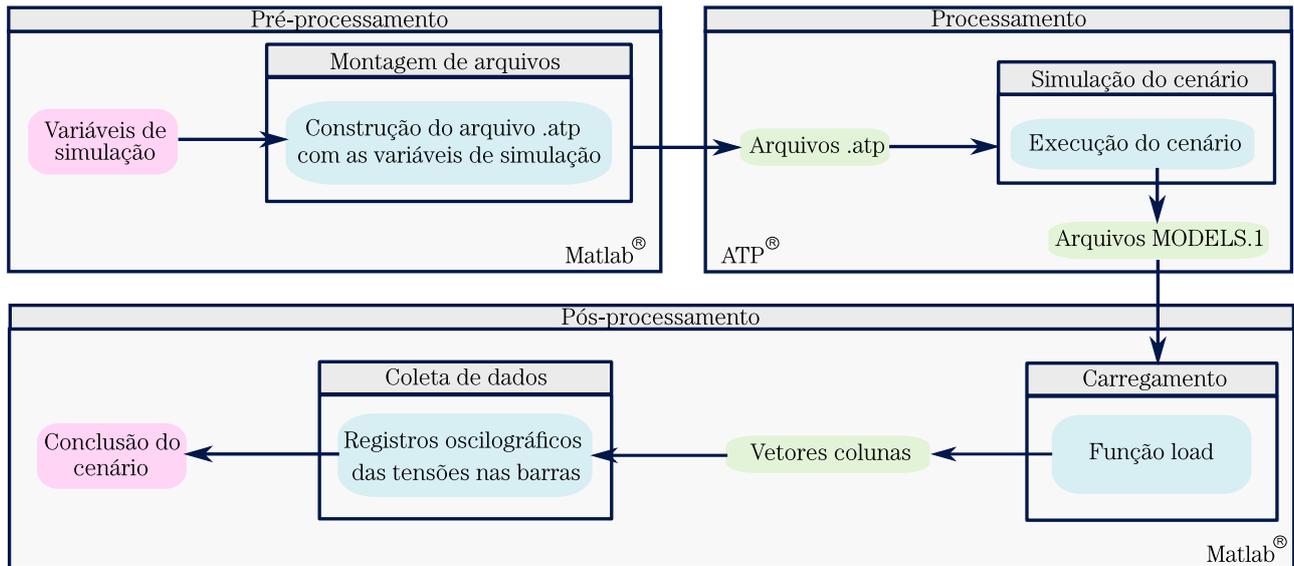
### 6.1.3 Automação da Construção da Base de Dados

É fato que a construção de uma base de dados manual está sujeita a erros e torna-se inviável à medida que sua complexidade cresce. Neste sentido, a automação torna-se indispensável. Nesta tese, a base de dados foi construída de forma automática, conforme apresentado na Figura 25.

O processo completo da construção da base de dados pode ser descrito do seguinte modo: a primeira etapa é a de pré-processamento, que consiste na etapa de construção dos arquivos com os cenários de curto-circuito, utilizando o *software* MATLAB<sup>®</sup> (*Matrix Laboratory*). Na montagem dos arquivos, as linhas referentes às variáveis de simulação são reescritas, a partir de um arquivo modelo, para gerar cada cenário específico. Ao final, um arquivo com linhas de códigos referentes à modelagem do sistema e às características do curto-circuito é gerado no formato .atp.

A próxima etapa é a de processamento, que corresponde à simulação dos cenários de curto-circuito de forma sequencial, a partir dos arquivos .atp provenientes da etapa de pré-

Figura 25 – Construção automática da base de dados.



Fonte - Autoria própria.

processamento. Por ser uma etapa repetitiva, automatizou-se uma sequência de ações que reduzem o esforço e o tempo necessário para a construção da base de dados. Para isso, desenvolveu-se uma rotina no *software* MATLAB<sup>®</sup> que utiliza a função *system* com o objetivo de executar o *software* ATP (*Alternative Transients Program*). Como saída, o arquivo modelo é configurado para gerar um arquivo MODELS.1, o qual pode ser lido diretamente pelo MATLAB<sup>®</sup>.

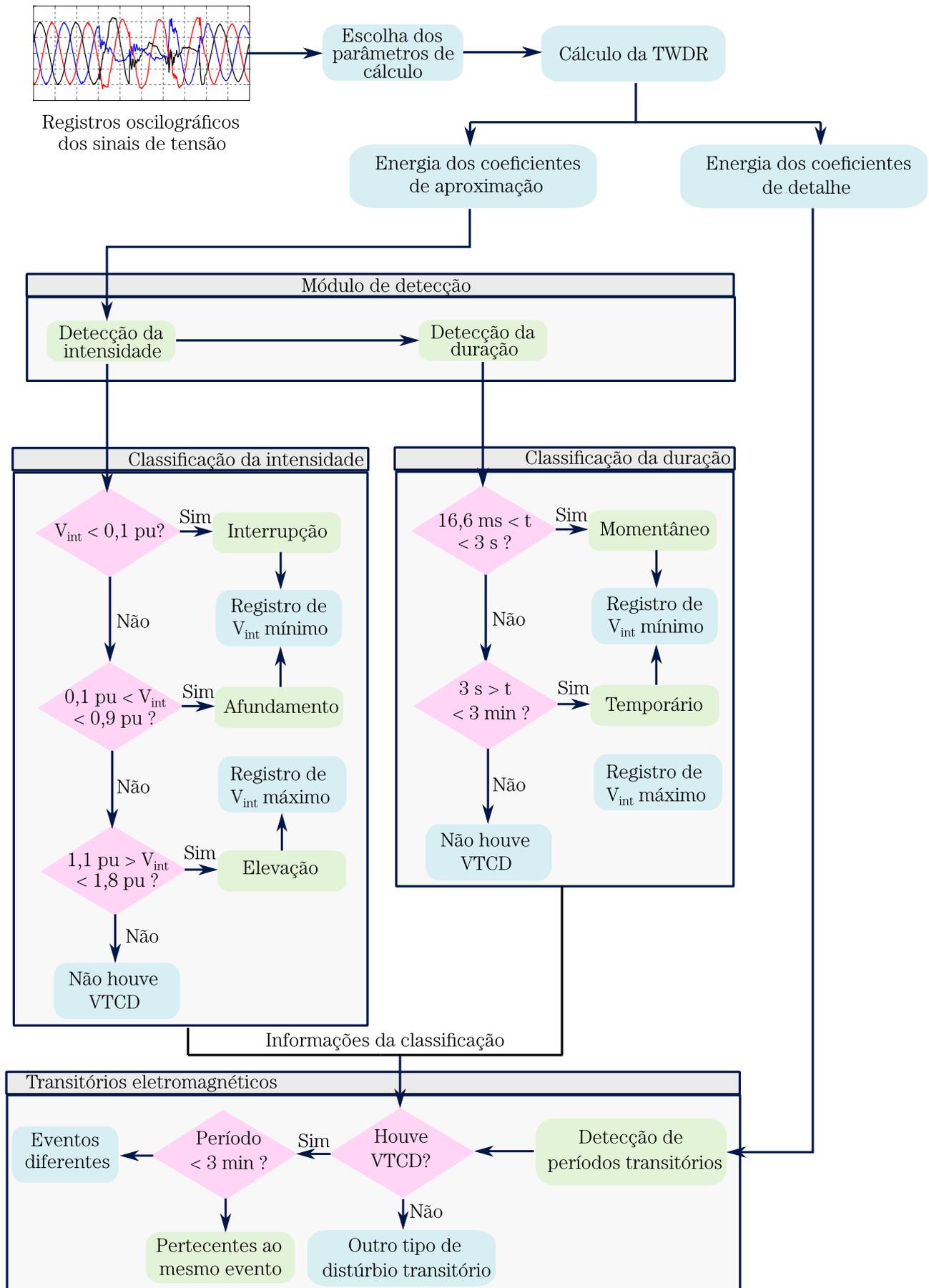
A etapa de pós-processamento é iniciada com o carregamento do arquivo MODELS.1 no MATLAB<sup>®</sup>, via função *load*. Em seguida, uma matriz com vetores colunas é formada e a coleta dos dados é realizada com os registros oscilográficos dos sinais de tensão das barras. O cenário de curto-circuito é concluído com o uso de uma nova combinação de variáveis de simulação para reiniciar o processo.

## 6.2 Detecção e Classificação utilizando a TWDR

Conforme apresentado no Capítulo 3, dependendo da ferramenta utilizada e da ocorrência de um evento, diferentes análises em relação às VTCD durante as medições podem ser realizadas. Para padronizar os registros oscilográficos dos sinais de tensão advindos da etapa de pós-processamento, uma metodologia de detecção e classificação de VTCD foi adotada, a qual é apresentada na Figura 26.

A metodologia de detecção e classificação de VTCD inicia com a escolha da taxa de

Figura 26 – Metodologia para detecção e classificação de VTCD.



Fonte - Autoria própria.

amostragem, tamanho da janela e o número de cálculos a cada ciclo do sinal de tensão. A análise prévia de sinais reais e simulados (Junqueira et al., 2020a), ambos com a presença de períodos transitórios, evidenciaram que resultados com 64, 128 e 256 amostras por ciclo apresentaram resultados semelhantes para a identificação da intensidade e duração. Com relação à detecção de períodos transitórios, o número de 64 amostras por ciclo apresentou intensidades similares aos resultados encontrados para 128 e 256 amostras por ciclo para os sinais analisados.

Para minimizar o esforço computacional, adotou-se o número de 64 amostras por ciclo. Outro ponto de destaque diz respeito às conclusões obtidas por Junqueira et al. (2020a) onde se constatou que as respostas para uma janela de meio ciclo, calculada amostra por amostra apresentaram decaimentos e elevações no sinal de tensão mais rápidos e identificação de um número maior de períodos transitórios durante um evento. Neste sentido, foram adotados nesta tese estes parâmetros para o cálculo da TWDR.

A ferramenta utilizada para análise das características da VTCD foi a TWDR com a *wavelet*-mãe (db4) que tem se destacado na detecção e classificação de distúrbios transitórios (Santos, 2016). A TWDR foi utilizada para extração dos coeficientes de aproximação ( $c_1$ ) e detalhe ( $d_1$ ) da primeira escala para cada uma das fases de uma barra. Além disso, a energia dos coeficientes de detalhe ( $\xi_d$ ) foi utilizada para identificar a presença de distúrbios transitórios e o número de eventos. A metodologia considera que quando um conjunto de períodos transitórios for detectado em um período menor que 3 minutos, apenas um evento é registrado. Caso contrário, os períodos transitórios seguintes fazem parte de um novo evento.

A energia dos coeficientes de aproximação ( $\xi_c$ ) é utilizada para classificar os eventos de acordo com a Tabela 3. Os afundamentos de tensão e interrupções são considerados eventos diferentes das elevações de tensão. Ademais, a intensidade mínima para afundamentos e interrupções e máxima para elevações são registradas. Ao final, o período mais longo para cada evento é considerado como sendo a sua duração.

A metodologia aplica o processo de detecção e classificação de VTCD em dois momentos distintos: i) durante o processo de escolha do número de medidores e suas respectivas localizações, descrito na seção a seguir; ii) durante o monitoramento para estimação de tensão nas barras não-monitoradas e redução do espaço de busca do local do curto-circuito, descrito na Seção "Resumo da Metodologia Proposta".

### 6.3 Instalação Otimizada de Medidores de QEE

Para cada evento de curto-circuito simulado, conforme o processo de construção automática da base de dados da Figura 25, um conjunto de registros oscilográficos das fases de cada uma das barras do sistema é gerado. Aplicando a metodologia para detecção e classificação de VTCD, apresentada na Figura 26, as tensões remanescentes na etapa de "Detecção de intensidade" são utilizadas para iniciar a formação da matriz  $[V_{rem}]$ . Conforme o fluxograma do método proposto da Figura 21, a matriz  $[V_{rem}]$  é responsável pela formação da matriz de observabilidade e pela formação dos índices que constituem a função objetivo do problema.

No contexto do processo de otimização, adotaram-se as seguintes correspondências entre o problema de instalação otimizada de medidores e o método BPSO:

- Partículas  $\rightarrow$  vetor de monitoramento ( $V_m$ );
- População  $\rightarrow$  conjunto de vetores de monitoramento;
- Posição  $\rightarrow$  localização dos medidores de QEE;
- Solução factível  $\rightarrow$  conjunto de medidores que atendem à restrição do problema;
- Função objetivo  $\rightarrow$  redução de: custos, erros de estimação e soluções simétricas;
- Restrição do problema: toda VTCD precisa ser detectada por pelo menos um dos medidores instalados;
- $P_{i_{best}}$   $\rightarrow$  melhor conjunto de medidores do vetor de monitoramento  $i$  até a iteração atual;
- $G_{best}$   $\rightarrow$  melhor conjunto de medidores do grupo de vetores de monitoramento até a iteração atual.

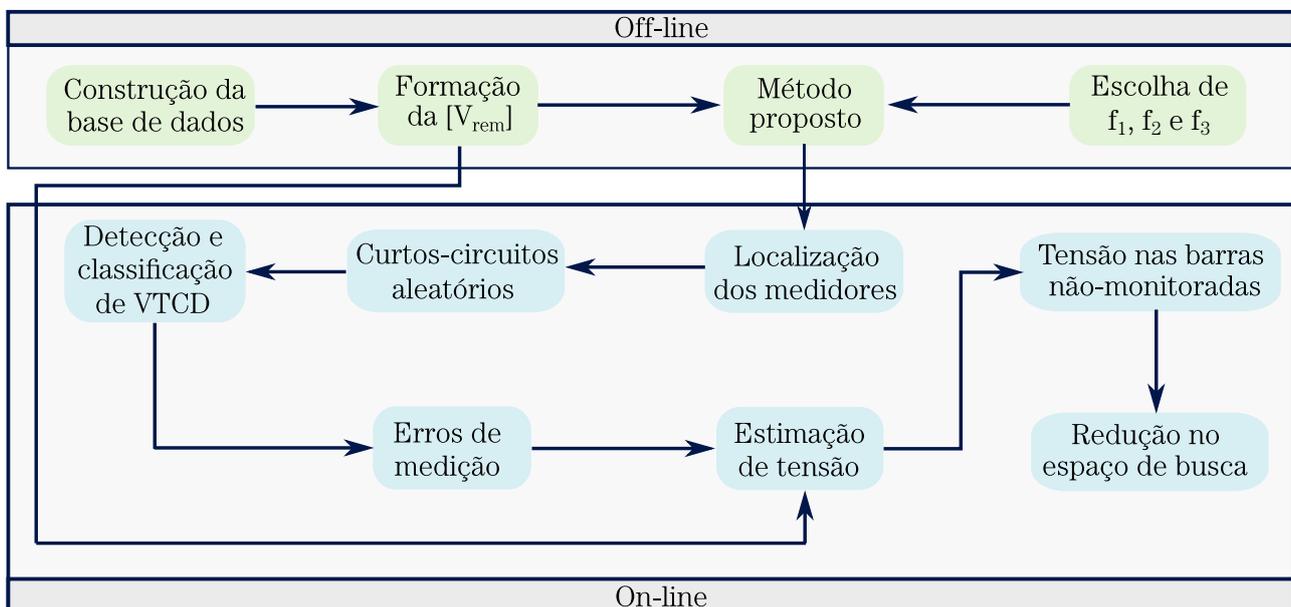
Para resolver o problema de otimização apresentado nesta tese, os parâmetros do método BPSO utilizados foram:  $w = -12$ ;  $c_{a1} = c_{a2} = 2$ ; número de partículas = 100; número de iterações = 100. Os valores negativos de  $w$  são justificados por resultar em velocidades negativas, as quais aumentam a tendência das partículas se movimentarem para posições com um número maior de zeros (Khanesar et al., 2007). No contexto da instalação otimizada de medidores, um número maior de zeros no vetor de monitoramento indica menos medidores a serem instalados. Além

disso, na dissertação de mestrado do autor desta tese (Junqueira, 2017), análises estatísticas foram realizadas para valores negativos de  $w$  e para  $c_{a1}$  e  $c_{a2}$ . Após o ajuste de curvas pela soma dos senos de seis termos, foram identificadas soluções com um número menor de medidores para uma faixa entre -15 e -5 para o valor de  $w$ . Destaca-se que variações significativas para os valores de  $c_{a1}$  e  $c_{a2}$  não foram observadas.

