

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Alocação Ótima de Religadores em Rede de  
Distribuição considerando Variações de  
Tensão de Curta Duração

**Nícolas de Oliveira Perez Westin**

Itajubá, 18 de dezembro de 2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Nícolas de Oliveira Perez Westin**

**Alocação Ótima de Religadores em Rede de  
Distribuição considerando Variações de  
Tensão de Curta Duração**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração: Qualidade da Energia Elétrica**

**Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho  
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Villegas Guerrero**

**18 de dezembro de 2020  
Itajubá**

# Agradecimentos

A Deus pelo dom da vida e por guiar-me até aqui.

Aos meus pais, Ricardo e Rosana, pelo amor incondicional e por acreditarem que eu seria capaz.

Ao professor, José Maria, pela orientação, empenho e consideração.

Ao professor, Carlos Villegas, pela coorientação, dedicação e atenção.

Ao professor, Thiago Clé, pelo companheirismo, prontidão e acolhimento.

Aos meus amigos Leonardo, Luís Gustavo e Pedro por mostrarem-me que amigos podem persistir à distância.

Aos amigos e profissionais que estiveram presentes durante estes anos de estudo e conhecimento pessoal.

À EDP e ao QMAP pelos incentivos financeiro e estrutural que me permitiram concluir este trabalho.

*"And you learn  
to build all your roads on today  
because tomorrows's ground is  
too uncertain for plans  
and futures have a way of falling down  
in mid-flight."  
(Veronica A. Shoffstall)*

# Resumo

Devido à constante evolução da sociedade, com a rápida modernização de tecnologias e processos, as concessionárias de energia sofrem constantes cobranças para melhoria de seus serviços prestados, culminando em investimentos em sua infraestrutura, mão-de-obra e qualidade de seu produto. Geralmente, são realizados estudos para alocação de dispositivos de proteção para reduzir índices de qualidade do serviço preestabelecidos.

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) são eventos causadores de problemas nos diversos consumidores da distribuidora. Como são de ocorrência aleatória, a captura dos parâmetros associados torna-se difícil, devido à dificuldade em dispor de equipamentos de medição em diversos pontos da rede. Neste cenário, metodologias para simulação de faltas tornam-se importantes para estimar o comportamento de tais variáveis.

Esta dissertação apresenta uma proposta de metodologia para alocação ótima de religadores em sistemas de distribuição quando se consideram os impactos das variações de tensão de curta duração em unidades consumidoras sensíveis.

Para estimar os diversos eventos, o desempenho do Método de Enumeração de Estados e da Simulação Monte Carlo, metodologias de simulação de curto-circuito mais usuais, foram confrontadas em um sistema teste do IEEE modificado, ao monitorar quatro barramentos em pontos distintos da rede.

Dos resultados obtidos da comparação entre as metodologias de simulação de curto-circuito e os impactos computacionais de suas variáveis, concluí-se que a Simulação Monte Carlo mostra-se como um método eficaz e prático para estimar os eventos.

A técnica que forneceu o melhor custo-benefício foi utilizada para estimar os valores médios das VTCDs, agora em um sistema teste do IEEE modificado com duplo alimentador, como dados de entrada em uma rotina de otimização, via Algoritmo Genético, para alocação de religadores. Ajustes reais coordenados e seletivos foram aplicados para verificar o impacto da inserção série de dispositivos de religamento automático.

Também, apresentam-se os impactos advindos da alocação ótima de religadores. A adoção de ajustes reais mostra as diferenças impostas sobre os comportamentos nas filosofias coordenadas e seletivas adotadas. A metodologia mostra-se robusta para capturar estas peculiaridades durante a otimização.

**Palavras-chaves:** Algoritmo Genético. Metodologias de Simulação de Curto-Circuito. Variações de Tensão de Curta Duração.

# Abstract

Due to the constant evolution of society, with the fast technologies and processes modernization, energy dealerships suffer constant demands to improve their services, culminating in investments in their infrastructure, manpower and product quality. Studies are generally carried out to allocate protective devices to reduce pre-established service quality levels.

Short-Duration Voltage Variations (VTCDs) are events that cause problems for the various dealerships' consumers. As they have random occurrence, the capture of the associated parameters becomes difficult, due to the difficulty in having measurement equipment at different points in the network. In this scenario, methodologies for faults simulation are important to estimate the behavior of such variables.

This master's thesis proposes a methodology for reclosers placement in distribution systems when considering the voltage sags' impacts in sensitive consumer.

In order to estimate the various events, the performance of the State Enumeration Method and Monte Carlo Simulation, the most common short circuit simulation methodologies, were compared in a modified IEEE test system, when monitoring four buses at different points in the network .

This work presents the results obtained from the comparison between the short circuit simulation methodologies and their variables' computational impacts. Monte Carlo Simulation is an effective and practical method to estimate events.

The technique that provided the best cost-benefit was used to estimate the average voltage sags' values, now in an modified IEEE test system with double feeder, as input data to the optimization routine, via Genetic Algorithm, for the recloser placement. Real coordinated and selective adjustments were applied to verify the impact of the series installation of automatic reclosure devices.

Also, the impacts arising from the optimal reclosers placement are presented. The adoption of real adjustments shows the differences imposed on the behaviors in the coordinated and selective philosophies adopted. The methodology proves to be robust to capture these peculiarities during optimization.

**Key-words:** Genetic Algorithm. Short Circuit Simulation Methodologies. Voltage Sags.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Curva de sensibilidade de CLPs (COSTA, 2018). . . . .	33
Figura 2 – Curva de sensibilidade para contatores (COSTA, 2018). . . . .	33
Figura 3 – Curva de sensibilidade de inversores de frequência (COSTA, 2018). . .	34
Figura 4 – Área de vulnerabilidade para faltas FT no barramento 1806 monitorado.	35
Figura 5 – Sistema de distribuição fictício com três cenários de falta. . . . .	42
Figura 6 – Sequência de afundamentos de tensão registrados nas cargas <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i> para uma falta permanente no ponto 3. . . . .	43
Figura 7 – Agregação de fases através do método de união de fases. . . . .	45
Figura 8 – Agregação de fases através do método de parâmetros críticos. . . . .	45
Figura 9 – Agregação de fases através do método da fase crítica. . . . .	46
Figura 10 – Sistema radial genérico para exemplificação do Método da Distância Crítica. . . . .	53
Figura 11 – Sistema malhado genérico para exemplificação do Método da Distância Crítica. . . . .	55
Figura 12 – Esquematização do Método das Posições de Falta em um sistema ma- lhado hipotético. . . . .	56
Figura 13 – Impacto do <i>step</i> de distância na aplicação de curtos-circuitos. . . . .	58
Figura 14 – Curva de sensibilidade de um consumidor e dois eventos hipotéticos. . .	66
Figura 15 – Contabilização de afundamentos de tensão. . . . .	67
Figura 16 – Registro de elevações de tensão. . . . .	67
Figura 17 – Registro de interrupções de curta duração, com afundamentos interca- lados. . . . .	67
Figura 18 – Contabilização de elevações de tensão e registro de interrupções de curta duração intercaladas. . . . .	68
Figura 19 – Zonas de proteção de um sistema hipotético. . . . .	71
Figura 20 – Fluxograma da metodologia de otimização. . . . .	74
Figura 21 – Fluxograma de transição entre plataformas. . . . .	76
Figura 22 – Sistema hipotético com taxa de falta constante. . . . .	77
Figura 23 – Probabilidade de sorteio para cada trecho. . . . .	78
Figura 24 – Designação da posição da falta, a partir do sorteio de um número ale- atório. . . . .	78
Figura 25 – Probabilidades de faltas hipotéticas para exemplificação da metodologia.	78
Figura 26 – Sorteio de impedância da falta. . . . .	79
Figura 27 – Alteração do <i>IEEE 34 buses test feeder</i> modificado (FILHO, 2017) – duplo alimentador. . . . .	84
Figura 28 – Disposição de todos os religadores candidatos. . . . .	87

Figura 29 – Alocação ótima de religadores sugeridos para o caso 1. . . . .	91
Figura 30 – Evolução do <i>fitness</i> da população para o caso 1. . . . .	92
Figura 31 – Evolução do <i>fitness</i> da população para o caso 2. . . . .	94
Figura 32 – Alocação ótima de religadores sugeridos para o caso 3. . . . .	95
Figura 33 – Evolução do <i>fitness</i> da população para o caso 3. . . . .	97
Figura 34 – Alocação ótima de religadores sugeridos para o caso 4. . . . .	97
Figura 35 – Evolução do <i>fitness</i> da população para o caso 4. . . . .	99
Figura 36 – Alocação ótima de religadores sugeridos para o caso 4. . . . .	100
Figura A1 – Roteiro de funcionamento de um AG. . . . .	111
Figura A2 – Tipos de codificações para o exemplo proposto. . . . .	111
Figura A3 – Representação e terminologia de genes, cromossomos, indivíduos, <i>locus</i> , alelos e população. . . . .	113
Figura A4 – Primeiro giro, selecionando o indivíduo de maior probabilidade. . . . .	116
Figura A5 – Segundo giro, selecionando o indivíduo de menor probabilidade. . . . .	116
Figura A6 – Tipos de cruzamentos – uniforme, um ponto de corte e dois pontos de corte. . . . .	120
Figura A7 – Tipos de mutação para o mesmo indivíduo. . . . .	120
Figura B1 – Representação do <i>IEEE 34 buses test feeder</i> (IEEE PES, 2015). . . . .	123
Figura B2 – Modelagem do <i>IEEE 34 buses test feeder</i> modificado (FILHO, 2017). . . . .	124



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação das VTCDs segundo ANEEL (2018). . . . .	28
Tabela 2 – Classificação das VTCDs de acordo com (IEEE 1159, 2009). . . . .	29
Tabela 3 – Percentual de faltas associado a cada tipo de curto-circuito para 138 kV e 13,8 kV (FONSECA, 1999). . . . .	36
Tabela 4 – Percentual de faltas associado a cada tipo de ocorrência em 13,8 kV (AMASIFEN, 2008). . . . .	36
Tabela 5 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km e sua distribuição por tipo de falta (GARCIA; ALVES, 2011). . . . .	37
Tabela 6 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km e sua distribuição por tipo de falta (CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991) e (BECKER et al., 1993). . . . .	37
Tabela 7 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km (FONSECA, 1999). . . . .	37
Tabela 8 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km (RAMOS, 2009). . . . .	37
Tabela 9 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km e sua distribuição por tipo de falta (HONORATO, 2014). . . . .	38
Tabela 10 – Estratificação de eventos de VTCD em intensidade e duração. . . . .	47
Tabela 11 – Estratificação das VTCDs para diversas regiões de sensibilidade de cargas. . . . .	48
Tabela 12 – Fatores de ponderação e de impacto base de acordo com a tensão nominal do sistema. . . . .	49
Tabela 13 – Janelas de observação e erros toleráveis, para cada frequência de evento. . . . .	51
Tabela 14 – Padrão de eventos para barramentos à montante de um sistema multi-religador coordenado ou em outros alimentadores vizinhos . . . . .	72
Tabela 15 – Padrão de eventos para barramentos no tronco de um sistema multi-religador coordenado . . . . .	72
Tabela 16 – Padrão de eventos para barramentos no ramal de um sistema multi-religador coordenado . . . . .	73
Tabela 17 – Impedância máxima para cada tipo de falta (AMASIFEN, 2008) <sup>1</sup> , (HONORATO, 2014) <sup>2</sup> , (GARCIA; ALVES, 2011) <sup>3</sup> . . . . .	85
Tabela 18 – Estados e ajustes para os RC6-RC12, RC5-RC11 e RC4-RC10. . . . .	88
Tabela 19 – Estados e ajustes para os RC3-RC9, RC2-RC8, RC1-RC7. . . . .	89
Tabela 20 – Parâmetros das UCSVs consideradas. . . . .	89
Tabela 21 – Eventos médios na filosofia 1R3L do indivíduo ótimo (caso 1). . . . .	90
Tabela 22 – Eventos médios na filosofia 1R3L para o estado inicial (caso 1) e variações relativas para o indivíduo ótimo (caso 1). . . . .	92
Tabela 23 – Eventos médios na filosofia 2R2L do indivíduo ótimo (caso 2). . . . .	93

Tabela 24 – Eventos médios na filosofia 2R2L para o estado inicial (caso 2) e variações relativas para o indivíduo ótimo (caso 2). . . . .	94
Tabela 25 – Eventos médios na filosofia 1L do indivíduo ótimo (caso 3). . . . .	95
Tabela 26 – Eventos médios na filosofia 1L para o estado inicial (caso 3) e variações relativas para o indivíduo ótimo (caso 3). . . . .	96
Tabela 27 – Eventos médios na filosofia 4L do indivíduo ótimo (caso 4). . . . .	98
Tabela 28 – Eventos médios na filosofia 4L para o estado inicial (caso 4) e variações relativas para o indivíduo ótimo (caso 4). . . . .	98
Tabela 29 – Eventos médios na filosofia 4L para o indivíduo da população de quintessência (caso 4) e variações relativas para o indivíduo convergido (caso 4). . . . .	99
Tabela 30 – Resumo de eventos médios estimados das alocações ótimas, para cada UCSV em todas as filosofias, com seu custo individual e diferença percentual em relação à referência. . . . .	101
Tabela 31 – Resumo da alocação dos religadores nos casos considerados. . . . .	102
Tabela A1 – Exemplo de seleção por torneio . . . . .	117
Tabela B1 – Parâmetros do equivalente de entrada da subestação - 69 kV. . . . .	124
Tabela B2 – Parametrização do transformador de entrada. . . . .	125
Tabela B3 – Parâmetros gerais do religador . . . . .	125
Tabela B4 – Curvas e ajustes do religador . . . . .	125
Tabela B5 – Curvas dos elos-fusíveis presentes nas chaves de proteção de ramais laterais. . . . .	126
Tabela B6 – Parametrização das linhas de distribuição aéreas. . . . .	126
Tabela B7 – Descrição dos trechos e suas configurações. . . . .	126
Tabela B8 – Cargas pontuais e suas descrições. . . . .	127
Tabela B9 – Cargas distribuídas e suas descrições. . . . .	127
Tabela B10 – Parametrização dos reguladores de tensão. . . . .	127
Tabela B11 – Parametrização dos capacitores <i>shunts</i> . . . . .	128

# Lista de abreviaturas e siglas

AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Afundamento de Tensão
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CAIDI	<i>Customer Average Interruption Duration Index</i>
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufacturers Association</i>
CI	<i>Confidence Intervals</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora
DMIC	Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão
EDP	<i>Energias de Portugal</i>
EMTP	<i>Electro Magnetics Transients Program</i>
END	Energia não Distribuída
ENS	<i>Energy Not Supplied</i>
ET	Elevação de Tensão
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FF	Curto-circuito Bifásico
FFF	Curto-circuito Trifásico
FFFT	Curto-circuito Trifásico-terro
FFT	Curto-circuito Bifásica-terro
FI	Fator de Impacto
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora

FO	Função Objetivo
FT	Curto-circuito Fase-terra
GD	Geração Distribuída
IC	Interrupção de Curta Duração
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IL	Interrupção de Longa Duração
ITIC	<i>Information Technology Industry Council</i>
L	Curva de Atuação Lenta do Religador
MAIFI	<i>Momentary Average Interruption Frequency Index</i>
MDC	Método da Distância Crítica
MEE	Método de Enumeração de Estados
NA	Normalmente Abertos
NF	Normalmente Fechados
NSGA II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OR	Outro Ramal
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
p.u.	Por Unidade
PI	<i>Prediction Intervals</i>
PR	Próprio Ramal
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
R	Curva de Atuação Rápida do Religador
RA	Religamento Automático
RD	Redes de Distribuição

SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
SE	Subestação
SEMI	<i>Semiconductor Equipment Materials International</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMC	Simulação Monte Carlo
UCSV	Unidade Consumidora Sensível a Variação de Tensão de Curta Duração
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
ZP	Zona de Proteção

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Relevância do Tema	17
1.2	Estado da Arte	19
1.3	Objetivos e Contribuições da Dissertação	26
1.4	Estrutura da Dissertação	26
<b>2</b>	<b>AS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO</b>	<b>28</b>
2.1	Considerações Iniciais	28
2.2	Definições	28
2.3	Causas	29
2.4	Efeitos sobre Clientes Sensíveis	31
2.4.1	Curvas de Sensibilidade	32
2.5	Variáveis de Influência	34
2.5.1	Localização da Falta	34
2.5.2	Tipo de Falta	35
2.5.3	Taxa de Falta	36
2.5.4	Impedância de Falta	37
2.5.5	Tensão Pré-Falta	38
2.5.6	Conexão do Transformador	39
2.5.7	Sistema de Proteção	40
2.5.8	Sistema de Religamento	41
2.6	Caracterização da VTCD	43
2.6.1	Agregação de Fases	44
2.6.2	Agregação Temporal	46
2.7	Indicadores para VTCDs	47
2.8	Considerações Finais	49
<b>3</b>	<b>METODOLOGIAS PARA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DE VTCDS</b>	<b>51</b>
3.1	Método da Distância Crítica	53
3.2	Método da Enumeração de Estados	56
3.3	Simulação Monte Carlo	59
3.4	Método Híbrido	61
3.5	Comparações entre os Métodos para Simulação de Curtos-Circuitos	62
<b>4</b>	<b>PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE RELIGADORES CONSIDERANDO VTCDS</b>	<b>65</b>

<b>4.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b>	<b>65</b>
<b>4.2</b>	<b>Contabilização de Eventos em Sistema Multi-religador</b>	<b>65</b>
4.2.1	Padrão de Eventos para Sistema com Religadores Coordenados	69
<b>4.3</b>	<b>Proposta de Metodologia para Simulação de Faltas e Otimização</b>	<b>73</b>
4.3.1	Considerações para a Simulação Monte Carlo	76
4.3.2	Considerações para o Algoritmo Genético	79
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>83</b>
<b>5.1</b>	<b>Aplicação da Proposta</b>	<b>83</b>
5.1.1	Sistema Teste - IEEE 34 Barras Modificado Duplo Alimentador	83
5.1.2	Parâmetros Considerados para Curtos-Circuitos e Otimização	85
5.1.3	Apresentação dos Resultados	90
5.1.3.1	Caso 1 - Filosofia 1R3L	90
5.1.3.2	Caso 2 - Filosofia 2R2L	93
5.1.3.3	Caso 3 - Filosofia 1L	94
5.1.3.4	Caso 4 - Filosofia 4L	96
5.1.3.5	Comparações entre Casos	100
<b>5.2</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>102</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>104</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões Gerais</b>	<b>104</b>
<b>6.2</b>	<b>Proposta para Trabalhos Futuros</b>	<b>105</b>
<b>6.3</b>	<b>Artigos Publicados</b>	<b>106</b>
	 <b>ANEXOS</b>	 <b>107</b>
	<b>ANEXO A – ALGORITMO GENÉTICO</b>	<b>108</b>
<b>A.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b>	<b>108</b>
<b>A.2</b>	<b>Definições</b>	<b>109</b>
<b>A.3</b>	<b>Codificação</b>	<b>110</b>
<b>A.4</b>	<b>População Inicial</b>	<b>112</b>
<b>A.5</b>	<b>Função Objetivo</b>	<b>113</b>
<b>A.6</b>	<b>Operadores Genéticos</b>	<b>114</b>
A.6.1	Seleção	114
A.6.1.1	Seleção Proporcional ou Roleta (Roulette Wheel)	115
A.6.1.2	Seleção por Torneio	117
A.6.1.3	Seleção por Elitismo	117
A.6.2	Cruzamento	118
A.6.2.1	Recombinação Uniforme	118

A.6.2.2	Recombinação a um Ponto de Corte . . . . .	119
A.6.2.3	Recombinação a dois Pontos de Corte . . . . .	119
A.6.3	Mutação . . . . .	119
<b>A.7</b>	<b>Critério de Parada devido à Convergência . . . . .</b>	<b>121</b>
<b>A.8</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO B – PARÂMETROS DO SISTEMA <i>IEEE 34 BUSES TEST</i></b>		
	<b><i>FEEDER MODIFICADO</i> . . . . .</b>	<b>123</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>129</b>



# 1 Introdução

## 1.1 Relevância do Tema

A ANEEL (2018), através do Módulo 8 do PRODIST, estabelece os procedimentos relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

A qualidade do produto retrata a conformidade do produto oferecido pela concessionária e entregue aos consumidores, que é a forma de onda da tensão, levando em consideração aspectos considerados desejáveis para sua operação em segurança.

Já a qualidade do serviço está relacionada com a confiabilidade e disponibilidade do serviço prestado, englobando indicadores de tempo de atendimento às ocorrências emergenciais e de continuidade, considerando interrupções com duração maior ou igual a 3 minutos.

Em outras palavras, um dos grandes desafios no Sistema Elétrico de Potência (SEP) não é somente atender à demanda de energia elétrica dos consumidores, mas também realizá-la de forma ininterrupta, com segurança, qualidade e de forma sustentável, o que se traduz em aprimorar a QEE.

Também, a rápida e crescente evolução que a indústria sofreu devido ao desenvolvimento de novas tecnologias mais eficientes, ocasionou um aumento na sensibilidade de equipamentos e processos industriais frente aos distúrbios elétricos, principalmente a variações de tensão de curta duração (VTCDs), que são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos (ANEEL, 2018).

Dependendo da magnitude e duração deste fenômeno, plantas industriais podem ser parcial ou totalmente interrompidas, o que pode trazer prejuízos por paradas de produção, perdas de insumos, horas extras, reparos, deterioração de isolamento de equipamentos, entre outros (FILHO, 2000).

Conseqüentemente, estes clientes, agora denominados sensíveis, podem solicitar indenizações às concessionárias de energia elétrica devido a problemas na qualidade da energia elétrica, levando à depreciação da imagem empresarial da distribuidora de energia, penalizações e, até mesmo, comprometimento da renovação da concessão.

As causas mais comuns destes fenômenos da qualidade da energia elétrica (QEE) são os curtos-circuitos em linhas de transmissão e distribuição, bem como falhas nos mais diversos componentes do sistema. Com o intuito de atenuar os efeitos, uma vez que as

causas não são totalmente controláveis, as concessionárias de energia elétrica usualmente realizam estudos de alocação ou realocação ótima de dispositivos de proteção baseados na melhoria de índices de continuidade (DEC, FEC, FIC, DIC e DMIC).

Inicialmente, os engenheiros responsáveis pela expansão, manutenção e proteção do sistema usufruíam de técnicas para alocação de equipamentos de proteção oriundas de conhecimentos adquiridos através da prática cotidiana. Contudo, surgiram novas variáveis a serem consideradas neste problema, como coordenação de dispositivos em série, número máximo de dispositivos, metas mais restritas para indicadores de continuidade e, não menos importante, a preocupação com a qualidade do produto.

Naturalmente, técnicas de otimização, tais como algoritmos matemáticos, métodos iterativos, métodos inteligentes e métodos híbridos, têm sido propostas para resolver este problema de programação multi-objetivo, com viés específico na melhora da continuidade do serviço.

No entanto, a busca por um aprimoramento nos índices de continuidade pode, em contrapartida, piorar a qualidade do produto de energia elétrica entregue aos consumidores sensíveis, pois uma sequência de VTCDs possivelmente será imposta em função das tentativas de realizar religamentos automáticos, podendo agravar o problema de desligamentos de unidades consumidoras sensíveis a essas variações (UCSVs).

A duração destes afundamentos ou elevações de tensão está diretamente relacionada ao ajuste do sistema de proteção, caracterizado pelo tipo de filosofia de proteção adotada. Ou seja, o religador pode estar parametrizado com curvas lentas (seletivo ou "queima fusível") ou rápidas (coordenado ou "salva fusível").

Uma boa precisão nos valores médios estimados dos fenômenos de VTCD serve como dado de entrada para análise da qualidade da energia elétrica, como a avaliação de custo de paradas de processo associados a VTCDs, análise de reclamações de UCSVs, e também, a alocação de religadores considerando o impacto de VTCDs em consumidores sensíveis.

Atualmente, diversos trabalhos publicados na literatura técnica têm seu foco na análise de características relacionadas à aplicação de religadores focando somente em qualidade do serviço (continuidade). A principal diferença dos trabalhos anteriores para esta proposta é que os outros restringem toda a discussão em torno do impacto dos religadores na melhoria dos indicadores de continuidade, enquanto esta proposta pretende avaliar os indicadores de qualidade do produto (VTCDs), utilizando uma ferramenta de otimização adequada para esta análise.

## 1.2 Estado da Arte

Devido à dificuldade verificada em dispor de equipamentos de medição nos mais diversos pontos da rede e à baixa frequência de ocorrência de VTCDs em uma janela adequada de tempo, os métodos para simulação de faltas tornam-se relevantes para estimação destas variáveis. Dentre as metodologias propostas, destaca-se o uso do método de Enumeração de Estados (MEE), método da Distância Crítica (MDC) e das Simulações Monte Carlo (SMC).

O MEE é apresentado em (CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991), calculando o número de eventos esperados de VTCDs para os barramentos escolhidos, ordenando-os quanto a sua amplitude e duração. Este método também foi proposto para composição da norma IEEE 493 (BECKER et al., 1993).

Outro método também conhecido é o MDC, que consiste no cálculo analítico de uma distância que provoque afundamentos de tensão, diferente do MEE que a intensidade do afundamento é estimada. Desta maneira, o MDC tem sido comparado com o MEE em diversos trabalhos (BOLLEN, 1996), (QADER; BOLLEN; ALLAN, 1999) e seu uso é direcionado a sistemas radiais ou pouco malhados.

Diferente dos demais, a SMC possui desempenho distinto. Dada a natureza aleatória do problema, o método consiste em simular possíveis anos de operação do sistema e, através de várias repetições, encontrar o seu comportamento médio. Em (OLGUIN; KARLSSON; LEBORGNE, 2005), foi utilizado para comparar o desempenho de uma rede frente a afundamentos de tensão com os resultados obtidos pelo MEE.

Devido a praticidade e eficiência do método, outros trabalhos têm utilizado esta proposição para comparar resultados de medições com simulações em sistemas reais (OLIVEIRA, 2008), (OLIVEIRA et al., 2008) e (HONORATO, 2014).

Amasifen (2008) propõe um método híbrido, o qual mescla a seleção determinística dos valores de algumas variáveis, discretizando-as em faixas de valores adequadas através do MEE, com a seleção aleatória das demais variáveis via SMC. O autor compara as três metodologias de simulação de curto-circuito, sugerindo suas vantagens e desvantagens.

A SMC também foi aplicada para avaliar os impactos de filosofias de proteção, em indicadores de QEE tais como interrupções de curta e longa duração, afundamentos e elevações de tensão, obtidos através de uma nova proposição para estimativa de valores médios de VTCDs, denominada Método Algébrico. Esta metodologia, desenvolvida em (FILHO, 2017), baseia-se em equações algébricas que dependem de parâmetros da rede, como taxa de falta, comprimento da área de vulnerabilidade (MCGRANAGHAN; MUELLER; SAMOTYJ, 1991), padrões de eventos oriundos do desempenho de equipamentos de proteção.

Posteriormente, Vale (2017) e Maciel (2019) discutiram novas generalizações para o Método Algébrico. Inicialmente, a proposição de Filho (2017) estava restrito a apenas um único alimentador para o sistema de distribuição em análise. Diante disso, Vale (2017) prosseguiu o estudo de filosofias de proteção em um sistema com dois alimentadores, contribuindo para a independência desta variável.

Já Maciel (2019), desenvolve a generalização da metodologia para um sistema de distribuição multi-alimentador, porém irrestrito à quantidade de chaves religadoras alocadas na rede. Para tal, foi necessária a utilização do conceito de zonas de proteção (ZP) entre dispositivos.

Para determinar a alocação ótima de religadores na rede distribuição (RD), alguma técnica de otimização deve ser aplicada. Desta maneira, a natureza discreta do problema, juntamente com a não linearidade das equações de fluxo de carga que caracterizam o sistema, dão origem a um problema de otimização categorizado como problema de Programação Não-Linear Discreta.

Do ponto de vista matemático, o problema de otimização da alocação ótima de religadores consiste em minimizar (ou maximizar) objetivos com restrições. Portanto, define-se uma função objetivo (FO), cujo valor obtido da solução numérica determina os melhores locais de instalação dos equipamentos. O alvo é encontrar o mínimo (ou máximo) valor da FO na medida em que as restrições e limitações estabelecidas são satisfeitas (ROYTELMAN; WEE; LUGTU, 1995).

Uma das técnicas são os algoritmos evolutivos, caracterizados por aplicar mecanismos inspirados na evolução biológica dos seres vivos, tais como a reprodução, mutação, recombinação, seleção e sobrevivência (*fitness*). Em (ALAM et al., 2018) o uso da técnica de Evolução Diferencial é proposta para resolver o problema da alocação ótima “simultânea” de religadores e chaves seccionadoras em RDs radiais. Neste caso, os resultados obtidos da aplicação desta técnica são confrontados com os resultados já obtidos da aplicação da metodologia de Programação Quadrática Sequencial .

Outra técnica baseada em algoritmos evolutivos são os Algoritmos Genéticos (AG). Esta técnica baseia-se na criação de uma população inicial e aleatória de indivíduos, cada um com características específicas. Estes são submetidos a um processo de seleção, cruzamento e mutação, criando novas gerações de indivíduos a fim de selecionar aqueles com características mais próximas do objetivo da otimização, e assim recombiná-los até se obter a convergência para o melhor resultado. As principais diferenças entre o AG e a Evolução Diferencial está na representação vetorial de números reais para o segundo método e no funcionamento dos operadores cruzamento e mutação, que se dão através de combinações aritméticas dos progenitores, também para a última metodologia.

Tem-se datado em (MIRANDA; RANITO; PROENCA, 1994) a utilização de AG

para planejamento ótimo de expansão multi-estágio em RD. A metodologia consiste em escolher um conjunto de variáveis de interesse, como por exemplo nós candidatos, e codificá-las em um cromossomo inicial, que é basicamente uma cadeia de *bits*, e assim gerar uma população inicial. Para manutenção e reprodução da espécie, são aplicados três operadores genéticos básicos: seleção, cruzamento e mutação.

O sistema teste utilizado em (MIRANDA; RANITO; PROENCA, 1994) possui 4 subestações pertencentes a um sistema de 50 barras, porém o critério multi-estágio faz o problema atingir 150 pontos de busca de solução. A metodologia foi capaz de encontrar soluções para o planejamento de 3 anos, nos quais foram priorizados a construção de ramais normalmente abertos nos primeiros anos com a finalidade de tornarem-se normalmente fechados no último ano previsto.

Por outro lado, Zhang, Xu e Wang (2008) propuseram uma modificação no AG padrão, que foi denominado *Multiple-Population Genetic Algorithm*, para alocação ótima de religadores em sistemas com Geração Distribuída (GD). A diferença básica é percebida na divisão da população genética em grupos de acordo com a avaliação *fitness*. Os cromossomos são classificados em três conjuntos, que são qualidade, normal e pobre. A probabilidade de cruzamento e de mutação, nestes conjuntos, são variáveis de acordo com sua aptidão. Ou seja, a chance com que um elemento do grupo “pobre” sofrer mutação é muito superior ao grupo “qualidade”. Uma nova operação genética, população de quintessência, é inserida nesta metodologia, cuja função é guardar as características do indivíduo ótimo de cada iteração.

Uma técnica de otimização semelhante ao AG denominada Algoritmo Genético Não Dominado (NSGA II) foi proposta em MONTROYA et al. (2014). O NSGA II difere-se do AG clássico por ser um algoritmo multi-objetivo que possibilita uma convergência simultânea em otimizações que possuem mais de uma FO. Com as possibilidades advindas do NSGA II, foi aplicada uma estratégia de localização simultânea de religadores normalmente abertos (NA), para transferência de carga e normalmente fechados (NF) para isolar as falhas.

Em (ATTARI; SHAKARAMI; POUR, 2016) também o NSGA II foi aplicado para alocação ótima de religadores. Para reduzir o espaço de busca por soluções não dominantes, incrementou-se um operador genético denominado “inversão”, que procura, principalmente, reverter o *bit* de cromossomos que os caracterizam como um sistema não radial. Neste estudo, verificou-se que o aumento de 50 iterações para 100, com 50 indivíduos cada, não trazia ganho significativo para o esforço computacional requerido.

Já em (ÁLZATE et al., 2015), foi apresentado o Micro Algoritmo Genético, uma derivação do AG, possuindo princípios de funcionamento semelhantes, porém com algumas exclusividades. Utiliza-se um tamanho de população muito pequeno, quando comparado ao AG, o que reduz o tempo de processamento. Além disso, as mutações não são aplicadas

nesse algoritmo, uma vez que a diversidade suficiente é introduzida após a convergência de populações micro. Um Algoritmo de Desenvolvimento da Sociedade foi proposto em (HAJINIA; MAHAEI; JAFARZADEH, 2015). Esta técnica possui um princípio de funcionamento similar ao AG, baseado em mutação genética, porém a diferença entre esses dois algoritmos encontra-se na população inicial de indivíduos, visto que no Algoritmo de Desenvolvimento da Sociedade as características da população inicial são determinadas previamente, enquanto no AG essas características são aleatórias. Os autores utilizaram ambas metodologias em um sistema de distribuição de 115 barras e concluíram que a instalação simultânea de religadores e chaves fusíveis utilizando o algoritmo proposto obteve resultados mais otimizados.

Um enfoque diferente é abordado em (WANG; SINGH, 2008), onde a técnica de Colônia de Formigas é proposta para determinar a alocação ótima de religadores e GD. O desempenho do algoritmo foi comparado com a resposta da técnica de AG, adotando uma população de 200 indivíduos com um máximo de 200 iterações. Dos resultados dos testes, Wang e Singh (2008) concluíram que a técnica de Colônia de Formigas supera o AG ao determinar a alocação de religadores com maior minimização da FO. Entretanto, uma das possíveis desvantagens que a técnica proposta pode apresentar frente aos AG é o comprometimento da eficiência na escolha inadequada dos parâmetros iniciais.

A aplicação de técnicas baseadas em meta-heurística também é sugerida em (ABDI et al., 2014). Neste artigo, os autores propõem a técnica de Enxame de Partículas Melhorado na alocação de religadores e seccionalizadores em uma RD radial considerando três cenários de otimização: alocação somente de religadores, alocação somente de seccionalizadores (operando em conjunto com o disjuntor da subestação), e alocação simultânea de religadores e seccionalizadores.

Em (SILVA et al., 2008) propõem-se o algoritmo de Busca Tabu Reativa para determinar a alocação ótima de dispositivos de controle e proteção da RD, simultaneamente. A técnica proposta neste artigo foi testada num sistema de 134 barras contendo vários pontos de interconexão com alimentadores vizinhos (total 7). Os possíveis locais candidatos para instalação dos dispositivos de proteção e controle, que conformam o espaço de busca da técnica de otimização, são definidos pelos autores com base em critérios estabelecidos pela experiência de engenheiros e técnicos das áreas de operação e planejamento da concessionária.

Uma proposta diferente de técnica meta-heurística é feita em (MORSALI et al., 2015), onde o algoritmo de Busca Aprimorada da Harmonia é aplicado para determinar a alocação ótima e simultânea de religadores e GD. Tal algoritmo caracteriza-se por imitar o processo de busca da melhor harmonia musical dentro de uma mescla de sons (ZONG; JOONG; LOGANATHAN, 2001). Morsali et. al. (2015) avaliam a técnica em uma RD composta de 115 barras, Os resultados obtidos pela proposta foram comparados com

os resultados da aplicação da técnica de Busca Simples da Harmonia e o algoritmo de Enxame de Partículas. Das análises realizadas, Morsali et. al. (2015) concluíram que a técnica proposta apresenta uma maior otimização em comparação com as outras técnicas, destacando que o pior desempenho foi apresentado pela técnica de Enxame de Partículas.