## 6.4 Resumo da Metodologia Proposta

A metodologia elaborada para o desenvolvimento e validação do método proposto é dividida em duas partes (*off-line* e *on-line*), como apresentada na Figura 27. A parte *off-line* é responsável pela construção da base de dados de VTCD causadas por curtos-circuitos e pela escolha do conjunto de medidores a serem instalados no sistema. A parte *on-line*, na prática, está relacionada aos registros advindos dos medidores instalados e que são utilizados para a estimação das tensões nas barras não-monitoradas e na redução do espaço de busca do curto-circuito.

Figura 27 – Fluxograma da metodologia.



Fonte - Autoria própria.

Inicialmente, na parte *off-line*, a  $[V_{rem}]$  é construída a partir da base de dados (Seção 6.1) e da detecção das tensões remanescentes nas barras (detecção de intensidade do fluxograma da Figura 26). Em seguida, com a escolha dos fatores-peso  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ , o processo de otimização para a escolha do conjunto de medidores é iniciado. Como resultado, a melhor combinação

( $G_{\text{best}}$ ) é utilizada para informar o número e a localização dos medidores, concluindo a parte *off-line*.

A parte *on-line* representa os registros de tensão das barras monitoradas no sistema em operação. Nesta tese, a parte *on-line* é representada pela geração de curtos-circuitos aleatórios, conforme apresentado no Apêndice A. A análise da quantidade de eventos aleatórios por período de tempo e as suas respectivas durações por evento, baseou-se na metodologia apresentada em Junqueira et al. (2020b) com as seguintes características:

- Número de curtos-circuitos aleatórios: 490 (média de números de eventos que ocorreram durante o período de um ano em uma concessionária local);
- Duração: obtidas por taxas de probabilidades. De 0 a 100 ms, 80%; valores maiores que 100 ms, 20%.

Após a ocorrência de cada curto-circuito aleatório, o processo de detecção e classificação da VTCD da Figura 26 é utilizado para identificar de forma precisa, as tensões remanescentes e as durações dos eventos para cada medidor instalado. Em seguida, o processo de estimação das tensões nas barras não-monitoradas é iniciado com a escolha dos  $E_m$ , conforme apresentados na Equação (25). A análise mais detalhada dos erros de medição não faz parte do escopo desta tese e três valores são analisados: 0,025 pu, 0,050 pu e 0,100 pu.

Para cada  $R \in C_{cs}(I)$  (Equação (27)), uma taxa de ocorrência  $F_{pz}(T_f, R_f, t_f, C_s)$  é calculada como uma função do tipo de falta, resistência de falta, trecho da falta e carregamento do sistema. Os valores de  $R_f$  e  $C_s$  são considerados os mesmos para cada possível local de falta, devido à dificuldade de obtenção de dados mais precisos em relação a esses parâmetros. As taxas de ocorrência dos outros dois parâmetros basearam-se nos critérios utilizados pelo método de Monte Carlo apresentado no Apêndice A.

Finalmente, com as tensões remanescentes nas barras monitoradas e as tensões estimadas nas barras não-monitoradas, um novo conjunto de possíveis locais de falta é formado. Como resultado, o número de possíveis locais de falta diminui para os eventos analisados, reduzindo o espaço de busca para a identificação do local da falta.

## 6.5 Considerações finais

Este capítulo teve como principal objetivo apresentar a metodologia elaborada para o desenvolvimento e validação do método proposto. Apresentaram-se os *softwares* utilizados, os modelos de curto-circuito adotados e as características do sistema-teste selecionado. Adicionalmente, apresentou-se a metodologia para detecção e classificação de VTCD, considerando a intensidade, duração e a presença de transitórios. Em seguida, os parâmetros utilizados no processo de instalação estratégica de medidores foi apresentado. Ao final, apresentou-se a metodologia completa desta tese.

# Capítulo 7

## Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao ser utilizado o método proposto para a identificação de VTCD em SDEE, a partir da instalação estratégica de medidores de QEE. Inicialmente, apresenta-se o desempenho da utilização da TWDR para a detecção e classificação de VTCD, via análise de sinais reais e simulados. Em seguida, o sistema-teste de 34 barras é utilizado para a validação do método proposto nesta tese. O número de medidores, a localização dos medidores, os erros de estimação das barras não-monitoradas e a redução no espaço de busca são apresentados para as soluções analisadas. Ao final, uma análise comparativa com outros métodos de estimação de VTCD nas barras não-monitoradas é apresentada.

### 7.1 Detecção e Classificação de VTCD

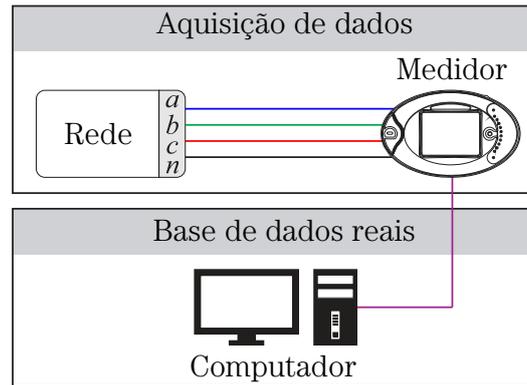
Esta seção apresenta os resultados obtidos para a detecção e classificação de VTCD. Ela foi dividida em duas partes: aplicação da TWDR para sinais reais e para uma base de dados simulada de VTCD.

#### 7.1.1 Sinais reais

Os sinais reais foram obtidos por um medidor de qualidade ("qualímetro"), instalado no período entre 27 de julho de 2019 e 19 de novembro de 2019 no quadro geral de baixa tensão do Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Apresenta-se na Figura 28, o esquema de montagem realizado. O medidor utilizado é do modelo Nexus 1500+, produzido pela *ElectroIndustry*, o qual é capaz de registrar até 1024 amostras por ciclo e transitórios de tensão até uma taxa de amostragem de 50 MHz. As informações são armazenadas pelo próprio medidor e exportadas via porta USB (*Universal Serial Bus*), utilizando o *software* Communicator Ext 3.0.

No total, 446 registros de tensão, representando 97 eventos distintos, foram capturados durante o período de medição. O Communicator Ext 3.0 foi configurado para que os sinais de

Figura 28 – Aquisição de dados reais.



Fonte - Autoria própria.

tensão fossem obtidos com uma taxa de amostragem de 15360 Hz (256 amostras por ciclo). Durante a análise dos sinais, foi necessária a modificação da duração do registro para que eventos consecutivos e evolutivos fizessem parte de um único evento registrado. Logo, a duração dos registros entre 0,1 e 2 s foram escolhidas para a análise dos sinais medidos.

O Communicator Ext 3.0 classificou os registros de VTCD de acordo com os limiares de disparo pré-estabelecidos (valores menores que 0,9 pu e maiores que 1,1 pu), utilizando o valor eficaz com janela de um ciclo, calculados uma vez por ciclo. Ao final, os 97 eventos representaram 78 VTCD distintas com os seguintes resultados:

- Intensidade:
  1. 36 interrupções de tensão (46,15 %);
  2. 30 afundamentos de tensão (38,46 %);
  3. 12 elevações de tensão (15,39 %).
  
- Duração:
  1. 34 com duração inferior a 100 ms (43,59 %);
  2. 44 com duração superior a 100 ms (56,41 %).

As VTCD registradas apresentaram três características principais: eventos simultâneos em diferentes fases, eventos evolutivos e eventos consecutivos. Além disso, foram registrados 19 eventos de transitórios de tensão, caracterizados pela presença de frequências elevadas sem

variação considerável na intensidade do sinal de tensão. Como forma de validar a utilização da TWDR para os sinais reais, os três tipos de VTCD registradas e os eventos de transitórios de tensão foram analisados.

A primeira análise foi realizada com relação ao número de amostras por ciclo. Após a identificação dos eventos de VTCD, percebeu-se que para uma duração maior que 100 ms, a diferença entre os resultados obtidos de intensidade e duração eram quase imperceptíveis. Para eventos com duração menor que 100 ms, os resultados apresentaram características de acordo com os instantes inicial e final e o tipo de fonte causadora do evento. Para ilustrar, os sinais reais da Figura 3 foram utilizados para demonstrar as diferenças entre o número de amostras por ciclo na análise das VTCD. A Tabela 13 apresenta os valores de  $\xi_c$  (valores mínimos para as fases A e C e máximo para a fase B),  $\xi_d$  (máximo para as três fases) e a duração da VTCD para cada uma das três fases, para uma janela de um ciclo, calculado amostra por amostra e com valores normalizados de acordo com os valores de intensidade antes da ocorrência da VTCD.

Tabela 13 – Valores de  $\xi_c$ ,  $\xi_d$  e duração com variação do número de amostras para os sinais da Figura 3.

	Phase A			Phase B			Phase C			
	$\xi_c$ (pu)	$\xi_d$	$\Delta t$ (ms)	$\xi_c$ (pu)	$\xi_d$	$\Delta t$ (ms)	$\xi_c$ (pu)	$\xi_d$	$\Delta t$ (ms)	
N	8	0,216	1,324	47,850	1,151	2,555	22,920	0,246	1,417	39,590
	16	0,206	2,594	40,630	1,149	4,969	31,290	0,206	2,376	40,030
	32	0,192	5,080	41,150	1,147	3,917	31,810	0,233	5,340	40,110
	64	0,197	7,580	40,990	1,147	7,525	32,440	0,254	8,937	40,890
	128	0,201	5,400	41,040	1,148	1,934	32,810	0,261	6,245	41,030
	256	0,201	2,300	41,080	1,151	1,199	32,810	0,263	2,280	41,020

Conforme a Tabela 13, os valores encontrados de intensidade ( $\xi_c$ ) para as três fases apresentam valores similares para 64, 128 e 256 amostras por ciclo. Para a detecção de transitórios e classificação de eventos ( $\xi_d$ ), um número de 64 amostras por ciclo apresentou maior sensibilidade para os três sinais analisados. Isso significa que os sinais apresentaram maior intensidade para uma faixa de frequência entre 960 Hz ( $\frac{f_s}{4}$ ) e 1920 Hz ( $\frac{f_s}{2}$ ). Apesar de em alguns eventos, os valores de ( $\xi_d$ ) serem maiores para 128 e 256 amostras por ciclo, as três maiores taxas de amostragem foram as únicas capazes de detectar eventos transitórios, com intensidade e duração similares para todos os eventos analisados. Visando minimizar o esforço computacional, o número de 64 amostras por ciclo foi utilizado para as análises seguintes.

A segunda análise foi realizada com relação ao tamanho da janela e o número de cálculos por ciclo. Conforme evidenciado no Capítulo 3, os cálculos de intensidade e duração, assim como a detecção de distúrbios transitórios, apresentam respostas mais rápidas quando são avaliadas utilizando uma janela de meio ciclo, calculada amostra por amostra. Logo, esses parâmetros foram utilizados na TWDR para análises comparativas nas etapas de detecção e classificação dos três tipos de VTCD registrados, de acordo com as seguintes referências:

- Método 1: Medidor de qualidade Nexus 1500+: valor RMS, janela de um ciclo e um valor por ciclo;
- Método 2: Referência internacional (IEEE, 2014): valor RMS, janela de um ciclo e um valor a cada meio ciclo;
- Método 3: Valor RMS, janela de meio ciclo, calculado amostra por amostra.

#### 7.1.1.1 VTCD em uma fase isolada

A fase A do sinal da Figura 3 foi utilizada como exemplo para a análise de um afundamento de tensão isolado. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Comparação entre os métodos para a fase A do sinal da Figura 3.

Método	Intensidade (pu)	Duração (ms)
(1)	0,262	33,333
(2)	0,251	33,333
(3)	0,171	38,280
TWDR	0,169	38,200

Análise da Tabela 14, mostra que dependendo do tamanho da janela e da quantidade de cálculos por ciclo, os valores da intensidade e duração podem apresentar resultados diferentes. A duração do afundamento de tensão para os métodos 1 e 2 se refere a dois ciclos do sinal (em 60 Hz) que a intensidade da tensão esteve abaixo de 0,9 pu. De maneira geral, a duração de eventos de VTCD para os métodos 1 e 2 está limitada a um número inteiro ou um número inteiro mais uma fração de meio ciclo, respectivamente. Quanto à intensidade, os métodos 1 e 2 registraram seis e doze valores distintos de tensão, respectivamente. Quando comparados aos métodos 3 e TWDR, os quais apresentaram um número maior de registros de tensão, as diferenças se aproximam de 0,1 pu.

Embora o método 3 tenha apresentado resultados similares, a resposta depende do nível de ruído e do conteúdo transitório. Em relação ao valor RMS, observa-se que ele pode apresentar oscilações que dificultam o cálculo da intensidade e duração, principalmente para eventos com durações próximas a um ciclo do sinal. Em relação à TWDR, uma vantagem é o uso de filtros passa-baixa no cálculo de  $\xi_c$  que permitem a redução de oscilações relacionadas às componentes transitórias maiores que  $\frac{f_s}{4}$  para a primeira escala e minimizam a influência dos ruídos. Além disso, a TWDR fornece informações extras de detecção de transitórios que podem ser utilizadas para a detecção de outros distúrbios transitórios.

### 7.1.1.2 VTCD em um evento evolutivo

Os sinais das três fases da Figura 3 foram utilizados para apresentar a análise da intensidade e duração para uma falta evolutiva. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15, adotando-se o seguinte:

- Para todos os métodos, o menor valor de intensidade para afundamentos de tensão e interrupção foi registrado;
- O valor máximo para elevação de tensão foi registrado;
- Uso da duração máxima para representar cada evento.

Tabela 15 – Comparação entre os métodos para a falta evolutiva da Figura 3.

Método	Intensidade (pu)	Duração (ms)
(1)-AT	0,262	33,333
(2)-AT	0,206	33,333
(3)-AT	0,171	38.600
TWDR-AT	0,169	38.580
(1)-ET	1,102	0,000
(2)-ET	1,146	33,330
(3)-ET	1,169	49,740
TWDR-ET	1,169	49,220

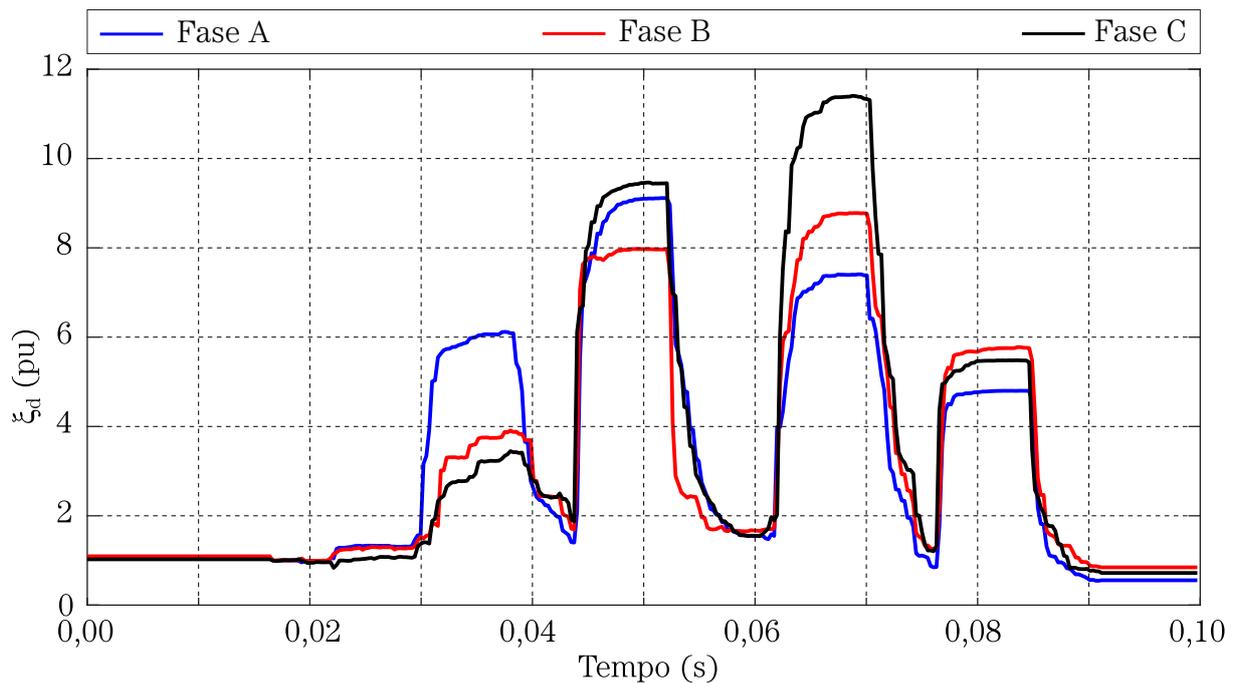
Análise da Tabela 15 mostra que apesar do método 1 detectar uma elevação de tensão, não houve registro de outra amostra com valor maior que 1,1 pu para identificar a duração do evento. Embora a fase C tenha apresentado um afundamento de tensão, a intensidade e

duração foram identificadas pelo afundamento de tensão na fase A em todos os métodos, o qual apresentou menor intensidade e maior duração.

Semelhante aos resultados obtidos na Tabela 14, os resultados de intensidade e duração estão diretamente relacionados ao tamanho da janela e a quantidade de cálculos por ciclo. Observou-se que a TWDR identificou dois eventos distintos (um afundamento de tensão e uma elevação de tensão), via detecção de períodos transitórios e intensidades dos sinais de tensão nas três fases. Embora o método 3 tenha apresentado a mesma classificação para a falta evolutiva quando comparada à TWDR, o valor RMS apresenta uma influência maior de ruídos e transitórios, podendo levar a classificações diferentes da TWDR, principalmente em tensões remanescentes próximas aos limiares de detecção.

Apresenta-se na Figura 29, a detecção de transitórios obtida por  $\xi_d$  para cada uma das fases.

Figura 29 – Comportamento da  $\xi_d$  para a falta evolucionária.



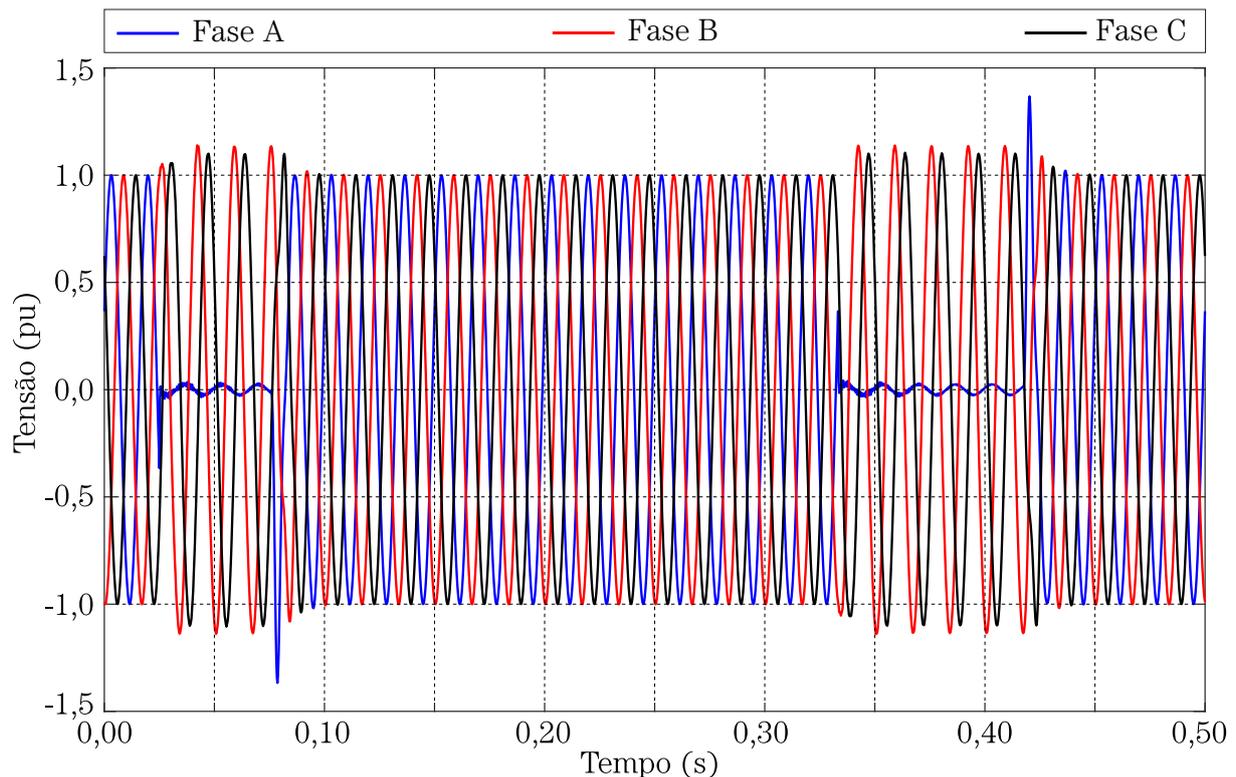
Fonte - Autoria própria.

Análise da Figura 29 mostra que os períodos transitórios são sensibilizados em todas as fases nos mesmos instantes de tempo. Constatou-se que eles estão relacionados aos momentos nos quais um evento ocorre em pelo menos uma das fases do sinal analisado. Portanto, pode-se inferir que durante as VTCD, os períodos transitórios podem ser identificados e utilizados para descrever com mais detalhes as características do evento.

### 7.1.1.3 VTCD em um evento consecutivo

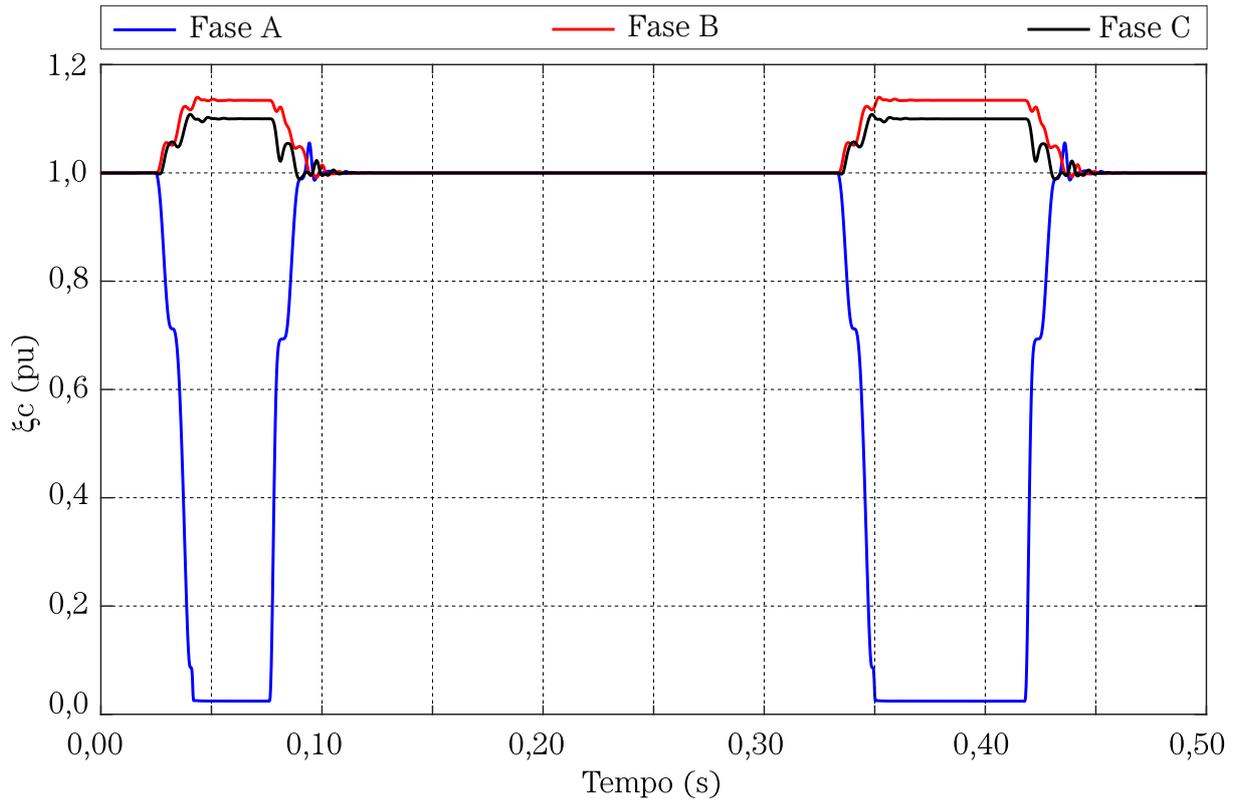
Apresenta-se na Figura 30, um registro de uma falta consecutiva, o qual resultou em uma interrupção de tensão na fase A e elevações de tensão nas fases B e C. Nas Figuras 31 e 32, são apresentados os resultados obtidos para as energias  $\xi_c$  e  $\xi_d$  da Figura 30, respectivamente. De acordo com a Figura 31, a energia  $\xi_c$  apresenta uma redução na intensidade de tensão em dois momentos distintos. No entanto, de acordo com a ANEEL (2018), eles não são caracterizados como dois eventos distintos, devido à duração ser menor que 3 min. Além disso, elevações de tensão são registradas nas fases B e C, como consequência do evento de interrupção de tensão na Fase A. Análise da Figura 32 mostra que a energia  $\xi_d$  detectou a presença de transitórios durante o evento consecutivo. Vale destacar que a fase sob falta resultou em valores maiores de energia  $\xi_d$  nos instantes específicos que marcam o início e o fim dos períodos transitórios.

Figura 30 – Exemplo de falta consecutiva.



Fonte - Autoria própria.

Na Tabela 16 é apresentada uma análise comparativa entre os métodos para o evento consecutivo. Os valores mínimos para interrupção de tensão e máximos para elevação de tensão foram utilizados para identificar a intensidade das VTCD. Conforme a Tabela 16, os resultados referentes aos métodos 1 e 2 apresentaram valores similares quando comparados aos métodos 3

Figura 31 – Energia  $\xi_c$  para falta consecutiva.

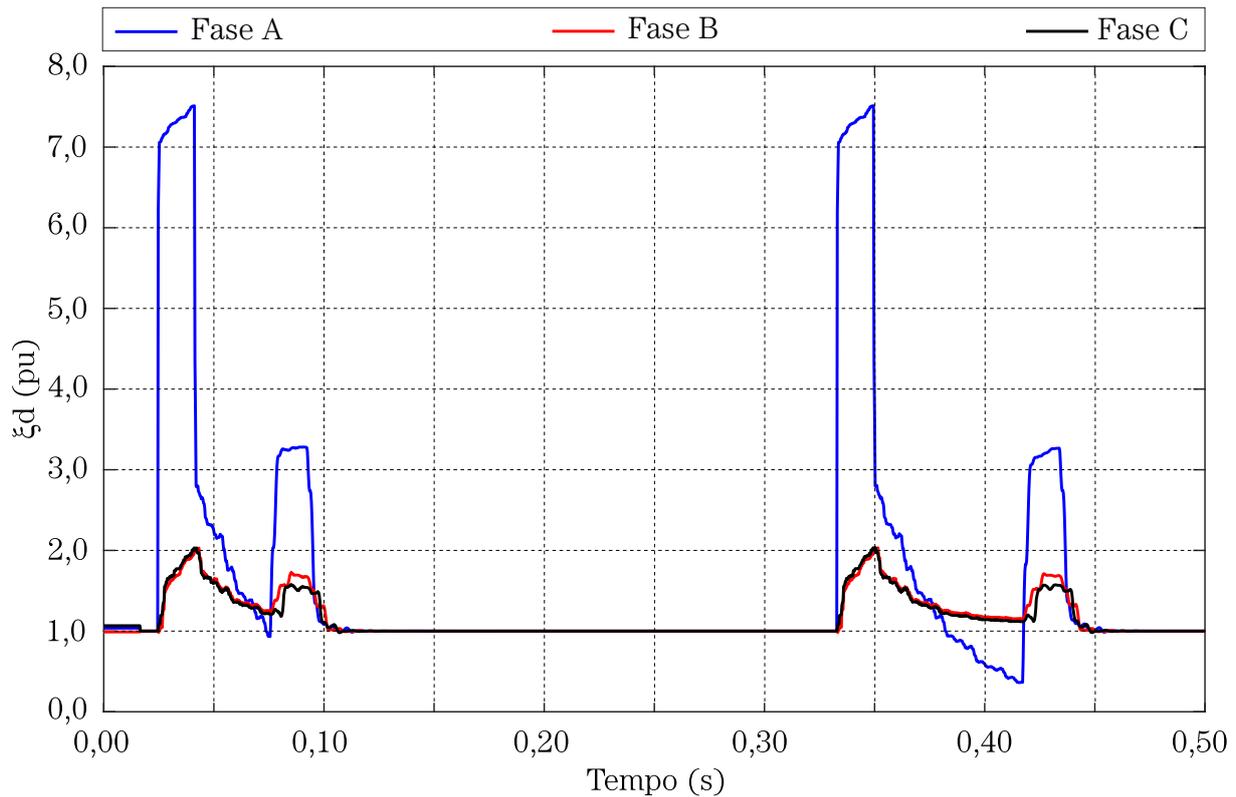
Fonte - Autoria própria.

e a TWDR em eventos de longa duração.

Tabela 16 – Comparação entre os métodos para a falta consecutiva da Figura 30.

Método	Intensidade (pu)	Duração (ms)	Detecção de transitórios	Número de eventos
(1)-INT	0,024	383,333	-	-
(2)-INT	0,024	383,333	-	-
(3)-INT	0,024	394,280	-	-
TWDR-INT	0,024	394,280	✓	1
(1)-ET	1,135	366,670	-	-
(2)-ET	1,136	383,330	-	-
(3)-ET	1,169	395,050	-	-
TWDR-ET	1,169	394,790	✓	1

Embora o evento tenha apresentado duas interrupções e duas elevações de tensão em instantes diferentes, a metodologia para detecção e classificação de VTCD utilizando a TWDR identificou apenas dois eventos: uma interrupção e uma elevação de tensão. A energia  $\xi_d$  identificou o início e o final de cada evento do sinal do evento consecutivo. Os resultados encontrados na Tabela 16 e em outros eventos com duração maiores que 100 ms mostraram que a diferença entre os métodos tendem a diminuir relativamente, para eventos mais longos.

Figura 32 – Energia  $\xi_d$  para falta consecutiva.