A motivação para um problema de otimização está, basicamente, em encontrar uma solução ótima (maximizada ou minimizada) para uma determinada FO, que não ultrapasse as imposições das funções de restrição. Normalmente, os limites são técnicos e operacionais.

A proposição feita em MIRANDA, RANITO e PROENCA (1994) formula a FO pela composição dos custos associados à instalação de novos componentes (alimentadores e subestações) e também por sua manutenção. As limitações para esta função são os custos de perda de energia, variações de tensão em cada barramento, e o investimento disponível para o estágio de investimento. Já em (ENAYATI; ORTMEYER, 2015), foi proposto a coordenação da proteção nos sistemas de distribuição de energia elétrica através de um esquema que utiliza diferentes dispositivos de proteção.

Geralmente, as FO são expressas por índices de confiabilidade. Como em (ZHANG; XU; WANG, 2008), foi proposto minimizar um índice ponderado, *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI) e *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI), equivalentes ao FEC e DEC respectivamente, o qual foi convertido em custo. O número de religadores disponíveis e os locais candidatos para sua alocação são considerados como restrições ao problema. Percebeu-se que os índices de confiabilidade diminuíram ao passo que a inserção de religadores foi aumentada.

Em (KONDO et al., 2013), o intuito da otimização está diretamente relacionado com a minimização dos indicadores de continuidade FEC, DEC e Energia não Distribuída (END), restringindo-se ao número máximo de religadores disponíveis.

É possível encontrar outras combinações que contém índices e distintos parâmetros. O trabalho (QIN; WU, 2014) mescla os índices de SAIDI e *Customer Average Interruption Duration Index* (CAIDI), visando minimizá-los. Uma pesquisa do *Berkeley Lab* para o Departamento de Energia dos EUA em (SULLIVAN; MERCURIO; SCHELLENBERG, 2009), contabilizou dados de confiabilidade do serviço e simplificou o custo da interrupção por kWh para cada setor, de acordo com a duração da interrupção. Novamente o número de equipamentos de proteção disponíveis atua como limitador do problema. Citando caso exemplo, em (INGKING; GALLANO; TIO, 2017) a FO a ser minimizada é modelada pelo índice SAIFI, expressando a localização do religador e sua taxa de falha. Neste caso, as restrições do trabalho são os números de equipamentos de proteção disponíveis, experiências práticas dos engenheiros quanto aos possíveis locais para alocação dos dispositivos, bem como sua coordenação e os limites intrínsecos do processo de linearização (grande esforço computacional e manuseio de funções não lineares).

Além do arranjo de índices de confiabilidade, é possível encontrar um critério de multi-objetivos. Neste caso, são duas ou mais FO distintas e não a combinação de dois objetivos resultando em somente uma função. Os autores de (ATTARI; SHAKARAMI; POUR, 2016) modelam as FO considerando os índices de *Energy Not Supplied* (ENS) e SAIFI, com o intuito de minimizá-las. Além das restrições anteriores, o carregamento de cada ramo e a garantia de que a solução seja radial são buscados. Verificou-se a rápida convergência do método, em tempo não proibitivo, para encontrar soluções não-dominantes robustas. Em (HAJINIA; MAHAEI; JAFARZADEH, 2015) e (RAHMAWATI et al., 2015) a melhoria dos índices de confiabilidade é proposta em conjunto com a minimização dos custos de investimento. É importante ressaltar, que para esses casos, tornou-se necessária a conversão das unidades dos índices de confiabilidade em uma unidade monetária, permitindo assim uma maior precisão dos resultados.

A otimização a partir de funções multi-objetivo também foi utilizada a partir de parâmetros diferentes dos citados anteriormente. Os objetivos propostos em (MONTROYA et al., 2014) estão relacionados não só com a minimização dos custos de investimento e a melhoria dos índices de confiabilidade, mas também a adequação do cumprimento das diretrizes exigidas pelas políticas regulatórias, com base na capacidade de carga de cada segmento da rede, além da tentativa de conservar os perfis de tensão em todos os nós do sistema e da quantidade disponível de religadores. Já em (ÁLZATE et al., 2015) foi proposto uma busca por melhorias nos canais de comunicação dos religadores, com base nas diferentes tecnologias de comunicação existentes, com o objetivo de isolar as falhas do sistema e promover a transferência de carga na rede.

Diferentemente dos casos anteriores, a melhoria dos índices de confiabilidade em (DAN et al., 2015) baseia-se na especificação das condições de tensão e da taxa de perda em diferentes configurações de topologia da rede, buscando a minimização das mudanças necessárias no sistema de proteção já existente.

Em (ALAM et al., 2018) o propósito global da alocação ótima de religadores e chaves seccionadoras é a melhoria na confiabilidade do sistema. Assim, para cumprimento deste quesito os autores apresentam a formulação de uma FO que visa maximizar a receita junto com a minimização de despesas da concessionária.

De maneira mais específica, Alam et. al. (2018) propõem maximizar a receita em função da redução nos custos por ENS e os custos de interrupção. Já no caso da minimização das despesas, propõe-se a redução nos custos de instalação e manutenção dos equipamentos. Tais solicitações da otimização podem ser atingidas ao obter-se uma solução ótima que ofereça o menor número de interrupções com a menor quantidade de equipamentos envolvidos.

Como limitações operacionais da FO, Alam et. al. (2018) definem dois parâmetros: o estabelecimento de uma quantidade máxima de chaves seccionadoras e religadores a



serem alocados, e a instalação de religadores e chaves seccionadoras não coincidentes no mesmo ramal.

Já Wang e Singh (2008) propõem uma estratégia de alocação ótima de religadores e GD na rede, objetivando melhorar os índices de confiabilidade. Especificamente, no artigo propõe-se a formulação de uma FO que visa maximizar um índice composto pela agregação de dois índices de maior aplicação na avaliação da confiabilidade em uma RD: SAIDI e SAIFI. Neste caso, a única limitação imposta na formulação da FO corresponde ao número máximo de religadores e GD disponíveis para instalação.

Por outro lado, em (ABDI et al., 2014) propõe-se a alocação ótima de religadores e seccionadores visando também melhorar a confiabilidade do sistema de distribuição, minimizando mutuamente o indicador de ENS, custos de investimentos anuais para os equipamentos de proteção, limitando-se ao número máximo de equipamentos disponíveis para instalação.

Novamente, com intuito de melhorar os índices de confiabilidade, Silva et. al. (2008) propõem a alocação ótima de equipamentos de proteção (religadores e fusíveis) e controle (seccionadores) em uma RD. Neste caso, a formulação da FO está baseada na soma de custos fixos, tais como: o custo de investimento na compra e instalação (ou substituição) de equipamentos, e os custos anuais associados com interrupções temporárias e permanentes.

O melhoramento nos índices de confiabilidade junto com a redução de perdas elétricas no sistema é a proposta feita em MORSALI et al. (2015), onde a FO proposta visa determinar a alocação ótima de religadores e GD. Aqui, os autores consideram a minimização de quatro índices: SAIDI, SAIFI, *Momentary Average Interruption Frequency Index* (MAIFI) e o custo de ENS. Os três primeiros são considerados como índices de melhoria do ponto de vista dos consumidores, enquanto que o custo de ENS é considerado um índice de melhoria do ponto de vista da concessionária de distribuição de energia.

Três categorias de limitações são estabelecidas em MORSALI et al. (2015): a limitação no fluxo de carga do sistema, limitações operacionais na tensão e potência do sistema, e limitações na potência ativa e reativa injetada pela GD no sistema.

Não foram encontrados trabalhos que abordam especificamente a alocação ótima de religadores na rede de distribuição considerando a qualidade do produto. Desta forma, este trabalho de dissertação originou-se de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D), no qual consiste em desenvolver um algoritmo de alocação ótima de religadores que considere o impacto mútuo entre qualidade do serviço e produto. Entretanto, este trabalho restringir-se-á à alocação visando apenas o impacto de VTCDs.

### 1.3 Objetivos e Contribuições da Dissertação

Diante do exposto, esta dissertação tem como principal objetivo propor um algoritmo computacional para alocação ótima de religadores, considerando VTCDs, a partir da aplicação de uma técnica de otimização baseada em AG. Para isto, uma metodologia que reproduza a ocorrência de curtos-circuitos, com o menor custo-benefício, será desenvolvida.

Posteriormente, as variações de filosofias de proteção serão avaliadas de modo a verificar seu impacto na busca de combinações de religadores a serem instalados, o que corresponde à alocação ótima destes dispositivos.

Em resumo, as perguntas que se pretendem responder com o desenvolvimento deste trabalho são:

1. Existe um método mais adequado para simulação de eventos de VTCDs (SMC ou MEE), visando a alocação ótima de religadores?
2. Qual é o custo benefício entre o esforço computacional e resultados adequados associado aos dois métodos de simulação citados, tendo em vista a sua importância para a alocação ótima de religadores?
3. Existe uma filosofia de proteção mais adequada quando se considera as VTCDs no processo de alocação ótima de religadores?

### 1.4 Estrutura da Dissertação

O documento de dissertação tem seu conteúdo apresentado em 6 capítulos e 2 anexos, dos quais a descrição de cada item é realizada nos parágrafos seguintes.

O capítulo 1 introduz ao leitor o tema abordado pela dissertação, citando precisamente a relevância do estudo, os trabalhos desenvolvidos até o presente momento, os objetivos desejados, bem como suas respectivas contribuições. Finalmente, este capítulo também contempla esta estrutura do documento de dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma discussão focada nas variações de tensão de curta duração. Este fenômeno é descrito juntamente de suas causas predominantes, efeito em consumidores sensíveis e suas mais diversas variáveis de influência. Também, são apresentados métodos para agregação de parâmetros das VTCDs, bem como seus indicadores.

As metodologias para simulação de eventos de VTCDs são expostas no capítulo 3. Uma análise comparativa entre os métodos de Simulação Monte Carlo e Enumeração de Estados também é realizada.

No capítulo 4 está descrita a proposta de metodologia para alocação ótima de religadores quando são considerados os consumidores sensíveis. São definidas as estratégias para a contabilização de eventos, a otimização via Algoritmo Genético e para a Simulação Monte Carlo.

Já no capítulo 5, é realizado um estudo de caso para validar a metodologia proposta utilizando o sistema IEEE 34 barras duplo alimentador modificado. São conduzidos testes que modificam as filosofias de proteção para verificar seus impactos na busca da alocação ótima de religadores.

O capítulo 6 retrata as conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho e sugere novas considerações para trabalhos futuros relacionados ao tema. Nesta seção, também são apresentados os trabalhos publicados através da condução deste trabalho.

No anexo A, é apresentada a técnica de otimização, denominada Algoritmo Genético, com as suas definições, operadores genéticos utilizados, a estruturação da função objetivo e critério de parada. Já o anexo B apresenta os parâmetros modificados do sistema teste usado para as metodologias de curto-circuito. Finalmente, as referências bases do trabalho são apresentadas.

## 2 As Variações de Tensão de Curta Duração

### 2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são abordados conceitos e definições relacionados a um item específico da qualidade do produto: a variação de tensão de curta duração. Posteriormente, suas causas são elencadas, retratando seu impacto em clientes sensíveis, descrevendo também suas variáveis de influência, métodos para agregação de eventos e, finalmente, indicadores sugeridos para estes fenômenos.

### 2.2 Definições

Para a distribuição de energia elétrica no Brasil, as concessionárias de energia têm como base as regulamentações estabelecidas em (ANEEL, 2018). Assim, as VTCDs são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos, podendo ser classificadas conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das VTCDs segundo ANEEL (2018).

Classificação	Denominação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência	Duração da variação
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	$V < 0,1 \text{ p.u.}$	$t \leq 3 \text{ s}$
	Afundamento Momentâneo de Tensão	$V \geq 0,1 \text{ p.u.}$ e $V < 0,9 \text{ p.u.}$	$t \geq 1 \text{ ciclo}$ e $t \leq 3 \text{ s}$
	Elevação Momentânea de Tensão	$V > 1,1 \text{ p.u.}$	
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	$V < 0,1 \text{ p.u.}$	$t > 3 \text{ s}$ e $t < 3 \text{ min}$
	Afundamento Temporário de Tensão	$V \geq 0,1 \text{ p.u.}$ e $V < 0,9 \text{ p.u.}$	
	Elevação Temporária de Tensão	$V > 1,1 \text{ p.u.}$	

Porém, outras normas podem diferenciar-se quanto a classificação destes fenômenos. A transmissão de energia elétrica baseia-se nas diretrizes do (ONS, 2011), na qual existe apenas uma diferença para a proposta em (ANEEL, 2018), que é a duração das variações temporárias de tensão, cujo limite superior definido é de 1 minuto.

Internacionalmente, as normas que tratam as VTCDs são a (IEEE 1159, 2009) (americana) e (IEC 61000-4-30, 2006) (europeia). Por exemplo, existe uma nova classificação dos eventos em variação instantânea de tensão para a norma americana, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das VTCDs de acordo com (IEEE 1159, 2009).

Classificação	Denominação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência	Duração da variação
Variação Instantânea de Tensão	Afundamento Instantâneo de Tensão	$V \geq 0,1$ p.u. e $V < 0,9$ p.u.	$t \geq 0,5$ ciclo e $t \leq 30$ ciclos
	Elevação Instantânea de Tensão	$V \geq 1,1$ p.u. e $V < 1,8$ p.u.	
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	$V < 0,1$ p.u.	$t \geq 0,5$ ciclo e $t \leq 3$ s
	Afundamento Momentâneo de Tensão	$V \geq 0,1$ p.u. e $V < 0,9$ p.u.	$t \geq 30$ ciclos e $t \leq 3$ s
	Elevação Momentânea de Tensão	$V \geq 1,1$ p.u. e $V < 1,4$ p.u.	
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	$V < 0,1$ p.u.	$t > 3$ s e $t < 1$ min
	Afundamento Temporário de Tensão	$V \geq 0,1$ p.u. e $V < 0,9$ p.u.	
	Elevação Temporária de Tensão	$V \geq 1,1$ p.u. e $V < 1,2$ p.u.	

Em geral, as classificações propostas pelas normas são semelhantes, possuindo uma pequena diferença quanto à duração do evento. A ANEEL emprega um intervalo mais amplo (de 1 ciclo a 3 minutos), enquanto a norma IEEE 1159 recomenda um intervalo mais restrito (de 0,5 ciclo a 1 minuto). Já a proposição do ONS é algo intermediário dos limites de duração citados anteriormente (de 1 ciclo a 1 minuto).

Além de uma nova classificação dos eventos de VTCD em variações instantâneas de tensão, a norma IEEE 1159 propõe limites superiores (nas amplitudes) para as elevações de tensão, o qual não ocorre nas propostas de ANEEL e ONS.

## 2.3 Causas

Os afundamentos de tensão são os eventos de VTCD que possuem a maior probabilidade de ocorrência, quando comparado aos demais fenômenos. Estes eventos no sistema elétrico são oriundos de curtos-circuitos (CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991),(BOLLEN,

1994), da partida de motores de grande porte (OLGUIN; KARLSSON; LEBORGNE, 2005), energização de transformadores e pela saída de grandes blocos de geração (STY-VAKTAKIS; BOLLEN; GU, 2002).

Entretanto, os curtos-circuitos são o motivo mais comum e importante dos afundamentos de tensão, principalmente no sistema da concessionária, devido às grandes extensões de linhas aéreas de transmissão e distribuição, que estão sujeitas a todos fenômenos naturais como descargas atmosféricas, temporais, ventos, plantações e queimadas, contato por animais, falha humanas, entre outros. Ainda, grande parte das falhas no sistema de distribuição estão relacionadas com problemas de má operação de seus componentes (HONORATO, 2014).

Ao contrário de linhas de transmissão que possuem cabos guarda, as redes de distribuição são, normalmente, desprovidas deste condutor, o que ocasiona menor proteção contra descargas atmosféricas, as quais estão relacionadas com o nível cerâmico de cada região. Apesar do alto nível de descargas atmosféricas, nem todos surtos acarretam em falhas no sistema e, conseqüentemente, afundamentos de tensão (LEBORGNE, 2003).

Também, os sistemas de distribuição possuem alto índice de faltas permanentes em grandes centros devido ao elevado número de postes alocados e intenso volume de veículos, que podem causar abalroamentos parcial ou total de estruturas ativas da rede.

Já as elevações de tensão ocorrem, normalmente, devido à ocorrência de curtos-circuitos fase-terra (FT) e, conseqüentemente, dependem diretamente do tipo de aterramento de neutro do sistema.

Outro motivo para a ocorrência de elevações de tensão é durante a energização de grandes bancos de capacitores e em saídas de grandes parcelas de carga. Contudo, a frequência destas duas últimas é menor quando comparada às faltas monofásicas em redes de distribuição e transmissão.

Tanto afundamentos quanto elevações de tensões podem ter sua severidade aumentada devido a curtos-circuitos evolutivos. Este fenômeno acontece em consequência da alteração na característica da falha pelo excesso de esforços mecânico e dinâmico, seja pela existência de estruturas precárias ou por falha em componentes de isolamento, evoluindo de um simples curto-circuito FT para uma falta mais severa, bifásica-terra (FFT) ou, até mesmo, trifásica-terra (FFFT).

Algumas medidas podem ser tomadas para reduzir o número de faltas, muitas delas associadas às próprias práticas de manutenção da distribuidora, como a realização regular de poda em árvores, vistoria contínua da rede, canais para comunicação com consumidores sobre situações de risco e a substituição de equipamentos com desempenho comprometido. O uso de cabos isolados e de linhas subterrâneas também podem contribuir para diminuição de faltas.

Outra possibilidade está em atuar no tempo de exposição da VTCD, o qual está diretamente associado com a filosofia de proteção empregada, bem como os ajustes dos dispositivos.

Mesmo tomando as medidas citadas anteriormente, associadas a um rígido controle de processos por parte da concessionária, não é possível eliminar totalmente a ocorrência de faltas, evidenciando sua inerência a qualquer sistema elétrico (SHORT, 2004).

## 2.4 Efeitos sobre Clientes Sensíveis

Os fenômenos de VTCD podem ocasionar efeitos distintos nos mais diversos consumidores residenciais, comerciais e industriais. Os afundamentos de tensão são responsáveis por provocar desligamentos indesejáveis de processos provocados por falhas na operação de dispositivos e sistemas de controle, o que resulta em parada parcial ou total de plantas industriais. Já as elevações de tensão, em sua ocorrência, podem causar danos no isolamento elétrico de equipamentos e, em piores cenários, culminar em queima.

Um dado evento de VTCD pode ser caracterizado por um par de intensidade e sua duração. Assim, os clientes sensíveis podem ser classificados quanto a estes dois parâmetros (DUGAN et al., 2002):

- *Equipamentos sensíveis à magnitude da VTCD:* são dispositivos cuja sensibilidade é, predominantemente, definida pela variável de intensidade. Contatores e relés de subtensão são exemplos deste tipo de componentes;
- *Equipamentos sensíveis a ambas magnitude e duração da VTCD:* são equipamentos cuja sensibilidade é dependente da combinação de ambas grandezas. A maioria dos dispositivos que utilizam fontes eletrônicas possuem esta característica;
- *Equipamentos sensíveis a outras variáveis:* são componentes cuja sensibilidade não depende, majoritariamente, da magnitude e duração do evento, mas sim de outros aspectos. Por exemplo, salto do ângulo de fase da tensão e desequilíbrios de fases.

Assim, os impactos das VTCDs em cada cliente sensível são distintos. Dentre os efeitos mais comuns em consumidores industriais, destacam-se (FILHO, 2000):

- Disfunção de controladores lógicos programáveis;
- Desatracamento das bobinas de contatores e relés auxiliares;
- Desligamento de lâmpadas de descarga de vapor de mercúrio, que levam cerca de minutos para reacenderem;

- Desligamento de acionamentos à velocidade variável;
- Variação de velocidade e torque em motores de indução;
- Bloqueio de disparo de tiristores devido à atuação de dispositivos de proteção associados, podendo acarretar em desligamento instantâneo da fonte de alimentação;
- Falhas de disparo dos tiristores em pontes controladas;
- Queima de fusíveis e outros componentes nos acionamentos em corrente contínua no modo regenerativo.

Já em consumidores residenciais, os efeitos não culminam em prejuízos financeiros diretos. Porém, a insatisfação de clientes em relação ao serviço prestado pela distribuidora de energia pode levar à depreciação de sua imagem empresarial. Normalmente, os equipamentos digitais sofrem perda na memória, como relógios, máquinas de lavar, fogões, geladeiras e também desligamentos, como televisores e micro-computadores.

### 2.4.1 Curvas de Sensibilidade

Tipicamente, a sensibilidade de uma carga pode ser representada por uma curva em um gráfico de intensidade do evento, em p.u. *versus* o seu tempo de exposição, ou seja, duração na rede, em segundos ou ciclos (LEBORGNE, 2003).

A literatura utiliza curvas típicas para estimar a sensibilidade de equipamentos e processos. A curva CBEMA (*Computer and Business Equipment Manufacturers Association*), foi proposta em 1978 para retratar limites de tolerância para computadores *mainframe* frente aos eventos de VTCD. Outros equipamentos micro-processados também podem ser caracterizados por esta curva.

Já a curva CBEMA foi utilizada até 1997, quando a associação sofreu uma mudança de nome para ITIC (*Information Technology Industry Council*) e, conseqüentemente, surgiu uma nova proposição de curva de sensibilidade, baseada na CBEMA. O objetivo desta reformulação foi de adequar as tolerâncias de novos dispositivos eletrônicos, dentre eles os computadores.

Outra curva também utilizada para representar a sensibilidade de equipamentos é a SEMI F47. Foi desenvolvida pela associação SEMI (*Semiconductor Equipment Materials International*), cujo objetivo é modelar dispositivos semicondutores presentes na indústria.

Muito embora existam estas curvas de sensibilidade típicas para os componentes citados, deve-se atentar ao seu uso, uma vez que podem não representar, adequadamente, as tolerâncias de outros equipamentos, sobretudo os industriais.



O CLP é um componente eletrônico, bastante presente nas indústrias, que pode ter mal funcionamento na presença de afundamentos de tensão. Apresenta-se curvas de sensibilidade máximas e mínimas para este equipamento na Figura 1 (COSTA, 2018).

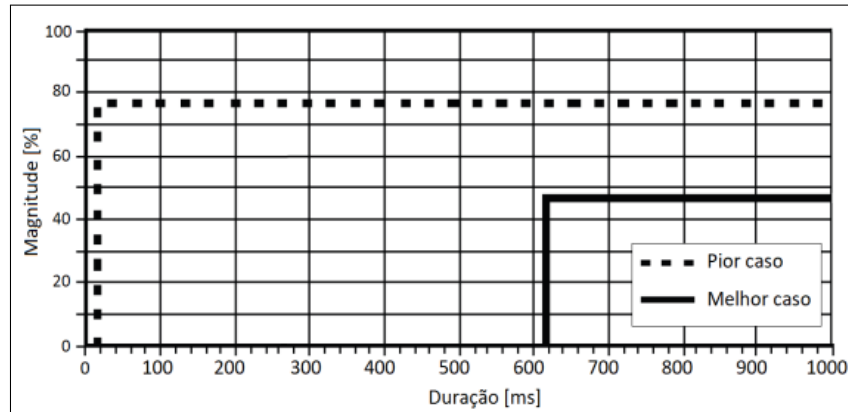


Figura 1 – Curva de sensibilidade de CLPs (COSTA, 2018).

Já os contatores são equipamentos eletromecânicos que também podem ter seu funcionamento comprometido na presença de afundamentos de tensão. Na Figura 2 (COSTA, 2018), são apresentadas as curvas típicas para estes componentes presentes em plantas industriais.

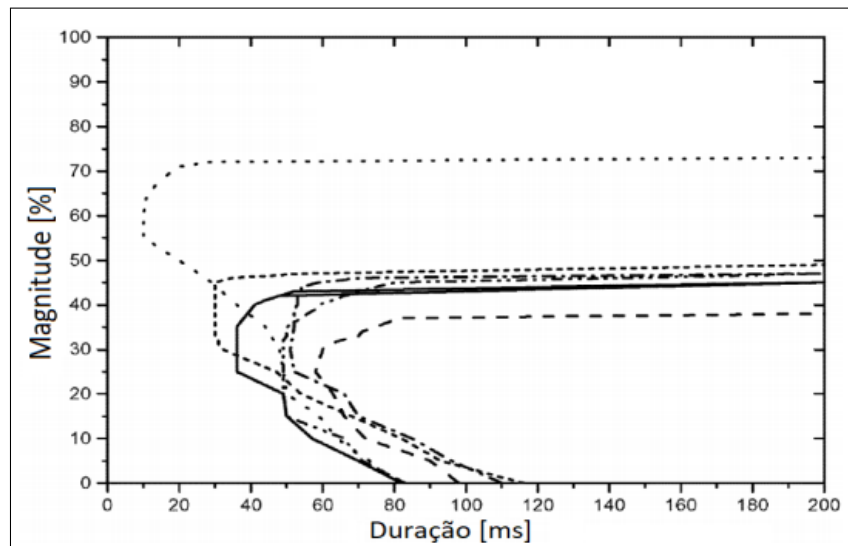


Figura 2 – Curva de sensibilidade para contatores (COSTA, 2018).

Amplamente utilizados na indústria, os inversores de frequência são equipamentos importantes que, de acordo com o tipo de afundamento de tensão, pode apresentar mal funcionamento. Apresentam-se curvas de sensibilidade para torques de 100, 50, 25 e 0% de seu valor nominal, respectivamente, na Figura 3 (COSTA, 2018).

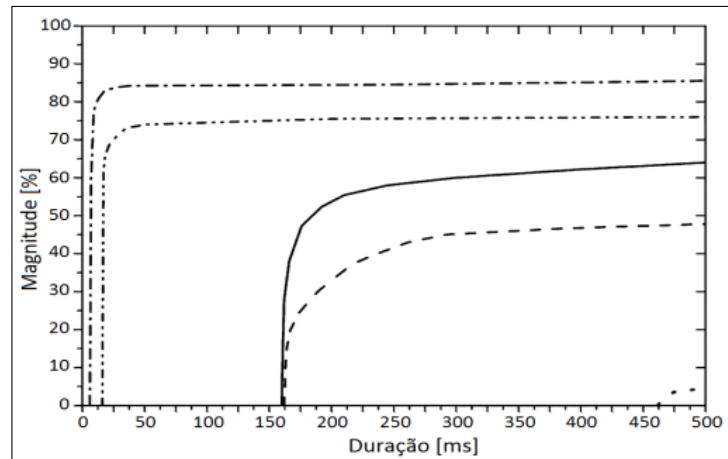


Figura 3 – Curva de sensibilidade de inversores de frequência (COSTA, 2018).

## 2.5 Variáveis de Influência

A análise dos afundamentos de tensão pode ser considerada complexa, pois envolve uma diversidade de fatores que afetam as suas características (FILHO, 2000), (FILHO et al., 2002). Tal problema é, múltiplo e multivariado, de diversas variáveis, de natureza estocástica, dentre elas:

- Localização da falta;
- Tipo de defeito;
- Taxas de falta de linhas de distribuição e transmissão;
- Impedância de defeito;
- Tensão pré-falta;
- Conexão dos transformadores entre o ponto de falta e a carga;
- Desempenho do sistema de proteção;
- Desempenho do sistema de religamento.

Cada uma das causas de afundamentos de tensão serão detalhadas nas sub-seções 2.5.1 a 2.5.8.

### 2.5.1 Localização da Falta

A variável localização da falta influencia, consideravelmente, na ocorrência de afundamentos de tensão sobre os consumidores do sistema. A posição da falta contribui com o valor da impedância equivalente no ponto da falta, determinando assim a intensidade da queda de tensão durante este fenômeno, para um certo ponto monitorado.

Como os sistemas de transmissão e subtransmissão são, geralmente, malhados e cobrem uma vasta área territorial, as faltas acabam impactando um elevado número de consumidores. Já os sistemas de distribuição possuem redes radiais, porém são geograficamente mais concentrados.

Normalmente, faltas em alimentadores ou ramais de uma subestação de distribuição causam impacto apenas nos clientes conectados em alimentadores ou ramais adjacentes e, dificilmente, provocarão afundamentos de tensão considerados no sistema de transmissão, principalmente quando dotados de alta capacidade de curto-circuito (LEBORGNE, 2003).

Associada à localização da falta, pode-se notar a importância do conceito de área de vulnerabilidade. Por definição, a área de vulnerabilidade é uma região do sistema elétrico na qual a ocorrência de determinado tipo de curto-circuito promove a ocorrência de afundamentos, para determinado barramento ou carga de interesse. Falhas fora destas regiões não provocam eventos de VTCD nestes pontos monitorados.

A Figura 4 ilustra o conceito de área de vulnerabilidade, em que existem duas regiões na qual a ocorrência de curtos-circuitos monofásicos promovem afundamentos de tensão de, no máximo, 0,73 p.u. e 0,82 p.u. no barramento 1806 monitorado.

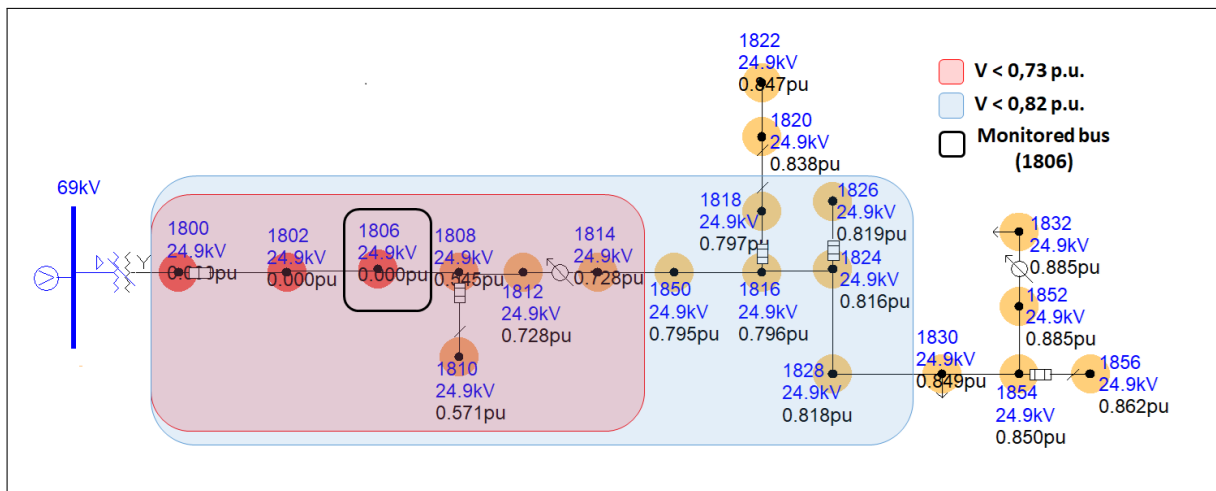


Figura 4 – Área de vulnerabilidade para faltas FT no barramento 1806 monitorado.

## 2.5.2 Tipo de Falta

Outra variável capaz de influenciar na intensidade de uma VTCD é o tipo de falta. Um sistema elétrico está sujeito às seguintes faltas: trifásica (FFF), trifásica-terra (FFFT), bifásica (FF), bifásica-terra (FFT) e fase-terra (FT).

Os dois primeiros tipos de faltas são simétricas, causando afundamentos de tensão severos e, também, simétricos. Contudo, são as faltas menos expressivas em termos de ocorrência. Já as demais, são assimétricas, geram eventos desequilibrados e, em geral,

menos severos. Porém, representam a maior parte das ocorrências de curto-circuito no sistema elétrico.

Logicamente, cada tipo de falta tem uma probabilidade de ocorrência associada, de acordo com o nível de tensão do sistema avaliado. A literatura apresenta estudos que atribuem probabilidades a cada tipo de falta. Porém, cabe ressaltar que é uma variável de difícil apuração, principalmente para sistemas de distribuição, devido à dificuldade em dispor de metodologias adequadas para identificar o tipo de ocorrência.

A Tabela 3 apresenta os percentuais de ocorrência de cada tipo de falta, de acordo com o nível de tensão da rede estudada em (FONSECA, 1999). Deve-se atentar ao utilizar estes valores como típicos, pois também a dinâmica de cada sistema de distribuição é particular.

Tabela 3 – Percentual de faltas associado a cada tipo de curto-circuito para 138 kV e 13,8 kV (FONSECA, 1999).

Nível de Tensão	Fase-Terra	Bifásica-Terra	Bifásica	Trifásica
138 kV	75%	13%	10%	2%
13,8 kV	55%	20%	20%	5%

Outros valores usados para retratar o comportamento dos tipos de faltas em redes de distribuição estão descritos em (AMASIFEN, 2008), apresentados na Tabela 4. Novamente, a singularidade de cada sistema de distribuição deve ser levado em consideração ao utilizar estes valores como referência.

Tabela 4 – Percentual de faltas associado a cada tipo de ocorrência em 13,8 kV (AMASIFEN, 2008).

Fase-Terra	Bifásica-Terra	Bifásica	Trifásica
50%	20%	20%	10%

Conforme esperado, as Tabelas 3 e 4 mostram que as faltas FT e FFT, respectivamente, são as que apresentam as maiores taxas de ocorrência em sistemas de distribuição. Desta maneira, pode-se concluir que a maioria dos afundamentos de tensão esperados são assimétricos.

### 2.5.3 Taxa de Falta

O valor da taxa de falta de um sistema, seja de distribuição ou de transmissão, está diretamente associado ao índice cerâmico da região na qual se localiza. Este índice, quantificado em média pela incidência de descargas atmosféricas, possui diversas variáveis de influência, como umidade, maresia e topografia (RAMOS, 2009). Quanto mais alto o nível cerâmico, maior é a exposição de linhas de transmissão e distribuição às descargas atmosféricas, acarretando em aumento da taxa de falta.

A taxa de falta é definida como o número médio esperado de faltas anual, por 100 km de linha de distribuição ou transmissão. Seu valor pode ser apurado, preferencialmente, através de um grande histórico de registro de faltas do sistema em questão. Quanto maior o horizonte observado, mais ele retrata a realidade de operação daquela rede.

Também, pode-se recorrer à literatura para adoção de valores típicos. Alguns destes valores, classificados em diferentes níveis de tensões, são apresentados nas Tabelas 5 a 9.

Tabela 5 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km e sua distribuição por tipo de falta (GARCIA; ALVES, 2011).

Nível de Tensão	Taxa de Falta	Fase-Terra	Bifásica-Terra	Bifásica	Trifásica
500 kV	1	92%	0%	3%	5%
345 kV	2	92%	0%	3%	5%
230 kV	2	92%	0%	3%	5%
138 kV	6	75%	13%	10%	2%
69 kV	12	58%	25%	11%	6%
13,8 kV	50	78%	10%	9%	3%

Tabela 6 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km e sua distribuição por tipo de falta (CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991) e (BECKER et al., 1993).

Nível de Tensão	Taxa de Falta	Fase-Terra	Bifásica-Terra	Bifásica	Trifásica
345 kV	2,31	91%	7%	1%	1%
230 kV	1,68	80%	17%	1,5%	1,5%
138 kV	2,98	73%	17%	6%	4%

Tabela 7 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km (FONSECA, 1999).

Nível de Tensão	Taxa de Falta
138 kV	5
13,8 kV	50

Tabela 8 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km (RAMOS, 2009).