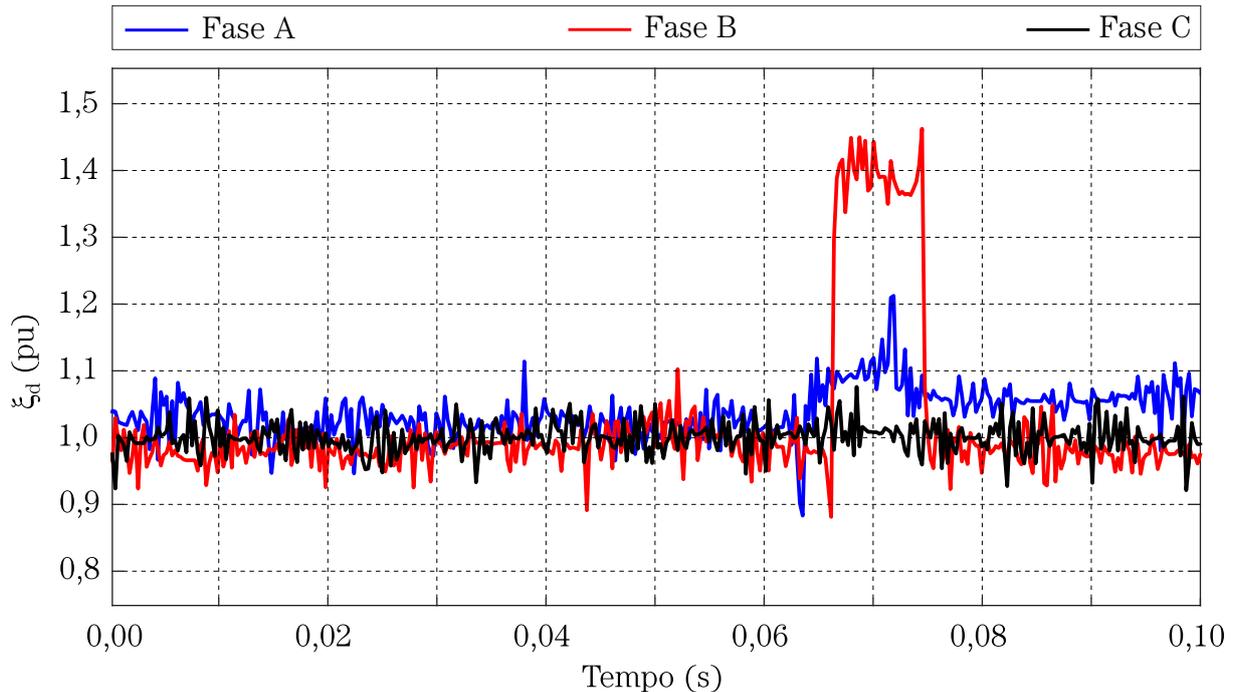
Fonte - Autoria própria.

Portanto, a ferramenta matemática utilizada para detectar e classificar VTCD precisa ser avaliada em eventos com intensidades e durações diferentes.

#### 7.1.1.4 Transitórios de tensão

Como dito anteriormente, além das VTCD, o medidor registrou sinais classificados como transitórios de tensão. Conforme se constatou, o Nexus 1500+ apresenta um recurso transitório que combina taxas de amostragens diferentes. Os registros com taxas mais elevadas podem chegar aos Mega Hertz (MHz), enquanto que os registros com taxas mais reduzidas são capturados de acordo com a taxa de amostragem. Quando um transitório de tensão é detectado, o medidor converte a taxa de amostragem reduzida para uma taxa de amostragem elevada.

Nesta tese, os registros de transitórios de tensão foram reamostrados para a taxa de 64 amostras por ciclo, visando avaliar a aplicação da metodologia de detecção e classificação de VTCD utilizando a TWDR. Apresenta-se na Figura 33, a energia  $\xi_d$  de um exemplo de transitório de tensão na fase B de um sinal real, no qual não foram identificadas variações significativas no sinal senoidal e na energia  $\xi_c$  das três fases.

Figura 33 – Energia  $\xi_d$  para o registro de transitório de tensão.

Fonte - Autoria própria.

Análise da Figura 33 mostrou que é possível identificar uma elevação da energia  $\xi_d$ , principalmente na fase B, entre 66,4 ms e 74,7 ms do sinal registrado, utilizando uma taxa de 64 amostras por ciclo. Apesar do evento não ser classificado como uma VTCD, a metodologia apresentada no Capítulo 6 para detecção e classificação de VTCD utilizando a TWDR, permitiu caracterizar o evento como sendo um distúrbio transitório diferente de uma VTCD. Quando comparados aos eventos de VTCD analisados anteriormente, os transitórios de tensão apresentaram elevações menores da energia  $\xi_d$  para a taxa de amostragem utilizada.

#### 7.1.1.5 Considerações finais para os sinais reais

Nas subseções anteriores foram apresentados um exemplo para cada evento registrado pelo medidor de QEE. Uma análise comparativa foi realizada para os 97 eventos, que conduziu às seguintes constatações:

- Os métodos 1 e 2 apresentam limitações no cálculo da intensidade e duração, principalmente para eventos com duração menor que 100 ms;
- O método 3 e a TWDR podem apresentar detecções diferentes de VTCD próximas aos limiares de detecção, devido à influência de ruídos e transitórios;

- O conceito de energia e a utilização de filtros passa-baixa permite reduzir a influência de ruídos e transitórios no cálculo da energia  $\xi_c$ ;
- A energia  $\xi_d$  pode detectar a presença de VTCD e outros distúrbios transitórios;
- A energia  $\xi_d$  pode identificar o número de eventos durante um distúrbio transitório.

Resumidamente, a etapa de análise dos dados reais é de extrema importância para avaliar as características presentes nos sinais durante um distúrbio transitório de VTCD. Com ela, é possível identificar as ferramentas necessárias para o desenvolvimento desta tese, como: construção da base de dados e validação do método proposto. Neste sentido, adotou-se o seguinte para execução das etapas de detecção e classificação de VTCD:

1. Ferramenta matemática: TWDR;
2. Taxa de amostragem: 64 amostras por ciclo;
3. Uso de uma janela de meio ciclo, deslocada amostra por amostra;

### 7.1.2 Base de dados de VTCD

A partir de um conjunto de simulações computacionais no *software* ATP, foi possível obter uma análise mais detalhada sobre a metodologia de detecção e classificação de VTCD aplicada ao sistema-teste. Uma base de dados de VTCD resultante de curtos-circuitos foi construída para o sistema de 34 barras, de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 6. Após a análise dos cenários e construção da  $[V_{rem}]$ , identificou-se que a barra 19 apresentava a maior sensibilidade em relação às VTCD, a qual foi escolhida para uma análise mais detalhada do uso da TWDR para a detecção e classificação da VTCD.

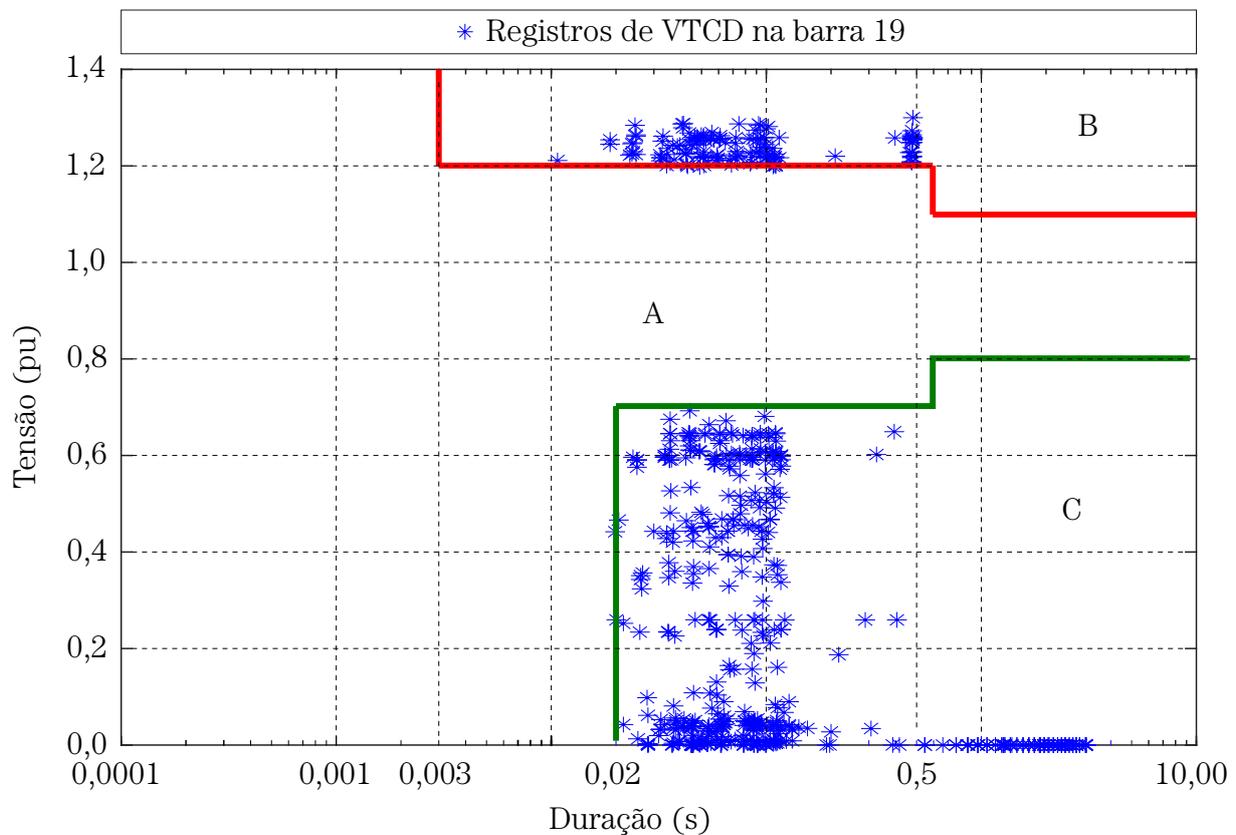
Um conjunto de 490 cenários aleatórios (Apêndice A) foi modelado a partir do método de Monte Carlo para a escolha dos parâmetros de curto-circuito. Ao final, foram obtidos:

- 247 interrupções de tensão;
- 215 afundamentos de tensão;
- 303 elevações de tensão;

- 18 distúrbios transitórios de tensão diferentes de VTCD;
- 10 eventos sem classificação.

Apresenta-se na Figura 34, a sensibilidade da barra 19 para os cenários de curto-circuito analisados. Cada registro foi adicionado à curva ITI para relacionar os resultados às curvas de tolerância na análise da sensibilidade de equipamentos eletrônicos, o que permite identificar os efeitos nos equipamentos conectados à barra, com os possíveis números de desligamentos e danos.

Figura 34 – Registros de VTCD na barra 19 utilizando a TWDR.



Fonte - Autoria própria.

A estratificação das VTCD visando correlacionar cada evento com a sensibilidade de diferentes tipos de carga conectadas ao sistema é apresentada na Tabela 17, cuja análise mostra que as elevações de tensão concentraram-se em durações menores que 600 ms, representados pela Região H. Além disso, a região E, a qual combina eventos de afundamentos de tensão e interrupção de tensão, apresentou a maior quantidade de registros advindos das medições na barra 19. Portanto, equipamentos conectados à barra 19 com sensibilidade nas regiões H e E estão mais sujeitos aos maiores impactos em termos de danos e desligamentos, respectivamente.

Tabela 17 – Divisão das VTCD de acordo com a sensibilidade da barra 19.

Intensidade (pu)	Duração						
	$16,67\text{ms} \leq t \leq 100 \text{ ms}$	$100 \text{ ms} \leq 300 \text{ ms}$	$300 \text{ ms} \leq 600 \text{ ms}$	$600\text{ms} \leq 1 \text{ s}$	$1 \text{ s} \leq 3 \text{ s}$	$3 \text{ s} \leq 1 \text{ min}$	$1 \text{ min} \leq 3 \text{ min}$
$V_{int} \geq 1,15$	303 (Região H)			0 (Região I)			
$1,10 \leq V_{int} \leq 1,15$							
$0,85 \leq V_{int} \leq 0,90$	0 (Região A)			0 (Região G)			
$0,80 \leq V_{int} \leq 0,85$							
$0,70 \leq V_{int} \leq 0,80$	45 (Região B)	28 (Região D)		85 (Região F)			
$0,60 \leq V_{int} \leq 0,70$							
$0,50 \leq V_{int} \leq 0,60$	75 (Região C)	28 (Região D)		85 (Região F)			
$0,40 \leq V_{int} \leq 0,50$							
$0,30 \leq V_{int} \leq 0,40$	229 (Região E)			85 (Região F)			
$0,20 \leq V_{int} \leq 0,30$							
$0,10 \leq V_{int} \leq 0,20$							
$V_{int} \leq 0,10$							

Análise da Figura 34 e Tabela 17 mostra que um único medidor instalado na barra 19 foi suficiente para a detecção de 462 eventos de afundamentos ou interrupção e 303 eventos de elevação de tensão. Além disso, em eventos que não houve variação significativa na intensidade da tensão, a TWDR conseguiu identificar transitórios de tensão em 18 cenários de curto-circuito. Ao final, 480 dos 490 cenários obtiveram pelo menos uma classificação utilizando a TWDR. Eventos não classificados estão relacionados a localização do medidor.

Apesar da barra 19 apresentar maior sensibilidade em relação às VTCD, a instalação de um único medidor nessa barra não seria suficiente para garantir a detecção de VTCD completa no sistema. A forma de solucionar este problema adotada nesta tese, foi adicionar novos medidores de forma estratégica, como será apresentada na seção a seguir. Além disso, mesmo garantindo a detecção, é importante identificar as tensões nas barras não-monitoradas e identificar as zonas de ocorrência do curto-circuito.

Por fim, pode-se afirmar que o uso da TWDR representa uma mudança em relação aos métodos tradicionais de detecção e classificação de VTCD aplicado a um sistema de

monitoramento estratégico. Além de trazer resultados semelhantes aos encontrados utilizando o valor RMS, a TWDR tem a característica de identificar períodos transitórios que podem ser utilizados na detecção de outros distúrbios transitórios. Um exemplo são as faltas de alta impedância, que podem não apresentar variações na intensidade de tensão em nenhuma das barras, mas podem ser identificadas pelos períodos transitórios, como demonstrado em Santos (2016). Portanto, o método apresentado nesta tese para detecção e classificação de VTCD, pode ser avaliado também, para tratar desse tipo de curto-circuito.

## 7.2 Estimação de Tensão nas Barras não-monitoradas

Esta seção apresenta a aplicação do método proposto ao sistema de 34 barras do IEEE e está dividida em duas partes: na parte *off-line*, a instalação estratégica de medidores é apresentada com diferentes fatores-peso para  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ ; na parte *on-line*, os conjuntos de medidores escolhidos são utilizados para validar o processo de estimação e na redução no espaço de busca, apresentando os erros associados a cada uma das soluções.