Nível de Tensão	Taxa de Falta
230 kV	2,32
138 kV	3,99
69 kV <sup>1</sup>	6

<sup>1</sup> Valores adotados pela CELG (atual Enel Distribuição Goiás).

Por serem eventos que dependem de diversos fatores, deve-se tomar cuidado na adoção destes valores, uma vez que cada sistema de distribuição possui características únicas.

## 2.5.4 Impedância de Falta

Os curtos-circuitos têm sua intensidade dependente da impedância de falta. Assim, os afundamentos de tensão podem ser mais severos, quando são faltas francas ou mais

Tabela 9 – Taxa de falta média esperada anual por 100 km e sua distribuição por tipo de falta (HONORATO, 2014).

Nível de Tensão	Taxa de Falta	Fase-Terra	Bifásica-Terra	Bifásica	Trifásica
<b>138 kV - EDP ES</b>	2,33	75%	13%	10%	2%
<b>88 kV - EDP SP</b>	2,98	73%	17%	6%	4%
<b>69 kV - EDP ES</b>	6,34	58%	25%	11%	6%
<b>34,5 kV - EDP ES</b>	43,13	70%	15%	10%	5%
<b>13,8 kV - EDP ES<sup>1</sup></b>	190,47	78%	10%	9%	3%
<b>13,8 kV - EDP SP<sup>1</sup></b>	1.122,49	78%	10%	9%	3%

<sup>1</sup> Valores médios para barramentos da subestação (SE).

brandos, na presença de impedância de defeito. Em redes de distribuição, raramente estas falhas possuem impedância nula (BLACKBURN; DECKKER, 1987). Logo, a maioria dos defeitos têm seu valor baseado na composição de resistências:

- Do arco elétrico entre o condutor e o referencial da terra, no caso de faltas que envolvam a terra;
- Do arco entre os condutores, em caso de faltas que envolvam fases;
- De contato devido à oxidação no ponto de falta;
- Do pé de torre, em caso de defeitos que envolvam o referencial de terra;

Devido à dificuldade de verificar o valor desta grandeza, são poucos valores de referência utilizados na literatura. De acordo com Filho et. al. (2002) e Blackburn e Deckker (1987), impedâncias de falta para linhas de transmissão estão na faixa de 1 a 5  $\Omega$ , enquanto Souza, Costa e Junior (2005) estimam valores para sistemas aéreos de distribuição para determinados casos. Por exemplo, eventos decorridos de descargas atmosféricas, as impedâncias de faltas podem assumir valores de 0 a 10  $\Omega$ ; defeitos que envolvam o contato com árvore e vegetação podem chegar até 70  $\Omega$ ; faltas originadas por queda de estruturas, poste ou abalroamento, são da faixa de 20 a 30  $\Omega$ .

Em (AMASIFEN, 2008), valores máximos para as impedâncias de cada tipo de falta foram fornecidos por uma concessionária de energia elétrica: falta trifásica 10  $\Omega$  (impedância por fase), falta fase-terra 30  $\Omega$ , falta fase-fase 20  $\Omega$  (impedância entre fases) e falta dupla fase-terra 10  $\Omega$  (impedância entre fases) e 30  $\Omega$  (impedância para terra).

### 2.5.5 Tensão Pré-Falta

Em condições normais de operação, as concessionárias de energia buscam suprir seus consumidores com tensões de operação dentro dos limites normalizados. Por exemplo, para pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV a faixa adequada de tensão é de 0,93 a 1,05 p.u. da tensão de referência (ANEEL, 2018).

O perfil de tensão em regime permanente é associado à curva de carga do sistema elétrico e à disponibilidade de equipamentos reguladores de tensão. A primeira parcela tem sua dinâmica diretamente relacionada a entradas e saídas de grandes blocos de carga; Já o segundo componente depende de dispositivos como compensadores síncronos, banco de capacitores, reatores de linha, reguladores de tensão e transformadores com comutadores de *tap* sob carga.

A tensão de operação no sistema elétrico sofre diversas variações durante o dia devido ao perfil de tensão da rede. Com o objetivo de auxiliar na operação do sistema, algumas dessas variações podem ser classificadas em patamares de carga, como carga leve, média e pesada. Normalmente, a carga leve ocorre em períodos noturnos, observando-se elevações de tensão. Já durante o período de carga pesada, em horários diurnos específicos, notam-se ligeiros afundamentos na tensão.

Geralmente, em estudos de curto-circuito em sistemas elétricos, adota-se tensão pré-falta igual a 1,0 p.u.. No entanto, em função da curva de carga do sistema, esta premissa, na maioria das vezes, não é verdadeira, incorrendo-se em erros de cálculo. Cabe ao usuário julgar se o erro assumido não comprometerá a qualidade dos resultados em sua aplicação.

A título de exemplo, considere um consumidor cuja sensibilidade depende apenas da magnitude da VTCD, com limiar de tolerância igual a 0,5 p.u.. Considere como condição inicial o *flat start* (tensão pré-falta igual a 1 p.u.), um certo defeito promove um afundamento de tensão de 0,52 p.u., o que não impacta este cliente. Porém, ao partir de um novo cenário em que a tensão pré-falta é 0,97 p.u., que está dentro dos limites previstos em (ANEEL, 2018), sua nova tensão residual é de 0,49 p.u., a qual sensibiliza seu processo e, possivelmente, interrompe sua atividade.

### 2.5.6 Conexão do Transformador

A conexão do transformador existente entre o local de falta e o ponto em que o consumidor encontra-se localizado influencia, consideravelmente, as características dos eventos de VTCDs captadas pela carga, tanto em magnitude quanto ao ângulo de fase da tensão. Resumidamente, existem três possíveis classificações para os transformadores, de acordo com a sua conexão (BOLLEN, 1997):

- *Primeiro tipo*: são conexões que filtram a componente de sequência zero e inserem, simultaneamente, defasamento angular nas componentes de sequência positiva e negativa. São exemplos as conexões  $Y-\Delta$ ,  $\Delta-Y$ ,  $Y_{aterrado}-\Delta$  e  $\Delta-Y_{aterrado}$ ;
- *Segundo tipo*: são conexões que filtram a componente de sequência zero, porém não introduzem defasamento angular nas demais componentes de sequência. São

exemplos as conexões Y-Y,  $\Delta$ - $\Delta$ ,  $Y_{aterrado}$ -Y e Y- $Y_{aterrado}$ ;

- *Terceiro tipo*: são conexões que não filtram a componente de sequência zero e também não introduzem defasamento angular nas demais componentes de sequência. São exemplos as conexões  $Y_{aterrado}$ - $Y_{aterrado}$ ,  $Y_{aterrado}$ - $\Delta$ - $Y_{aterrado}$ . Neste equipamento de três enrolamentos, o lado  $\Delta$  é apenas para compensação.

Também, o tipo de conexão da carga (estrela ou delta) pode influenciar nos parâmetros das VTCDs percebidos pelo próprio consumidor (FILHO, 2000).

### 2.5.7 Sistema de Proteção

Como citado na seção 2.4, um dado evento de VTCD pode ser caracterizado por um par de intensidade e duração. O desempenho do sistema de proteção influencia apenas na variável duração do evento, uma vez que a condição de curto-circuito será mantida e, conseqüentemente, a intensidade manter-se-á a mesma. Assim, o tempo em que um consumidor estará exposto ao fenômeno de VTCD é dado pelo tempo de sensibilização e de atuação de relés, somado ao tempo de abertura e extinção do arco pelos disjuntores ou religadores.

Os tempos de sensibilização e atuação do relé são dados em função do ajuste de *pick-up* de corrente do equipamento, de seu *time dial*, de sua curva de atuação (tempo dependente ou tempo definido) e, também, da filosofia de proteção adotada para a sua zona de proteção. Já os tempos de abertura e de extinção da corrente de curto-circuito dos disjuntores ou religadores são dados em função das características construtivas destes equipamentos (meios isolador e extintor de arco, por exemplo).

Existe algumas diferenças nos esquemas de proteção entre os sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição. Tipicamente, nos sistemas de transmissão (acima de 230 kV) as linhas são protegidas por meio de relés de distância, providos de lógicas de tele-proteção (AYELLO; FILHO, 1999).

Em sistemas de subtransmissão (69 kV a 138 kV), tradicionalmente, os sistemas de proteção adotados, contemplam as proteções de sobrecorrente de fase e de neutro para circuitos radiais; direcional de fase e neutro para circuitos malhados; distância de fase e neutro em circuitos paralelos.

Nos sistemas de distribuição (até 34,5 kV), as concessionárias adotam geralmente relés de sobrecorrente de fase e de neutro. Em alimentadores primários, são utilizados disjuntores e religadores, em troncos são aplicados religadores e nos ramais de distribuição são utilizadas chaves fusíveis ou, até mesmo, chaves fusíveis repetidoras.



### 2.5.8 Sistema de Religamento

Os números de afundamento de tensão verificados no sistema estão fortemente ligados à natureza dos curtos-circuitos ocorridos na rede elétrica (temporários ou permanentes), do local de ocorrência do defeito, associados ao desempenho do sistema de religamento existente.

No tocante aos consumidores sensíveis, a frequência dos eventos de VTCD são dependentes, além dos fatores citados anteriormente, da posição elétrica deste cliente no sistema em questão. Vale ressaltar que, nos sistemas de distribuição, os dispositivos capazes de realizar religamentos automáticos acarretam, geralmente, sucessivas VTCDs em consumidores localizados à montante do equipamento de proteção, em caso de uma falta permanente.

Os dispositivos de proteção podem operar de maneira seletiva e coordenada, visando minimizar o impacto das faltas sobre o sistema elétrico.

A seletividade é a capacidade do sistema de proteção reconhecer e selecionar as condições em que deve atuar, de tal modo que o dispositivo mais próximo ao local da falta antecipe-se à atuação do dispositivo de retaguarda, independente da natureza do defeito ser temporária ou permanente. Este tipo de filosofia também é conhecida como "Queima Fusível", já que a atuação dos dispositivos capazes de realizar religamentos automáticos é dada através da função temporizada (curva lenta).

Já a coordenação significa dispor dois ou mais dispositivos em série, de forma que eles atuem segundo uma sequência de operação pré-definida, visando o restabelecimento automático para faltas temporárias e seletividade para faltas permanentes. Este tipo de filosofia também é conhecida como "Salva Fusível", pois permite a atuação da função instantânea dos equipamentos capazes de realizar religamentos automático, através da curva instantânea (rápida).

Os estudos de coordenação têm como objetivo definir os ajustes dos dispositivos de proteção, a fim de que alcancem os requisitos de velocidade e seletividade. Na distribuição, é comum realizar a coordenação entre religadores e chaves-fusíveis, sendo os ajustes desses dispositivos definidos de acordo com a filosofia de proteção adotada pela distribuidora.

Para ilustrar o problema, considere uma rede fictícia mostrada na Figura 5. O sistema possui um disjuntor para proteção do transformador, quatro religadores que protegem as linhas de distribuição e quatro chaves fusíveis protegendo os ramais laterais. Três consumidores sensíveis estão dispostos na rede, sendo que o cliente *A* está localizado em um alimentador exclusivo, o consumidor *B* está conectado no tronco do alimentador quatro e a última carga *C* localizada em um ramal lateral do alimentador 4.

São aplicados curtos-circuitos permanentes em três posições diferentes, assinaladas pelos números 1, 2 e 3. O disjuntor da subestação não está programado para efetuar

tentativas de religamento. Em contrapartida, todos os religadores estão ajustados para quatro atuações em um esquema de proteção coordenado, sendo duas pela curva rápida (função instantânea) e duas pela curva lenta (função temporizada).

Na ocorrência de um curto-circuito no ponto 1, o disjuntor 1 é o único equipamento que se sensibilizará, atuando uma única vez, bloqueando e travando seus polos (*lockout*). Neste caso, todo o circuito fica sem alimentação, uma vez que o único transformador da rede é desenergizado. Assim, todos os consumidores *A*, *B* e *C* sofrem desligamento, contabilizando uma interrupção de longa duração.

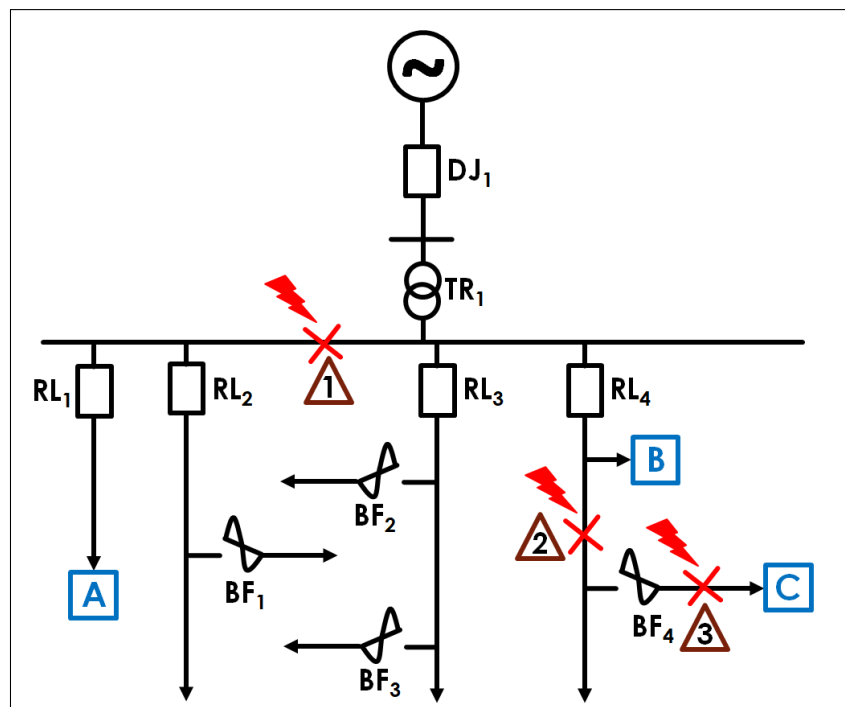


Figura 5 – Sistema de distribuição fictício com três cenários de falta.

Quando existe um defeito permanente na posição 2, ambos disjuntor 1 e religador 4 são sensibilizados pela corrente de curto-circuito. Como o disjuntor não está habilitado para atuar através de sua curva rápida, apenas o religador realiza seu ciclo de operações. O consumidor *A* sofre sucessivos afundamentos tensão, num total de 4 eventos. Contudo, os clientes *B* e *C* sofrem sucessivos afundamentos de tensão, intercalados de interrupções de curta duração, até que o ciclo de operações encerre-se e estas cargas contabilizam uma interrupção de longa duração.

No caso em que o curto-circuito ocorre no ponto 3, os dispositivos sensibilizados são o disjuntor 1 da subestação, o religador 4 do alimentador e a chave fusível 4 do ramal defeituoso. Novamente, o religador atua através de sua curva rápida duas vezes. A próxima operação é da chave fusível, uma vez que a atuação através da curva lenta do religador é projetada para ser mais tardia que o rompimento do elo fusível. O cliente *A* sofre sucessivos afundamentos tensão, num total de 3. A carga *B* registra três afundamentos

intervalados de duas interrupções de curta duração. Finalmente, o consumidor  $C$  tem seu comportamento semelhante ao  $B$ , diferindo-se no tipo da interrupção final, que será de longa duração.

A Figura 6 ilustra os eventos registrados em cada um dos consumidores, para o curto-circuito no ponto 3. Existem duas maneiras para quantificar estes fenômenos. O primeiro método consiste em, simplesmente, contar os eventos ocorridos, resultando em um número sobrestimado de ocorrências, já que a carga sensível pode ser desligada durante o primeiro afundamento de tensão. Já o segundo método baseia-se em utilizar o procedimento da agregação temporal, contabilizando como uma única ocorrência todos os eventos ocorridos dentro de um determinado intervalo de tempo.

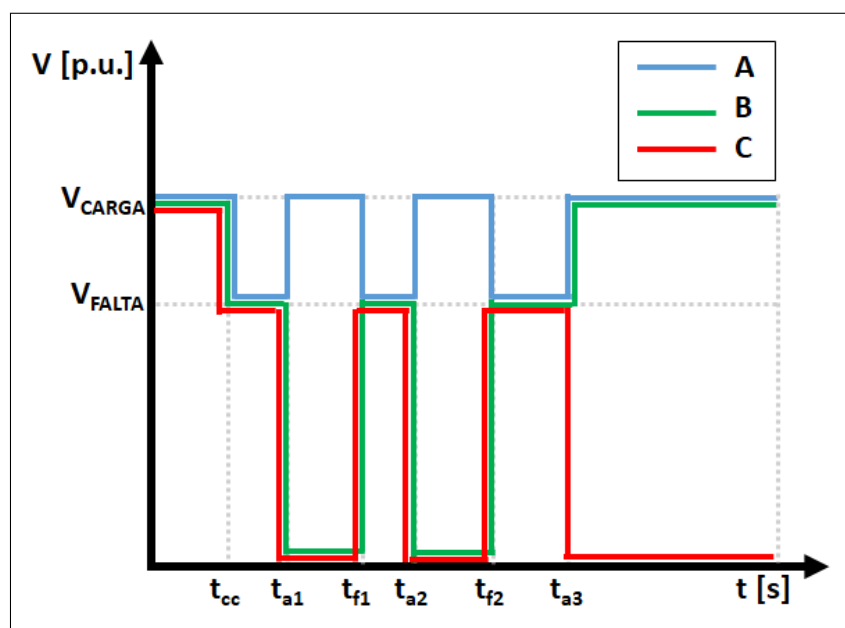


Figura 6 – Sequência de afundamentos de tensão registrados nas cargas  $A$ ,  $B$  e  $C$  para uma falta permanente no ponto 3.

Normalmente, o evento mais severo é capturado na agregação temporal. Sendo assim, uma possível maneira de quantificar os eventos para a carga  $A$  seria um afundamento de tensão, para o cliente  $B$  uma interrupção de curta duração e para o consumidor  $C$  uma interrupção de longa duração.

## 2.6 Caracterização da VTCD

Os eventos de VTCDs são fenômenos variantes no tempo e analisá-los pode não ser uma tarefa trivial. Deste modo, metodologias que retratem estas variáveis com o menor número de parâmetros possíveis, sem perda de informações importantes e de fácil aplicação, são desejadas.

Complementando as explicações presentes nas seções 2.4 e 2.5, um dado evento pode ser caracterizado por um trio de intensidade da VTCD, uma duração e sua frequência de ocorrência. A intensidade da VTCD pode ser entendida como a amplitude da tensão residual, em relação ao valor da tensão de referência. A duração do evento é contabilizada pelo intervalo de tempo no qual o valor eficaz da tensão ultrapassa e retorna de um limite pré-determinado. Finalmente, a frequência do fenômeno é expressa pela quantidade de vezes em que o par intensidade-duração repetiu-se no intervalo de observação considerado.

A Figura 6 demonstra claramente a pertinência de cada uma das variáveis. A carga A, por exemplo, pode ser caracterizada por dois afundamentos de magnitude  $V_{FALTA}$  de duração  $t_{a1} - t_{cc}$  com dupla frequência e um afundamento de magnitude  $V_{FALTA}$  de duração  $t_{a3} - t_{f2}$  com ocorrência unitária.

Note que essa caracterização é aplicada para fenômenos monofásicos. Porém, a ocorrência de curtos-circuitos no sistema elétrico de potência pode afetar todas as suas fases. No caso de eventos trifásicos, outros parâmetros podem ser considerados, como por exemplo a assimetria e desequilíbrio entre fases. Filho (2000) cita que os fenômenos, tanto monofásicos quanto trifásicos, podem também ser caracterizados pela evolução de sua forma de onda.

Na ocorrência concomitante de afundamento e elevação de tensão, em um certo ponto de monitoramento, estes devem ser caracterizados separadamente com um trio de intensidade, duração e frequência. Independente dos eventos serem monofásicos ou trifásicos, nas subseções 2.6.1 e 2.6.2 são mostradas metodologias para agregação dos respectivos trios, resultando em um único equivalente.

### 2.6.1 Agregação de Fases

Em sistemas de distribuição, a intensidade e a duração do afundamento ou elevação de tensão resultante em cada um de suas fases podem diferenciar-se consideravelmente, uma vez que a maioria dos curtos-circuitos são oriundos de faltas assimétricas (GARCIA; ALVES, 2011), (HONORATO, 2014). Também, em casos extremos, podem ocorrer defeitos evolutivos (OLIVEIRA, 2008).

A ANEEL (2018) elenca três metodologias possíveis para definir um par equivalente de intensidade e duração. Independente do método, a magnitude do evento equivalente equivale ao menor valor de tensão residual entre as fases. Já a duração correspondente depende das proposições:

1. *Agregação pela união de fases:* a duração corresponde ao intervalo de tempo em que a primeira das fases ultrapassa o limite de tensão pré-estabelecido e o instante em que a última fase regressa deste limite. A Figura 7 exemplifica a obtenção do par de parâmetros segundo esta proposição, em que o intervalo de duração é definido pela

fase *C* (instante inicial) e pela fase *A* (instante final), enquanto a magnitude vem da fase *C*. Adicionalmente, a ANEEL (2018) recomenda sua utilização.

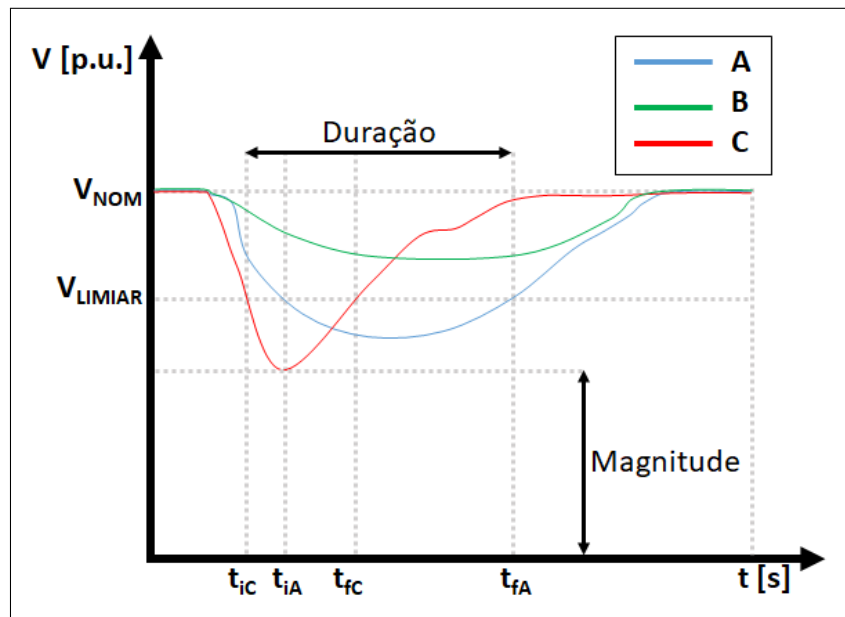


Figura 7 – Agregação de fases através do método de união de fases.

2. *Agregação por parâmetros críticos*: a duração corresponde à duração da fase na qual possui o maior tempo em afundamento ou elevação de tensão. Na Figura 8, a duração é proveniente da fase *A* e a magnitude equivalente é expressa pela fase *C*.

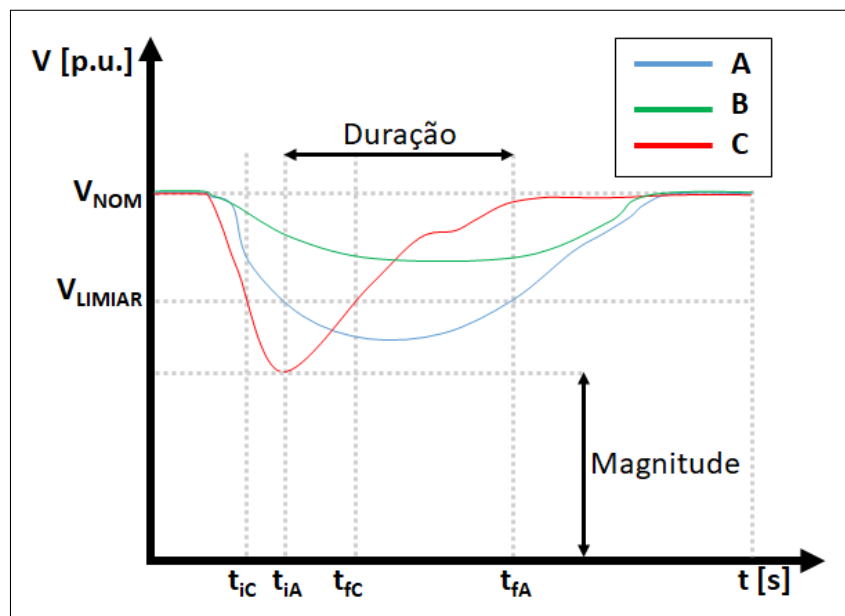


Figura 8 – Agregação de fases através do método de parâmetros críticos.

3. *Agregação pela fase crítica*: a duração corresponde ao intervalo de tempo no qual a fase de menor tensão residual está em distúrbio. Para o caso apresentado na Figura

9, a fase C possui a menor tensão residual dentre as demais. Logo, a extensão do evento equivalente corresponde a sua duração.

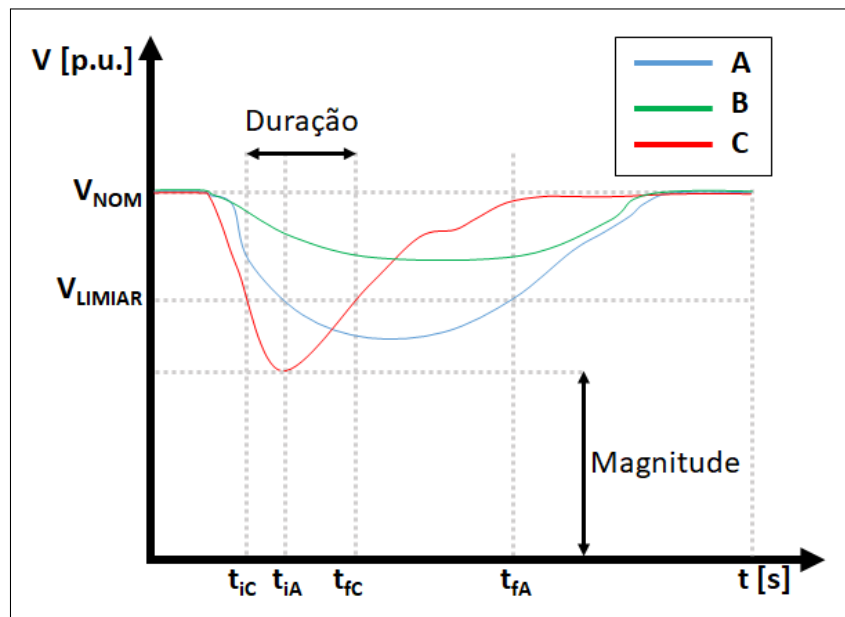


Figura 9 – Agregação de fases através do método da fase crítica.

## 2.6.2 Agregação Temporal

A agregação temporal tem como objetivo agrupar todos eventos de VTCD que são originados da mesma falta, que ocorreram em uma janela de tempo pré-estabelecida, compondo um único registro para um ponto de interesse. Muitas vezes, estes fenômenos consecutivos são decorrentes da atuação de dispositivos de proteção que realizam tentativas de religamento automático (RA), no intuito de isolar a menor parte de clientes devido a um defeito transitório no sistema (LEBORGNE, 2003).

Outra justificativa para o uso é no âmbito de consumidores industriais. Quando o primeiro afundamento de tensão for de intensidade tal que seja suficiente para sensibilizar os equipamentos e, conseqüentemente, desligar o processo produtivo, a ocorrência dos próximos eventos não causam efeito algum sobre a carga. Assim, contabilizar todos os fenômenos registrados em uma janela de tempo inferior a de restauração do processo significa sobrestimar os reais impactos neste consumidor, resultando em erro estatístico sobre o desempenho da concessionária.

Também, medidores de qualidade podem identificar o fim de um afundamento sem que este tenha, de fato, terminado. Assim, a leitura de tensão pode oscilar em torno do *trigger* de detecção, registrando múltiplos eventos inexistentes.

Para definição da janela de tempo a ser empregada na agregação temporal, deve-se levar em consideração o objetivo da análise. Caso o propósito seja contabilizar eventos produzidos por sucessivos religamentos automáticos sem sucesso, pode-se usar o intervalo

de 3 minutos sugerido em (ANEEL, 2018). Se a óptica for avaliar o impacto de VTCDs sobre parada de produção em consumidores sensíveis, o período considerado está diretamente associado ao tempo necessário para restabelecimento do processo, o qual pode variar de minutos a horas (BOLLEN; GU, 2006).

## 2.7 Indicadores para VTCDs

Após definidas as VTCDs, conhecendo suas causas majoritárias, seus efeitos nas cargas, as variáveis que as influenciam e metodologias para caracterização, torna-se desejável quantificar suas ocorrências nos mais diversos pontos de monitoramento. Neste aspecto, surge a necessidade do uso de indicadores para VTCDs.

A ANEEL (2018), baseando-se na proposição da norma sulafricana (NRS 048-2:2003, 2003) estabeleceu uma tabela para contabilização de eventos, em pares de amplitude e duração correspondente, em faixas pré-estabelecidas, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Estratificação de eventos de VTCD em intensidade e duração.

Intensidade do evento [p.u.]	Duração do evento						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 s]	(1 s - 3 s]	(3 s - 1 min]	(1 min - 3 min]
> 1,15							
(1,10 - 1,15]							
(0,85 - 0,90]							
(0,80 - 0,85]							
(0,70 - 0,80]							
(0,60 - 0,70]							
(0,50 - 0,60]							
(0,40 - 0,50]							
(0,30 - 0,40]							
(0,20 - 0,30]							
(0,10 - 0,20]							
< 0,10							

Na ocorrência de eventos coincidentes, ou seja, que pertencem a mesma célula da tabela, sua incidência é somada. No final do processo, encontra-se a contabilização estratificada de frequência de VTCDs. Note ainda que, da Tabela 10, são contabilizados todos os eventos da Tabela 1, que são interrupções, afundamentos e elevações de tensão.

De maneira análoga em (NRS 048-2:2003, 2003), a ANEEL (2018) considerou as peculiaridades do sistema elétrico brasileiro e diferenças existentes nas topologias de seus sistemas e verificou que não é possível estabelecer limites aceitáveis para ambos consumidores e concessionárias. Diante disso, elaborou-se a Tabela 11 em que estabelece regiões de referência que indicam um bom desempenho da rede em termos da qualidade da energia elétrica. É um parâmetro a ser utilizado no planejamento do sistema de distribuição.

Discriminadas as regiões de sensibilidade de cargas, o indicador Fator de Impacto (FI) estima a incidência das mais diversas VTCDs em um dado ponto de monitoramento do sistema. Este índice, calculado através da equação 2.1, é apurado para um período de 30 dias consecutivos.

Tabela 11 – Estratificação das VTCDs para diversas regiões de sensibilidade de cargas.

Intensidade do evento [p.u.]	Duração do evento						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 s]	(1 s - 3 s]	(3 s - 1 min]	(1 min - 3 min]
> 1,15	Região H			Região I			
(1,10 - 1,15]							
(0,85 - 0,90]	Região A			Região G			
(0,80 - 0,85]							
(0,70 - 0,80]	Região B	Região D		Região F			
(0,60 - 0,70]	Região C						
(0,50 - 0,60]							
(0,40 - 0,50]							
(0,30 - 0,40]	Região E						
(0,20 - 0,30]							
(0,10 - 0,20]							
< 0,10							

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times f_{pi})}{FI_{BASE}} \quad (2.1)$$

Em que:

$f_{ei}$  é a frequência mensal de ocorrência de VTCDs, para cada região de sensibilidade  $i$ , com  $i = A$  até  $I$ ;

$f_{pi}$  é o fator de ponderação correspondente a região de sensibilidade  $i$ ;

$FI_{BASE}$  é o fator de impacto base dependente do nível de tensão do sistema.

O fator de ponderação ( $fp$ ) correspondente a cada região de sensibilidade, bem como o fator de impacto base ( $FI_{BASE}$ ) relacionados são apresentados na Tabela 12.

Observa-se das Tabelas 11 e 12 que os fatores de ponderação são proporcionais à severidade representativa de cada região. Por exemplo, o fator de ponderação para os eventos pertencentes à região  $A$  é nulo, pois se assume que estes eventos são menos severos e comuns e, conseqüentemente, as medidas de mitigação são cabíveis às unidades consumidoras. A região  $F$  possui o maior valor de  $fp$  por concentrar eventos mais severos, de baixa intensidade com considerável duração. Logo, adoções de medidas mitigadoras são mais difíceis e os impactos em unidades consumidoras do sistema são mais frequentes.



Tabela 12 – Fatores de ponderação e de impacto base de acordo com a tensão nominal do sistema.

Região de sensibilidade	Fator de ponderação (fp)	Fator de impacto base ( $FI_{base}$ )	
		$1kV < V_{nom} < 69kV$	$69kV \leq V_{nom} < 230kV$
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

O valor de referência do indicador Fator de Impacto para os sistemas de distribuição de média tensão e de alta tensão, apurado por medição apropriada em 30 dias consecutivos, é de 1,0 p.u.. Os sistemas de distribuição de baixa tensão não possuem valores de referência para este indicador. Os acessantes da Rede Básica devem seguir o determinado nos Procedimentos de Rede ou, caso necessário, em regulamentação específica (ANEEL, 2018).

## 2.8 Considerações Finais

As VTCDs são fenômenos frequentes em sistemas de distribuição, com muitas variáveis de influência e, conseqüentemente, de difícil controle. Embora estes eventos possam ser quantificados através do indicador de FI definido em (ANEEL, 2018), as concessionárias de energia não sofrem penalizações, pois este indicador ainda não possui valor limite.

Habitualmente, as distribuidoras de energia focam seus investimentos em melhorias na rede, visando melhorar a qualidade da energia entregue aos seus clientes. No âmbito de qualidade do serviço, as estratégias de alocação de dispositivos de proteção priorizam a segregação de clientes, uma vez que se deseja desenergizar a menor parcela de consumidores possíveis diante de uma falta permanente.

Simultaneamente, estes novos equipamentos alocados são, normalmente, ajustados para realizar tentativas de religamento automático, já que a maioria dos defeitos na rede são de natureza transitória e podem causar a fusão de elos-fusíveis, desligando desnecessariamente as cargas por um grande intervalo de tempo.

Melhorar os índices de frequência e duração, geralmente, implica em sucessivas VTCDs impostas às cargas que estão posicionadas à montante destes dispositivos de proteção. Atualmente, os processos industriais estão mais automatizados e sensíveis. Logo,

possuir ótimos índices de qualidade do serviço, promovendo a satisfação de consumidores residenciais e redução de compensações, acarreta, conseqüentemente, em transtornos e processos judiciais de grandes consumidores industriais.

Devido a complexidade do problema, novos estudos devem ser realizados. O grande desafio, por exemplo, é encontrar qual a melhor estratégia para alocação de dispositivos de proteção no sistema, que pondere os aspectos financeiro, regulatório e político da concessionária de energia. Assim, o desenvolvimento deste trabalho visa contribuir neste sentido.

### 3 Metodologias para Simulação de Eventos de VTCDs

Os principais causadores de afundamentos de tensões são as faltas e suas características, tais como sua localização, seu tipo, resistência de defeito e filosofia do sistema de proteção.

Naturalmente, o primeiro procedimento que pode ser utilizado para obter os parâmetros desses fenômenos é através de medições pontuais com a instalação de qualímetros de energia elétrica em determinados locais de interesse da rede. Porém, os afundamentos de tensão são de ocorrência aleatória, sobretudo na rede de distribuição. Assim, retratar a realidade dos afundamentos de tensão requer uma janela de observação muito longa, o que torna este tipo de metodologia inadequada e ineficaz para estudos em grandes sistemas.

Para viabilizar o processo de medição, devem-se atentar a dois fatores importantes: tempo de monitoramento e o erro associado para estimativa do evento. Em (BOLLEN; YALCINKAYA; HAZZA, 1998a), é apresentada uma tabela na qual se relacionam a frequência de ocorrência do fenômeno e o erro associado a cada período de medição. Percebe-se da Tabela 13 que eventos menos frequentes requerem maior janela de medição, para o mesmo percentual de erro assumido, quando comparados a fenômenos mais frequentes.

Tabela 13 – Janelas de observação e erros toleráveis, para cada frequência de evento.

<b>Periodicidade do evento</b>	<b>Erro 50%</b>	<b>Erro 10%</b>
<b>1 por dia</b>	2 semanas	1 ano
<b>1 por semana</b>	4 meses	7 anos
<b>1 por mês</b>	1 ano	30 anos
<b>1 por ano</b>	16 anos	400 anos

Para análises pontuais, as faltas podem ser aplicadas deterministicamente, em pontos específicos cujas características são baseadas no objetivo do estudo. Em avaliações gerais, os defeitos podem ser estimados através de um histórico de ocorrência de faltas do sistema em questão ou adoção de taxas médias. Contudo, este conjunto de informações não é trivial de ser obtido. Logo, os procedimentos computacionais são os mais aptos para estimar os parâmetros e estatísticas dos afundamentos de tensão, viabilizando análises mais realísticas e completas.

Dentre os métodos computacionais para estimativa dos parâmetros de VTCD, destacam-se:

- *Simulação da forma de onda*: este procedimento disponibiliza as oscilografias dos eventos de VTCD através de simulações no domínio do tempo. Possui como vantagens a possibilidade de estudar a evolução do comportamento da tensão. Porém, o maior detalhamento do sistema em análise demanda maior esforço computacional. Os *softwares* utilizados com esta finalidade são ATP/EMTP (*Alternative Transients Program / Electro Magnetics Transients Program*);
- *Simulação dinâmica*: este método utiliza ferramentas de estabilidade transitória ou estabilidade em médio prazo, avaliando partida de grandes motores ou entrada e saída de blocos geradores e consumidores, através de análise em domínio da frequência. Apresenta como vantagem a obtenção da variação do valor eficaz da tensão durante e após o distúrbio;
- *Simulação de curto-circuito*: As metodologias fundamentadas em simulações de curtos-circuitos fornecem a intensidade mínima dos valores eficazes das tensões remanescentes nos barramentos de interesse, entretanto a visualização da evolução temporal do valor eficaz da tensão são perdidos. Conseqüentemente, faz-se necessária a utilização de informações de tempo de operação das proteções do sistema para que a duração dos eventos seja estimada.

No Brasil, onde o sistema de distribuição é predominantemente aéreo, as causas mais frequentes de curtos-circuitos estão relacionadas a: falhas de equipamentos e isoladores, descargas atmosféricas, vandalismo, acidentes, abalroamentos, ação de animais, contato entre condutores da rede e a vegetação, ventos, queimadas, entre outros fatores externos ao sistema (FILHO; MAMEDE, 2011).

Outros elementos da rede, como transformadores e barramentos, têm menor taxa de ocorrência de curto-circuito, contudo sofrem desligamentos frequentes por outros motivos (SILVA, 2014), (RAMOS, 2009). Assim, avaliar o desempenho do sistema de distribuição no tocante aos afundamentos de tensão requer à aplicação de faltas em linhas de distribuição.

É natural que para o cálculo da intensidade destes afundamentos utilizem-se programas para cálculo de faltas, cujo modelo é linearizado, permitindo solução não iterativa e com baixo esforço computacional. As técnicas mais usuais para simulação de faltas são o Método da Distância Crítica, o Método de Enumeração de Estados e a Simulação Monte Carlo. Em (AMASIFEN, 2008), foi proposto uma metodologia híbrida, que mescla variáveis aleatórias provenientes da SMC com parâmetros determinísticos do MEE. Estas metodologias para cálculo das características dos eventos de VTCD são descritas nas seções 3.1 a 3.4.

### 3.1 Método da Distância Crítica

Por ser um método bastante simples de ser desenvolvido, esta metodologia é recomendada para avaliação de sistemas de distribuição e de transmissão predominantemente radiais. A formulação consiste em encontrar uma posição para ocorrência da falta, no alimentador, que culminará em um valor pré-determinado de afundamento de tensão, considerando um barramento de interesse (BOLLEN, 1996). Curtos-circuitos à jusante da distância crítica provocarão afundamentos de tensão menos severos e vice-versa.

Resumidamente, é um método de cálculo analítico que se baseia em um divisor de tensão para um sistema radial. Uma das suas possíveis aplicações é quando se deseja encontrar a área de vulnerabilidade de um sistema, que é uma determinada região em que a aplicação de curtos-circuitos acarretarão em valores conhecidos de afundamentos de tensão (BOLLEN, 1996).

A Figura 10 retrata um sistema radial genérico para exemplificação da metodologia. Normalmente, as cargas são desprezadas e a tensão pré-defeito é considerada como 1 p.u., para simplificação. A tensão para o barramento monitorado é encontrada através da equação 3.1.

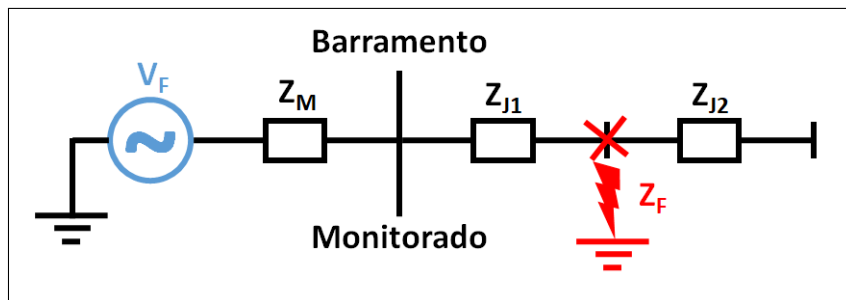


Figura 10 – Sistema radial genérico para exemplificação do Método da Distância Crítica.

$$V_{BM} = \frac{Z_{J1} + Z_F}{Z_{J1} + Z_F + Z_M} \times V_F \quad (3.1)$$

Em que:

$V_{BM}$  é a tensão calculada para o barramento monitorado [p.u. ou Volt];

$Z_{J1}$  é a impedância existente entre o barramento monitorado e o local de falta do alimentador [p.u. ou  $\Omega$ ];

$Z_M$  é a impedância da fonte ou do equivalente entre a fonte e a barra monitorada e a fonte [p.u. ou  $\Omega$ ];

$Z_F$  é a impedância de falta [p.u. ou  $\Omega$ ];

$V_F$  é a tensão da fonte ou do equivalente [p.u. ou Volt].

Considerando que  $Z_{J1} = z \times L$ , em que  $z$  é a impedância do alimentador por unidade de comprimento e  $L$  é a distância entre a barra monitorada e ponto de defeito, a equação 3.1 pode ser reescrita, conforme mostrada na equação 3.2.

$$V_{BM} = \frac{zL + Z_F}{zL + Z_F + Z_M} \times V_F \quad (3.2)$$

Assumindo que  $Z_M$  e  $Z_{J1}$  possuem a mesma relação  $X/R$  e  $V_F = 1$  p.u., pode-se determinar a distância crítica ( $L_{Crítica}$ ), na qual a ocorrência de quaisquer curtos-circuitos até o ponto crítico ocasionará afundamentos de tensão no barramento monitorado, conforme a equação 3.3.

$$L_{Crítica} = \frac{Z_M V_{Crítica} + Z_F V_{Crítica} - Z_F}{z(1 - V_{Crítica})} \quad (3.3)$$

Em que:

$V_{Crítica}$  corresponde à tensão limite considerada para o barramento monitorado [p.u. ou Volt].

Note que ao considerar  $Z_F = 0$ , pode-se encontrar a equação 3.4.

$$L_{Crítica} = \frac{Z_M}{z} \times \frac{V_{Crítica}}{1 - V_{Crítica}} \quad (3.4)$$

Quanto mais próximo o defeito ocorrer do ponto observado, mais severos serão os afundamentos de tensão, enquanto as faltas mais próximas à distância crítica estarão no limiar da tensão crítica assumida, ou seja, no limite de sensibilidade da carga.

A estimativa anual do número de afundamentos de tensão, devido à ocorrência de curtos-circuitos trifásicos, para uma intensidade definida em um certo barramento monitorado, equivale multiplicar a distância crítica, calculada através das equações 3.3 ou 3.4, pela taxa de falta por comprimento por ano.

As informações necessárias para aplicação da metodologia em sistemas de distribuição de energia são:

- Quantidade de alimentadores conectados ao barramento monitorado;
- Impedâncias por unidade de comprimento de cada alimentador;
- Comprimento total dos alimentadores;
- Taxas de falta transitória e permanente dos alimentadores, bem como a composição segundo aos tipos de faltas (FFFT, FFT, FT e FF).

Diferente da topologia das redes de distribuição, o sistema de subtransmissão é predominantemente constituído por diversas malhas, de maneira que as cargas normalmente possuem mais de um possível caminho para sua alimentação. Existe a melhoria na qualidade do serviço, porém a qualidade do produto é degradada, uma vez que o número de afundamento de tensão aumenta (BOLLEN, 1996).

A Figura 11 retrata uma rede malhada genérica, onde foi aplicado um curto-circuito trifásico-terra no ponto “ $p$ ”, em p.u., do comprimento total do alimentador 1.

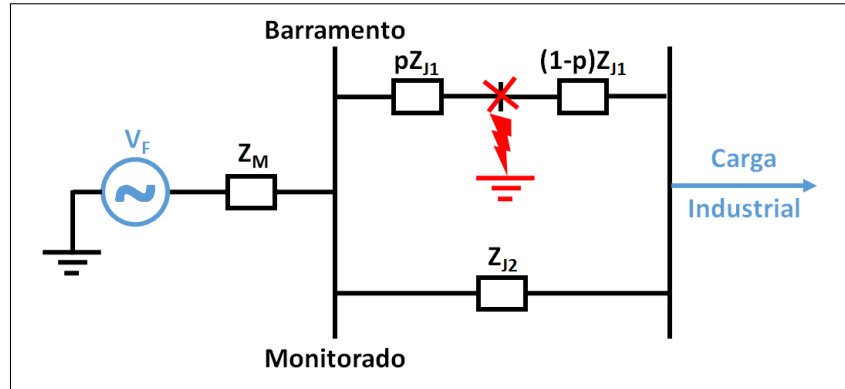


Figura 11 – Sistema malhado genérico para exemplificação do Método da Distância Crítica.

A intensidade do afundamento de tensão, observado no barramento monitorado, é expresso através da equação 3.5.

$$V_{BM} = \frac{p(1-p)Z_{J1}^2 + pZ_{J1}Z_{J2}}{Z_M(Z_{J1} + Z_{J2} + pZ_{J1}Z_{J2} + p(1-p)Z_{J1}^2)} \quad (3.5)$$

Em que:

$V_{BM}$  é a tensão calculada para o barramento monitorado [p.u. ou Volt];

$Z_{J1}$  é a impedância do alimentador 1 [p.u. ou  $\Omega$ ];

$Z_{J2}$  é a impedância do alimentador 2 [p.u. ou  $\Omega$ ];

$Z_M$  é a impedância da fonte ou do equivalente entre a fonte e a barra monitorada [p.u. ou  $\Omega$ ];

$p$  é o ponto que remete o percentual do alimentador no qual ocorreu o defeito.

Notavelmente, o cálculo da distância crítica para um sistema malhado leva em consideração mais variáveis, sendo assim relativamente mais complexo. De maneira análoga às equações 3.3 e 3.4, é possível obter o ponto crítico ao avaliar a impedância  $Z_{J1}$  por unidade de comprimento, isolar a variável  $L$  e considerar  $V_{BM} = V_{Crítica}$ .

A metodologia de distância crítica é aderente para avaliação de redes pouco malhadas ou puramente radiais. Quando o sistema é predominantemente malhado, este método

não é mais recomendado (LEBORGNE, 2003).

## 3.2 Método da Enumeração de Estados

Esta metodologia, também conhecida como Método do Curto-Circuito Deslizante ou até mesmo Método das Posições de Falta, tem sido amplamente empregada na avaliação de afundamentos de tensão em sistemas elétricos de potência de médio e grande porte, sendo eles radiais ou malhados (LEBORGNE, 2003). Tem-se relatado em (CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991) a proposição desta formulação, que contribuiu para a estruturação da norma IEEE 493 (2007).

O método consiste em simular faltas em diferentes posições ao longo dos alimentadores do sistema considerado, avaliando a influência do local de defeito através de intensidades e durações dos afundamentos de tensão no barramento de interesse. A Figura 12 representa um diagrama unifilar de um sistema hipotético, em que o comportamento das tensões do barramento  $i$  é analisado via aplicação de aplicação de curtos-circuitos.

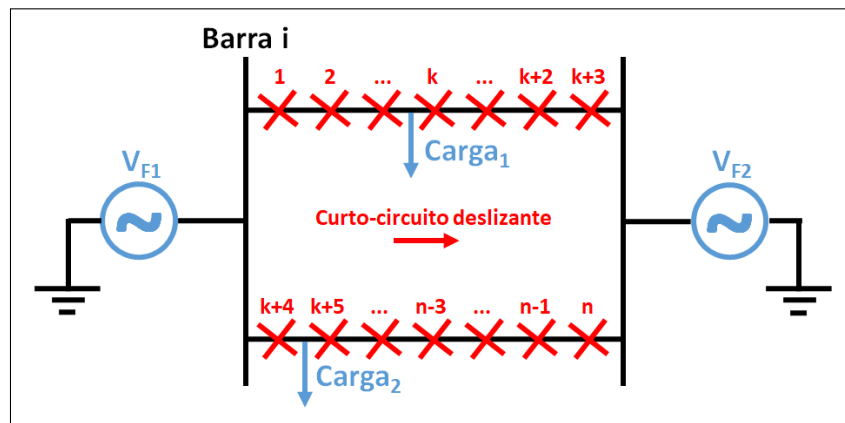


Figura 12 – Esquematização do Método das Posições de Falta em um sistema malhado hipotético.

Perceba que os curtos-circuitos são aplicados em ambos alimentadores, em um total de  $n$  segmentos. A intensidade do afundamento de tensão no barramento  $i$  para um curto-circuito trifásico aplicado em um ponto  $k$  qualquer, pode ser calculada através da equação 3.6.

$$E_{i,k} = E_i^P - \frac{E_k^P}{Z_{k,k}^+ + Z_f} \times Z_{i,k} \quad (3.6)$$

Em que:

$E_{i,k}$  é o afundamento de tensão na barra  $i$  devido a curto-circuito trifásico na barra  $k$ ;

$E_i^P$  é a tensão pré-falta na barra  $i$ ;

$E_k^P$  é a tensão pré-falta na barra  $k$ ;



$Z_{i,k}$  é a impedância de transferência entre as barras  $i$ - $k$ ;

$Z_{k,k}^+$  é a impedância própria de sequência positiva da barra  $k$ ;

$Z_f$  é a impedância de falta.

Através da equação 3.6, é possível concluir que as principais variáveis de influência na intensidade do afundamento de tensão são:

- Tensão pré-falta a partir das variáveis  $E_i^P$  e  $E_k^P$ ;
- Impedância de falta  $Z_f$ ;
- Características inerentes à rede  $Z_{k,k}$ ;
- Posição relativa entre o ponto de falta e a barra monitorada  $Z_{i,k}$ .

Para a avaliação do afundamento de tensão para os outros tipos de faltas que envolvam a terra, empregam-se expressões semelhantes a equação 3.6, porém são incorporadas as impedâncias de sequências positivas, negativas e zero no cálculo. Usando as equações 3.7 e 3.8, pode-se encontrar a intensidade das tensões residuais para estes defeitos.

$$\begin{bmatrix} E_{i,k}^0 \\ E_{i,k}^+ \\ E_{i,k}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{a_i}^P \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{E_{a_k}^P}{Z_{i,k}^0 + Z_{i,k}^+ + Z_{i,k}^- + 3Z_f} \times \begin{bmatrix} Z_{i,k}^0 \\ Z_{i,k}^+ \\ Z_{i,k}^- \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} E_{a_{i,k}} \\ E_{b_{i,k}} \\ E_{c_{i,k}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{i,k}^0 \\ E_{i,k}^+ \\ E_{i,k}^- \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Em que:

$E_{a_i}^P, E_{a_k}^P$  é a tensão pré-falta na fase A nos barramentos  $i$  e  $k$ , respectivamente;

$E_{i,k}^0, E_{i,k}^+, E_{i,k}^-$  é a tensão de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, no barramento  $i$  devido a um curto fase-terra na barra  $k$ ;

$Z_{i,k}^0, Z_{i,k}^+, Z_{i,k}^-$  é a impedância de transferência de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, entre os barramentos  $i$ - $k$ ;

$Z_{k,k}^0, Z_{k,k}^+, Z_{k,k}^-$  é a impedância própria da barra  $k$  de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;

$E_{a_{i,k}}, E_{b_{i,k}}, E_{c_{i,k}}$  é a tensão nas fases A, B e C, respectivamente, no barramento  $i$  devido a um curto-circuito fase-terra na barra  $k$ .

O Método de Enumeração de Estados pode ser resumido segundo (BOLLEN, 2000) em:

1. Modelar a rede de interesse, bem como seu sistema de proteção;
2. Determinar qual porção do sistema em que serão aplicados os curtos-circuitos. Normalmente, a região escolhida corresponde às linhas de distribuição e transmissão da rede em questão, uma vez que suas taxas de falta são, consideravelmente, superiores que as dos equipamentos;
3. Determinar quais os pontos de monitoração;
4. Definir um passo de discretização para a área da rede e segregá-la em segmentos correspondentes. Cada fração corresponde a uma posição para aplicação de curtos-circuitos;
5. Definir o valor máximo de impedância de falta para cada tipo de defeito;
6. Definir um passo de discretização para as impedâncias de defeito e segregá-las em faixas correspondentes;
7. Determinar o número de curtos-circuitos anuais a serem aplicados em cada porção de rede;
8. Avaliar as características dos eventos de VTCD para cada segmento de trecho, para cada tipo de falta, para cada faixa de impedância, considerando a rede utilizada.

Os resultados obtidos no processo de cálculo podem ser influenciados por alguns fatores. Por exemplo, o comprimento total da área para aplicação dos curtos-circuitos e a distância de aplicação de faltas. A Figura 13 mostra o comportamento da influência da posição entre defeitos, quando comparados à tensão real do curto-circuito (BOLLEN, 2000).

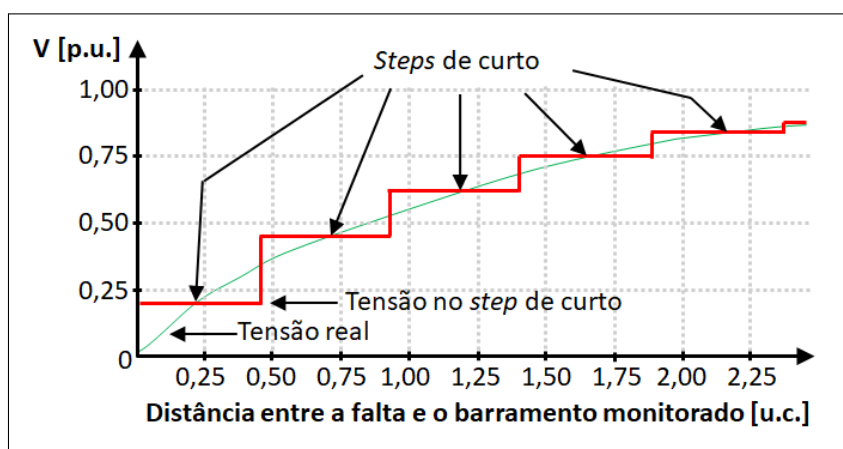


Figura 13 – Impacto do *step* de distância na aplicação de curtos-circuitos.

Observa-se na Figura 13 que quanto mais próximo o defeito está do barramento monitorado, maior será o erro associado, sendo assim recomendada uma maior enumeração

dos segmentos iniciais. Já para faltas em locais mais distantes, onde a curva de tensão real possui menor inclinação, o erro relativo é menor, dispensando um menor passo de discretização.

Como qualquer sistema real, a discretização de um problema contínuo acarreta em perdas na qualidade do resultado. Logo, é uma tarefa importante escolher qual o melhor passo de discretização (*step*) do comprimento da rede para aplicação de curtos-circuitos.

Outro fator de influência nos resultados está relacionado com a fronteira das posições de faltas. Como já apresentado na subseção 2.5.2, as Áreas de Vulnerabilidade são regiões em que a intensidade dos eventos de VTCD é conhecida. Desta maneira, é importante encontrar um custo-benefício ótimo relacionado com o quão distante faz-se necessária a aplicação de defeitos, para obtenção de resultados precisos, dado seu esforço computacional demandado. Pontos em que os níveis de tensão são superiores à sensibilidade da carga são dispensáveis para avaliação do curto-circuito.

Retornando ao caso exemplo da Figura 4, um consumidor conectado à barra 1806 cujo limiar de sensibilidade é 0,82 p.u., curtos-circuitos FT nos trechos localizados no exterior da região azul não são necessários de serem calculados, uma vez que a magnitude do afundamento de tensão é conhecido e superior a 0,82 p.u.. Para tal simplificação, faz-se necessário determinar previamente a Área de Vulnerabilidade do consumidor para este tipo de defeito.

Também, o Método de Enumeração de Estados fornece apenas o número médio de VTCDs em um certo período de tempo. Devido, principalmente, à natureza aleatória do problema, o uso de parâmetros estatísticos, como desvio padrão, é fundamental. Portanto, os Métodos da Distância Crítica e Posição das Faltas não são recomendados para estudos em que a variabilidade tem relevância (OLIVEIRA, 2008).

### 3.3 Simulação Monte Carlo

Considerando a dimensão de um sistema real de distribuição, nem sempre é possível conhecer deterministicamente os valores de alguns parâmetros da rede. Desta maneira, a modelagem destas variáveis através de funções de distribuições de probabilidades mostra-se mais apropriada. Com o objetivo de retratar, probabilisticamente, as características das diversas variáveis de influência nos parâmetros dos afundamentos de tensão, a Simulação Monte Carlo é indispensável.

Uma das vantagens da simulação estocástica dá-se quando pelo menos uma variável aleatória, como por exemplo a taxa de falta, é expressa por uma função de probabilidade. Assim, esta e outras variáveis podem ser utilizadas como dados de entrada do problema.

Os métodos de simulação citados nas seções 3.1 e 3.2 fornecem apenas o valor

médio dos parâmetros associados às VTCDs. Portanto, os Métodos da Distância Crítica e Posição das Faltas não são recomendados para estudos em que a variabilidade das variáveis tem relevância (OLIVEIRA, 2008).

A Simulação Monte Carlo é um método probabilístico baseado em um processo de sorteio de números aleatórios, dada uma função de distribuição de probabilidades, com o intuito de retratar a realidade física, matemática e lógica de um sistema sob análise (AMASIFEN, 2008). Por esta razão, a Simulação Monte Carlo é considerado uma ferramenta poderosa e robusta para avaliação de sistemas complexos.

Por buscar reproduzir a realidade do problema, a Simulação Monte Carlo busca simular os possíveis anos de operação do sistema através de sorteios massivos para as características desejadas, em uma demanda computacional relativamente pequena. Porém, é necessário modelar o sistema da maneira mais fiel possível, de modo a obterem-se resultados adequados.

A resposta oferecida pela metodologia é aproximada, culminando em um erro não nulo, porém pode ser tão pequeno quanto desejado ao aumentar o horizonte simulado. As grandezas sorteadas podem ser, por exemplo, trecho em falta, posição da falta, tipo da falta, resistência de falta e patamar de carga (tensão pré-falta).

A metodologia baseada na Simulação Monte Carlo pode ser resumida em:

1. Modelar a rede de interesse, bem como seu sistema de proteção;
2. Determinar qual a área do sistema em que os curtos-circuitos sorteados serão aplicados. Normalmente, a região escolhida corresponde às linhas de distribuição e transmissão;
3. Determinar quais os pontos de monitoração;
4. Determinar o número de anos para simulação;
5. Determinar o número de faltas anuais totais;
6. Para cada falta anual, sortear o local em defeito, o tipo de curto-circuito e sua resistência associada;
7. Repetir o item 6 para todos os anos de simulação escolhidos;
8. Avaliar estatisticamente os parâmetros das VTCDs considerando todo o horizonte de simulação.

### 3.4 Método Híbrido

Em resumo da seção 3.2, o Método de Enumeração de Estados, como o próprio nome sugere, consiste em representar todas combinações possíveis das variáveis de um sistema, segregando variáveis contínuas em intervalos discretos adequados, de forma com que cada arranjo possui um peso ou probabilidade de ocorrência passível de ser calculada. Já a Simulação Monte Carlo (seção 3.3), é baseada em um critério de seleção probabilístico para obtenção das variáveis do sistema, utilizando para cada variável uma função de distribuição de probabilidade correspondente.

Naturalmente, cada qual possui suas vantagens e desvantagens. Como vantagem, o MEE possibilita a obtenção de conjuntos de estados combinatoriais com faixas definidas e conhecidas. Contudo, a análise de sistemas com um baixo número de faixas de estados pode não retratar, adequadamente, sua realidade. Desta maneira, a principal desvantagem do método está na dependência do nível de detalhamento para cada variável, o que acarreta em um elevado número de combinações possíveis, difíceis de serem enumeradas.

A SMC possui a vantagem de obter, de maneira aleatória, os conjuntos de estados das variáveis do problema. Por ser uma metodologia probabilística, a sua desvantagem está vinculada ao grande número de arranjos necessários para sua convergência numérica.

Visando combinar as vantagens das metodologias para cálculo de VTCDs, Amasifen (2008) propõe o uso simultâneo de ambos os métodos, em uma nova técnica denominada Método Híbrido. Tal procedimento consiste em selecionar aleatoriamente parte das variáveis via SMC, enquanto define um número de faixas possíveis para as demais variáveis através do MEE, obtendo rapidamente um conjunto bem definido de estados.

O conceito por trás desta metodologia consiste em fixar um número preestabelecido de condições de curtos-circuitos e distribuí-lo, uniformemente, para todas os parâmetros envolvidos, cada qual com sua distribuição de probabilidade. Assim, o Método Híbrido pode ser resumido em:

1. Modelar a rede de interesse, bem como seu sistema de proteção;
2. Determinar quais os pontos de monitoração;
3. Determinar qual a área do sistema em que os curtos-circuitos sorteados serão aplicados. Normalmente, a região escolhida corresponde às linhas de distribuição e transmissão, as quais são reduzidas, eliminando os nós fictícios;
4. Agrupar trechos em grupos, em função de seus comprimentos;
5. Classificar os grupos em predominantes ou não predominantes, de acordo com a extensão total da rede;

6. Determinar as condições de curtos-circuitos para os grupos predominantes:
  - 6.1. Número total de faltas por grupo, em função da proporção de seu comprimento com o tamanho total do sistema (sorteio);
  - 6.2. Número de faltas por tipo de curto-circuito, em função da probabilidade de ocorrência (sorteio);
  - 6.3. Impedância de faltas, em função de faixas de valores (determinístico);
  - 6.4. Posição da falta, em função do comprimento total do grupo (sorteio).
7. Determinar as condições de curtos-circuitos para os grupos não predominantes:
  - 7.1. Número total de faltas por grupo, em função da proporção de seu comprimento com o tamanho total do sistema (sorteio);
  - 7.2. Número de faltas por tipo de curto-circuito, em função da probabilidade de ocorrência (sorteio);
  - 7.3. Impedância de faltas, em função do valor máximo (sorteio);
  - 7.4. Posição da falta, em função do comprimento total do grupo (sorteio).
8. Determinar o número de simulações necessárias para a aplicação da metodologia, em função do valor do menor comprimento existente no grupo dos predominantes, da probabilidade mínima dos tipos de falta e do número mínimo de faixas para a discretização da impedância de falta.

### 3.5 Comparações entre os Métodos para Simulação de Curtos-Circuitos

Os curtos-circuitos são os principais causadores dos eventos de VTCD no SEP, devido às características construtivas das linhas de transmissão e distribuição. Por serem redes, majoritariamente, compostas por cabos nus, estão sujeitas aos mais diversos fenômenos, como descargas atmosféricas, temporais, queimadas, ventos, falha humana e contato de animais.

Mesmo conhecendo suas causas e variáveis de influência, a adoção de medidas preventivas ou corretivas não é totalmente eficaz, já que a ocorrência de defeitos é inerente à rede. Dependendo das suas características, os eventos de VTCD podem ser mais severos ou brandos, podendo passar despercebidos de certos clientes enquanto pode causar a interrupção de processos em outros.

Dado o seu grau de importância, tanto para a concessionária de energia quanto aos mais diversos consumidores da rede, os curtos-circuitos são o foco de diversos estudos.

Devido à escassez de informações e dificuldades na medição deste evento em redes de distribuição, metodologias para simulação de defeitos são utilizadas para mensurar seus impactos no SEP.

Desta maneira, o objetivo nesta seção é verificar a metodologia para estimação de indicadores de VTCDs que resulte na melhor relação custo-benefício entre esforço computacional e a precisão de resultados. Os indicadores obtidos podem ser utilizados como subsídios para diversas aplicações, por exemplo: de análise do impacto financeiro destes eventos sobre UCSVs e análise de viabilidade para instalação de condicionadores de energia.

Das técnicas existentes, a Enumeração de Estados e a Simulação Monte Carlo foram escolhidas para confrontação, já que se mostraram as mais utilizadas para estudos de curtos-circuitos em redes de distribuição. Reforça-se este fato pela proposição do Método Híbrido (AMASIFEN, 2008), que visa diminuir as restrições (combinações proibitivas e horizonte simulado, respectivamente) ao combinar suas características favoráveis (conhecimento dos estados da rede e fácil implementação, respectivamente). Ressalva-se que, neste trabalho, não foram comparadas outras metodologias aplicáveis para estimativa dos índices de VTCD, como o Método Híbrido ou Algébrico, por requererem um estudo extenso, distanciando-se do objetivo principal da pesquisa, que é fornecer dados de entrada, suficientemente, adequados para o problema de otimização de religadores, foco principal deste trabalho.

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, foram publicados dois artigos (WESTIN et al., 2019) e (WESTIN et al., 2020) que ilustram a comparação entre duas metodologias de simulação de curtos-circuitos para análise de VTCDs em sistemas de distribuição: o Método de Enumeração de Estados e a Simulação Monte Carlo.

No tocante da primeira técnica, buscou-se um par ótimo de passo de discretização para o local de defeito e passo de discretização da impedância de falta, uma vez que estas variáveis são contínuas. Já para a segunda metodologia, investigou-se qual o horizonte mínimo de simulação de possíveis anos de operação da rede, visto que é um procedimento probabilístico. Independente do método, o objetivo foi identificar qual destes era capaz de retratar, adequadamente, os parâmetros de VTCD para uma rede de distribuição, para as filosofias de proteção 1L, 1R3L, 2R2L e 4L.

O sistema considerado foi o do *IEEE* 34 barras modificado, proposto em (FILHO, 2017) e apresentado no anexo B. Elegeram-se quatro barramentos para estimar os eventos de VTCDs, sendo um deles à montante do único religador da rede, um no início e outro no final do tronco principal e, finalmente, um barramento localizado em um ramal lateral.

Por ser um estudo prévio sem considerar o impacto na sensibilidade de cargas sensíveis, apenas os afundamentos e elevações de tensão foram considerados. A contabilização

do primeiro evento foi para tensões residuais inferiores ou iguais a 0,9 p.u., enquanto para o segundo foi tensões residuais superiores ou iguais a 1,1 p.u..

Foram considerados diversos limiares de tensão, classificaram-se os eventos de acordo com sua probabilidade de ocorrência relativa, em cada um dos cenários do métodos de simulação de eventos de VTCD. Assim, possibilitou-se aplicar regressões polinomiais, para estimar as tendências de ocorrência de afundamentos e elevações de tensão, de mais variadas intensidades.

Verificou-se o impacto que cada parâmetro impõe na contabilização de eventos de VTCDs no sistema teste. Ambas metodologias podem apresentar resultados com qualidade, desde que sejam selecionados valores adequados para as diversas variáveis de influência.

Também foi verificado que a utilização de valores relativos para construção da probabilidade acumulada não trazem diferenças expressivas ao variar-se a filosofia de proteção. Sabe-se que a quantidade de eventos totais em cada filosofia é diferente, porém a sua ocorrência relativa é, praticamente, proporcional. Logo, não houve diferença expressiva quanto a modificação da filosofia empregada.

Naturalmente, o esforço computacional demandado pelos melhores cenários das metodologias de simulação de eventos de VTCDs está, diretamente, relacionado com o número de curtos-circuitos simulados.

Mesmo que um dos possíveis conjuntos ótimos de modelagem das variáveis local e impedância de falta para o MEE tenha oferecido tão boa qualidade de resultados, com um número próximo de curtos-circuitos, quanto os horizontes simulados de SMC, não implica que o primeiro método seja mais vantajoso. Afirma-se isto, pois a busca de um possível conjunto de parâmetros ótimos para a MEE requer muito tempo investido em sua modelagem (*step* de comprimento e de impedância), enquanto o SMC mostra-se muito simples de ser implementado, sem a necessidade de conhecimentos profundos sobre as variáveis da rede avaliada. Além de avaliar o valor médio das variáveis, a SMC retrata adequadamente a aleatoriedade do número de VTCDs.

Portanto, com base no caso teste utilizado, conclui-se que a SMC é o método mais apropriado para simulação de eventos de VTCDs. Esta conclusão é relevante por subsidiar a escolha dos métodos de simulação em diversas aplicações, em particular, quando se pretende realizar alocação ótima de religadores em sistemas de distribuição considerando VTCDs, que será assunto do capítulo 4.



# 4 Proposta de Metodologia para Alocação Ótima de Religadores considerando VTCDs

## 4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo consiste em apresentar uma proposta para alocação ótima de religadores em redes de distribuição quando se consideram as VTCDs. Os conceitos e técnicas apresentadas nos capítulos 2 e 3, e também no anexo A são fundamentais para a proposição da metodologia.

Discorridas as conclusões na subseção 3.5, a Simulação Monte Carlo será empregada para estimar os parâmetros de VTCD, uma vez que se mostra um procedimento prático de ser implementado e fornece a variabilidade das variáveis de interesse.

Na obtenção de um conjunto de soluções ótimas do problema, surgem complexidades como a manipulação de variáveis contínuas discretizadas, número elevado de combinações do espaço de busca e condições de contorno e restrições de igualdade ou desigualdade. As técnicas tradicionais analíticas de programação linear e não linear não são adequadas para solucionar este tipo de problema. Neste cenário, o uso da metodologia de Algoritmo Genético ganha destaque.

A título de informação, este trabalho originou-se de um projeto de P&D, no qual se propõe o uso desta técnica para alocação de dispositivos de proteção, primeiramente visando qualidade do serviço e, posteriormente, qualidade do produto. Assim, um dos principais motivadores e objetivos do P&D é desenvolver uma plataforma que permita validar o novo módulo desenvolvido no *software* comercial.