### 7.2.1 Instalação estratégica de medidores (parte *off-line*)

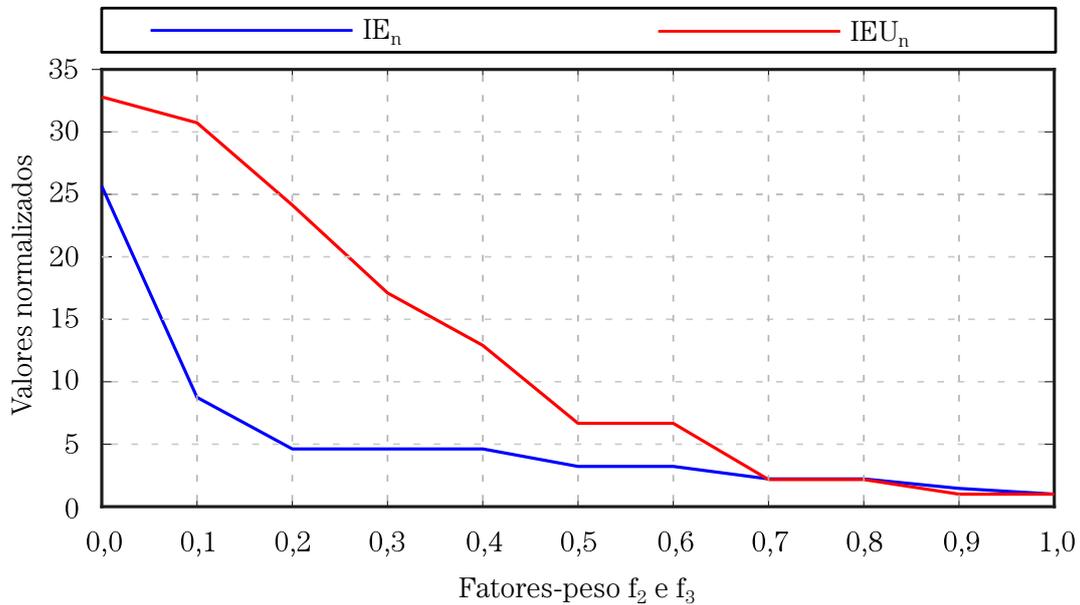
O processo de análise do método proposto nesta tese, baseou-se na adição dos seguintes critérios:

1. Para obter mais informações das tensões remanescentes nas barras, o custo de instalação dos medidores é igual a 1 (um) para barras trifásicas e 35 (números de barras + 1) para barras monofásicas e bifásicas;
2. Os valores de EI e  $(q - \text{IEU})$  são normalizados em uma faixa entre 1 (um) e 34 (número de barras) e denominados  $\text{EI}_n$  e  $\text{IEU}_n$ , respectivamente;
3. A soma dos fatores  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  é sempre igual a 1 (um);
4. Para todas as soluções, considerou-se a presença da medição na subestação do sistema, localizada na barra 1.

A primeira análise refere-se à sensibilidade da resposta em relação ao problema, com a adição dos dois novos índices IE e IEU separadamente. Inicialmente, considera-se a variação dos

parâmetros  $f_1$  e  $f_2$ , mantendo-se  $f_3$  igual a 0 (zero). Em seguida, considera-se a variação dos parâmetros  $f_1$  e  $f_3$  mantendo-se  $f_2$  igual a 0 (zero). Apresentam-se na Figura 35, os valores de  $IE_n$  e  $IEU_n$  com a variação de  $f_2$  e  $f_3$ , respectivamente.

Figura 35 – Valores de  $IE_n$  e  $IEU_n$  com variação dos fatores-peso.

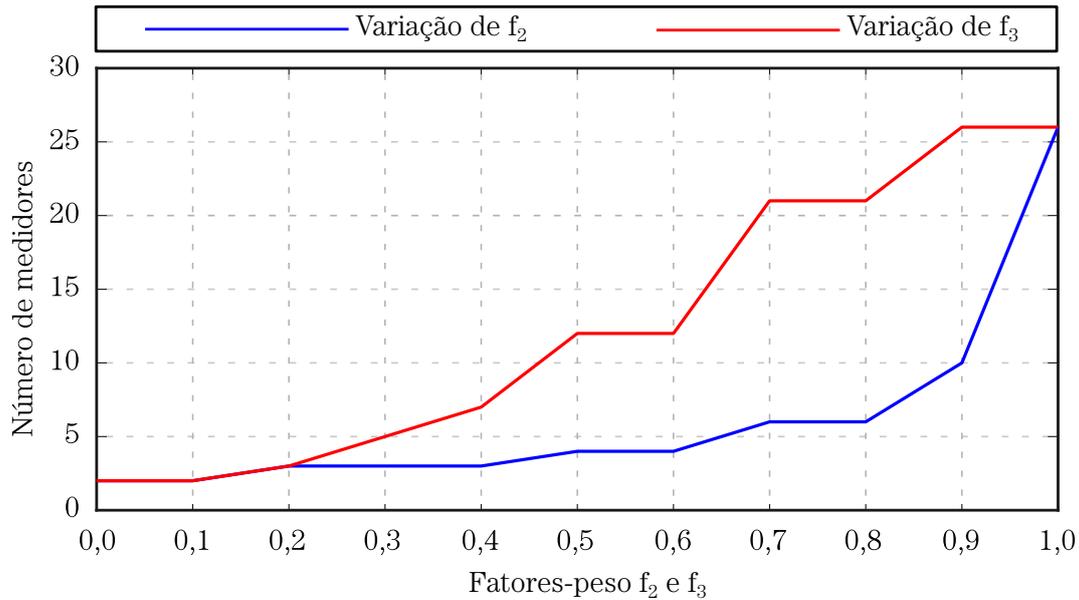


Fonte - Autoria própria.

Para exemplificar a informação apresentada na Figura 35, um valor para cada um dos gráficos é considerado. Para o gráfico em azul, o valor de  $f_2 = 0,1$ , tem como  $f_1 = 0,9$ ,  $f_3 = 0,0$  e  $IE_n = 8,75$ . Para o gráfico em vermelho, o valor de  $f_3 = 0,2$ , tem como  $f_1 = 0,8$ ,  $f_2 = 0,0$  e  $IEU_n = 24,12$ . Para complementar a análise, apresenta-se na Figura 36, o número de medidores com a variação de  $f_2$  e  $f_3$ .

Análise das Figuras 35 e 36 mostra que a variação de  $f_2$  está diretamente relacionada com a redução nas diferenças entre os valores da base de dados nas barras não-monitoradas em condições simétricas, representada por  $IE_n$ . Entretanto, como consequência, o processo de otimização converge para uma solução com prioridade de estimar tensões remanescentes nas barras não-monitoradas e, para isso, é necessário um número maior de medidores.

O aumento do fator  $f_3$  está relacionado com o número de eventos únicos identificados pelo conjunto de medidores, para a base de dados de VTCD, representados pelo problema de minimização modificado  $IEU_n$ . Para priorizar a identificação de eventos únicos com o aumento do fator-peso  $f_3$ , de acordo com a Figura 36, é necessário o aumento do número de medidores. Além disso, observa-se na Figura 36, que  $f_3$  é mais sensível à variação do número de medidores,

Figura 36 – Número de medidores com a variação de  $f_2$  e  $f_3$ .

Fonte - Autoria própria.

alcançando valores maiores que os encontrados para  $f_2$ , a partir de 0,2.

Para aplicar o método proposto nesta tese, foram selecionadas seis soluções, com seus respectivos valores de  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ , as quais são apresentadas na Tabela 18. A solução 1 (S1) apresenta os resultados obtidos para a função objetivo tradicional (apenas com a função custo), conforme apresentada em Olguin (2005), Mora (2012), Xiu e Liao (2014) e Hernández e Milanović (2019). As soluções 2 (S2), 3(S3) e 4 (S4) apresentam respostas considerando a utilização de dois fatores-peso separadamente:  $f_1$  e  $f_2$  para S2 e S3 e  $f_1$  e  $f_3$  para S4. As soluções 5 (S5) e 6 (S6) utilizam os três fatores-peso para a obtenção da resposta ao problema.

Análise detalhada da Tabela 18 levou às seguintes constatações:

- A solução que representa os métodos tradicionais da função objetivo (S1), apresenta a menor quantidade de medidores para o propósito da solução (3 medidores), o qual é apenas detecção das VTCD. Como consequência, a solução S1 não leva em consideração os casos em que há simetria para a base de dados utilizada e, por isso, apresentam os valores mais elevados de  $IE_n$  e  $IEU_n$ ;
- As soluções S2 e S5 apresentaram o mesmo número de medidores para o monitoramento (5 medidores), porém com fatores diferentes. Com a presença de  $f_3$  em S5, o processo de otimização converge para uma solução com um número maior de eventos únicos e um

Tabela 18 – Instalação Estratégica de Medidores

Solução	Medidores	$f_1$	$f_2$	$f_3$	Custo	IE	IE <sub>n</sub>	IEU	IEU <sub>n</sub>	$F_o^*$
S1	1, 19 e 28	1,00	0,00	0,00	3,00	47,01	10,92	5037	29,44	3,00
S2	1, 9, 11 28 e 34	0,70	0,30	0,00	5,00	26,91	5,97	6297	24,55	5,29
S3	1, 9, 11 19, 28 e 34	0,30	0,70	0,00	6,00	16,99	2,22	7850	19,26	3,35
S4	1, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 17, 27 28, 33 e 34	0,50	0,00	0,50	12,00	9,12	1,59	10517	8,19	10,09
S5	1, 9, 19, 28 e 34	0,70	0,10	0,20	5,00	18,12	6,53	7890	18,53	7,55
S6	1, 5, 7, 8, 9, 28 e 34	0,50	0,25	0,25	7,00	17,17	2,24	8597	12,91	7,28

IEU<sub>n</sub> menor. Um valor mais elevado de  $f_2$  em S2 entretanto, resulta em um valor menor de IE<sub>n</sub> na solução encontrada;

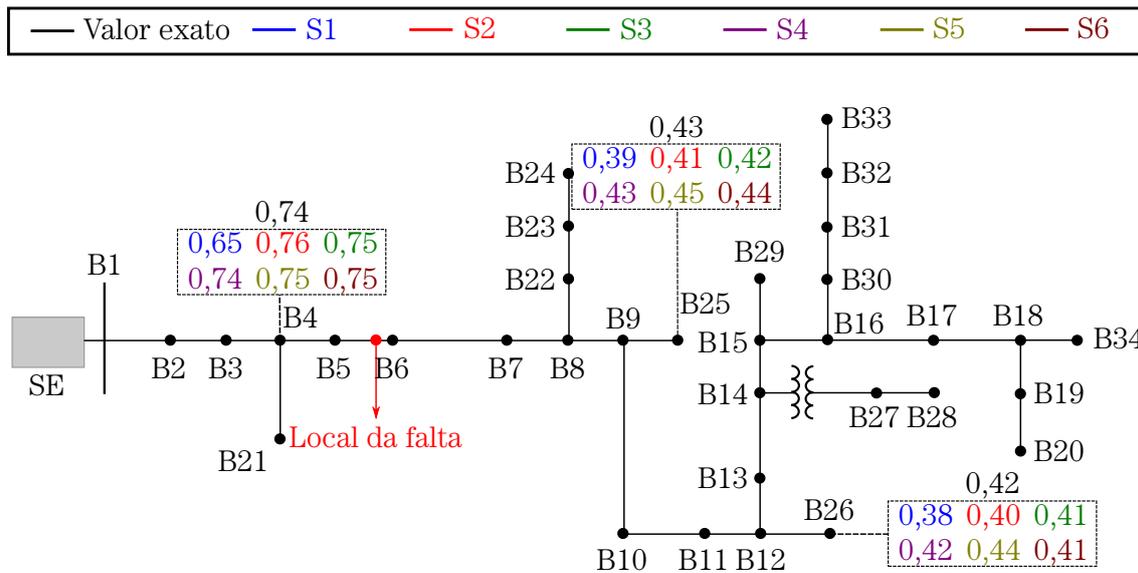
- A solução S4 apresenta o maior número de medidores para as soluções analisadas (12 medidores) devido à maior sensibilidade com a variação de  $f_3$ , como visto anteriormente. Apesar disso, a solução apresentou o menor valor para IEU<sub>n</sub>;
- As soluções S5 e S6 utilizaram os três fatores-peso no processo de escolha dos medidores. Observa-se na Tabela 18 que a diminuição em  $f_1$  e aumento em  $f_2$  e  $f_3$  causaram um ajuste no número e na localização dos medidores.

### 7.2.2 Estimação de tensão nas barras não-monitoradas

As seis soluções escolhidas na seção anterior foram utilizadas para a análise da estimação de tensão nas barras não-monitoradas. Apresenta-se na Figura 37, um exemplo das tensões remanescentes na fase B em três barras não-monitoradas (barras 4, 25 e 26). Um curto-circuito aleatório ocorreu em 81 % da linha B5-B6, com resistência de falta de 14,34  $\Omega$ , carregamento de 70,95 %, do tipo fase-fase-terra (fases B e C) e erros de medição ( $E_m$ ) de 0,025 pu.

Conforme apresentado na Figura 37, a solução S1 apresentou as maiores diferenças de tensão remanescente quando comparadas ao valor exato. Tais erros são indesejáveis principalmente em situações próximas aos limiares de detecção, podendo haver estimação de registros de afundamentos de tensão ou elevação de tensão de forma incorreta. Além disso, os resultados

Figura 37 – Tensões remanescentes em três barras não-monitoradas para um curto-circuito aleatório.



Fonte - Autoria própria.

da solução S1 comprometem a previsão de desligamentos e danos nas barras não-monitoradas, dificultando também a identificação do local em que ocorreu a falta.

Análise da Tabela 18, mostra que os valores de IE e  $IE_n$  das soluções S2 e S5 são maiores que os valores das soluções S3 e S6. A partir disso, espera-se que as soluções com maiores IE apresentem diferenças maiores durante o processo de estimação quando comparados aos valores exatos, conforme apresentado na Figura 37. Observou-se que a solução S4 apresentou as mesmas tensões remanescentes comparadas os valores exatos. Além disso, um número maior de medidores na solução S4 forneceu mais informações no processo de estimação, atenuando assim, os erros de tensões remanescentes nas barras não-monitoradas.

Os erros médios relativos ( $\epsilon_r$ ) e o desvio-padrão ( $\sigma$ ) para o conjunto de 490 curtos-circuitos aleatórios, considerando os valores de 0,025 pu, 0,050 pu e 0,100 pu para os erros de medição ( $E_m$ ) são apresentados na Tabela 19. As tensões remanescentes nas barras não-monitoradas foram comparadas com os valores exatos para cada um dos cenários.

Conforme a Tabela 19, dentre os conjuntos de medidores analisados, a solução S4 apresentou os menores erros de estimação, com erros médios e desvio-padrão menores que 1 %. Esses resultados estão diretamente relacionados com o número e a posição dos medidores, obtidos pela escolha dos fatores-peso apresentados na Tabela 18. Além disso, observa-se que a solução S4 apresenta os menores valores de IE e  $IE_n$  (Tabela 18), parâmetros diretamente relacionados

Tabela 19 – Erros relativos médios ( $\epsilon_r$ ) e desvio-padrão ( $\sigma$ ) para cada solução.

Solução	$\epsilon_r$ (%)			$\sigma$ (%)			
	$E_m$	0,025	0,050	0,100	0,025	0,050	0,100
S1		2,08	2,31	3,28	1,73	1,88	2,38
S2		1,91	1,70	2,25	1,57	1,50	1,82
S3		1,84	1,63	1,09	0,72	1,47	1,79
S4		0,88	0,49	0,79	0,63	0,50	0,79
S5		0,97	0,71	1,23	0,56	0,47	0,78
S6		1,01	0,60	1,03	0,69	0,47	0,79

com o processo de estimação.

Para as seis soluções analisadas, apenas a solução S1 apresentou erros  $\epsilon_r$  menores para  $E_m$  de 0,025 pu. É importante notar que um valor menor de  $E_m$  indica a seleção de um conjunto menor de cenários da base de dados com tensões remanescentes similares às encontradas nas barras monitoradas. No entanto, dependendo da situação, valores menores de  $E_m$  podem selecionar cenários da base de dados com informações insuficientes para a estimação e apresentar erros mais elevados, conforme apresentado na Tabela 19 para as soluções S2, S3, S4, S5 e S6.