## 4.2 Contabilização de Eventos em Sistema Multi-religador

Os dispositivos de proteção da rede de distribuição atuam para os mais diversos tipos de curtos-circuitos aplicados, apresentando tempos de resposta em função do tipo de curva de atuação tempo  $x$  corrente selecionada. Como estes equipamentos podem ser parametrizados considerando as diversas filosofias de proteção (coordenada e seletiva), a evolução temporal dos eventos de VTCD depende da parametrização da proteção e do tipo de curto-circuito ocorrido, se é permanente ou temporário.

Algumas considerações são adotadas para registro e contabilização dos fenômenos,

uma vez que estas impactarão os resultados e análises realizadas na subseção 5.1. As premissas empregadas neste trabalho são:

1. Os impactos nas UCSVs devido às interrupções de curta (IC) e longa (IL) duração serão contabilizadas;
2. As elevações de tensão serão somente registradas. Esta consideração justifica-se pela dificuldade em caracterizar a sensibilidade das UCSVs frente a tais distúrbios. Também, estes fenômenos não fazem parte do escopo do projeto de P&D;
3. Os parâmetros associados a sensibilidade das UCSVs são considerados para contabilização dos afundamentos de tensão. Um afundamento de tensão é contabilizado se o par ordenado de intensidade residual e tempo de exposição estiver dentro da região de sensibilidade da UCSV. Considere um consumidor sensível qualquer apresentado na Figura 14, cujos limiares de sensibilidade são definidos pelos pontos 0,200 s e 0,6 p.u.. Embora o evento 1 seja um afundamento registrado, ele não será contabilizado, enquanto o evento 2 promove uma parada no processo e, desta forma, será contabilizado no custo de interrupção.

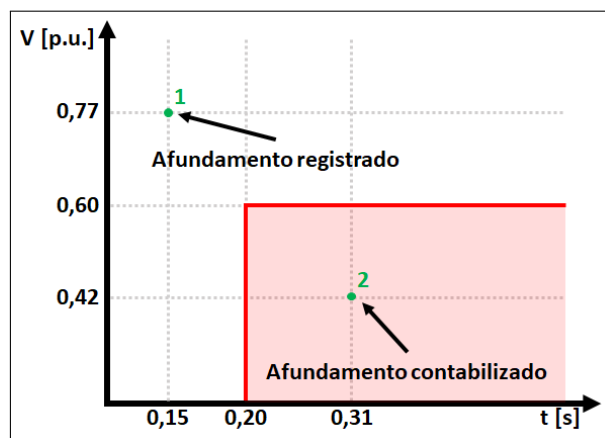


Figura 14 – Curva de sensibilidade de um consumidor e dois eventos hipotéticos.

4. O procedimento de Agregação Temporal não é usado, para permitir avaliar o impacto da evolução temporal dos fenômenos. A título de exemplo, são contabilizados 3 afundamentos de tensão na Figura 15 e registradas 3 elevações de tensão na Figura 16;
5. Na ocorrência concomitante de elevações e afundamentos, ambos são tratados separadamente;
6. A duração dos eventos de VTCD é inferior a 3 minutos, de acordo com ANEEL (2018);

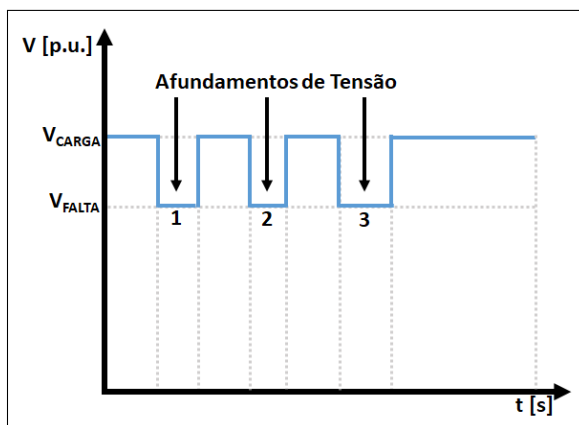


Figura 15 – Contabilização de afundamentos de tensão.

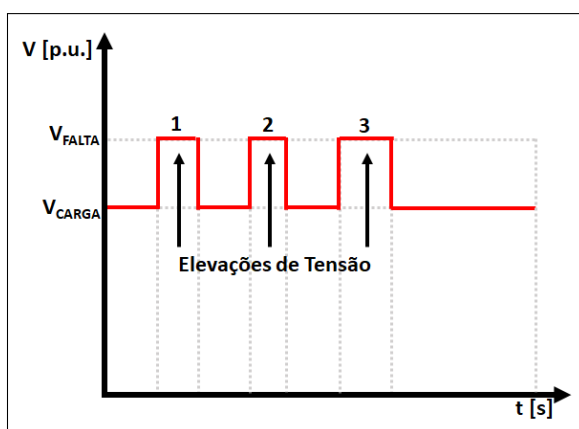


Figura 16 – Registro de elevações de tensão.

7. Pontos monitorados à jusante da abertura do dispositivo de proteção podem sofrer afundamentos de tensão intercalados de interrupções de curta duração. Assim, serão contabilizadas apenas as interrupções pois representam o distúrbio mais severo. A Figura 17 retrata um possível caso em que são contabilizadas 2 interrupções de curta duração, omitindo a contagem de 3 afundamentos de tensão;

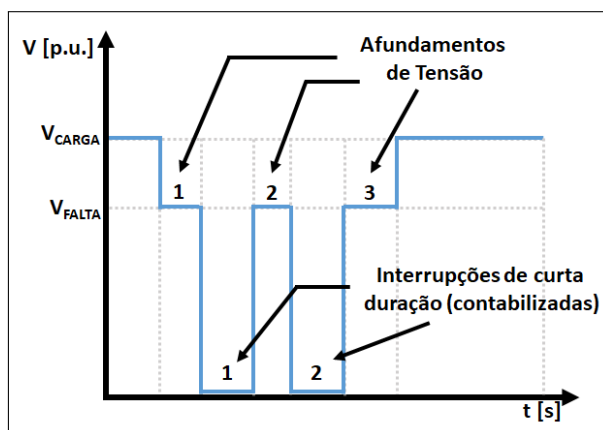


Figura 17 – Registro de interrupções de curta duração, com afundamentos intercalados.

8. Pontos monitorados à jusante da abertura do dispositivo de proteção podem sofrer elevações de tensão intercalados de interrupções de curta duração. Assim, estes eventos são tratados separadamente, por possuírem impactos distintos (ANEEL, 2018), (ONS, 2011). A Figura 18 retrata uma possível situação em que são registradas 3 elevações de tensão e contabilizadas 2 interrupções de curta duração;

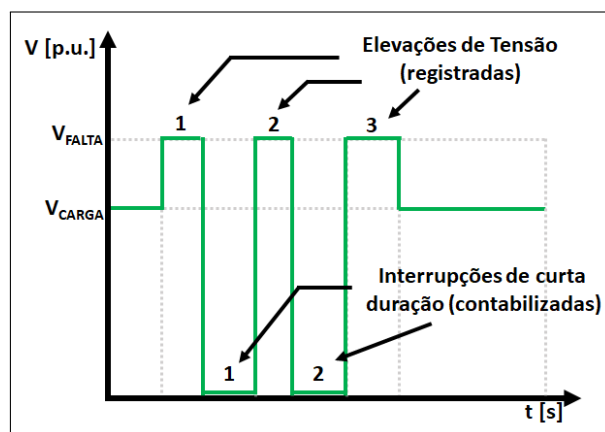


Figura 18 – Contabilização de elevações de tensão e registro de interrupções de curta duração intercaladas.

9. A natureza das faltas aplicadas pode ser permanente ou transitória. Disjuntores ou religadores podem estar ajustados para atuações coordenadas. Logo, os defeitos transitórios podem ser eliminados durante o 1º, 2º ou 3º religamento automático, cada qual com sua probabilidade de sucesso associada;
10. Disjuntores ou religadores também podem estar ajustados para atuações seletivas. Logo, nestes casos não há religamentos para defeitos à jusante de bases fusíveis;
11. O *software* usado para a simulação de curtos-circuitos (DistriView) fornece todas as tensões residuais para cada falta, porém informa um único tempo para cada atuação do dispositivo de proteção. Logo, a Agregação de Fases é realizada utilizando o critério da Fase Crítica, assumindo que o tempo de atuação fornecido é da fase que sofreu maior afundamento;
12. Não são consideradas faltas simultâneas e faltas evolutivas;
13. As faltas são aplicadas no sistema conforme a metodologia de curto-circuito e suas considerações na subseção 4.3;
14. O padrão utilizado para contabilização de eventos considera total coordenação e seletividade entre os dispositivos de religamento automático, o qual é apresentado na subseção 4.2.1.

Para a contabilização de eventos anuais esperados para a SMC basta somar o número de eventos anuais e dividir pela número de anos simulados, conforme a equação 4.1.

$$N_{Ek_{SMC}} = \frac{1}{N_A} \sum_{j=1}^{N_A} \sum_{i=1}^{N_F} N_{ERij} \quad (4.1)$$

Em que:

$N_{Ek_{SMC}}$  é o número médio de eventos anuais de VTCD, para a SMC, sensibilizados pela UCSV  $k$ ;

$N_A$  é o número de anos de simulação considerado;

$j$  é o contador de anos;

$i$  é o contador de faltas;

$N_F$  é o número total de faltas anuais para a SMC;

$N_{ERij}$  é a quantia de eventos de VTCD registrada devido a falta  $i$  no ano  $j$ .

O valor encontrado na equação 4.1 equivale o registro de um único evento de VTCD em um ponto específico de monitoração. Logo, para um conjunto de  $k$  barramentos monitorados, é necessário replicar a equação  $k$  vezes, para cada um dos quatro eventos de VTCD (IC, IL, AT e ET).

Por fim, a equação 4.2 apresenta a função custo total, que consiste na somatória de cada um dos custos individuais das UCSVs, devido ao número de paradas de processos estimado pela SMC.

$$C_{TOTAL} = \sum_{k=1}^{n_{UCSV}} N_{Ek_{SMC}} \times C_k \quad (4.2)$$

Em que:

$C_{TOTAL}$  é o custo total das interrupções referentes à proposta de alocação [unidade monetária];

$k$  é o contador de UCSVs;

$n_{UCSV}$  é o número total de UCSVs;

$C_k$  é o custo de uma interrupção associada à UCSV  $k$  [unidade monetária/evento].

#### 4.2.1 Padrão de Eventos para Sistema com Religadores Coordenados

O objetivo desta subseção é propor uma metodologia capaz de contabilizar, genericamente, os eventos de VTCDs em sistemas de distribuição com multi-religadores,

quando se garante a total coordenação e seletividade entre estes dispositivos.

Nesta proposição, são descartadas as possibilidades de falhas nas operações dos dispositivos, ou seja, considera-se que o equipamento de proteção operará sempre quando for solicitado. Também, são desconsideradas faltas evolutivas. As filosofias de proteção contempladas são 1L, 1R3L, 2R2L e 4L.

O diferencial desta proposta é contabilizar os mais diversos eventos de VTCD nos barramentos, sabendo apenas a quantidade de operações verificadas. Assim, não se faz necessário o conhecimento sobre qual dispositivo de proteção operou, dado que nem sempre é possível a identificação deste componente, fato que é realidade em boa parte dos sistemas de distribuição de energia.

As variáveis que influenciam na contabilização dos fenômenos de VTCD são: a quantidade verificada de operações dos dispositivos de proteção, o posicionamento do barramento monitorado, o local de ocorrência do curto-circuito e a localização qualitativa da falta nas zonas de cobertura dos dispositivos (também conhecida como zona de proteção).

De acordo com as parametrizações dos dispositivos de proteção, podem ser observados de 1 até 4 operações totais. Quanto aos pontos de monitoramento podem estar situados à montante de todo o sistema de distribuição, no tronco do alimentador ou em algum ramal lateral. Já os locais em defeito considerados, podem estar no tronco do alimentador ou em ramais laterais, os quais ainda dependem da zona de proteção que estão instalados.

O conceito de zona de proteção (ZP) torna-se conveniente na existência de múltiplos equipamentos de proteção instalados em série no sistema. Assim, uma zona de proteção é aquela região compreendida entre dois equipamentos de proteção e, na ocorrência de um defeito, existe um dispositivo responsável por sua eliminação. No caso de uma ZP protegida por uma chave fusível, deve-se considerar como ZP a região, imediatamente, anterior protegida por um religador, pois a metodologia proposta contempla a possibilidade de filosofias coordenadas e seletivas, simultaneamente.

A Figura 19 ilustra um sistema hipotético no qual conta com um total de 7 zonas de proteção, das quais 3 são referentes aos religadores do tronco principal, 3 de ramais laterais e 1 de sub-ramal lateral. Podem-se observar 8 barramentos monitorados, sendo  $B_0$  e  $B_1$  localizados à montante da rede de distribuição,  $B_2$ ,  $B_3$  e  $B_4$  posicionados nos tronco principal e  $B_5$ ,  $B_6$ ,  $B_7$  e  $B_8$  nos ramais laterais.

Considere o caso em que exista uma falta em uma ZP protegida por um religador, como por exemplo a  $ZP_2$ . Todos os barramentos mantém sua classificação como montante, tronco e ramal, porém se agrega a posição relativa da falta para complementar sua especificação.

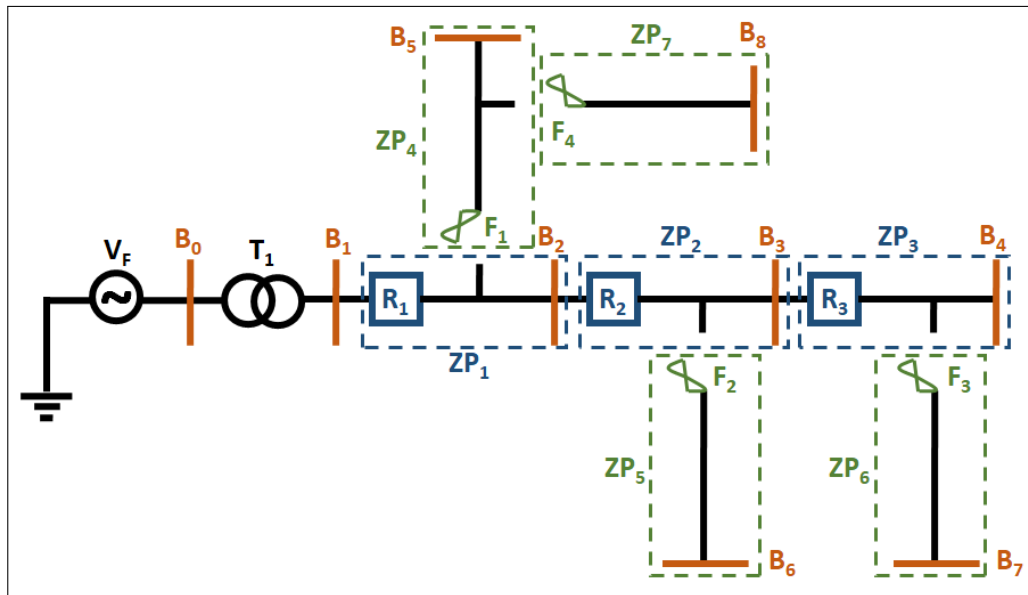


Figura 19 – Zonas de proteção de um sistema hipotético.

Os barramentos  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_5$  e  $B_8$  são considerados à montante da ZP defeituosa, uma vez que o comportamento verificado dos fenômenos de VTCD é equivalente a uma barra nesta posição. A interpretação destes eventos seguem a primeira linha da Tabela 14. A barra  $B_3$  está localizada no tronco, com a falta no tronco e na mesma ZP. Logo, seus eventos seguem de acordo com a primeira linha da Tabela 15. Já a barra  $B_4$ , também está posicionada no tronco, porém com falta em uma ZP à montante (tronco). Assim, os registros seguem a terceira linha da Tabela 15. No tocante do barramento monitorado  $B_6$ , seus eventos são identificados pela terceira linha da Tabela 16, já que é uma barra instalada em ramal, com falta em uma ZP à montante no tronco. Finalmente, a barra  $B_7$  tem seus registros idênticos ao barramento  $B_6$ .

Quando a falta está em uma ZP protegida por fusível, a situação ganha um cuidado a mais, já que a metodologia proposta é generalizada para qualquer filosofia de proteção adotada. Tome como exemplo um defeito na ZP<sub>5</sub>.

Novamente, as barras  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_5$  e  $B_8$  são consideradas à montante da ZP defeituosa, cujo padrão de eventos corresponde à segunda linha da Tabela 14. O barramento  $B_6$ , localizado em no próprio ramal defeituoso, tem seus eventos de acordo com a quarta linha da Tabela 16. Já a barra  $B_3$ , instalada no tronco com falta em um ramal, identifica-se como a mesma ZP devido a possibilidade de atuação do religador  $R_2$ , seguindo padrões conforme a quarta linha da Tabela 15. O barramento  $B_4$ , posicionado no tronco, tem seus registros de acordo com a sexta linha da Tabela 15, uma vez que a falta no ramal 5 está associada a ZP<sub>2</sub> à montante. Finalmente, a barra  $B_7$  está conectada em um ramal com uma falta associada a um ZP à montante, devido a possível operação de  $R_2$ , tendo seus registros baseados na sétima linha da Tabela 16.

A única classificação não presente no exemplo é a existência de um outro ramal lateral na  $ZP_2$ , para o mesmo curto-circuito na  $ZP_5$ . Esse barramento é denominado como defeito na mesma ZP porém em outro ramal.

Percebe-se que, no cenário de defeito em um trecho protegido por chave fusível, a posição relativa do barramento monitorado com a posição do defeito está, diretamente, relacionada com a ZP imediatamente à montante protegida por um religador.

Neste trabalho, um barramento localizado à montante da ZP defeituosa equivale à falha em ZP à jusante. Similarmente, uma barra posicionada à jusante da ZP defeituosa corresponde à falha em ZP à montante. A denominação de barramento na mesma ZP condiz com falta na mesma ZP.

Para evitar a poluição visual e facilitar a correta extração das informações, alguns termos das tabelas foram abreviados. Os significados para as abreviaturas são: ZP - zona de proteção; IC - interrupção de curta duração; IL - interrupção de longa duração; AT - afundamento de tensão; ET - elevação de tensão; PR - próprio ramal; OR - outro ramal.

A Tabela 14 ilustra a contabilização de eventos quando se monitora uma barra posicionada à montante de todo o sistema de distribuição de média tensão ou em um alimentador vizinho. Já a Tabela 15 retrata o número de eventos contabilizados ao monitorar-se um barramento localizado no tronco do alimentador. Finalmente, A Tabela 16 apresenta a contabilização de eventos quando se monitora uma barra instalada em um ramal lateral do alimentador.

Quando um ramal recebe a troca de uma chave fusível por um religador, sua correta interpretação nas tabelas é como tronco, uma vez que o novo dispositivo de proteção tem capacidade de realizar tentativas de religamento automático, o que muda os padrões de eventos observados neste segmento.

Tabela 14 – Padrão de eventos para barramentos à montante de um sistema multi-religador coordenado ou em outros alimentadores vizinhos

Barramento Monitorado	Posição da Falta	Falta em	Operações			
			1	2	3	4
<i>Montante ou Outros Alimentadores</i>	<i>Tronco</i>	<i>ZP à Jusante</i>	1 AT e 1 ET	2 AT e 2 ET	3 AT e 3 ET	4 AT e 4 ET
	<i>Ramal</i>	<i>ZP à Jusante</i>	1 AT e 1 ET	2 AT e 2 ET	3 AT e 3 ET	-

Tabela 15 – Padrão de eventos para barramentos no tronco de um sistema multi-religador coordenado

Barramento Monitorado	Posição da Falta	Falta em	Operações			
			1	2	3	4
<i>Tronco</i>	<i>Tronco</i>	<i>Mesma ZP</i>	1 IL e 1 ET	1 IC, 1 IL e 2 ET	2 IC, 1 IL e 3 ET	3 IC, 1 IL e 4 ET
		<i>ZP à Jusante</i>	1 AT e 1 ET	2 AT e 2 ET	3 AT e 3 ET	4 AT e 4 ET
		<i>ZP à Montante</i>	1 IL e 1 ET	1 IC, 1 IL e 2 ET	2 IC, 1 IL e 3 ET	3 IC, 1 IL e 4 ET
	<i>Ramal</i>	<i>Mesma ZP</i>	1 AT e 1 ET	1 IC e 2 ET	2 IC e 3 ET	-
		<i>ZP à Jusante</i>	1 AT e 1 ET	2 AT e 2 ET	3 AT e 3 ET	-
		<i>ZP à Montante</i>	1 AT e 1 ET	1 IC e 2 ET	2 IC e 3 ET	-



Tabela 16 – Padrão de eventos para barramentos no ramal de um sistema multi-religador coordenado

Barramento Monitorado	Posição da Falta	Falta em	Operações			
			1	2	3	4
Ramal	Tronco	Mesma ZP	1 IL e 1 ET	1 IC, 1 IL e 2 ET	2 IC, 1 IL e 3 ET	3 IC, 1 IL e 4 ET
		ZP à Jusante	1 AT e 1 ET	2 AT e 2 ET	3 AT e 3 ET	4 AT e 4 ET
		ZP à Montante	1 IL e 1 ET	1 IC, 1 IL e 2 ET	2 IC, 1 IL e 3 ET	3 IC, 1 IL e 4 ET
	Ramal	Mesma ZP PR	1 IL e 1 ET	1 IC, 1 IL e 2 ET	2 IC, 1 IL e 3 ET	-
		Mesma ZP OR	1 AT e 1 ET	1 IC e 2 ET	2 IC e 3 ET	-
		ZP à Jusante	1 AT e 1 ET	2 AT e 2 ET	3 AT e 3 ET	-
		ZP à Montante	1 AT e 1 ET	1 IC e 2 ET	2 IC e 3 ET	-

Note que os padrões de eventos servem como referência para a contabilização, pois os fenômenos só são contados se as magnitudes forem inferiores a 0,9 p.u. ou superiores a 1,1 p.u., para afundamentos e elevações de tensão, respectivamente. Neste trabalho, os eventos só são contabilizados caso o par intensidade residual e tempo de exposição forem suficientes para sensibilizar determinada UCSV.

Vale ressaltar que para cada combinação de indivíduo da otimização e barramento monitorado, existe um novo cenário de ZP. Para que seja realizada a leitura, registro e contabilização corretas, faz-se necessário definir as ZP correspondentes. Quando as faltas não são no mesmo alimentador que o barramento monitorado ou barra à montante, não se faz necessária a elaboração das ZP, uma vez que identifica-se a operação de fusível ou religador através do número total de operações verificadas.

### 4.3 Proposta de Metodologia para Simulação de Faltas e Otimização

A proposta do algoritmo responsável pela otimização da alocação de religadores é exibida na Figura 20. As colorações dos blocos podem identificar o *software* usado ou somente uma determinada ação. Os blocos em vermelho claro denotam ações realizadas dentro da plataforma MATLAB, enquanto os preenchidos de azul correspondem ao uso do aplicativo DistriView. A cor verde foi usada apenas para destaque de blocos de perguntas ou marco do fim do algoritmo.

A forma dos blocos é também uma maneira de identificação de etapas. Os blocos que conotam o início e fim do algoritmo são ilustrados em retângulos delimitados por extremidades convexas. Ações são representadas por retângulos de pontas, ligeiramente, arredondadas. Os losangos são usados para laços no código fonte, ilustrados como perguntas na figura. Finalmente, os paralelogramos representam informações congeladas em formato de texto (.txt).

Percebe-se que a metodologia proposta contém a aplicação da SMC como ferramenta para estimativa dos eventos de VTCD. A justificativa é dada nos testes percorridos

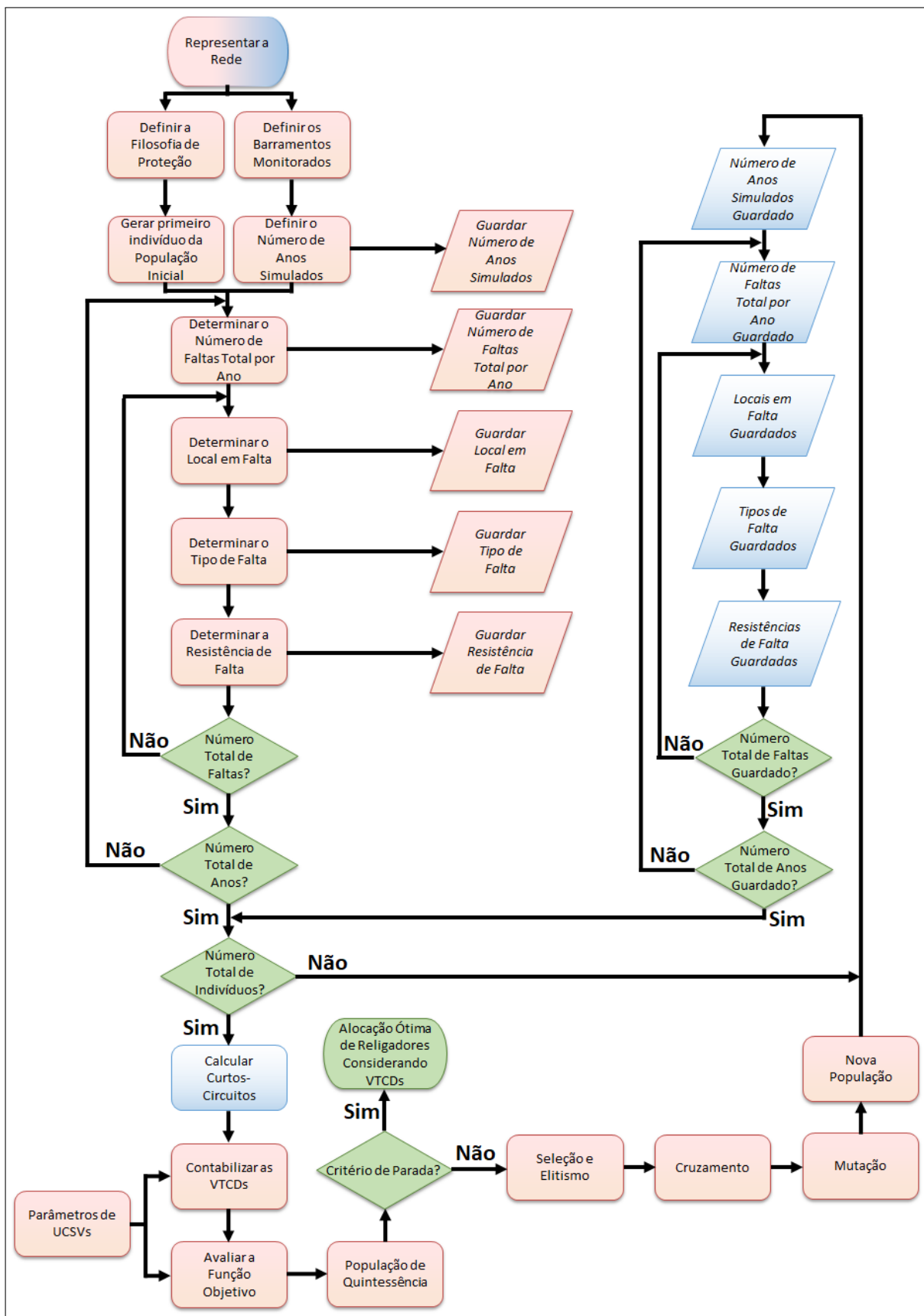


Figura 20 – Fluxograma da metodologia de otimização.

na seção 3.5, em que a técnica Monte Carlo mostrou-se mais prática de ser implementada, promovendo resultados de qualidade, com esforço computacional não proibitivo e, além de tudo, não demanda testes adicionais pois se considera uma variável de influencia em seus resultados (anos de simulação).

O sistema de distribuição é modelado e representado em ambas plataformas escolhidas. Definem-se a filosofia de proteção desejada e os pontos de interesse do sistema para serem monitorados. É definida a quantidade de anos de operação para a SMC e esta informação é armazenada. O primeiro indivíduo que compõe a população inicial é gerado, aleatoriamente. Observe que qualquer um dos passos de definição não depende do outro.

O número de faltas simuladas é definido e armazenado. A partir de então, é realizado o *looping* de varredura de sorteios, em que se define um local defeituoso, sorteia um tipo de falta, bem como sua impedância de defeito. O ciclo é repetido até que seja elencado o número total de faltas pré-estabelecido, compondo o primeiro possível ano de operação do sistema. Novos defeitos e suas características são sorteados, até que se componha todo o horizonte de faltas considerado.

Todos os estados de defeitos são associados ao primeiro indivíduo proposto pela metodologia de otimização. Para permitir a correta avaliação e comparação dos indivíduos, o mesmo conjunto de faltas sorteado é replicado a todos seres da otimização. Desta forma, não é aplicada nenhuma influência externa ao processo de evolução natural dos indivíduos, o que poderia acarretar em uma influência indesejada e, até mesmo, em avaliações confusas.

Com a determinação do conjunto de indivíduos e seus estados de falta, o algoritmo tem informações suficientes para iniciar a rotina de simulação de curtos-circuitos, no *software* DistriView. Após a conclusão das simulações, os fenômenos de VTCD são estimados, pela plataforma MATLAB, através da associação de padrões de eventos (Apêndice 4.2.1) com os limiares de sensibilidade das UCSVs.

Os indivíduos da população atual são avaliados através da função objetivo e seus respectivos valores de aptidão são encontrados. O melhor indivíduo da geração é enviado à população de quintessência, onde seu cromossomo e *fitness* são armazenados. O laço de repetição relacionado à convergência do algoritmo é verificado. Enquanto as condições de parada não são atendidas, a população atual é sujeita aos operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação, dando origem a uma nova geração de indivíduos.

Cada novo indivíduo é associado ao conjunto de faltas anuais pré-definido e fixado. São submetidos ao processo de simulação destes defeitos e, posteriormente, contabilizam-se os eventos de VTCDs, para cada UCSV, que causaram sua interrupção no processo produtivo. Os indivíduos são avaliados de acordo com seu desempenho, recebendo um valor de aptidão. O melhor cromossomo da geração presente possui suas informações

genéticas armazenadas na população de quintessência.

O processo de procriação repete-se até que o critério de parada é satisfeito, seja por convergência ou por tempo limite de processamento.

A Figura 21 demonstra os marcos de transição e ações gerais nas plataformas.

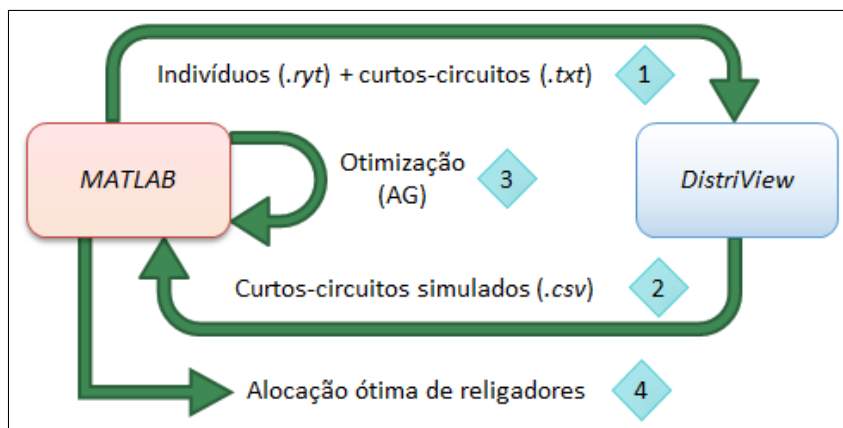


Figura 21 – Fluxograma de transição entre plataformas.

O corpo do algoritmo está concentrado no MATLAB, onde está implementada quase toda a automatização do algoritmo, desde metodologia para construção dos estados de curto-circuito (1), rotina de otimização (3) e apresentação de resultados (4). A função do *software* DistriView é de ser a plataforma de processamento de defeitos (2), para todos os estados (indivíduos) possíveis oriundos da técnica de otimização.

Devido à dificuldade do problema em enumerar-se, previamente, todas as possibilidades, torna-se impraticável modelar visualmente todos os cenários possíveis de alocações na plataforma de simulação de curto-circuito. Logo, existe uma macro computacional que faz a comunicação entre os *softwares* MATLAB e DistriView no tempo correto em que são solicitados. Este algoritmo, implementado em linguagem C++, é responsável pela transição dos passos (1) ao (2) e vice-versa.

### 4.3.1 Considerações para a Simulação Monte Carlo

A determinação do número de anos de operação do sistema que se deseja simular é única e está fortemente ligada às características da rede, conforme mostrado nas equações 4.3 e 4.4. Como a precisão desta metodologia está diretamente relacionada com a quantidade de anos simulados (horizonte de observação), recomenda-se que as simulações sejam estendidas até que o erro associado ao processo esteja dentro de uma faixa aceitável (OLIVEIRA, 2008).

Para encontrar a probabilidade associada ao comprimento ( $P_{L_m}$ ) do trecho  $m$ , deve-se considerar o número de faltas anuais neste trecho ( $N_{F_m}$ ) em relação ao número

total de faltas anual do sistema ( $N_T$ ), conforme equação 4.5.

$$N_{F_m} = l_m \times \lambda_m \quad (4.3)$$

$$N_T = \sum_{m=1}^n N_{F_m} = \sum_{m=1}^n l_m \times \lambda_m \quad (4.4)$$

$$P_{L_m} = \frac{N_{F_m}}{N_T} = \frac{l_m \times \lambda_m}{\sum_{m=1}^n l_m \times \lambda_m} \quad (4.5)$$

Em que:

$m$  é o índice de trecho;

$n$  é o número total de segmentos de trecho;

$N_{F_m}$  é o número de faltas anuais ocorridas no trecho  $m$ ;

$l_m$  é o comprimento do trecho  $m$  [km];

$\lambda_m$  é a taxa de faltas no trecho  $m$  [faltas/km/ano];

$N_T$  é o número total de faltas anuais para toda rede;

$P_{L_m}$  é a probabilidade de ocorrência de faltas associada ao trecho  $m$ .

Com o intuito de ilustrar o processo de sorteio de um trecho em falha, considere o sistema exemplo apresentado na Figura 22.

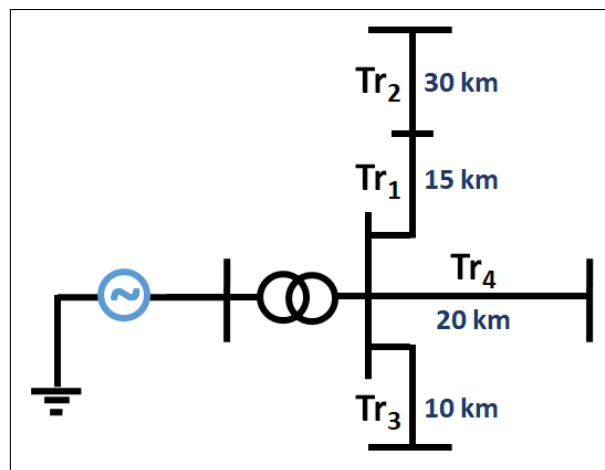


Figura 22 – Sistema hipotético com taxa de falta constante.

Considerando a equação 4.5 e sendo a rede hipotética com a mesma taxa de falta em todos os trechos, a probabilidade de ocorrência de cada trecho é a relação entre o seu comprimento e o somatório dos comprimentos de todos os trechos. A metodologia aplicada para sorteio consiste no enfileiramento de todos os segmentos de rede, como apresentado na Figura 23.

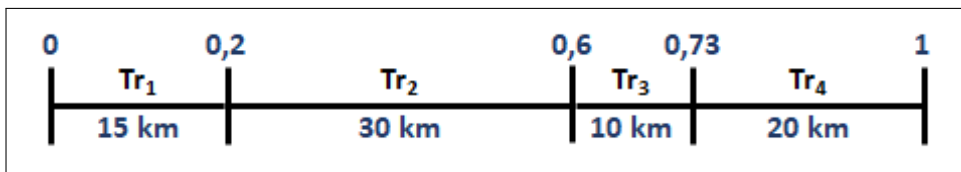


Figura 23 – Probabilidade de sorteio para cada trecho.

A probabilidade de ocorrência de faltas em cada trecho também é acumulada no processo de enfileiramento, o que facilita na escolha e definição da posição de defeito. O procedimento de seleção consiste no sorteio de um número aleatório, com distribuição uniforme, entre 0 e 1. A figura 24 exemplifica o sorteio para um valor de 0,5. Este número equivale a aplicar uma falta no trecho 2 da Figura 22. Além disso, a falta será aplicada a 75% do início deste trecho, já que o número sorteado equivale a exatamente esta posição intermediária.

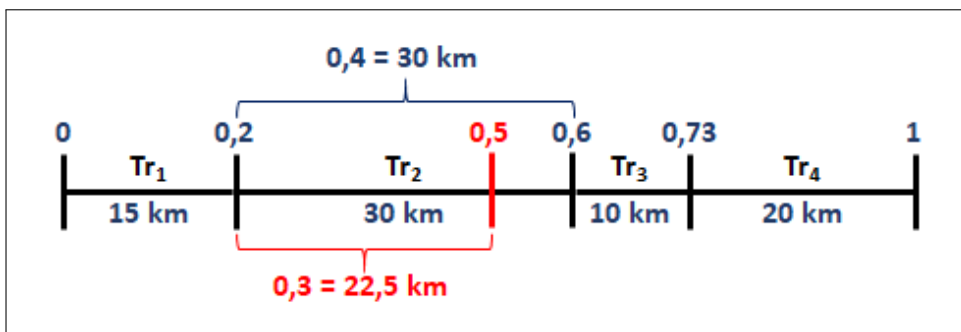


Figura 24 – Designação da posição da falta, a partir do sorteio de um número aleatório.

Analogamente, a determinação do tipo de falta é realizada através do enfileiramento das probabilidades de ocorrência de cada um destes tipos. Assim, o sorteio de outro número aleatório indica um tipo de falta a ser aplicada no local previamente determinado. A Figura 25 demonstra o espaço de probabilidades para um possível cenário de distribuição de faltas.

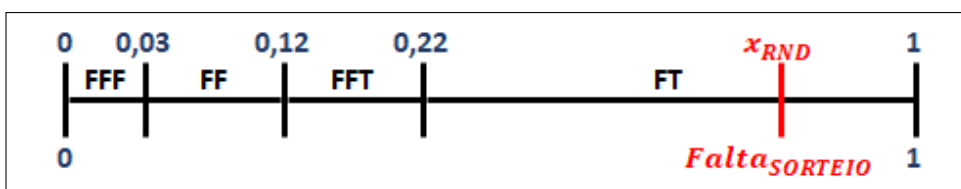


Figura 25 – Probabilidades de faltas hipotéticas para exemplificação da metodologia.

Finalmente, a impedância de falta é modelada como uma função de distribuição uniforme. Logo, um número aleatório sorteado é comparado com intervalo, desde zero até o valor máximo de resistência, conforme visto na Figura 26

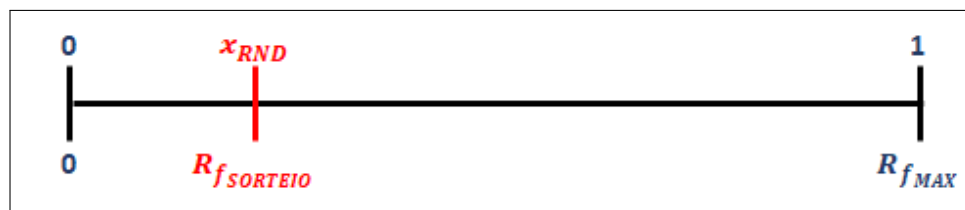


Figura 26 – Sorteio de impedância da falta.

### 4.3.2 Considerações para o Algoritmo Genético

Os indivíduos do problema de otimização correspondem a uma proposta de alocações de religadores para a rede considerada. O tipo de codificação utilizada é a binária, em que se representará as posições candidatas para alocação, já que este tipo de adoção favorece a generalização dos operadores genéticos. Associado a este cromossomo, existe um *bit* com uma parte real, recebendo o valor de aptidão deste ser, facilitando a manipulação da função objetivo.

O número total de genes nos indivíduos é igual ao número de barramentos do sistema. O índice de cada elemento do vetor possui relação direta à posição elétrica que será alocado. Em cada *locus*, pode-se atribuir o alelo 0 ou 1, em que 0 indica a ausência de uma característica, enquanto o valor 1 representa a presença da mesma. No caso do problema de alocação ótima, o valor 0 indica o nó desprovido de religador, enquanto o número 1 representa a sugestão de alocação deste equipamento.

Observe que o tamanho do indivíduo pode acarretar em um longo processo de troca de material genético, retardando a evolução da espécie. Neste contexto, medidas para reduzir o espaço de busca de indivíduos auxilia na redução temporal da progressão da população. De forma análoga, uma solução com muitos religadores candidatos acarreta em uma alta demanda computacional, além do fato da possibilidade de sugestão de uma posição candidata impraticável, geográfica ou fisicamente. Assim, posições em derivações, dispositivos existentes (chaves facas, fusíveis ou seccionadoras), grandes blocos de cargas, consumidores especiais, comprimento do ramal, divisão de circuito urbano-rural ou experiência prática do engenheiro (local da rede, aspectos políticos e geográficos) foram aplicadas para redução do espaço de busca.

O grau de aptidão dos indivíduos da população será quantificado através da equação 4.6, no qual traduz quão aderente o indivíduo é ao meio em que vive. No problema de otimização, o objetivo da FO é minimizar, simultaneamente, o custo de parada de processo em todas as UCSVs, devido a sugestão de alocação de religadores promovida pelo indivíduo  $k$  atual. Desta forma, soluções que fornecerem o menor custo de interrupção

associado serão tidas como as mais aptas ao sistema de distribuição considerado.

$$\min(Y_k) = \sum_{i=1}^n (x_i \times C_i) \quad (4.6)$$

*sujeito a: n<sub>serie</sub>, n<sub>total</sub>*

Em que:

$k$  é o identificador de indivíduo da população atual;

$i$  é o auxiliar para varredura de UCSV;

$n$  é o número total de UCSV;

$Y_k$  é o custo total de parada de processo de  $n$  UCSV para o indivíduo  $k$ ;

$x_i$  é a quantidade de eventos totais que sensibilizaram a UCSV  $i$  devido a alocação do indivíduo  $k$ , sejam eles interrupções de curta e longa duração e afundamentos de tensão;

$C_i$  é o custo associado à parada de processo da UCSV  $i$ ;

$n_{serie}$  é o número máximo de religadores permitidos em série;

$n_{total}$  é o número de religadores disponíveis para serem alocados na rede considerada.

A bonificação que cada indivíduo recebe é associada ao grau de aderência ao meio, enquanto a penalização resulta em sua exclusão da população. Na formulação do problema, a bonificação é dada através do menor número de eventos sensibilizados para todos os consumidores sensíveis, já que o custo das paradas das UCSVs é um dado de entrada do problema. Já a penalização é realizada através das restrições, resultando na exclusão do indivíduo da população imediatamente. Assim, um indivíduo que exceda o número de religadores série ou o número de dispositivos disponíveis não terá seu *fitness* avaliado.

Será usada a seleção por roleta, uma vez que ela permite que uma maior diversidade seja inserida no problema quando na escolha de um indivíduo de menor *fitness*, ao passo que acelera a busca por ótimos globais ao alternar a presença de indivíduos de aptidões média e alta. Assim, ambos indivíduos avaliados como mais ou menos aptos, podem ser selecionados para prosseguir na busca de uma possível solução ótima, porém cada um com sua probabilidade associada.

O operador genético de elitismo é utilizado, porém é aplicado de maneira diferente da usual, já que se propõe o uso conjunto da população de quintessência (ZHANG; XU; WANG, 2008) e da seleção roleta. A população de quintessência reserva uma cópia do melhor indivíduo de cada geração, onde nenhum operador genético é aplicado sobre este ser. O elitismo consiste em selecionar, diretamente, um número determinado dos melhores indivíduos para prosseguirem à próxima geração. Porém, este papel já é desempenhado, de certa forma, pela população de quintessência, já que contém o indivíduo mais apto de



cada geração.

O uso da população de quintessência é importante para o caso em que, devido a alguma peculiaridade do sistema ou dos operadores genéticos, um indivíduo ótimo global não sobreviva ao processo natural e o algoritmo convirja em um ótimo sub-global. Neste cenário, as informações sobre o melhor indivíduo seriam perdidas sem o uso desta técnica.

Logo, a função do operador elite neste algoritmo é de sempre garantir que os melhores seres sejam escolhidos para o cruzamento, uma vez que a escolha por roleta pode não selecioná-los, já que o processo de sorteio é aleatório. Assim, indivíduos com bons materiais genéticos podem seguir procriando e, conseqüentemente, buscando indivíduos melhores. Vale ressaltar que estes indivíduos podem ou não trocar material genético, já que dependem da probabilidade de cruzamento.

Em relação ao problema de otimização, o elitismo garante sempre que as melhores posições candidatas sigam presentes em parte da solução, estando sujeitas a novas trocas de posições, enquanto a população de quintessência sempre armazenará as melhores posições candidatas, obtidas na população atual. Este trabalho conjunto permite que, caso uma posição candidata que favoreça, parcialmente, uma das UCSVs seja desconsiderada devido o processo de mutação, não tenha sua informação perdida durante o processo de alocação.

Para a recombinação dos indivíduos, é proposta a técnica de cruzamento a dois pontos de corte. Para cada par de indivíduos (pais), será verificada a disponibilidade para cruzamento através da comparação com a probabilidade de cruzamento. Na hipótese de predisposição, são sorteados, aleatoriamente, dois *locus* para delimitar a região de corte na qual haverá a troca de material genético. A justificativa desta escolha é dada em função de ser uma recombinação que permite maior diversidade na troca de genes, quando comparada a troca a um ponto de corte, e não é uma troca totalmente aleatória, quando comparada ao cruzamento uniforme.

Assim, a recombinação das soluções é dada através da troca intervalar que contém posições candidatas de religadores, cujo tamanho é aleatório, permitindo a busca por novas soluções de equipamentos alocados, que podem fornecer um menor custo total de interrupção associado.

A tática empregada para a mutação consiste no teste um a um dos *bits* do cromossomo, promovendo maiores chances de varredura do espaço de busca de soluções, já que cada gene é testado individualmente, com uma probabilidade menor. Logo, existe a possibilidade de inversão da alocação de cada um dos religadores na solução atual.

Finalmente, o critério de parada é uma relação de compromisso entre os melhores indivíduos gerados dentro de uma demanda computacional não proibitiva. Assim, considera-se que o algoritmo convergiu quando existe a permanência de uma característica

ótima por um número determinado de gerações consecutivas, após um percentual considerado do total de gerações ou simplesmente quando atinge o número pré-estabelecido de gerações. O indivíduo que convergiu e os presentes na população de quintessência são considerados como as melhores respostas para o problema. No contexto da alocação, a solução de posições candidatas que fornecer o menor custo total de interrupção e se repetir ao longo do problema, é tomada como uma das melhores alocações de religadores possíveis para o problema.

## 5 Estudo de Caso

Este capítulo tem como principal objetivo aplicar e validar a proposta de metodologia para alocação ótima de religador considerando as VTCDs, apresentada no capítulo 4.

Ao final deste item, espera-se concluir se existe diferença no resultado da alocação quando se considera a variação de filosofias de proteção nos equipamentos de proteção.

### 5.1 Aplicação da Proposta

#### 5.1.1 Sistema Teste - IEEE 34 Barras Modificado Duplo Alimentador

Conforme citado, o *software* utilizado para a simulação de eventos de VTCDs foi o DistriView, uma vez que esta plataforma permite a aplicação dos mais diversos tipos de defeitos com suas possíveis combinações, além de permitir sua análise temporal através da resposta dos dispositivos de proteção.

A rede de distribuição utilizada corresponde ao Sistema Teste IEEE 34 Barras Modificado proposto por FILHO (2017) (vide anexo B). Sabe-se que os impactos experienciados por consumidores sensíveis possuem duas possibilidades, na qual a primeira é o desacoplamento elétrico para clientes localizados à jusante do dispositivo de religamento automático e a segunda é a possibilidade de afundamentos ou elevações de tensão para consumidores posicionados à montante. O segundo caso estende-se a unidades localizadas em alimentadores vizinhos.

Como se deseja avaliar o impacto da alocação de novos religadores na rede, propõe-se uma adaptação ao sistema teste visando contemplar as duas possibilidades citadas. Logo, o sistema no qual será aplicado o algoritmo de otimização é apresentado na Figura 27, que possui dois alimentadores na saída do transformador.

Os alimentadores são duplicados, um possuindo a mesma característica do outro. Os barramentos possuem o mesmo radical em sua nomenclatura, acrescendo apenas um prefixo para diferenciação. Por exemplo, a barra 1814 denota um nó presente no primeiro alimentador enquanto uma barra 2814 é localizada no segundo. As barras *IEEE 34 bus e 800* são as únicas que não possuem prefixo, pois são comuns a ambos circuitos. Todos os nós do sistema estão em coloração azul, com exceção dos barramentos monitorados, que estão em vermelho (800, 1822 e 2856).

Já os equipamentos instalados no sistema, cujos nomes estão destacados em verde, possuem numeração contínua, começando no alimentador 1 e finalizando no alimentador

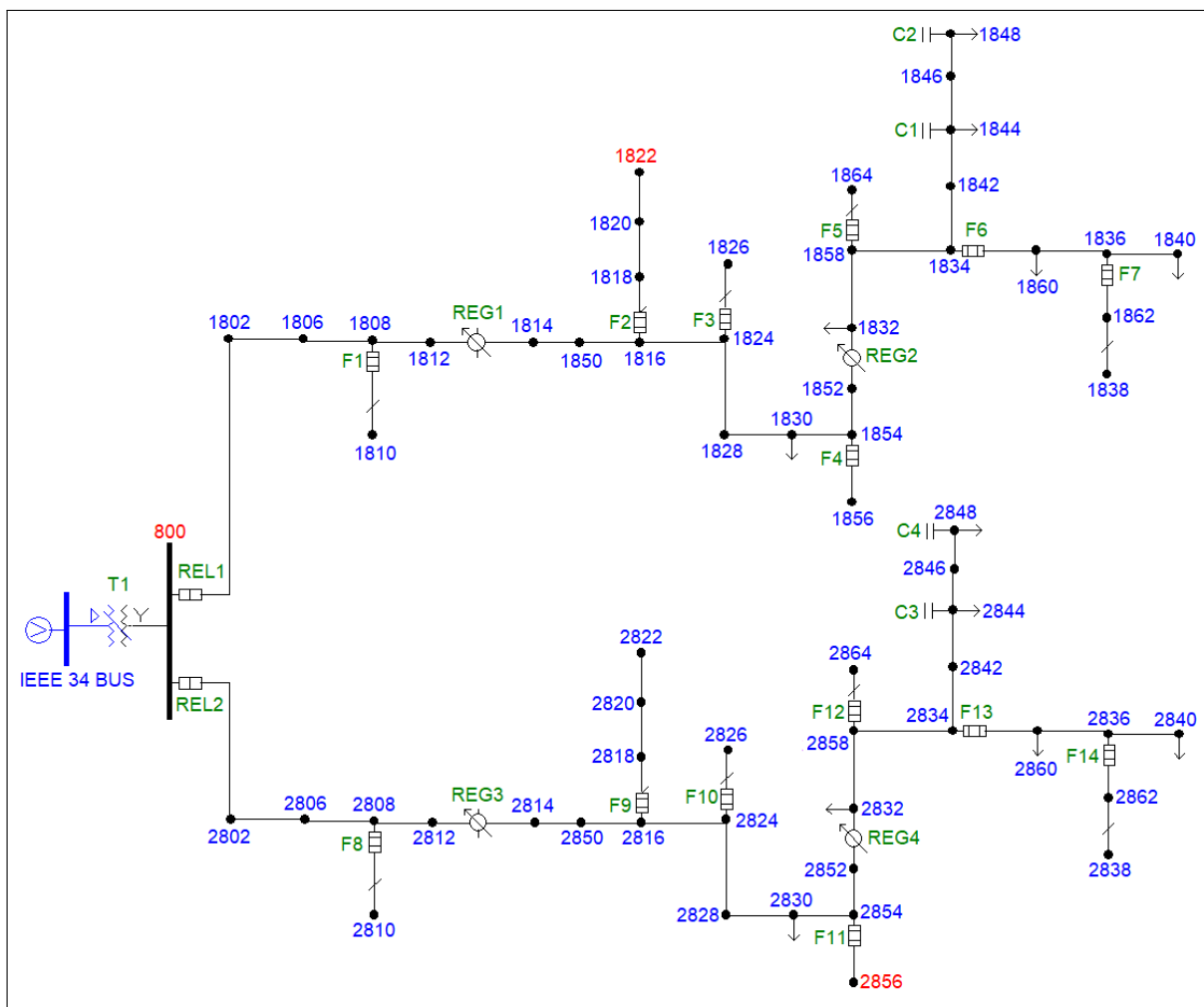


Figura 27 – Alteração do *IEEE 34 buses test feder* modificado (FILHO, 2017) – duplo alimentador.

2. São eles relatores (REL1-REL2), reguladores de tensão (REG1-REG4), banco de capacitores (C1-C4), chaves fusíveis (F1-F14) e o transformador (T1).

O equivalente do sistema e do transformador da SE são adequados para suportar o acréscimo de um novo alimentador, com as mesmas características. Os parâmetros e ajustes dos componentes do sistema estão disponíveis no anexo B.

Algumas compatibilizações foram realizadas nos trechos 816-818, 818-820, 820-822 e 854-856, nas quais consistiram na conversão de trechos monofásicos em trifásicos, com níveis de curto-circuito equivalentes. Assim, estes trechos deixaram de ser classificados com códigos 302, 302, 302 e 303 para 301, 301, 301 e 301 (vide Tabelas B6 e B7). As justificativas para estas adaptações são devido ao fato de as cargas sensíveis a VTCDs serem, preponderantemente, trifásicas e estes trechos são locais candidatos para alocação de relatores.

Similarmente, propôs-se a modificação do elo fusível de algumas chaves do sistema, com o objetivo de melhorar o intervalo de coordenação entre os relatores a serem alo-

cados com os dispositivos existentes (vide Tabela B5). As chaves denominadas F2 e F6 mudaram de 15K para 25K e o componente F7 alternou de 10K para 15K. A observação vale para os fusíveis correspondentes no segundo alimentador (F9, F13 e F14).

### 5.1.2 Parâmetros Considerados para Curtos-Circuitos e Otimização

Os parâmetros considerados para a técnica de simulação de eventos de VTCDs são:

- Foi usado o valor de 30 faltas anuais por 100 km. Adotou-se esse valor intermediário entre 13,8 kV e 69 kV (GARCIA; ALVES, 2011), (FONSECA, 1999), por não ser uma tensão típica de distribuição nacional (FILHO, 2017);
- A Tabela 17 apresenta os valores de impedâncias de falta máximos considerados, bem como a probabilidade de ocorrência associada;

Tabela 17 – Impedância máxima para cada tipo de falta (AMASIFEN, 2008)<sup>1</sup>, (HONORATO, 2014)<sup>2</sup>, (GARCIA; ALVES, 2011)<sup>3</sup>.

Tipo de falta	Impedância máxima entre fases	Impedância máxima para terra	Probabilidade de ocorrência
<i>Trifásica</i>	10 $\Omega^{1,2}$	-	3 % <sup>3</sup>
<i>Bifásica</i>	20 $\Omega^{1,2}$	-	9 % <sup>3</sup>
<i>Bifásica-Terra</i>	10 $\Omega^1$	30 $\Omega^{1,2}$	10 % <sup>3</sup>
<i>Monofásica-Terra</i>	-	30 $\Omega^{1,2}$	78 % <sup>3</sup>

- A probabilidade da natureza das faltas é dada: 20 % permanentes e 80 % temporárias (GUIGUER, 1988);
- As falhas temporárias possuem 90 % de serem eliminadas no 1° RA, 9 % no 2° RA e 1 % no 3° RA (CARVALHO, 2010);
- A condição pré-falta considerada é o perfil plano (*flat start*), cujo valor de tensão é igual a 1 p.u.;
- Horizonte de simulação igual a 50 anos.

Sobre o último item, faz-se uma observação de que não se pretende avaliar o impacto da mudança no horizonte de simulação da metodologia. Então, supõe-se que 50 anos de simulação sejam suficientes para estimar os eventos no sistema duplo-alimentador.

Nos aspectos da técnica de otimização, aplicou-se uma metodologia heurística para redução do espaço de busca de posições candidatas para alocação de religadores. Adotou-se o critério empregado pela empresa EDP (contratante do P&D) de até 4 dispositivos de religamento automático em série. Logo, esta restrição foi aplicada na definição do espaço de busca, favorecendo o algoritmo de otimização.

Neste ponto, vale ressaltar que ao considerar até 4 religadores em série, os tempos de exposição aos curtos-circuitos, para consumidores mais próximos à SE, são incrementados uma vez que há mais equipamentos alocados. Este fato pode-se traduzir em um elevado custo de parada de processos para as alternativas que possuem mais religadores alocados em série. Além disso, é notável o aumento da complexidade do estudo de coordenação e seletividade.

Foram elencadas seis possíveis posições para alocação de religadores em cada alimentador, quatro no tronco principal e dois em ramais laterais. A primeira delas, alocação fixa, é do religador no barramento de saída de subestação (800-802), por ser a proteção fundamental do alimentador. O segundo trecho candidato é 814-850, pela distância da SE (aproximadamente 22,5 km). O terceiro local é devido à posicionamento central do tronco principal e estar próximo a dois ramais laterais (850-816). O quarto e último candidato no tronco é o trecho 832-858, por estar próximo ao final do alimentador e fazer a coordenação de três ramais laterais rurais.

O primeiro candidato em ramal 816-818, quinto no total, é devido a uma UCSV sensível no final de um trecho longo (aproximadamente 19,3 km). Finalmente, o sexto local possível (854-856) é também em um ramal rural trifásico que possui uma UCSV.

A representação dessas posições em ambos alimentadores é observada na Figura 28. Preservaram-se apenas os equipamentos de proteção e os barramentos monitorados para facilitar a visualização. As posições candidatas são denominadas  $RCn$ , em que o intervalo de 1-6 correspondem às alocações no primeiro alimentador e a faixa de 7-12 são do segundo alimentador.

A metodologia de associação dos indivíduos foi implementada genericamente. O número total de combinações possíveis do problema é  $2^{(bits)n_{al}}$ , em que *bits* retrata o número de posições candidatas e  $n_{al}$  representa a quantidade de alimentadores. Logo, a dimensão do problema é de 4096 cenários, já que o número de *bits* é seis e o sistema possui dois alimentadores.

Porém, a ideia de usar o AG é para evitar a enumeração de todas as possibilidades previamente, pois dependendo do número de posições candidatas, este valor pode ser inviável de ser elencado.

Para contornar este contratempo, o algoritmo identifica, separadamente, o estado para o primeiro alimentador e logo após o estado para o segundo alimentador, facilitando o trabalho de números binários. Assim, a associação do indivíduo é dada pela conversão de dois números binários para dois inteiros ou vice-versa, dependendo da conveniência dentro do algoritmo.

Cada posição candidata está relacionada com um *locus* da codificação binária. Por comodidade, os religadores são associados ao *bit* de menor valor, em ordem crescente. Ou

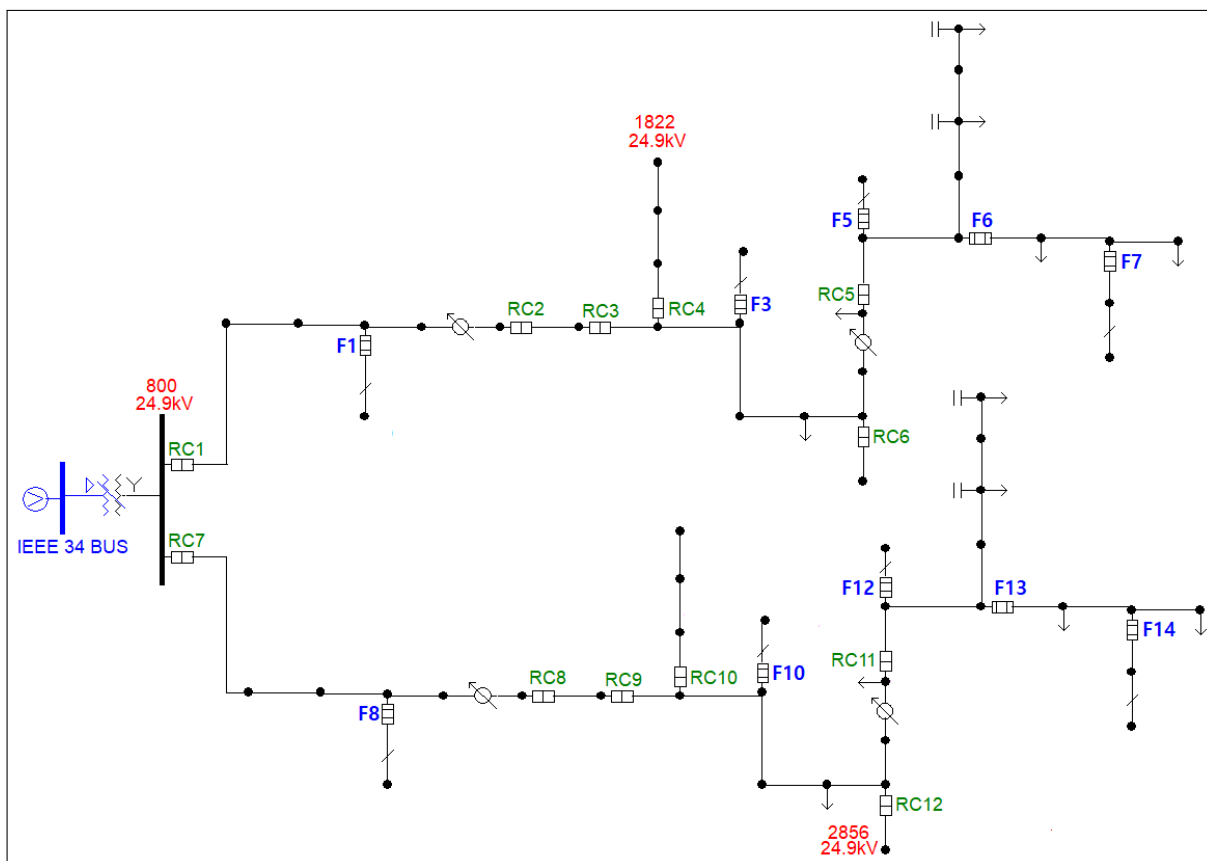


Figura 28 – Disposição de todos os relatores candidatos.

seja, o relator 1 ocupa o primeiro *bit*, o relator 2 corresponde ao segundo *bit* e assim sucessivamente. Por exemplo, um indivíduo cuja representação é 111111|000011 equivale ao número inteiro 63|3, o que ilustra a alocação de todos os relatores no primeiro alimentador e a presença dos relatores 1 e 2 no segundo alimentador.

Como se considera essencial a presença do primeiro relator na saída de cada alimentador, a primeira posição candidata torna-se mandatória. Assim, a nova dimensão do problema é dada por  $2^{(bits-1)n_{al}}$ , reduzindo para 32 estados em cada alimentador, gerando 1024 cenários possíveis.

Ainda como consequência, o manuseio dos números binários dar-se-á apenas aos correspondentes de números inteiros ímpares, já que a codificação de números inteiros pares desconsidera a alocação do primeiro dispositivo. Por exemplo, o número inteiro 4|2 equivale ao binário 000100|000010, o qual não ilustra um indivíduo possível para o problema.

Assim, realizou-se um estudo de coordenação e seletividade para cada um dos casos de um alimentador, pois isso equivale à análise do outro. Foram adotados ajustes que maximizavam, sempre que possível, o intervalo de coordenação entre os dispositivos. Observe que nem todos os casos é possível obter total coordenação e seletividade entre os relatores e chaves fusíveis, como esperado na prática.

Os ajustes considerados de cada um dos 32 cenários de alocação, em cada alimentador, são apresentados nas Tabelas 18 e 19. Foi adotado o modelo *CENTURION* com a curva *104* para todas as unidades de fase e terra, bem como suas funções instantânea e temporizada. Dentro de cada célula das funções 50 e 51, estão o valor da corrente de *pickup* [A] e o *time dial* [s], separados por um ponto e vírgula.

Tabela 18 – Estados e ajustes para os RC6-RC12, RC5-RC11 e RC4-RC10.

Estado	Binário	RC6-RC12				RC5-RC11				RC4-RC10			
		Fase		Neutro		Fase		Neutro		Fase		Neutro	
		50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]
1	1												
2	3												
3	5												
4	7												
5	9									130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
6	11									130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
7	13									130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
8	15									130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
9	17					130;1,4	120;5	50;1,4	40;30				
10	19					130;1,4	120;5	50;1,4	40;30				
11	21					130;1,4	120;5	50;1,4	40;30				
12	23					130;1,4	120;5	50;1,4	40;30				
13	25					130;1,4	120;5	50;1,4	40;30	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
14	27					130;1,4	120;5	50;1,4	40;30	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
15	29					130;1,4	120;5	50;1,4	40;30	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
16	31					130;1,4	120;5	50;1,4	40;30	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
17	33	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5								
18	35	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5								
19	37	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5								
20	39	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5								
21	41	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5					130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
22	43	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5					130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
23	45	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5					130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
24	47	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5					130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
25	49	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5	130;1,4	120;5	50;1,4	40;30				
26	51	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5	130;1,4	120;5	50;1,4	40;30				
27	53	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5	130;1,4	120;5	50;1,4	40;30				
28	55	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5	130;1,4	120;5	50;1,4	40;30				
29	57	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5	130;1,4	120;5	50;1,4	40;30	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
30	59	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5	130;1,4	120;5	50;1,4	40;30	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
31	61	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5	130;1,4	120;5	50;1,4	40;30	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5
32	63	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5	130;1,4	120;5	50;1,4	40;30	130;1,4	120;5	50;1,4	40;5

A disposição com que os pais trocam seus materiais genéticos, no cruzamento a dois pontos de corte, é dado pela taxa de cruzamento de 0,8. Já a mutação ponto a ponto, é utilizada uma taxa de 0,001.

Propõe-se o uso de 20 indivíduos para composição das populações do algoritmo, equivalendo a 2 vezes o número de genes ativos do problema, já que este valor está dentro da faixa, usualmente, empregada nestes tipos de estudos (FERREIRA, 2009).

Quanto ao número de gerações, considera-se que 30 iterações sejam o suficiente para promover a busca da alocação ótima de religadores, sem que haja comprometimento na demanda computacional.

São verificados se 10% dos indivíduos ótimos foram selecionados para o cruzamento, através do elitismo. Logo, podem ser selecionados de 0 a 2 dos melhores indivíduos da população anterior para substituir 0 a 2 dos piores indivíduos que compõem os pais da população atual.



Tabela 19 – Estados e ajustes para os RC3-RC9, RC2-RC8, RC1-RC7.

Estado	Binário	RC3-RC9				RC2-RC8				RC1-RC7			
		Fase		Neutro		Fase		Neutro		Fase		Neutro	
		50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]	50 [A;s]	51 [A;s]
1	1									130;1,4	120;10	50;1,4	40;30
2	3					130;1,4	120;10	50;1,4	40;30	490;1,4	120;30	390;1,4	40;50
3	5	130;1,4	120;10	50;1,4	40;30					380;1,4	120;30	290;1,4	40;50
4	7	130;1,4	120;10	50;1,4	40;30	380;1,4	120;30	290;1,4	40;50	490;1,4	120;40	390;1,4	40;70
5	9									260;1,4	120;20	180;1,4	40;30
6	11					260;1,4	120;20	180;1,4	40;30	490;1,4	120;30	390;1,4	40;50
7	13	260;1,4	120;20	180;1,4	40;30					380;1,4	120;30	290;1,4	40;50
8	15	260;1,4	120;20	180;1,4	40;30	380;1,4	120;30	290;1,4	40;50	490;1,4	120;50	390;1,4	40;70
9	17									230;1,4	120;20	180;1,4	40;50
10	19					230;1,4	120;20	180;1,4	40;50	490;1,4	120;30	390;1,4	40;70
11	21	230;1,4	120;20	180;1,4	40;50					380;1,4	120;30	290;1,4	40;70
12	23	230;1,4	120;20	180;1,4	40;50	380;1,4	120;30	290;1,4	40;70	490;1,4	120;50	390;1,4	40;90
13	25									260;1,4	120;20	180;1,4	40;50
14	27					260;1,4	120;20	180;1,4	40;50	490;1,4	120;40	390;1,4	40;70
15	29	260;1,4	120;20	180;1,4	40;50					380;1,4	120;40	290;1,4	40;70
16	31	260;1,4	120;20	180;1,4	40;50	380;1,4	120;40	290;1,4	40;70	490;1,4	120;50	390;1,4	40;90
17	33									260;1,4	120;15	100;1,4	40;30
18	35					130;1,4	120;10	120;1,4	40;30	490;1,4	120;40	390;1,4	40;50
19	37	130;1,4	120;10	120;1,4	40;30					380;1,4	120;40	290;1,4	40;50
20	39	130;1,4	120;10	120;1,4	40;30	380;1,4	120;40	290;1,4	40;50	490;1,4	120;50	390;1,4	40;70
21	41									260;1,4	120;15	100;1,4	40;30
22	43					260;1,4	120;15	100;1,4	40;30	490;1,4	120;30	390;1,4	40;50
23	45	260;1,4	120;15	100;1,4	40;30					380;1,4	120;30	240;1,4	40;50
24	47	260;1,4	120;15	100;1,4	40;30	380;1,4	120;30	240;1,4	40;50	490;1,4	120;50	390;1,4	40;70
25	49									230;1,4	120;15	180;1,4	40;50
26	51					230;1,4	120;15	180;1,4	40;50	490;1,4	120;30	390;1,4	40;70
27	53	230;1,4	120;15	180;1,4	40;50					380;1,4	120;40	290;1,4	40;70
28	55	230;1,4	120;15	180;1,4	40;50	380;1,4	120;40	290;1,4	40;70	490;1,4	120;50	390;1,4	40;90
29	57									260;1,4	120;20	180;1,4	40;50
30	59					260;1,4	120;20	180;1,4	40;50	490;1,4	120;40	390;1,4	40;70
31	61	260;1,4	120;20	180;1,4	40;50					380;1,4	120;40	290;1,4	40;70
32	63	260;1,4	120;20	180;1,4	40;50	380;1,4	120;40	290;1,4	40;70	490;1,4	120;60	390;1,4	40;90

A função objetivo usada neste problema nada mais é do que a própria função avaliação (equação 4.6), que consiste em avaliar o custo total de parada das UCSVs para a proposta de alocação atual. O melhor indivíduo é aquele que fornece o menor valor da função de avaliação.

As restrições utilizadas são o número total de equipamentos em série e o número total de dispositivos para alocação disponíveis. Muito embora o número de religadores em série tenha sido usada para elencar o espaço de busca do problema, o algoritmo possui esta consideração implementada, genericamente. Quanto ao número de dispositivos disponíveis, consideram-se 12 componentes.