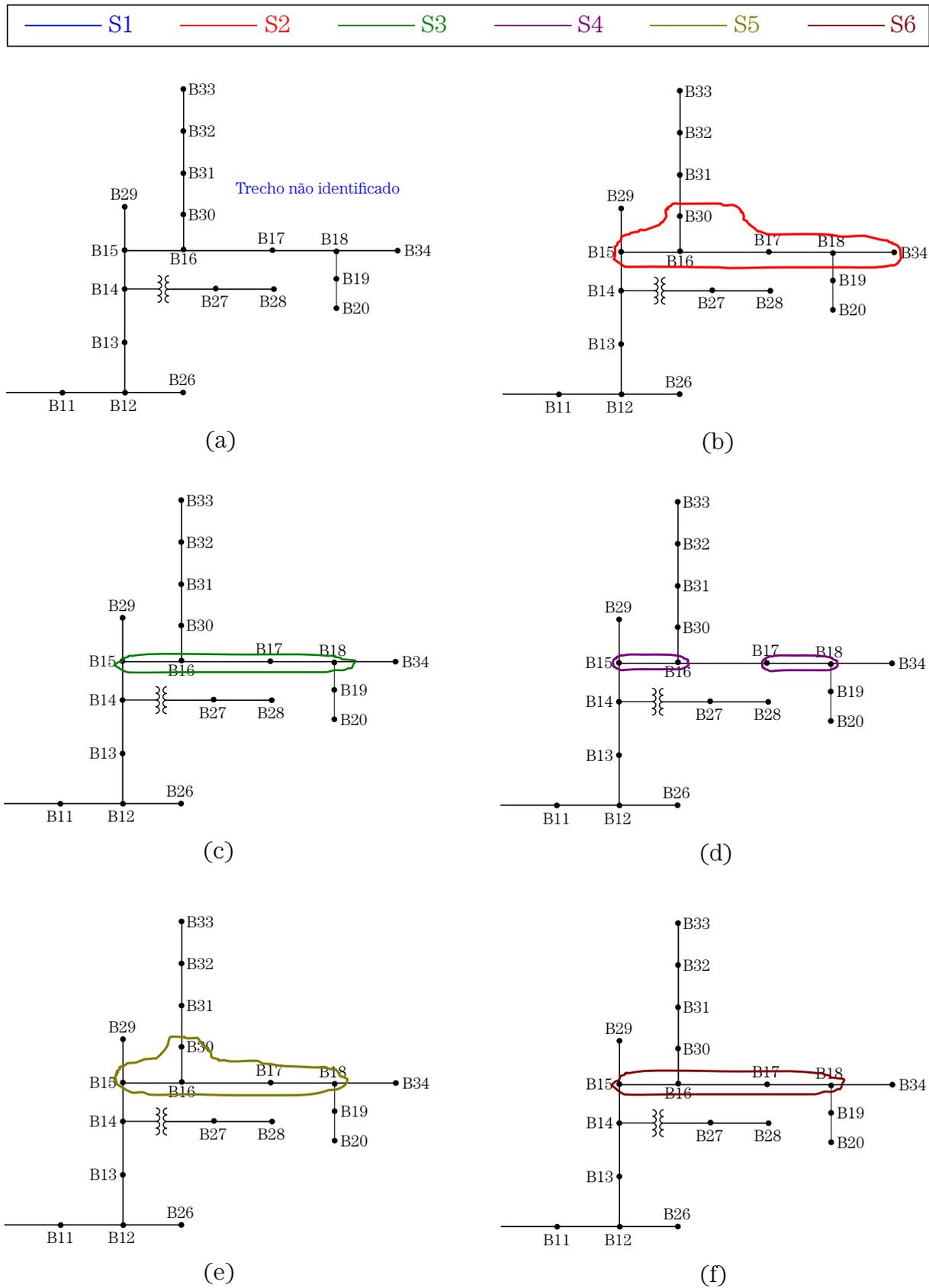
### 7.2.3 Redução do espaço de busca

Para avaliar a redução do espaço de busca, apresenta-se na Figura 38, uma aproximação do sistema-teste utilizado com os possíveis trechos de falta para cada solução, considerando um curto-circuito aleatório. A falta aplicada ocorreu em 13 % da linha B17-B18, com resistência de falta de 9,28  $\Omega$ , carregamento de 91,91 %, falta monofásica (Fase C) e  $E_m$  de 0,025 pu.

Devido aos erros de estimação para a solução S1, conforme apresentado na Tabela 19 e na Figura 37, não foi possível identificar os possíveis locais de falta para o curto-circuito aleatório, conforme apresentado na Figura 38(a). A partir da Tabela 18 e da Figura 38, observa-se que existe uma relação direta entre IEU e IEU<sub>n</sub> e o número de possíveis locais de falta. Um número maior de eventos únicos permite a identificação de um número menor de possíveis locais de falta. Isso pode ser visto na Figura 38 (d), com dois possíveis trechos sob falta para a solução S4, a qual possui o valor mais elevado de IEU e conseqüentemente, o menor valor de IEU<sub>m</sub>.

É importante destacar que um valor mais elevado de IEU não assegura uma redução no número de possíveis trechos sob falta. As Figuras 38 (b) e (e), referentes às soluções S2 e S5,

Figura 38 – Possíveis trechos sob falta para a solução (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) S4 (e) S5 (f) S6.



Fonte - Autoria própria.

respectivamente, apresentam os mesmos trechos de possíveis locais de falta, com diferentes valores de IEU. O mesmo pode ser visto nas Figuras 38 (c) e (e) para as soluções S3 e S6, respectivamente.

Apresenta-se na Tabela 20, os valores médios de possíveis locais de falta, cenários não identificados e taxa de acerto para o conjunto de 490 cenários aleatórios. Os três valores dos erros de medição ( $E_m$ ) foram utilizados para a análise das seis soluções.

Tabela 20 – Resultados para a redução no espaço de busca

Solução	Média de possíveis trechos sob falta			Não identificados			Taxa de acerto (%)			
	$E_m$ (pu)	0,025	0,050	0,100	0,025	0,050	0,100	0,025	0,050	0,100
S1		0,00	5,86	9,53	490	165	144	0	66,33	70,61
S2		3,22	5,11	7,71	60	35	9	87,76	92,86	98,16
S3		3,18	4,96	7,57	40	7	1	89,90	98,57	99,80
S4		2,88	4,70	7,46	37	6	1	92,25	98,78	99,80
S5		3,22	5,21	7,80	48	12	3	90,20	97,55	99,39
S6		3,12	4,88	7,50	42	10	1	91,20	93,18	99,80

Análise da Tabela 20 mostra que o aumento no valor dos erros de medição ( $E_m$ ) implica no aumento da taxa de acerto, porém com um número maior de possíveis trechos sob falta. Constatou-se que a solução S4 apresentou o maior valor de eventos unicamente identificáveis (Tabela 18), reduzindo o número médio de possíveis trechos de falta para todos os erros de medição ( $E_m$ ) analisados. Além disso, a solução S4 apresentou o menores número de eventos não identificados e as maiores taxas de acerto.

Conforme esperado, uma quantidade maior de medidores fornece mais informações para o processo de estimação e redução do espaço de busca. Entretanto, soluções com uma quantidade menor de medidores podem apresentar resultados similares, dependendo dos erros de medição escolhidos. Como exemplo, considera-se a solução S5, com quatro medidores (Tabela 18) e com erros de medição de 0,05 pu. Conforme Tabelas 19 e 20, os erros de estimação são menores que 1 % com uma média de busca de 5,21 trechos (16,28 % do alimentador) e uma taxa de sucesso de 97,55 %.

A solução S1, baseada na função objetivo tradicional, apresentou os maiores erros no processo de estimação, comprometendo a identificação dos possíveis trechos sob falta. A adição

dos dois novos índices relacionados à estimação e ao número de eventos únicos permitiu que ao método proposto na tese uma análise melhor da identificação de VTCD no sistema analisado.

Uma constatação importante, foi de que os erros de estimação ( Tabela 19), a média do número de possíveis locais de falta e taxa de acerto (Tabela 20) estão diretamente relacionados à base de dados utilizadas no processo de estimação. Além de incluir todos os tipos de falta, a base de dados proposta nesta tese apresentou um aumento no número de locais e resistências de falta, com relação aos outros trabalhos na literatura, incluindo o parâmetro de carregamento do sistema. Isso tudo possibilitou que a identificação de VTCD via instalação estratégica de medidores, venha a constituir uma técnica mais robusta para essa aplicação.

#### 7.2.4 Comparação com a literatura

Para finalizar, uma comparação com a literatura em relação à estimação de VTCD foi realizada. Visando uma avaliação imparcial, apenas os métodos com condições semelhantes foram considerados. Os resultados apresentados referem-se às informações fornecidas por cada um dos autores. Apresenta-se na Tabela 21, uma comparação direta entre alguns métodos analisados anteriormente no Capítulo 2 e o método proposto nesta tese. Na tabela, algumas observações são feitas:

1. A dimensão do sistema refere-se à quantidade de barras;
2. Dependendo do trabalho, mais de um conjunto de medidores foi analisado no processo de estimação;
3. Dois tipos de estimação foram analisados: estimação na frequência de ocorrência de AT e estimação da intensidade dos AT nas barras não-monitoradas;
4. Erros obtidos referem-se a erros médios ou aproximados;
5. O espaço de busca refere-se à região em relação ao alimentador, considerando o provável local de falta, de acordo com as informações do conjunto de medidores.
6. Os conjuntos de medidores do método proposto referem-se às soluções que apresentaram todos os fatores-peso diferentes de zero (S5 e S6).

Tabela 21 – Comparação entre o método proposto e outros métodos presentes na literatura

Método	Sistema	Medidores	Estimação	Erros de estimação
Olguin (2005)	87	14	Frequência de AT	$\approx 6,24\%$
			Intensidade de AT	$\approx 19,51\%$
		33	Frequência de AT	$\approx 5,11$
			Intensidade de AT	$\approx 14,18\%$
Juarez e Hernandez (2007)	24	2		3,77 %
		4	Frequência de AT	2,47 %
		8		1,24 %
Mora (2012)	295	25	Frequência de AT	5 %
			Intensidade de AT	[13 - 42]%
Hernández e Milanović (2019)	24	3		$\approx 2,05\%$
		6	Frequência de AT	$\approx 1,95\%$
		9		$\approx 1,75\%$
<b>Método proposto</b>	<b>34</b>	<b>5</b>	<b>Frequência de AT</b>	<b>0,88 %</b>
			<b>Intensidade de AT</b>	<b>1,36 %</b>
		<b>7</b>	Frequência de AT	<b>0,70 %</b>
			<b>Intensidade de AT</b>	<b>1,12 %</b>

Observa-se que o método proposto nesta tese destaca-se em relação tanto aos erros de estimação de tensão quanto aos erros de estimação de frequência nas barras não-monitoradas. Apesar de se tratar de situações com características diferentes, a estimação de tensão torna-se mais complexa, devido ao fato de que a estimação de frequência está relacionada à uma faixa de valores de tensão. Dentre os fatores para a redução dos erros, destaca-se a base de dados mais detalhada do sistema-teste analisado. Apesar do esforço computacional para a sua construção, o procedimento está localizado na parte *off-line* (escolha da quantidade e localização dos medidores) do processo. Outro fator importante refere-se à análise das condições simétricas durante a escolha dos medidores, as quais podem comprometer o processo de estimação. Por fim, o método proposto apresenta a redução no espaço de busca, baseado na capacidade de identificação de eventos únicos para o conjunto de medidores escolhidos.

### 7.3 Considerações Finais

Neste capítulo, os resultados relacionados à detecção e classificação de VTCD e estimação de tensão nas barras não-monitoradas foram apresentados e discutidos. Inicialmente, os resultados da utilização da metodologia de detecção e classificação via TWDR foram analisados e

comparados, considerando sinais simulados e registros oscilográficos reais. A metodologia foi avaliada considerando a variação do número de amostras por ciclo e o tamanho da janela de cálculo. Apresentou-se ainda, a aplicação da metodologia de detecção e classificação em três tipos distintos de VTCD e em outros eventos transitórios de tensão. Diferente do método do valor RMS, a metodologia com a utilização da TWDR foi capaz de identificar períodos transitórios e reduzir as oscilações presentes durante o cálculo da intensidade e duração da VTCD.

O método proposto para a estimação de tensão nas barras não-monitoradas foi analisado para seis soluções distintas, escolhidas a partir da modificação dos fatores-peso. Em seguida, os erros de estimação, a taxa de acerto e a redução no espaço de busca foram analisados. Ao final, constatou-se que o método apresenta resultados promissores, reduzindo o espaço de busca para 16 %, com taxa de acerto de 97,55 % dos cenários analisados, para uma solução S5, com cinco medidores para o sistema-teste de 34 barras do IEEE.

## Capítulo 8

# Conclusões e Perspectivas de Continuação

Um novo método de instalação estratégica de medidores de QEE para identificação de VTCD causadas por curtos-circuitos foi proposto nesta tese. Na etapa de detecção e classificação, uma metodologia foi proposta a partir da extração da energia dos coeficientes de aproximação (intensidade e duração da VTCD) e de detalhe (detecção de transitórios e identificação do número de eventos) da transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR). A tensão remanescente durante cada evento de curto-circuito foi obtida, considerando uma taxa de 64 amostras por ciclo, com janela de meio ciclo e calculada amostra por amostra.

Apresentou-se inicialmente, a construção de uma base de dados de VTCD utilizando o conceito de automação robótica de processos (RPA), de forma a integrar os *softwares* utilizados (Matlab<sup>®</sup> e ATP) e automatizar as etapas para a construção da base de dados. A base de dados foi aperfeiçoada pela adição dos seguintes parâmetros de curto-circuito: tipo de falta, resistência de falta, local da falta e carregamento do sistema. A metodologia de detecção e classificação foi validada utilizando a base de dados simulada e um conjunto de registros oscilográficos reais de VTCD. Ao total, 490 cenários simulados e 78 cenários reais foram utilizados. Adicionalmente, 19 casos correspondentes a outros distúrbios transitórios de tensão foram utilizados visando a análise da capacidade da metodologia avaliar eventos que não provocaram VTCD.

A análise dos resultados evidenciou que a metodologia de detecção e classificação é capaz de identificar VTCD em eventos com duração menores que 100 ms para todos os tipos de VTCD registradas. Além disso, a utilização da TWDR permitiu a redução da influência de ruídos e transitórios pelo uso do conceito de energia e da utilização de filtros passa-baixa na formulação dos coeficientes de aproximação. Constatou-se que a energia dos coeficientes de detalhe pode ser utilizada na detecção de transitórios presentes durante as VTCD e em outros tipos de distúrbio que não provocaram VTCD. Uma comparação com técnicas propostas em medições de VTCD, as quais utilizaram o valor RMS, atestou a importância da escolha do tamanho da janela de cálculo e do número de amostras por ciclo no cálculo da intensidade e duração da VTCD. Em situações com durações menores que 100 ms ou em VTCD próximas aos limites de detecção, o

valor RMS pode não identificar VTCD de acordo com a técnica utilizada.

O método proposto nesta tese teve como foco principal a identificação da ocorrência das VTCD nas barras do sistema-teste, sendo dividido em duas etapas principais. A primeira, escolheu a quantidade e localização dos medidores por um processo de otimização, utilizando o método de otimização por enxame de partículas binário (BPSO). A função objetivo incluiu a influência do custo de instalação dos medidores, da estimação de tensão nas barras não-monitoradas e do registro de eventos únicos pelo conjunto de medidores. Além disso, fatores-peso foram adicionados a cada uma das parcelas e escolhidos de acordo com a necessidade do utilização. A etapa seguinte consistiu em estimar a tensão nas barras não-monitoradas via registros de tensão nas barras monitoradas e da utilização da base de dados de VTCD. Esta etapa se concluiu com a busca dos possíveis trechos sob falta, identificados pelas tensões nas barras monitoradas, estimação das tensões nas barras não-monitoradas e cenários da base de dados com tensões remanescentes similares, considerando os erros de medição.