Os limiares de sensibilidade adotados para as UCSVs foram estimadas através do estudo realizado em (COSTA, 2018). Sabe-se que o comportamento dos equipamentos são distintos, logo se adotou um valor intermediário para cada componente apresentado na Tabela 20. Os valores de custos de parada foram adotados arbitrariamente.

Tabela 20 – Parâmetros das UCSVs consideradas.

UCSV	Barramentos Monitorados	Tipo de UCSV	Limiar de Intensidade	Limitar de Duração	Custo de Parada
1	800	CLP	0,75 p.u.	0,150 s	R\$ 1.000,00
2	1822	Contator	0,65 p.u.	0,100 s	R\$ 1.200,00
3	2856	Inversor	0,70 p.u.	0,120 s	R\$ 1.500,00

O algoritmo é considerado que convergiu quando atingir o número máximo de iterações (30 gerações) ou na permanência da melhor característica por 10 iterações consecutivas após a metade do número total de gerações. Ou seja, o mínimo em que a otimização pode convergir é na 25ª geração, na ocorrência consecutiva de 10 vezes do indivíduo ótimo a partir da 15ª geração. Finalmente, compara-se o indivíduo obtido na convergência com os indivíduos da população de quintessência.

### 5.1.3 Apresentação dos Resultados

Os operadores do AG têm seus funcionamentos baseados em sorteios de números aleatórios. Porém, o *software* usado na construção do algoritmo utiliza uma rotina de geração de números pseudo-aleatórios, a qual depende de um número inicial (semente). Para permitir que as inferências de resultados fossem adequadas para os casos simulados, utilizou-se a mesma semente para geração de números pseudo-aleatórios. Assim, torna-se possível verificar o impacto da mudança de cada variável na metodologia de otimização.

Propõem-se quatro casos de simulação, que consistem em variações na filosofia de proteção mantendo-se as posições candidatas de instalação dos religadores.

#### 5.1.3.1 Caso 1 - Filosofia 1R3L

O caso 1 consiste em ajustar os dispositivos de proteção que realizam RA na filosofia 1R3L. O algoritmo convergiu pelo número máximo de 30 gerações. O indivíduo ótimo obtido através da otimização foi o 100001|001101 (33|13), o qual está ilustrado na Figura 29.

A alocação sugerida representa o equipamento RC6 no alimentador 1 e os religadores RC9 e RC10 no segundo alimentador, promovendo um valor de *fitness* igual a R\$ 114.817,00. A Tabela 21 apresenta os valores dos eventos médios registrados nos barramentos monitorados devido à alocação de religadores proposta.

Tabela 21 – Eventos médios na filosofia 1R3L do indivíduo ótimo (caso 1).

<b>Indivíduo Ótimo: 100001 001101</b>			
<b>Tipo de Evento</b>	<b>BM 800</b>	<b>BM 1822</b>	<b>BM 2856</b>
<i>IL</i>	0	4,74	5,65
<i>IC</i>	0	31,46	27,18
<i>AT</i>	8,44	5,21	4,96
<i>ET</i>	0	28,52	35,45

Ressalva-se da premissa adotada que, embora se apresentem os valores médios estimados para as ETs, estes eventos são registrados e não contabilizados. A apresentação de seus valores na tabela serve apenas para mostrar os eventos observados nos barramentos monitorados.

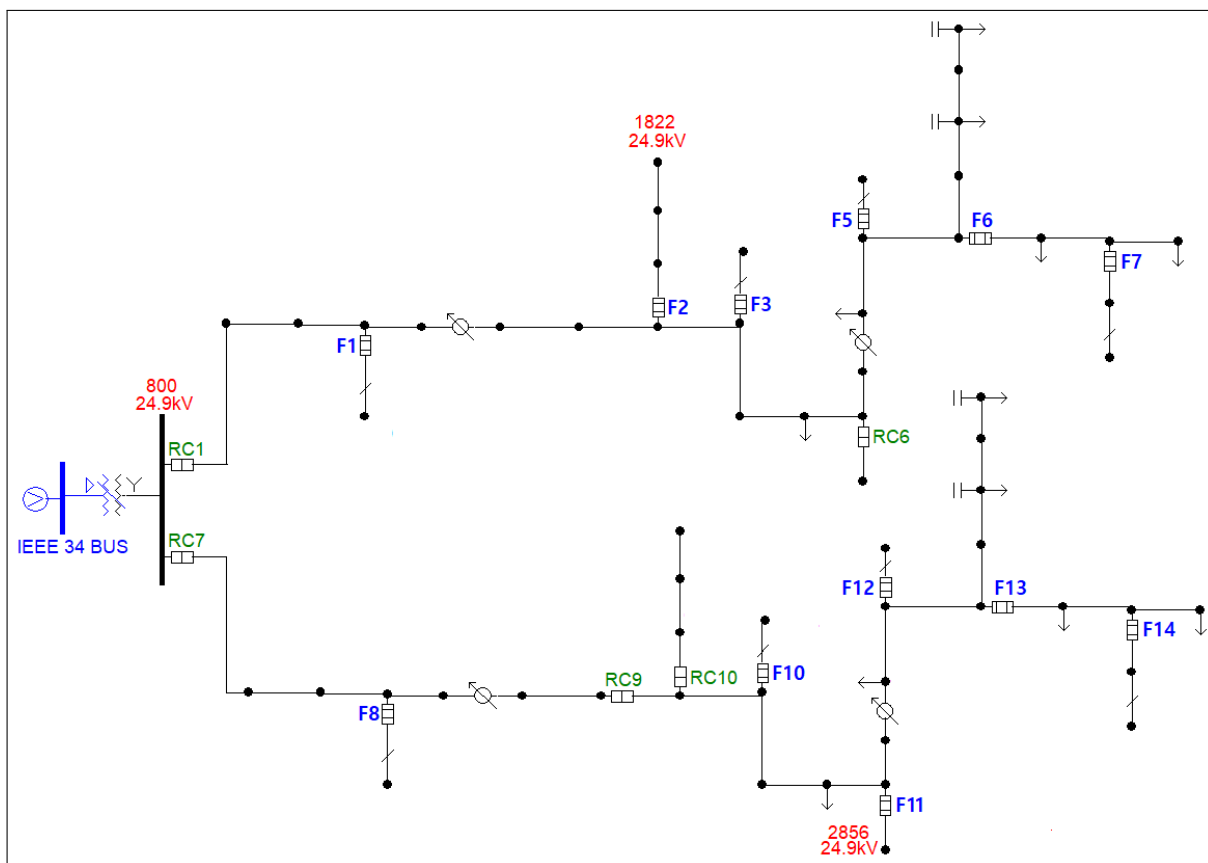


Figura 29 – Alocação ótima de relatores sugeridos para o caso 1.

Assim, percebe-se que o consumidor mais impactado com paradas de processo é o localizado no barramento 1822, cuja sensibilidade é definida, principalmente, por contadores, com 41,41 eventos médios (IL, IC e AT). Embora seja a UCSV que sofre mais eventos, ela não representa o cliente mais custoso à distribuidora. Perceba que a UCSV possui um custo de parada unitária de R\$ 1.500,00 (vide Tabela 20) e um total de 37,79 eventos médios, correspondendo a custo total de parada de R\$ 56.685,00 equivalendo a quase 50% do custo total da alternativa.

A presença de ambos dispositivos na entrada de linha (RC1 e RC7) é mandatória, uma vez que é a proteção principal destes circuitos. As demais posições candidatas que receberam relatores podem ser devido a um conjunto de possibilidades entre o número de eventos médios e custo de parada das três UCSVs.

Uma das maneiras de acompanhar o desempenho da metodologia de otimização é através de gráficos de evolução do valor médio da aptidão dos indivíduos da população. A resposta do AG frente ao cenário proposto é ilustrada na Figura 30.

Os pontos em azul retratam os valores de *fitness* médios para os indivíduos da população atual, enquanto os dados em laranja representam os melhores indivíduos de cada geração, os quais são armazenados na população de quintessência, quando na sua primeira ocorrência. Observa-se a tendência dos pontos em azul a diminuírem os valores

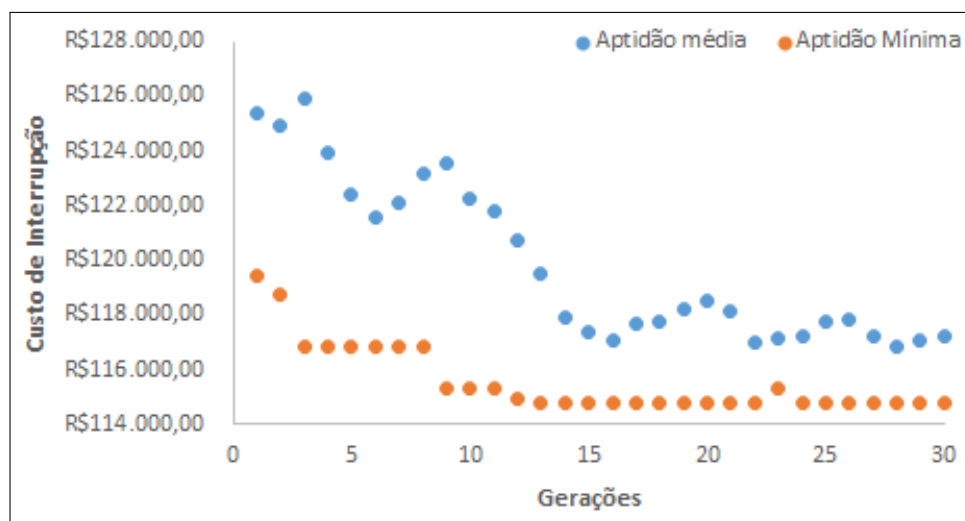


Figura 30 – Evolução do *fitness* da população para o caso 1.

de custos de parada com o passar das gerações, ilustrando a sobrevivência de indivíduos mais aptos. Os operadores genéticos de seleção e cruzamento são responsáveis pelo comportamento ondular na tendência do *fitness* médio, uma vez que têm o papel de buscar a diversidade nos materiais genéticos.

Para obter melhoria na aptidão geral da população, novos indivíduos ótimos são encontrados e, conseqüentemente, o valor do *fitness* associado diminui. Percebe-se que na iteração 13 o processo de minimização já encontra o melhor indivíduo para o caso em questão. Note que o algoritmo não convergiu por repetição do indivíduo ótimo pois na geração 23 houve uma busca por novas características dominantes, porém sem sucesso. Neste caso, a população retomou à evolução natural no ótimo encontrado.

O estado inicial da rede, representado pelo binário 000001|000001 (1|1), possui custo total de parada de R\$ 126.904,00. Observa-se que houve redução de 9,52% no custo de parada de produção. Os fenômenos de VTCD médios estimados para a alocação inicial são apresentados na Tabela 22, bem como as variações relativas com indivíduo ótimo sugerido.

Tabela 22 – Eventos médios na filosofia 1R3L para o estado inicial (caso 1) e variações relativas para o indivíduo ótimo (caso 1).

Tipo de Evento	Indivíduo Inicial: 000001 000001 (caso 1)			Indivíduo Ótimo: 100001 001101 (caso 1)		
	Eventos Médios			Variação Relativa (%)		
	BM 800	BM 1822	BM 2856	BM 800	BM 1822	BM 2856
IL	0	4,42	4,07	-	+7,24	+38,82
IC	0	35,06	38,96	-	-10,27	-30,24
AT	6,64	2,59	3,49	+27,11	+101,16	+42,12
ET	0	27,54	34,08	-	+3,56	+4,02

As variações relativas dão-se a partir da diferença entre o valor do caso base com

o estimado no indivíduo ótimo, dividido pelo montante do caso inicial. Os resultados positivos indicam que o indivíduo ótimo teve aumento, quando comparado ao indivíduo inicial. Já os valores negativos retratam uma redução nos indicadores da proposição ótima. Como esperado, inserir religadores no sistema teste promoveu a redução das interrupções de curta duração em 10,27 e 30,24 % para as UCSVs 2 e 3, respectivamente.

Também, o número médio de afundamentos de tensão aumenta devido às tentativas de RA, fato observado para todas as UCSVs. Os AT observados aumentaram em 27,11, 101,16 e 42,12 % para as UCSVs 1, 2 e 3 respectivamente.

Também foi observado o aumento do número médio de interrupções de longa duração para as UCSVs 2 e 3, com incrementos respectivos de 7,24 e 38,82 %.

Aparentemente, as três UCSVs são prejudicadas com o grande aumento de ocorrências de AT (vide Tabela 22). No entanto, o algoritmo é capaz de encontrar a solução cuja combinação de fenômenos resulta em um menor número de paradas de processo das UCSV levando ao menor custo possível.

### 5.1.3.2 Caso 2 - Filosofia 2R2L

O segundo cenário simulado consiste em avaliar a filosofia 2R2L em todos os dispositivos alocados. A resposta da otimização encontrou o mesmo indivíduo ótimo obtido pelo caso anterior, cuja alocação representa o binário 100001|001101 (33|13) (vide Figura 29). Contudo, o novo caso alterou o valor de *fitness* para R\$ 115.141,00. A Tabela 23 apresenta os valores dos eventos médios registrados nos barramentos monitorados devido à alocação de religadores proposta, na qual se diferencia da anterior por uma atuação a mais através da curva rápida e uma atuação a menos na curva lenta.

Tabela 23 – Eventos médios na filosofia 2R2L do indivíduo ótimo (caso 2).

<b>Tipo de Evento</b>	<i>Indivíduo Ótimo: 100001 001101 (caso 2)</i>		
	<b>Eventos Médios</b>		
	<i>BM 800</i>	<i>BM 1822</i>	<i>BM 2856</i>
<i>IL</i>	0	4,73	5,65
<i>IC</i>	0	31,74	27,18
<i>AT</i>	8,84	5,21	4,96
<i>ET</i>	0	28,60	35,45

A alocação inicial da rede (binário 000001|000001) também foi verificada para o segundo cenário, possui um *fitness* de R\$ 129.712,00. Os fenômenos de VTCD médios estimados para a alocação inicial, e suas variações relativas para o indivíduo ótimo, são apresentados na Tabela 24. No caso 2, houve uma redução de 11,23% no custo total de paradas.

O acréscimo de uma nova tentativa rápida para eliminação de faltas temporárias implica em aumentos de ATs e ILs, com redução de ICs. As ILs sofreram aumento de 11,03

Tabela 24 – Eventos médios na filosofia 2R2L para o estado inicial (caso 2) e variações relativas para o indivíduo ótimo (caso 2).

Tipo de Evento	Indivíduo Inicial: 000001/000001 (caso 2)			Indivíduo Ótimo: 100001/001101 (caso 2)		
	Eventos Médios			Variação Relativa (%)		
	BM 800	BM 1822	BM 2856	BM 800	BM 1822	BM 2856
IL	0	4,26	4,07	-	+11,03	+38,82
IC	0	37,56	38,96	-	-15,50	-30,24
AT	6,64	2,59	3,49	+27,11	+101,16	+42,12
ET	0	29,16	34,08	-	-1,92	+4,02

e 38,82 % para as UCSVs 2 e 3, respectivamente. Observa-se reduções nas ICs das UCSVs 2 e 3 cerca de 15,50 e 30,24 %. Finalmente, os ATs aumentaram de forma substancial.

Em relação à otimização, o cenário 2 convergiu pela repetição do indivíduo ótimo por 10 gerações seguidas, sendo a última a 27ª iteração. A evolução dos valores médios e mínimos de aptidão são apresentados na Figura 31

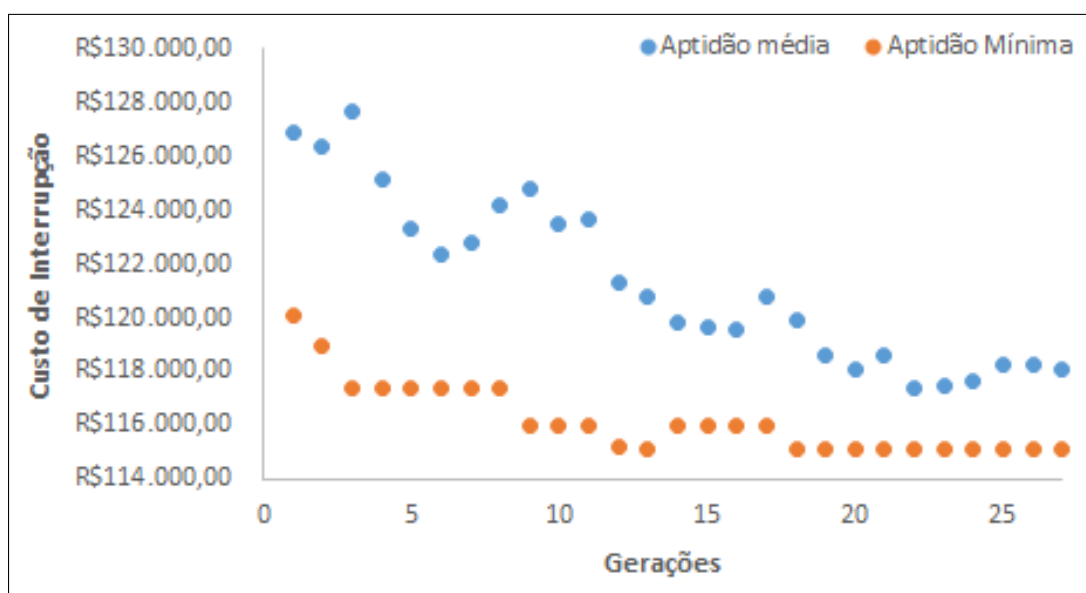


Figura 31 – Evolução do *fitness* da população para o caso 2.

Percebe-se um pequeno truncamento entre as gerações 14 a 17, no qual se observa um ligeiro aumento no *fitness* do melhor indivíduo da população, resultado da investigação sucessiva por uma característica diferente, porém ótima, inserida pela diversificação dos operadores genéticos.

### 5.1.3.3 Caso 3 - Filosofia 1L

O terceiro cenário considerado é a aplicação da filosofia 1L, na qual consiste na operação seletiva dos dispositivos de proteção. Assim, os religadores atuarão para faltas em suas respectivas ZP e também em retaguarda, sem realizar tentativas de RA para salvar os fusíveis das chaves instaladas em ramais laterais.

A rotina de otimização encontrou como indivíduo ótimo a correspondência binária 100101|001101 (37|13). Os valores médios dos eventos de VTCDs estimados são mostrados na Tabela 25, resultando em uma aptidão igual a R\$ 72.212,00.

Tabela 25 – Eventos médios na filosofia 1L do indivíduo ótimo (caso 3).

Tipo de Evento	Indivíduo Ótimo: 100101 001101 (caso 3)		
	Eventos Médios		
	BM 800	BM 1822	BM 2856
IL	0	21,93	20,27
IC	0	0	0
AT	5,00	4,33	3,53
ET	0	18,20	22,33

A Figura 32 ilustra a alocação sugerida pela otimização, observando-se a presença dos religadores RC3 e RC6 no alimentador 1 e os equipamentos RC9 e RC10 no segundo alimentador.

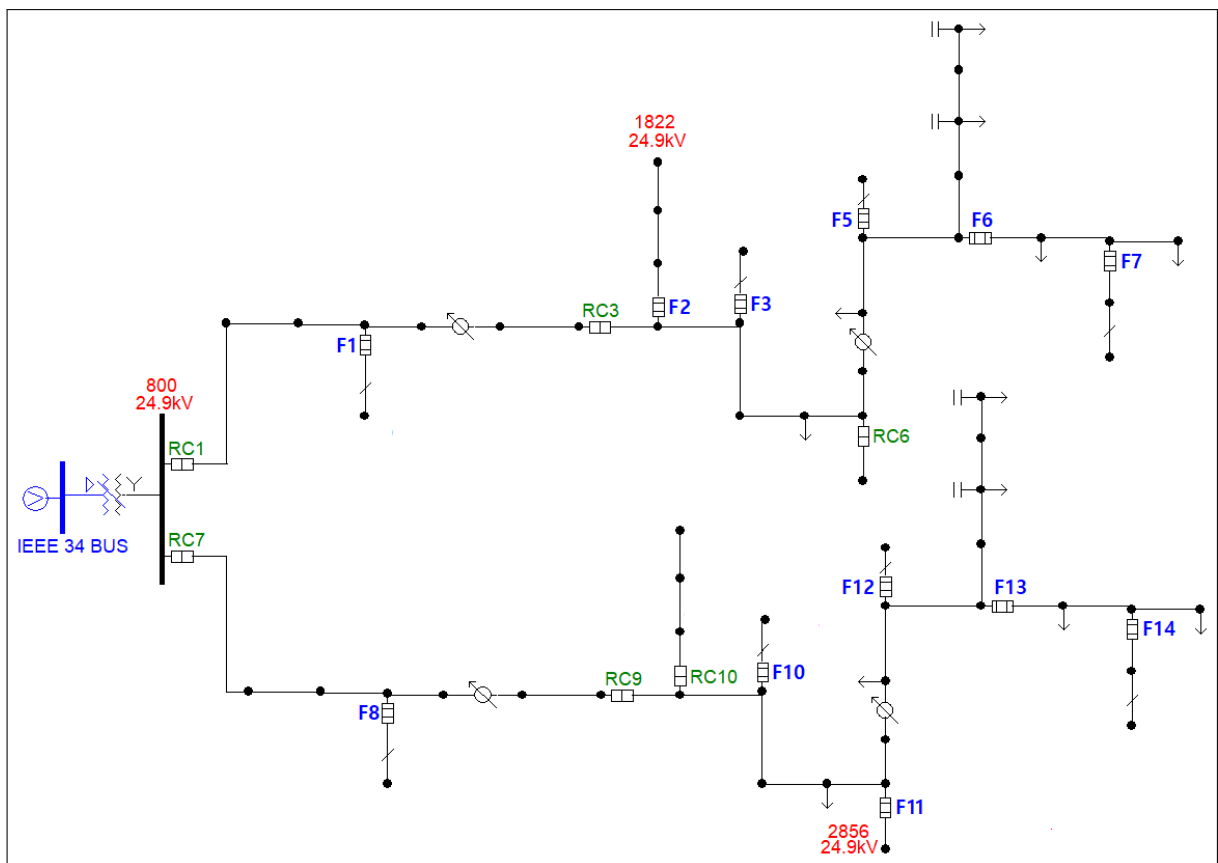


Figura 32 – Alocação ótima de religadores sugeridos para o caso 3.

A utilização de uma filosofia totalmente seletiva impede que as UCSVs experienciem ICs. Em contrapartida, não dá oportunidade ao sistema de proteção de realizar tentativas de RAs para evitar as ILs causadas por faltas transitórias, já que os eventos dessa natureza representam uma parte considerável dos defeitos.

Neste caso como não há contabilização de IC, a FO é ponderada pela soma de IL e AT, associados aos custos de paradas de cada UCSV.

A Tabela 26 apresenta os eventos médios estimados para o caso inicial da rede (binário 000001|000001), na filosofia 1L. Verificou-se um valor de aptidão de R\$ 78.150,00. Para o terceiro cenário, verifica-se uma melhoria de 7,60% na função de avaliação.

Tabela 26 – Eventos médios na filosofia 1L para o estado inicial (caso 3) e variações relativas para o indivíduo ótimo (caso 3).

<b>Tipo de Evento</b>	<i>Indivíduo Inicial: 000001 000001 (caso 3)</i>			<i>Indivíduo Ótimo: 100101 001101 (caso 3)</i>		
	<b>Eventos Médios</b>			<b>Variação Relativa (%)</b>		
	<i>BM 800</i>	<i>BM 1822</i>	<i>BM 2856</i>	<i>BM 800</i>	<i>BM 1822</i>	<i>BM 2856</i>
<i>IL</i>	0	21,15	20,89	-	+3,69	-2,97
<i>IC</i>	0	0	0	-	-	-
<i>AT</i>	3,93	6,00	6,87	+27,23	-27,83	-48,62
<i>ET</i>	0	18,77	21,96	-	-3,04	+1,68

Verifica-se que o indivíduo ótimo do caso 3 promove aumento nos ATs estimados para a UCSV 1 de 27,22 %. Para a UCSV 2, a alocação aumenta as ILs porém reduz os ATs em 3,69 % e 27,83 %, respectivamente. Para a UCSV 3 notam-se reduções de 2,97 % e 48,62 % para as ILs e ATs, respectivamente.

Na Figura 33 é apresentado o comportamento da população ao longo das gerações, onde se captura o indivíduo ótimo já na terceira geração.

Note que ele mantém-se presente na população até o final das gerações. A rotina de otimização promove uma rápida disseminação de características ótimas, de forma que a média de aptidão da população fica próxima do melhor indivíduo. Entre as gerações 14 e 19, a população ainda possui indivíduos com genes diferentes, promovendo uma busca por outras alocações ótimas. Porém, observa-se que o indivíduo ótimo encontrado é global e, a partir deste ponto, sua presença nas gerações finais é dada em grandes proporções.

#### 5.1.3.4 Caso 4 - Filosofia 4L

O quarto caso consiste na última variação de filosofia de proteção empregada na alocação de religadores que é a possibilidade de quatro atuações pela curva lenta. O AG convergiu pelo limite máximo de gerações, encontrando o indivíduo ótimo 100001|011011 (33|27), ilustrado na alocação da Figura 34.

Sugeriu-se a instalação do religador RC6 no alimentador 1 e dos equipamentos RC8, RC10 e RC11 no segundo alimentador, promovendo um valor de *fitness* igual a R\$ 114.324,00. Os eventos médios estimados para as UCSVs, frente a esta proposta de alocação no caso 4, são apresentados na Tabela 27.

O cenário de alocação inicial, para o caso 4, tem seus eventos médios estimados



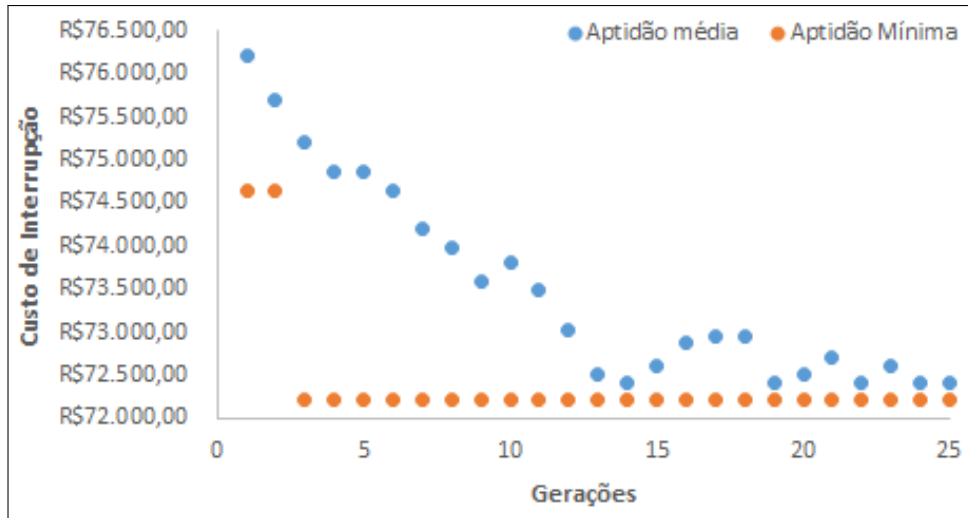


Figura 33 – Evolução do *fitness* da população para o caso 3.

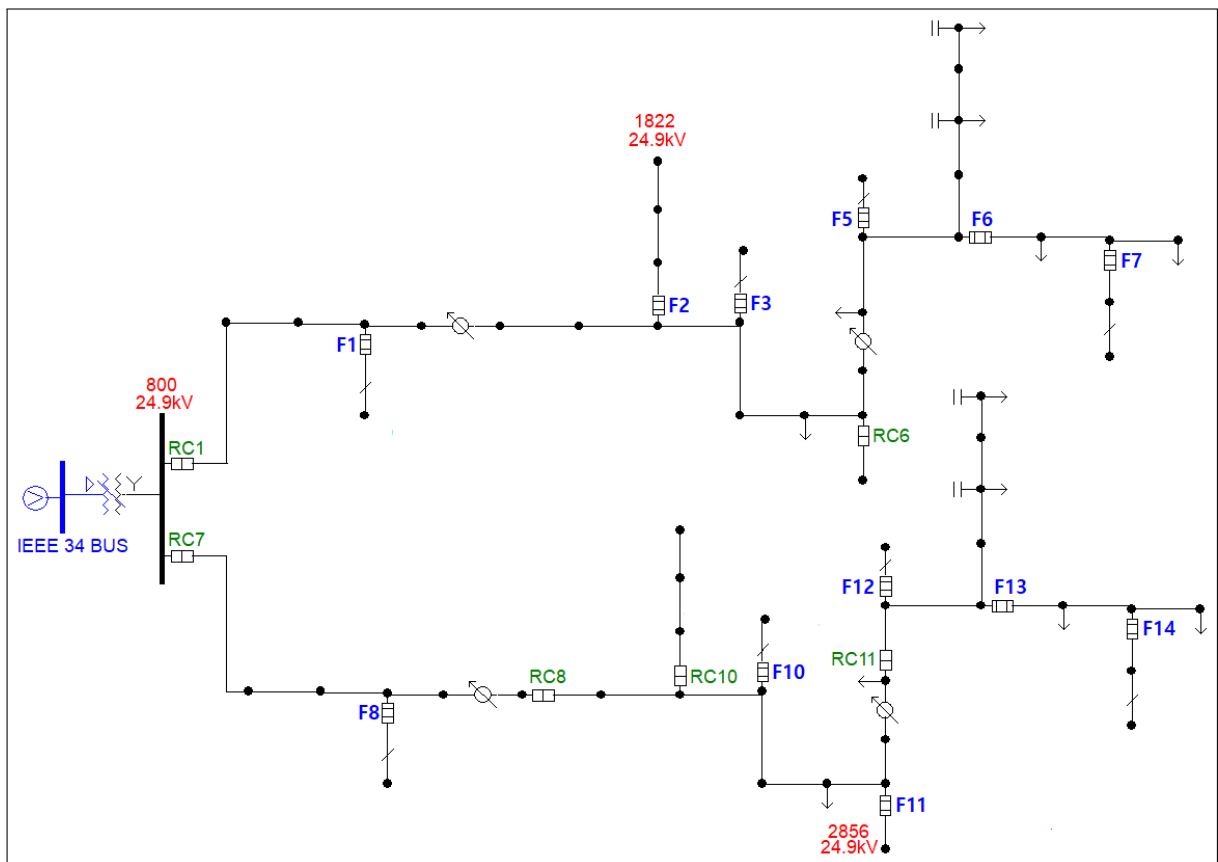


Figura 34 – Alocação ótima de religadores sugeridos para o caso 4.

Tabela 27 – Eventos médios na filosofia 4L do indivíduo ótimo (caso 4).

<b>Tipo de Evento</b>	<i>Indivíduo Ótimo: 100001/011011</i> (caso 4)		
	<b>Eventos Médios</b>		
	<i>BM 800</i>	<i>BM 1822</i>	<i>BM 2856</i>
<i>IL</i>	0	9,73	5,44
<i>IC</i>	0	24,80	24,60
<i>AT</i>	9,90	6,19	7,00
<i>ET</i>	0	27,68	32,18

conforme apresentados na Tabela 28. Este indivíduo possui um valor de aptidão de R\$ 120.908,00.

Tabela 28 – Eventos médios na filosofia 4L para o estado inicial (caso 4) e variações relativas para o indivíduo ótimo (caso 4).

<b>Tipo de Evento</b>	<i>Indivíduo Inicial: 000001/000001</i> (caso 4)			<i>Indivíduo Ótimo: 100001/011011</i> (caso 4)		
	<b>Eventos Médios</b>			<b>Variação Relativa (%)</b>		
	<i>BM 800</i>	<i>BM 1822</i>	<i>BM 2856</i>	<i>BM 800</i>	<i>BM 1822</i>	<i>BM 2856</i>
<i>IL</i>	0	9,73	5,72	-	0	-4,90
<i>IC</i>	0	24,80	26,68	-	0	-7,80
<i>AT</i>	7,76	6,71	10,04	+27,58	-7,75	-30,28
<i>ET</i>	0	26,62	28,47	-	+3,98	+13,03

Como não há religadores alocados no tronco do alimentador 1 à jusante do ramal da UCSV 2, não são esperadas mudanças nas quantidades de ICs e ILs para este consumidor. Observa-se que o indivíduo ótimo promove redução de 7,75 % para os ATs médios neste ponto monitorado.

O impacto da inserção de religadores em série é verificado para a UCSV 1, no qual os ATs sofrem aumentos de 27,58 % para o indivíduo ótimo encontrado. A presença do equipamento RC11 tem seus impactos pronunciados na UCSV 3, contribuindo para reduzir as ILs e ICs em 4,90 e 7,80 %, respectivamente. Em relação aos ATs, nota-se redução de 30,28 %.

A evolução do AG para o caso 4 é apresentada na Figura 35. O indivíduo ótimo foi obtido através da convergência da rotina pelo número máximo de gerações.

Neste caso observa-se a importância da população de quintessência. Um indivíduo de melhor característica genética foi encontrado na oitava geração e manteve-se até a décima quarta, porém na tentativa de buscar outros genes ótimos (gerações 15 a 18), o algoritmo conduziu a população a um ótimo regional. O melhor indivíduo ainda foi encontrado na geração 22, contudo devido a uma mutação, o gene ótimo foi perdido na população.

Pode-se observar dos pontos azuis, que descrevem o *fitness* médio da população atual, incrementos nas aptidões devido as buscas de características ótimas. Diferente dos

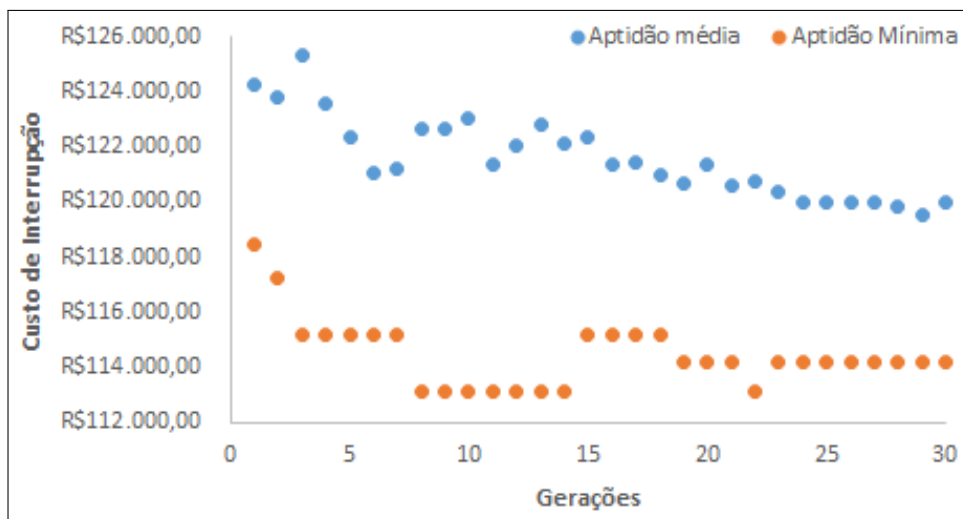


Figura 35 – Evolução do *fitness* da população para o caso 4.

demais casos, verifica-se o grande distanciamento entre as duas sequências de aptidões, demonstrando que, embora o algoritmo tenha convergido para uma característica ótima, os genes mais fortes não se expressavam em grandes proporções nos indivíduos presentes.

A Figura 36 ilustra a alocação ótima do indivíduo presente na população de quintessência. Observa-se a instalação do religador RC6 no primeiro alimentador, enquanto se sugere a alocação dos equipamentos RC10 e RC11 no alimentador 2.