A análise do desempenho do método demonstrou que, para o sistema-teste de 34 barras, o número de medidores dependeu diretamente da escolha dos fatores-peso na função objetivo. Os resultados mostraram que uma solução com quatro medidores (Solução S4) foi capaz de apresentar erros médios relativos de 0,71 %, considerando os erros de medição de 0,05 pu. Além disso, essa solução apresentou uma taxa de acerto dos possíveis trechos sob falta de 97,55 %, com a redução de busca do curto-circuito para 16 % do alimentador. Resultados melhores foram obtidos com o aumento dos fatores-peso relacionados à estimação de tensão nas barras não-monitoradas e à capacidade de identificar eventos únicos, porém acompanhados do aumento do número de medidores.

Por fim, sugerem-se como trabalhos futuros:

- **Incluir o ângulo de fase das tensões remanescentes nas barras:** as simetrias encontradas para duas ou mais condições de curto-circuito estão entre os maiores desafios no processo de estimação de tensão nas barras não-monitoradas. Logo, a adição do parâmetro de ângulo de fase, pode permitir a redução do número de condições simétricas identificadas pelo conjunto de medidores instalados para monitoramento.
- **Otimizar a base de dados:** a depender do sistema elétrico avaliado, o número de

cenários de curto-circuito pode necessitar de um grande esforço computacional. Logo, a identificação dos parâmetros de curto-circuito que garantam resultados satisfatórios de estimação de tensão nas barras não-monitoradas pode reduzir o tempo necessário para a construção da base de dados do sistema.

- **Verificar a influência de componentes que variam a tensão em regime permanente:** a variação do carregamento do sistema e a variação no fator de potência são acompanhadas da variação da tensão nas barras de monitoramento, podendo aparecer VTCD ainda em regime permanente. Uma das formas de analisar o carregamento é a avaliação das tensões remanescentes para uma curva de carga. Além disso, a inclusão da atuação de componentes reguladores de tensão e capacitores *shunt*, modificam as zonas expostas e afetadas, podendo necessitar de um número e localizações diferentes dos medidores.
- **Avaliar o método proposto em sistemas-teste diferentes:** como forma de avaliar a necessidade de adaptação do método proposto, algumas situações podem ser analisadas, as quais se destacam: sistemas de distribuição real com centenas ou milhares de barras; sistemas de transmissão com eventos de curto-circuito que influenciam as tensões remanescentes nos sistemas de distribuição; sistemas de distribuição com geração distribuída.
- **Analisar funções multiobjetivo:** a parcela relacionada ao custo do sistema de monitoramento ainda é um fator muito importante para as concessionárias e para os clientes. A função multiobjetivo pode incluir além do custo do sistema de monitoramento, os prejuízos relacionados aos consumidores, selecionando barras que são mais importantes de se obter um monitoramento direto ou indireto.
- **Analisar a relação entre os fatores-peso e os índices IE e IEU:** os fatores-peso representam uma escolha relevante na decisão da quantidade e na localização dos medidores. Quando são adicionadas as novas parcelas à função-objetivo, podem existir correlações que precisam ser avaliadas com mais detalhes para se obter uma resposta mais precisa para o problema.
- **Avaliar problemas de planejamento:** os sistemas de distribuição podem apresentar expansões da rede ao longo do tempo. Portanto, o método pode ser aplicado ao sistema

em expansão, considerando medidores já existentes na rede. Além disso, devem ser levados em consideração às variações nos custos a valores futuros no cálculo da função objetivo do método proposto.

- **Analisar a influência da falta de sincronismo entre medidores:** As informações dos medidores instalados podem apresentar características de eventos distintos que ocorreram no sistema de distribuição por falta de sincronismo. Logo, um estudo dos modelos de medidores, assim como as tecnologias utilizadas para o sincronismo ou os desvios de tempo entre as medições do sistema de monitoramento precisam ser avaliadas como forma de integrá-las nos erros de medição durante o processo de estimação de tensão nas barras não-monitoradas.
- **Realizar testes em tempo-real:** a avaliação da TWDR para detecção e classificação de VTCD precisa ser feita em tempo-real para avaliar as características mínimas necessárias para o processador que será utilizado no medidor. Com isso, é possível a obtenção dos registros oscilográficos, os quais serão úteis para a aplicação do método proposto, sem perdas relacionadas à amostragem, por exemplo.

# Bibliografia

- ABRADEE (2021). “Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica - Acesso em 21 de Maio de 2021”. Em: <https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>.
- Almeida, C. F. M. (2007). “Metodologia para a Monitoração Eficiente de Variações de Tensão de Curta Duração em Sistemas Elétricos de Potência”. Em: *Dissertação de Mestrado*.
- Andrade, G. V. Júnior (2011). “Análise Estocástica dos Afundamentos de Tensão em Sistemas de Distribuição”. Em: *Tese de Doutorado*.
- ANEEL (2018). “Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica”. Em: *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*.
- ANSI/IEEE (1987). “IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications”. Em: *ANSI/IEEE Std 446-1987*, pp. 1–272.
- Bertho, R. et al. (2016). “Optimized Power Quality Placement Based on Particle Swarm Optimization Algorithm”. Em: *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*.
- Bollen, M. H. J. (2000). “Understand Power Quality Problems: Voltage sags and Interruptions”. Em: *Livro*.
- Bottura, F. B. (2019). “Arranjo Otimizado de Medidores Para Sistemas de Distribuição Frente às Variações de Tensão de Curta Duração e Potenciais Condições de Ressonância Harmônica”. Em: *Tese de Doutorado*.
- Cebrian, J. C., C. F. M. Almeida e N. Kagan (2010). “Genetic Algorithms applied for the Optimal Allocation of Power Quality Monitors in Distribution Networks”. Em:
- Chan, J. Y., J. V. Milanović e A. Delahunty (2011). “Risk-Based Assessment of Financial Losses Due to Voltage Sag”. Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 26.2, pp. 492–500. DOI: <10.1109/TPWRD.2009.2037426>.
- Conrad, L., K. Little e C. Grigg (1991). “Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips”. Em: *IEEE Transactions on Industry Applications* 27.1, pp. 167–172. ISSN: 1939-9367. DOI: <10.1109/28.67549>.

- Conrad, L. E. e M. H. J. Bollen (1997). “Voltage sag coordination for reliable plant operation”. Em: *IEEE Transactions on Industry Applications* 33.6, pp. 1459–1464. DOI: <10.1109/28.649956>.
- Costa, F. B. (2010). “Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para Uso em Registradores Digitais de Perturbação”. Em: *Tese de Doutorado*.
- Daubechies, I. (1992). “Ten Lectures on Wavelets”. Em: *Philadelphia, USA: CBMS-NSF Regional Conference Series, SIAM*.
- Davarinejad, E., A. Ameli e E. El-Saadany (2018). “Fault-Observability Enhancement in Distribution Networks Using Power Quality Monitors”. Em: *2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, pp. 1–6. DOI: <10.1109/EPEC.2018.8598287>.
- Dorr, D. S. et al. (1997). “Interpreting recent power quality surveys to define the electrical environment”. Em: *IEEE Transactions on Industry Applications* 33.6, pp. 1480–1487. DOI: <10.1109/28.649959>.
- Dugan, R. C. et al. (2004). “Electrical Power Systems Quality”. Em:
- Eldery, M. A., F. El-Saadany e M. M. A. Salama (2004). “Optimum number and location of power quality monitors”. Em: *Harmonics and Quality of Power, 2004. 11th International Conference on*, pp. 50–57. DOI: <10.1109/ICHQP.2004.1409328>.
- EN-50160 (2004). “Voltage Disturbances Standard EN 50160 Voltage Characteristics in Public Distribution Systems”. Em: *Power Quality Application Guide*.
- (2019). “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”. Em: *European Committee for Electrotechnical Standardization*.
- Hernández, A. e J. V. Milanović (2019). “Efficient Monitor Placement and Voltage Sag Estimation Using System Impedance Matrix”. Em: *2019 IEEE Milan PowerTech*, pp. 1–6. DOI: <10.1109/PTC.2019.8810452>.
- Ibrahim, A. A. et al. (2012a). “A New Approach for Optimal Power Quality Monitor Placement in Power System Considering System Topology”. Em: *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY*.
- (2012b). “Optimization Methods for Optimal Power Quality Monitor Placement in Power Systems: A Performance Comparison”. Em: *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*.

- IEC-61000-4-11 (2017). “Part 4-11: Testing and measurements techniques - voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests”. Em: *Electromagnetic compatibility (EMC)*.
- IEEE (1997). “IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (Gold Book)”. Em: *IEEE Std 493-1997 [IEEE Gold Book]*, pp. 1–464. DOI: <10.1109/IEEESTD.1998.89291>.
- (1998). “IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment”. Em: *IEEE Std 1346-1998*, 0<sub>1</sub><sup>∞</sup>. DOI: <10.1109/IEEESTD.1998.87816>.
- (2010). “IEEE 34 Node Test Feeder”. Em: *Power System Analysis, Computing and Economics Committee*.
- (2014). “IEEE Guide for Voltage Sag Indices”. Em: *IEEE P1564/D19*, pp. 1–55.
- (2019). “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”. Em: *IEEE Power and Energy Society*.
- ITIC (2000). “Disponível em: <http://www.itic.org>”. Em: *Technical Committee 3 (TC3) of the Information Technology Industry Council*.
- Jiang, Haiwei et al. (2020). “A BPSO-Based Method for Optimal Voltage Sag Monitor Placement Considering Uncertainties of Transition Resistance”. Em: *IEEE Access* 8, pp. 80382–80394. DOI: <10.1109/ACCESS.2020.2990634>.
- Juarez, E. E. e A. Hernandez (2007). “A Method for Voltage Sag State Estimation in Power Systems”. Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 22.4, pp. 2517–2526. DOI: <10.1109/TPWRD.2007.905587>.
- Juarez, E. E., A. Hernandez e G. Olguin (2009). “An Approach Based on Analytical Expressions for Optimal Location of Voltage Sags Monitors”. Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 24.4, pp. 2034–2042. DOI: <10.1109/TPWRD.2009.2028777>.
- Junqueira, C. M. S. (2017). “Um algoritmo para alocação ótima de detectores de afundamentos de tensão”. Em: *Dissertação de Mestrado*.
- Junqueira, C. M. S., N. S. D. Brito e B. A. Souza (2020a). “Procedimentos para Detecção e Classificação de Variações de Tensão de Curta Duração Utilizando a Transformada Wavelet Discreta”. Em: *Congresso Brasileiro de Automática*.

- Junqueira, C. M. S., N. S. D. Brito e B. A. Souza (2020b). “Uma Metodologia para a Construção de uma Base de Dados de Variações de Tensão de Curta Duração”. Em: *Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos*.
- Junqueira, C. M. S. et al. (2019). “An Algorithm for Optimal Placement of Voltage Sag Monitors”. Em: *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. Vol. 30, 266–276. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s40313-019-00443-4>>.
- Kazemi, A. et al. (2013). “Optimal power quality monitor placement using genetic algorithm and Mallow’s Cp”. Em: *Electrical Power and Energy Systems*.
- Kennedy, J. e R. Eberhart (1995). “Particle swarm optimization”. Em: *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*. Vol. 4, 1942–1948 vol.4. DOI: <[10.1109/ICNN.1995.488968](https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968)>.
- Khanesar, M. A., M. Teshnehlab e M. A. Shoorehdeli (2007). “A novel binary particle swarm optimization”. Em: *Control Automation, 2007. MED '07. Mediterranean Conference on*, pp. 1–6. DOI: <[10.1109/MED.2007.4433821](https://doi.org/10.1109/MED.2007.4433821)>.
- Koval, D. O. e M. B. Hughes (1997). “Canadian National Power Quality Survey: frequency of industrial and commercial voltage sags”. Em: *IEEE Transactions on Industry Applications* 33.3, pp. 622–627. DOI: <[10.1109/28.585850](https://doi.org/10.1109/28.585850)>.
- Lima, E. M. (2021). “Detecção e Localização de Falhas de Alta Impedância Baseadas na Transformada de Stockell”. Em: *Tese de Doutorado*.
- Mali, V., R. Chakrasali e K. Aprameya (2015). “A Technical Investigation of Voltage Sag”. Em: *American Journal of Engineering Research (AJER)*.
- Mallat, S. G. (1989). “A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation”. Em: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11.7, pp. 674–693. ISSN: 0162-8828. DOI: <[10.1109/34.192463](https://doi.org/10.1109/34.192463)>.
- Martins, P. E. T. et al. (2019). “Multi-Objective Approach for Power Quality Monitor Allocation With Symmetry in Short-Duration Voltage Variations”. Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 34.2, pp. 430–437. DOI: <[10.1109/TPWRD.2018.2890233](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2890233)>.
- Mora, J. M. A. (2012). “Monitor Placement for Estimation of Voltage Sags in Power Systems”. Em: *Tese de Doutorado* 4.1.
- Motoki, E. M. et al. (2021). “Cost of Industrial Process Shutdown Due to Voltage Sags and Short Interruption”. Em: *Multidisciplinary Digital Publishing Institute - Energies*.

- Olguin, G. (2005). “Voltage Dip (Sag) Estimation in Power Systems based on Stochastic Assessment and Optimal Monitoring”. Em: *Tese de Doutorado*.
- Olguin, G. e M. H. J. Bollen (2003). “Optimal dips monitoring program for characterization of transmission system”. Em: *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*. Vol. 4, 2490 Vol. 4. DOI: <10.1109/PES.2003.1271033>.
- Santos, W. C. (2016). “Identificação de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição”. Em: *Tese de Doutorado*.
- Solano, J. B., J. F. P. Suárez e G. O. Plata (2015). “Optimal placement of voltage sag monitors in smart distribution systems: Impact of the dynamic network reconfiguration”. Em: *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, pp. 361–365. DOI: <10.1109/ISGT-LA.2015.7381182>.
- Souza, B. A. (2005). “Distribuição de Energia Elétrica”. Em: *Livro*.
- SRD (2018). “Regulação dos Serviços de Distribuição”. Em: *Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição*.
- Sun, H. et al. (2020). “Precise Fault Location in Distribution Networks Based on Optimal Monitor Allocation”. Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 35.4, pp. 1788–1799. DOI: <10.1109/TPWRD.2019.2954460>.
- Thakur, P. e A. K. Singh (2012). “A Novel Way to Quantify the Magnitude of Voltage Sags”. Em: *Electrical Engineering*.
- Warren, C. M. (1992). “The Effect of Reducing Momentary Outages on Distribution Reliability Indices”. Em: *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1610–1617.
- Xiu, W. e Y. Liao (2014). “Fault-location Observability Analysis on Power Distribution Systems”. Em: *Electric Power Components and Systems* 42.16, pp. 1862–1871. DOI: <10.1080/15325008.2014.956953>. eprint: <<https://doi.org/10.1080/15325008.2014.956953>>. URL: <<https://doi.org/10.1080/15325008.2014.956953>>.
- Šipoš, Mario et al. (2021). “Determining the Optimal Location and Number of Voltage Dip Monitoring Devices Using the Binary Bat Algorithm”. Em: *Energies* 14.1. ISSN: 1996-1073. DOI: <10.3390/en14010255>. URL: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/1/255>>.

# APÊNDICE A – Simulações Estocásticas (Monte Carlo)

Para validar o método proposto nesta tese, optou-se por criar um conjunto de cenários aleatórios de curto-circuito. Para isso, utilizou-se o método de Monte Carlo, que consiste no processo de geração de valores aleatórios a partir de dados estatísticos de um determinado evento. Esse processo tem como objetivo "imitar" uma situação real, conservando as características físicas e lógicas do sistema em estudo. Resumidamente, as simulações de Monte Carlo podem ser classificadas em:

- Problemas determinísticos: resolução de problemas matemáticos de elevado grau de dificuldade como derivadas, integrais, equações diferenciais etc, via uso de um modelo conveniente para a aplicação;
- Problemas estocásticos: resolução de problemas que acontecem muitas vezes, sem uma previsão exata (como são os casos dos curtos-circuitos).

Para aplicar o método de Monte Carlo ao problema de curtos-circuitos, foi necessário realizar um sorteio a partir dos seus parâmetros característicos. O processo de escolha dos critérios utilizados para cada parâmetro é apresentado a seguir.

## A.1 Trecho sob curto-circuito

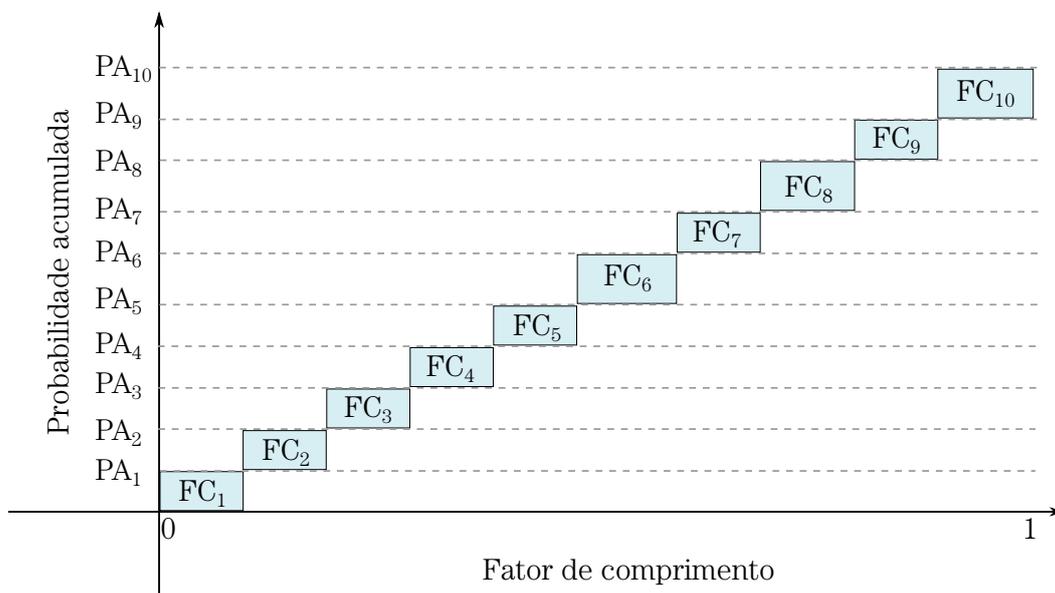
É fato que os curtos-circuitos podem ocorrer em qualquer parte do SDEE. Para simular os curtos-circuitos, considerou-se que a probabilidade de seleção de um trecho é diretamente proporcional ao seu comprimento (Cebrian et al., 2010). Para isso, considerou-se a Equação (32) e a Inequação (33), o que permitiu obter a probabilidade de um trecho  $m$  ser selecionado na simulação de um curto-circuito.

$$FC_{t_f} = \frac{C_{t_f}}{C_T}, \quad (32)$$

$$\text{Trecho} \begin{cases} = t_f, \text{ se } PA_{t_f-1} < r_4 \leq PA_{t_f-1} + FC_{t_f} \\ \neq t_f, \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad (33)$$

sendo:  $FC_{t_f}$ , o fator de comprimento, o qual representa a relação entre o comprimento do trecho  $t_f$  ( $C_{t_f}$ ) e o comprimento total do alimentador ( $C_T$ );  $PA_{t_f-1}$ , a probabilidade acumulada até o trecho  $t_f-1$ ;  $PA_{t_f-1} = FC_1 + FC_2 + FC_3 \dots + FC_{t_f-1}$ . Apresenta-se na Figura 39, a probabilidade de seleção de cada um dos 10 trechos do sistema hipotético de 11 barras do Capítulo 3.

Figura 39 – Probabilidade acumulada em função do fator de comprimento.



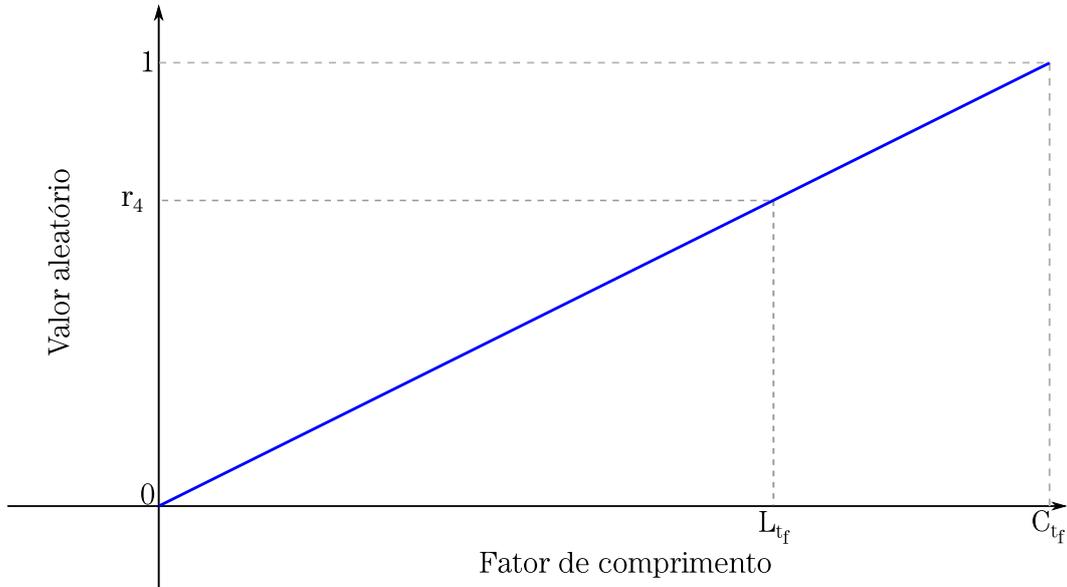
Fonte - Autoria própria.

## A.2 Localização do curto-circuito

Apesar da natureza aleatória dos curtos-circuitos, adotou-se nesta tese, uma distribuição uniforme ao longo do trecho, de modo que um valor próximo de 0 (zero) indica uma localização no início do trecho, enquanto que um valor próximo de 1 (um), indica um curto-circuito no final do trecho (Figura 40). Matematicamente, a localização de um curto-circuito em um trecho  $t_f$  ( $L_{t_f}$ ) é definida como Cebrian et al. (2010):

$$L_{t_f} = C_{t_f} \times r_4. \quad (34)$$

Figura 40 – Escolha aleatória do local da falta.



Fonte - Autoria própria.

### A.3 Tipo de curto-circuito

É fato que os curtos-circuitos em sistemas trifásicos podem envolver mais de uma fase e ter ou não contato com a terra. Nesta tese, os seguintes tipos de falta foram considerados para os cenários aleatórios: monofásica, bifásica, bifásica-terra e trifásica-terra. A escolha do tipo de falta é determinada a partir da probabilidade de ocorrência de cada tipo, normalmente baseando-se em dados reais de concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Para escolher o tipo de curto-circuito, adotou-se o uso de faixas (Figura 41), de 0% a 100%, conforme os critérios apresentados a seguir:

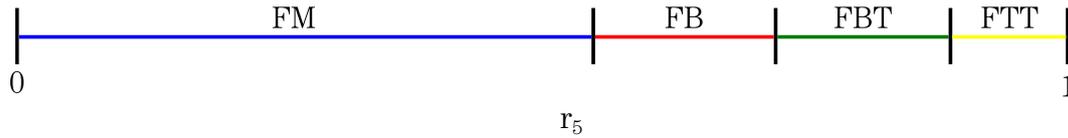
$$r_5 \leq A \rightarrow \text{Falta monofásica;} \quad (35)$$

$$A < r_5 \leq B \rightarrow \text{Falta bifásica;} \quad (36)$$

$$B < r_5 \leq C \rightarrow \text{Falta bifásica-terra;} \quad (37)$$

$$C < r_5 \leq D \rightarrow \text{Falta trifásica-terra.} \quad (38)$$

Figura 41 – Escolha aleatória do tipo de falta.



Fonte - Autoria própria.

Para a construção dos cenários aleatórios de curto-circuito, foi necessária a obtenção de dados de faltas de uma concessionária local. A partir de um banco de dados de 7 anos, foi possível identificar a probabilidade de ocorrência de cada tipo de curto-circuito, como apresentado na Tabela 22. Quanto à escolha da fase sob falta, adotaram-se probabilidades iguais para cada uma das fases, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Probabilidades de ocorrência do tipo de falta (Adaptado de Andrade (2011)).

Tipo de falta	Fase sob falta
FM = $0 < r_5 \leq 0,8005$	$3\phi = 0,33$ para cada
FB = $0,8005 < r_5 \leq 0,9106$	$2\phi = 0,5$ para cada
FBT = $0,9106 < r_5 \leq 0,9872$	$1\phi = 1$
FTT = $0,9872 < r_5 \leq 1$	-

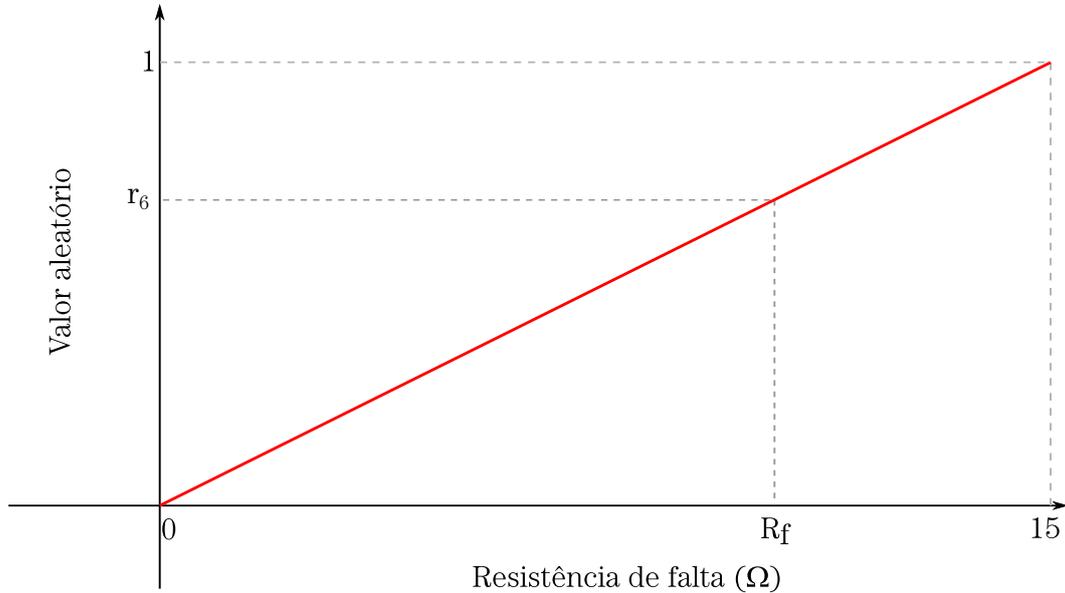
## A.4 Resistência de curto-circuito e carregamento do sistema

Um fato importante a ser destacado é a dependência da resistência de curto-circuito em relação ao arco formado, à resistência do solo, à impedância da linha, entre outros. Devido à grande quantidade de variáveis envolvidas, a análise do valor de resistência é complexa. Nesta tese, a escolha da resistência de curto-circuito entre fases e entre fase e terra foi realizada considerando uma probabilidade de ocorrência distribuída uniformemente dentro de um intervalo preestabelecido. Para uma precisão maior nos valores obtidos, foi necessário realizar um estudo aprofundado para o sistema analisado. Matematicamente, esse tipo de distribuição é representada por:

$$R_f = R_{f_{\min}} + (R_{f_{\max}} - R_{f_{\min}}) \times r_6, \tag{39}$$

sendo:  $R_{f_{\text{mín}}}$  e  $R_{f_{\text{máx}}}$ , os valores mínimos e máximos da resistência, respectivamente. A escolha dos valores mínimos ( $0 \Omega$ ) e máximos ( $15 \Omega$ ) basearam-se na capacidade do sistema em detectar uma VTCD para os níveis de resistência analisados. A depender do valor aleatório de  $r_6$ , um valor referente à  $R_f$  é então calculado, conforme apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Escolha aleatória da resistência de falta.



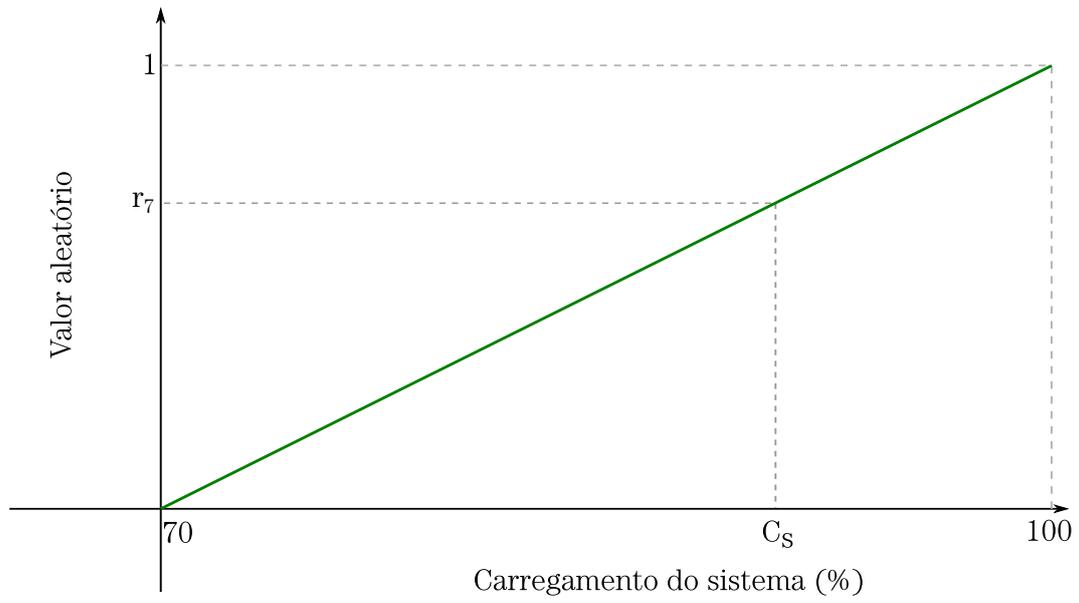
Fonte - Autoria própria.

De modo análogo ao aplicado à escolha da resistência de falta, a escolha do carregamento do sistema também exigiu uma análise aprofundada para aumentar a precisão dos dados. Assim, foram definidos os mesmos limiares da construção base de dados (70% a 100%), em uma distribuição uniforme, para o cenário de curto-circuito aleatório (Figura 43). Matematicamente, a escolha do carregamento do sistema é representada por:

$$C_s = C_{s_{\text{mín}}} + (C_{s_{\text{máx}}} - C_{s_{\text{mín}}}) \times r_7, \tag{40}$$

sendo:  $C_{s_{\text{mín}}}$  e  $C_{s_{\text{máx}}}$ , os carregamentos mínimo e máximo do sistema, respectivamente.

Figura 43 – Escolha aleatória do carregamento do sistema.



Fonte - Autoria própria.