Tal indivíduo possui seus eventos médios estimados apresentados na Tabela 29. Seu valor de aptidão equivalente é R\$ 113.150,00 sua representação binária é 100001|011001 (33|25).

Tabela 29 – Eventos médios na filosofia 4L para o indivíduo da população de quintessência (caso 4) e variações relativas para o indivíduo convergido (caso 4).

Tipo de Evento	Indivíduo Ótimo: 100001 011001 (caso 4 - quintessência)			Indivíduo Ótimo: 100001 011011 (caso 4 - critério de parada)		
	Eventos Médios			Variação Relativa (%)		
	BM 800	BM 1822	BM 2856	BM 800	BM 1822	BM 2856
IL	0	9,73	5,44	-	0	0
IC	0	24,80	24,60	-	0	0
AT	8,99	5,97	7,00	+10,12	+3,69	0
ET	0	27,15	32,74	-	+1,95	-1,71

A característica perdida na população foi devido à mutação do *locus* 8, que corresponde à alocação de RC8. Assim, a inserção deste equipamento no indivíduo inviabilizou, parcialmente, o reaparecimento do melhor indivíduo. Associado a este fato, existem outros seres que também não manifestavam a alocação de RC8, porém parte não estava disponível para cruzamento e os demais não trocaram materiais genéticos neste *locus*, impossibilitando o surgimento do melhor indivíduo da população de quintessência.

A não alocação de RC8 promove reduções nos ATs das UCSVs 1 e 2. De acordo com

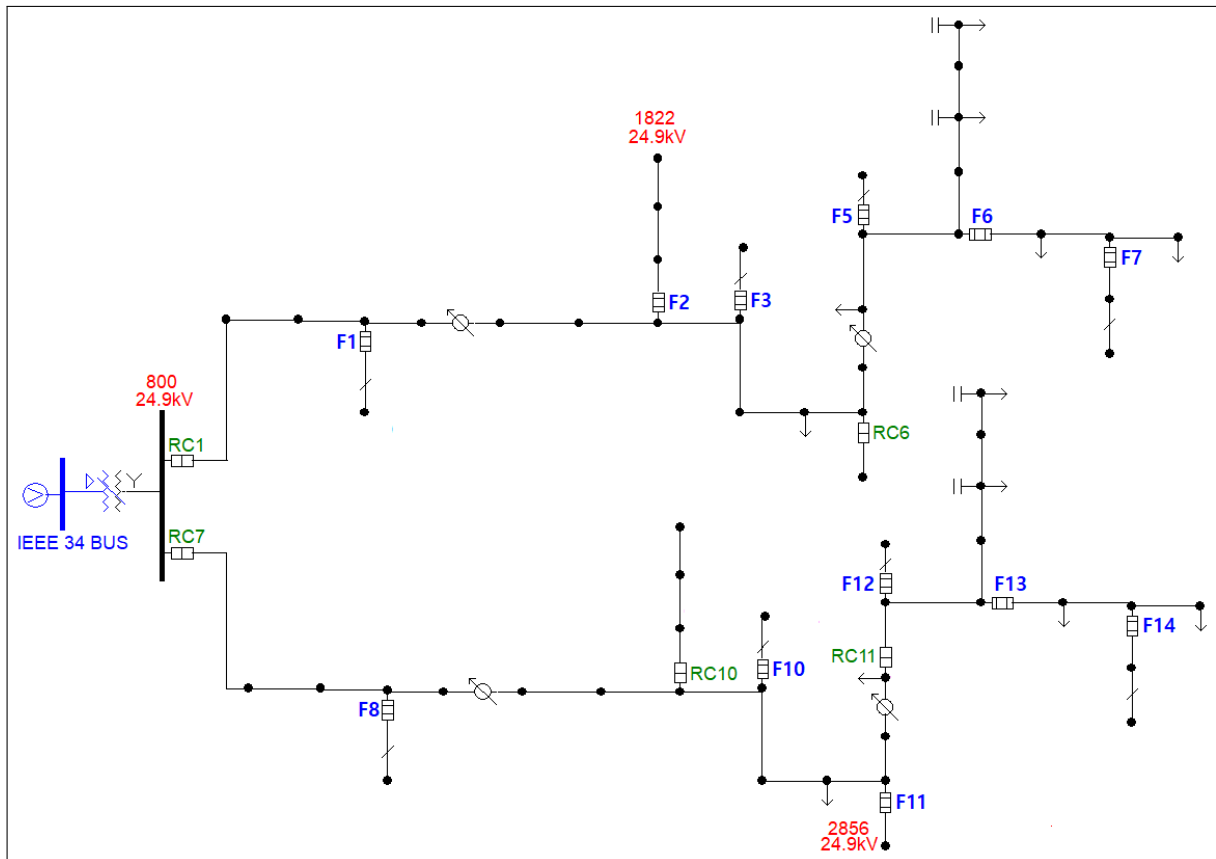


Figura 36 – Alocação ótima de relatores sugeridos para o caso 4.

a Tabela 29, o indivíduo convergido possui aumentos de 10,12 % e 3,69 % respectivamente, quando comparados ao indivíduo da população de quintessência.

#### 5.1.3.5 Comparações entre Casos

Por fim, as informações relativas a todos os casos analisados são apresentadas na Tabela 30. Desta maneira, é possível avaliar o impacto que as diferentes filosofias de proteção têm sobre cada consumidor e também sobre o sistema de distribuição como um todo.

Tomou-se a filosofia 1L como referência por ser o esquema de proteção que resultou no menor custo de parada de produção, seja para cada UCSV ou para o conjunto de consumidores.

Como a UCSV 1 está posicionada à montante de todo o sistema, é o cliente que possui o menor custo de parada associado, uma vez que somente é sensibilizada devido aos ATs. A alocação encontrada para a filosofia 4L impõe o maior custo de parada de produção para este cliente.

Em relação aos demais consumidores instalados ao longo do sistema de distribuição, observa-se que o número de ILs diminui consideravelmente, para todas as filosofias que

Tabela 30 – Resumo de eventos médios estimados das alocações ótimas, para cada UCSV em todas as filosofias, com seu custo individual e diferença percentual em relação à referência.

		Filosofias			
		1R3L	2R2L	1L (referência)	4L
UCSV 1 (BM 800)	<i>IL</i>	0	0	0	0
	<i>IC</i>	0	0	0	0
	<i>AT</i>	8,44 (+68,8 %)	8,44 (+68,8 %)	5,00	8,99 (+79,8 %)
	<i>ET</i>	0	0	0	0
	<i>Custo</i>	R\$ 8.440,00 (+68,8 %)	R\$ 8.440,00 (+68,8 %)	R\$ 5.000,00	R\$ 8.990,00 (+79,8 %)
UCSV 2 (BM 1822)	<i>IL</i>	4,74 (-78,39 %)	4,73 (-78,43 %)	21,93	9,73 (-55,63 %)
	<i>IC</i>	31,46	31,74	0,00	24,80
	<i>AT</i>	5,21 (+20,32 %)	5,21 (+20,32 %)	4,33	5,97 (+37,88 %)
	<i>ET</i>	28,52 (+56,70 %)	28,60 (+57,14 %)	18,20	27,15 (+49,18 %)
	<i>Custo</i>	R\$ 49.692,00 (+57,69 %)	R\$ 50.016,00 (+58,72 %)	R\$ 31.512,00	R\$ 48.600,00 (+54,23 %)
UCSV 3 (BM 2856)	<i>IL</i>	5,65 (-72,13 %)	5,65 (-72,13 %)	20,27	5,44 (-73,16 %)
	<i>IC</i>	27,18	27,18	0,00	24,60
	<i>AT</i>	4,96 (+40,51 %)	4,96 (+40,51 %)	3,53	7,00 (+98,30 %)
	<i>ET</i>	35,45 (+58,76 %)	35,45 (+58,76 %)	22,33	32,18 (+44,11 %)
	<i>Custo</i>	R\$ 56.685,00 (+58,78 %)	R\$ 56.685,00 (+58,78 %)	R\$ 35.700,00	R\$ 55.560,00 (+55,63 %)
Custo Total		R\$ 114.817,00 (+59,00 %)	R\$ 115.141,00 (+59,45 %)	R\$ 72.212,00	R\$ 113.150,00 (+56,69 %)

envolvam tentativas de religamento, permitem que boa parte das faltas transitórias sejam eliminadas. Conseqüentemente, verifica-se o aparecimento de ICs nestes consumidores.

A UCSV 2 mostra-se como o consumidor que mais tem paradas de processos devido aos eventos de VTCD (ILs, ICs e ATs), para todas as filosofias consideradas. O esquema que promove maiores perdas a este consumidor é o 2R2L.

Já a UCSV 3 sofre menos paradas de processos gerais que a UCSV 2, porém o seu custo total de parada é superior, mostrando-se assim como o cliente mais importante para a distribuidora. Devido ao posicionamento desta carga e dos ajustes dos indivíduos ótimos sugeridos pelos casos 1 e 2, esta UCSV não sofre mudanças nos seus eventos médios de VTCD e, conseqüentemente, possui o mesmo prejuízo de parada de processo para as filosofias 1R3L e 2R2L.

Também, é possível verificar nos casos 1 e 2 que os eventos estimados, para ambas UCSVs 2 e 3, fogem do esperado com reduções de ILs e aumentos de ICs, quando comparadas ao caso 4.

A UCSV 3 mostra-se menos sensível para variações de ILs devido à mudança no esquema de proteção, quando comparada à UCSV 2.

Embora seja o esquema de proteção que é mais indicado para a qualidade do serviço, a filosofia de proteção 2R2L é a que provoca o maior custo para a distribuidora de energia, ao se considerarem as paradas de processo devido às VTCDs.

A Tabela 31 apresenta um panorama geral dos religadores alocados nos quatro casos simulados.

Observa-se que os religadores RL 6, RL 9 e RL 10 foram os candidatos mais presentes nas alocações propostas pelo algoritmo de otimização. Logo, um engenheiro de

Tabela 31 – Resumo da alocação dos religadores nos casos considerados.

Caso	Religador									
	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12
1					x		x	x		
2					x		x	x		
3		x			x	x	x	x		
4					x			x	x	

proteção pode optar por novos cenários de alocação, que consistem na combinação de instalação dos dispositivos mais comuns das filosofias 1R3L, 2R2L, 1L e 4L.

Ao contrário, os religadores RL 2, RL 4, RL 5 e RL 12 muito embora sejam posições candidatas para alocação, o algoritmo não sugeriu a instalação destes equipamentos em nenhum dos casos ótimos. Assim, mesmo que sejam posições recomendadas por critérios convencionais amplamente aplicados pelas distribuidoras, não retratam o menor custo para o problema de otimização proposto.

Finalmente, os dispositivos RC 3, RC 8 e RC 11 foram alocados somente nas filosofias que operam exclusivamente através de curvas lentas dos religadores (1L e 4L).

## 5.2 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma proposta de metodologia para obtenção de alocações ótimas de religadores, em redes de distribuição, quando são considerados os impactos das VTCDs em UCSVs.

Os pontos de monitoramento, denominados de Unidades Consumidoras Sensíveis a VTCDs, tiveram suas características de processo modeladas através de uma região de limiar de sensibilidade, tomando como base os equipamentos mais sensíveis instalados nos consumidores industriais. Como, normalmente, não se dispõe de medições suficientes que retratem estatisticamente os eventos de VTCDs, utilizou-se a metodologia para simulação de eventos de VTCDs conhecida como Simulação Monte Carlo.

Os mais diversos defeitos foram elencados e replicados no *software* de simulação DistriView. Assim, as tensões residuais e os tempos de operação para cada um destes eventos foram confrontados com as sensibilidades das UCSVs.

Uma rotina de otimização foi implementada para auxiliar na busca do melhor conjunto de posições candidatas a receberem a instalação de religadores que minimizem os custos de parada em consumidores sensíveis devido às VTCDs.

Implementou-se um método capaz de contabilizar os fenômenos de VTCD para um sistema multi-religador, no qual se pode avaliar diversas filosofias de proteção. A técnica implementada é capaz de capturar e contabilizar cada tipo de evento de acordo com a atuação do sistema de proteção.

Para avaliação da metodologia proposta, foram implementadas quatro tipos de filosofias de proteção na rede teste do IEEE 34 barras modificada, a qual foi acrescida de um alimentador, cujos parâmetros da rede estão apresentados no Anexo B desta dissertação.

O algoritmo proposto mostrou-se como uma ferramenta apropriada para subsidiar a tomada de decisões quanto à alocação de religadores, quando se avalia, prioritariamente, os impactos dos eventos de VTCDs sobre cargas sensíveis.

## 6 Conclusões

### 6.1 Conclusões Gerais

O presente trabalho apresentou uma proposta para alocação de religadores ao considerar a qualidade do produto através dos eventos de VTCDs. No desenvolvimento da metodologia, algumas contribuições merecem destaque.

Métodos de simulação computacional correspondem a maneira mais viável e prática de estimar os fenômenos de VTCDs. Uma parte do desenvolvimento deste trabalho consistiu em confrontar duas técnicas de simulação de curtos-circuitos: Método de Enumeração de Estados e a Simulação Monte Carlo.

Ambas metodologias têm o mesmo objetivo, porém possuem diferenças funcionais devido as suas variáveis no processo de modelagem. Para o MEE, os parâmetros são a discretização do trecho em falta e da impedância de defeito, enquanto para a SMC é a definição do número de anos de simulação.

Diversos cenários foram propostos e verificou-se que ambas técnicas são capazes de estimar os valores médios dos eventos de VTCD em um sistema teste, com boa qualidade nos resultados. Entretanto, a SMC mostrou-se como uma metodologia prática para simulação de eventos de VTCDs, uma vez que não requer conhecimentos específicos sobre a modelagem da rede e fornece a variabilidade dos resultados.

O sistema teste empregado é uma modificação proposta no IEEE 34 *buses test feeder* e o horizonte mínimo de simulação que fornece estimativa adequada para os fenômenos de VTCD é 50 anos.

Para a solução do problema de alocação de religadores, implementou-se a técnica conhecida como Algoritmo Genético, a qual busca conduzir o problema de acordo com a evolução natural proposta por Darwin. Assim, cada indivíduo presente no método de otimização representa um conjunto de possíveis religadores candidatos, em que cada gene representa a sua posição de instalação.

Ao considerar a existência de novos equipamentos capazes de realizar tentativas de RA em série, propôs-se uma metodologia para contabilização de eventos em sistemas multi-religadores, quando se garante que os dispositivos de religamento automático estão totalmente coordenados e seletivos.

O algoritmo proposto mostrou-se uma ferramenta apropriada para tomada de decisões quanto à alocação de religadores quando se considera cargas sensíveis à VTCDs.

A filosofia 1L foi a que trouxe o menor custo de interrupção individual e geral,



além do fato de não ter promovido interrupções de curta duração e ter imposto a menor quantidade de afundamentos de tensão. Em contrapartida, foi o esquema de proteção que possuiu a maior quantidade de interrupções de longa duração.

A filosofia 4L foi a que promoveu o maior número de afundamentos de tensão nas UCSVs, uma vez que todas suas operações foram devidas a atuações através de curvas lentas, prolongando a exposição dos consumidores à tensão de falta.

Quanto às filosofias que buscam eliminar as faltas devido a atuações via curva rápida (1R3L e 2R2L), verificou-se que, de fato, existiu um aumento nas interrupções de curta duração no incremento de tentativas rápidas.

Os tipos e as quantidades de eventos sofridos pelas UCSVs estão relacionados com o ponto de acoplamento na rede de distribuição. Observou-se que a metodologia implementada é capaz de encontrar uma alternativa adequada de religadores a serem instalados na rede que provoquem o menor custo total de parada de processos produtivos, considerando as combinações de eventos médios sofridos, por cada uma das cargas, e seus respectivos custos unitários.

Cabe ressaltar que as conclusões obtidas neste trabalho estão condicionadas a diversos fatores e premissas tais como: a rede teste, ajustes de proteção considerados, premissas para contabilização de eventos, metodologia de simulação de eventos de VTCDs e técnica de otimização.

## 6.2 Proposta para Trabalhos Futuros

Diversas considerações tiveram de ser adotadas para o desenvolvimento da metodologia proposta. Assim, existe uma gama de possibilidades para pesquisas futuras, seja através de novos testes, adaptações na metodologia ou mudanças nos parâmetros da rede simulada.

Citam-se como sugestões interessantes para investigação:

- Por ilustrar um sistema de distribuição compacto, houve limitação no espaço de busca. Recomenda-se a utilização de sistemas de distribuição com múltiplos alimentadores, com mais de um transformador e barramento de média tensão;
- Houve uma limitação na quantidade de indivíduos da população atual e na quantidade de gerações devido ao grande número de VTCDs a serem simuladas. O *software* usado para cálculo de VTCDs não permite o monitoramento concomitante de diversas barras. Logo, a quantidade de curtos-circuitos simulados eram multiplicado pelo número de UCSVs, o que limitou o número de pontos monitorados. Recomenda-se aumentar o número de UCSVs;

- Todos os religadores considerados nos indivíduos possuem a mesma filosofia de proteção. Recomenda-se avaliar, concomitantemente, distintas filosofias de proteção nos religadores;
- A estimativa dos eventos de VTCDs foi obtida através da SMC. Recomenda-se aplicar outras metodologias encontradas no estado da arte, como Método Híbrido ou Método Algébrico, para confrontação dos resultados obtidos;
- A rotina de otimização foi baseada em AG canônico com pequenas modificações. Propõe-se introduzir modificações na estruturação da otimização, como utilização de novos operadores genéticos, diferentes funções objetivos e restrições. Uma contribuição notada é a FO modelada, duplamente, pela qualidade do serviço e do produto. Além disso, recomenda-se incorporar aspectos financeiros dos religadores, como custo de implementação;
- Sugere-se a aplicação de outra metodologia de otimização para confrontação de resultados obtidos com o AG;
- Desconsiderou-se a Agregação Temporal com o objetivo de não perder a evolução temporal dos fenômenos de VTCD, impossibilitando assim a contabilização do Fator de Impacto. Sugere-se, então, empregar este tipo de agregação para viabilizar uma análise de VTCDs através do Fator de Impacto;
- Propõe-se realizar a modelagem da sensibilidade das cargas através de outros tipos de curvas, parâmetros e, até mesmo, de maneira probabilística. Também, considerar as elevações de tensões como possível fator causador de parada de processo.

### 6.3 Artigos Publicados

O trabalho desenvolvido neste documento possibilitou a publicação dos artigos:

- WESTIN, N. O. P.; SILVEIRA, P. M.; GUERRERO, C. A. V.; OLIVEIRA, T. C.; CARVALHO FILHO, J. M.; PEREIRA, N. B. Comparação entre Metodologias de Simulação de VTCDs em Redes de Distribuição. In: III CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2019, São Bernardo do Campo. CBQEE2019-0049, 2019.
- WESTIN, N. O. P.; SILVEIRA, P. M.; GUERRERO, C. A. V.; OLIVEIRA, T. C.; CARVALHO FILHO, J. M.; PEREIRA, N. B. Comparison between Voltage Sag Simulation Methodologies in Distribution Systems. In: 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2020, Online. ICHQP2020-0055.

# Anexos

# ANEXO A – Algoritmo Genético

## A.1 Considerações Iniciais

O Algoritmo Genético (AG) é uma técnica computacional evolutiva, desenvolvida por (HOLLAND, 1973), a qual se baseia no processo de evolução natural. Seu principal objetivo é buscar uma possível resposta para um problema, inicialmente, complexo dado um conjunto de restrições, através de uma busca estocástica em uma região de possíveis soluções.

Este simples comportamento esconde uma poderosa ferramenta de processamento. Cada indivíduo de uma sociedade tem um nível de aptidão (*fitness*) relacionada ao seu ambiente. Naturalmente, quanto mais apto um ser, mais chances ele tem de sobreviver e disseminar seu gene na população futura. Conforme novas populações são reproduzidas, indivíduos com melhores níveis de aptidão nascem, de tal forma que as próximas gerações possuam *fitness*, no mínimo, tão bom quanto as anteriores, a menos de alguma interferência externa.

Ressalva-se que esta metodologia tem sido empregada para para solução de diversos problemas na área de engenharia elétrica, por exemplo, planejamento de SE (MIRANDA; RANITO; PROENCA, 1994), otimização na alocação de religadores NA e NF com presença de GD (ZHANG; XU; WANG, 2008), (MONTROYA et al., 2014), (ÁLZATE et al., 2015), (ATTARI; SHAKARAMI; POUR, 2016). Outros estudos também usufruem a técnica de AG, como posicionamento de monitores de qualidade da energia, análises de fluxo de carga e alocação de banco de capacitores.

Diferentes técnicas computacionais são usadas para solução de problemas de otimização, a eventual escolha do AG deu-se pelo seu caráter genérico e de fácil implementação. A necessidade da aplicação deste trabalho não requer execução em tempo real e sua formulação pode ser binária, o que reduz significativamente sua complexidade.

A ferramenta de AG possui como vantagem fornecer não somente uma única, porém diversas possíveis soluções para o problema. Desta forma, cabe ao usuário escolher qual alternativa, ou alternativas, são capazes de solucionar a problemática modelada.

Também, optou-se por não utilizar ferramentas de otimização previamente elaboradas, permitindo ao autor mergulhar no assunto, desenvolvendo sua própria metodologia e adequando-a da maneira que fosse mais conveniente de ser utilizada.

Outra justificativa para escolha do método de otimização dá-se pelo fato do tema deste trabalho estar vinculado a um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em

andamento, no qual se emprega o AG para encontrar a alocação ótima de religadores, considerando primeiramente aspectos de continuidade e, em seguida, os impactos das VTCDs.

Assim, nas seções e subseções deste anexo, define-se a técnica e sua rotina de operação. Em seguida, cada parcela constituinte é conceituada e apresentadas suas variações mais utilizadas.

## A.2 Definições

Os Algoritmos Genéticos são algoritmos de busca e otimização baseados no comportamento de seleção natural, mesclando conceitos de sobrevivência dos seres mais aptos ao ambiente, através de combinações entre si de maneira ordenada e, até mesmo aleatória (GOLDBERG, 1989).

Cada indivíduo é modelado como um cromossomo, que nada mais é a representação de uma possível solução para o problema. O cromossomo é constituído por uma cadeia (*string*) de genes, que retratam uma característica genética frente ao ambiente, assumindo valores que o definem, denominados "alelos". A posição que cada uma destas características assume no cromossomo é conhecida como *locus*. A maneira com a qual o cromossomo interage com o meio é denominada fenótipo.

Naturalmente, os indivíduos da população atual podem interagir uns com os outros através de novas gerações, acarretando em aparecimento de novas características genéticas, sejam estas favoráveis ou não. A capacidade de sobrevivência de um ser está diretamente associada com o resultado da relação de seus genes com a sua comunidade (cadeia alimentar, disputa territorial e procriação), ou também com seu meio ambiente (disponibilidade de alimento, condições climáticas, geográficas, entre outros).

O que mede a habilidade de sobrevivência de um indivíduo é o seu grau de aptidão, também conhecido como *fitness*. Um ser mais apto possui maior probabilidade de sobrevivência que um outro de menor grau de aptidão. Não só isso, são indivíduos que possuem atributos naturais para serem reproduzidos e seus genes herdados às novas crias. No caso do problema de otimização, esta variável pode ser mensurada através de uma ou um conjunto de equações, denominadas *Função Objetivo*.

Normalmente, o *fitness* dos filhos tendem a ser acima da média dos pais. Como a natureza de procriação não é totalmente determinística, indivíduos novos, que possuem tendências a serem tão aptos quanto seus pais, podem não carregar esta característica devido a uma falha genética na combinação dos genes paternos. Da mesma forma, um ser suposto previamente inábil, pode sofrer uma mudança não esperada nas características dos pais e tornar-se um indivíduo de maior grau de aptidão.

Em outras palavras, os indivíduos passam por processos naturais já conhecidos e que, dentro desta metodologia computacional de AG, são denominados *Operadores Genéticos*. Diversos estudos sugerem novos modificadores genéticos, incluindo mais especificidade nas funções básicas. A forma canônica original do AG é composta apenas por três principais, que são: *seleção*, *cruzamento* e *mutação*.

Resumidamente, o Algoritmo Genético consiste em determinar os seguintes aspectos (MICHALEWICZ, 1996):

- Representar, geneticamente, o espaço de busca do problema (definir e codificar o cromossomo);
- Definir o tamanho da população;
- Definir o número de gerações;
- Determinar a função de aptidão (FO);
- Determinar a função de restrição;
- Estabelecer um critério de parada;
- Elencar a população inicial;
- Determinar a característica de seleção;
- Determinar a característica de cruzamento;
- Determinar a característica de mutação.

Genericamente, a maneira com que os itens interagem dentro de qualquer implementação computacional do AG, é apresentado na Figura A1.

### A.3 Codificação

Os indivíduos do problema de otimização podem ser organizados como um vetor, no qual cada posição (*bit* ou *locus*) recebe uma informação quanto a característica correspondente. Normalmente, adiciona-se uma posição ao final deste cromossomo, correspondendo ao seu valor da sua aptidão frente a função objetivo.

Os alelos podem ser números inteiros, binários ou mistos. Considere o exemplo em que se deseja avaliar a função  $y = x - 4$ . A Figura A2 mostra as codificações possíveis quando  $x$  assume valor igual a 6, com o valor de *fitness* associado.

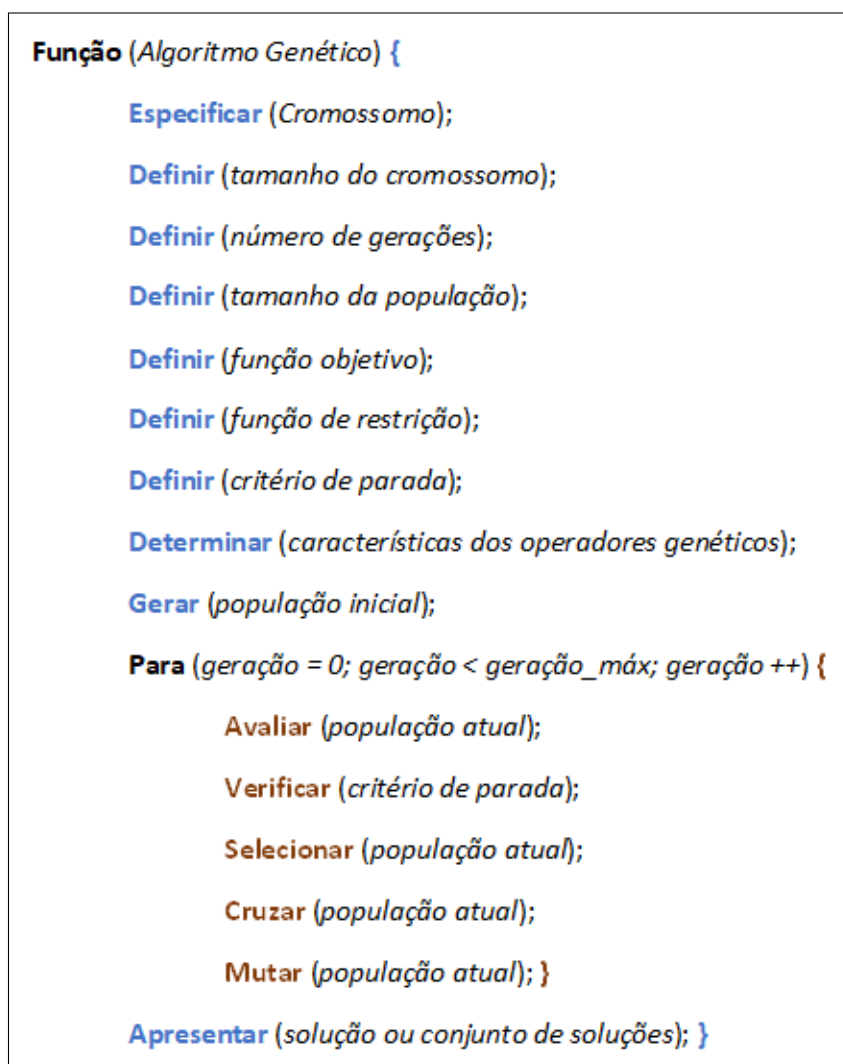


Figura A1 – Roteiro de funcionamento de um AG.

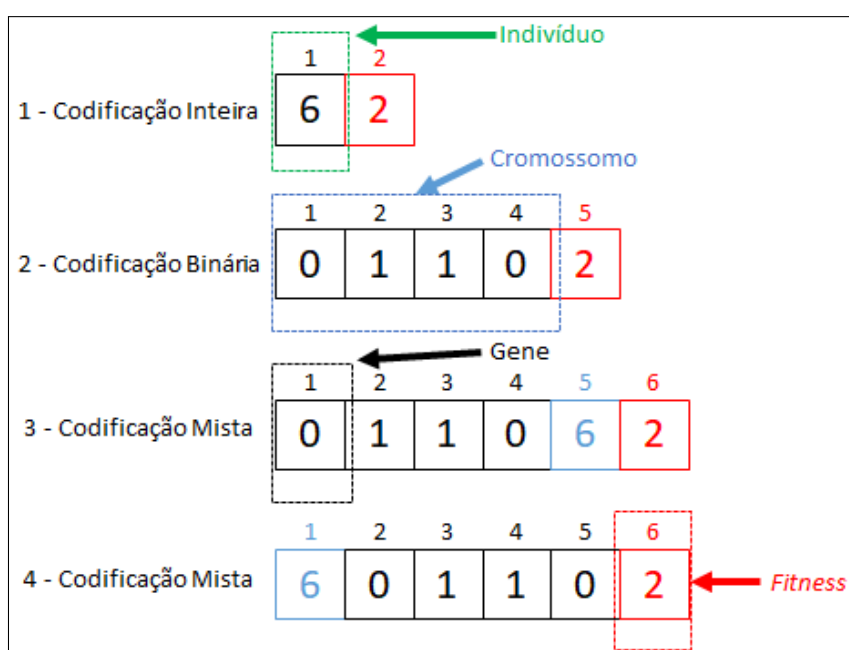


Figura A2 – Tipos de codificações para o exemplo proposto.

No caso da codificação 1, o único gene corresponde ao próprio cromossomo e indivíduo, enquanto nas codificações 2, 3 e 4 o cromossomo possui 4, 5 e 5 genes, respectivamente. Observe que as dimensões dos indivíduos são diferentes para os casos, variando entre 1, 4 e 5 *bits*.

A quantidade de genes presentes em cada tipo de codificação está relacionado com a quantidade de características que se deseja modelar. Quando são representadas características quantitativas, normalmente se utiliza a codificação inteira. Em contrapartida, em avaliações qualitativas, a codificação binária é mais adequada. Em hipóteses de estados mistos, a representação mista é vantajosa.

## A.4 População Inicial

A população inicial de um problema de otimização baseado em AG é, habitualmente, aleatória, já que o processo de convergência do algoritmo deve independe da condição inicial. Quando se utiliza novos operadores genéticos mais específicos, a convergência pode sofrer alterações, como por exemplo o uso de um agente elitista. Logo, o uso de condições iniciais conhecidas e favoráveis, pode facilitar o processo de convergência (MICHALEWICZ; NAZHIYATH, 1995).

O tamanho da população é um fator que deve ser levado em consideração nas otimizações com AG, já que ela pode influenciar a qualidade dos resultados obtidos, bem com o esforço computacional demandado. Por exemplo, uma população pequena pode não prover uma variedade suficiente de soluções e, na maioria das vezes, não varre boa parte do espaço de busca do problema. Assim, existe a possibilidade do algoritmo convergir prematuramente a um ótimo local. Para ajustar esta adversidade, sugere-se o aumento na quantidade de indivíduos, que naturalmente promove maior esforço computacional e, conseqüente, atraso na convergência da rotina de simulação.

Assim, deve-se buscar uma solução de compromisso entre o tamanho da população e um esforço computacional não proibitivo para manter a diversidade do problema. Adicionalmente, o número de gerações é outra variável a ser considerada. Uma grande quantidade de indivíduos na população associada a poucas gerações pode não permitir que a sociedade evolua suficientemente, e a solução encontrada pode corresponder a um sub-ótimo regional. Ferreira (2009) relata que o tamanho da população deve estar em 1,1 a 30 vezes o número de genes do cromossomo, o que favorece o desempenho do AG.

Uma possível representação da população de um problema de otimização computacional pode ser feita através de uma matriz, como ilustrada na Figura A3 com uma codificação mista.

Do exemplo, a população é composta por  $m$  indivíduos, cuja dimensão é  $n+1$ .



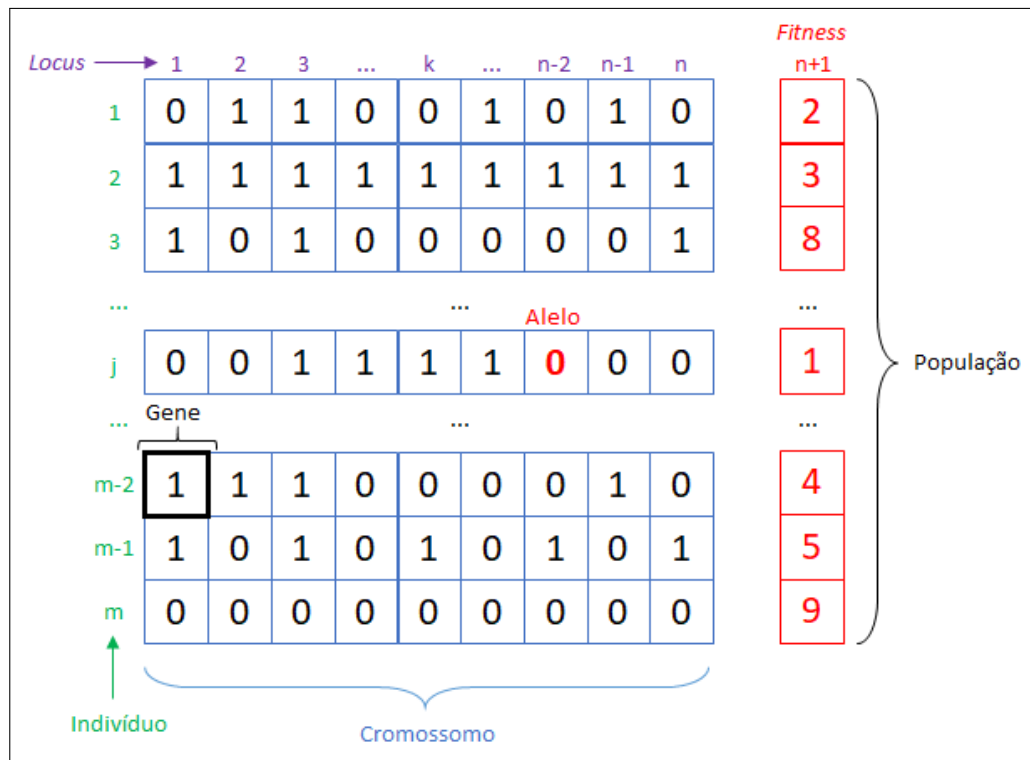


Figura A3 – Representação e terminologia de genes, cromossomos, indivíduos, *locus*, alelos e população.

Cada indivíduo possui uma parcela correspondente ao cromossomo (dimensão  $n$ ) e seu *fitness* (um único *bit* no *locus*  $n+1$ ). Os cromossomos são formados por  $n$  genes, no qual se observa o destaque de um na posição 1 do indivíduo  $m-2$ . O valor de um gene é destacado por um alelo 0 no indivíduo  $j$  no *locus*  $n-2$ . Logo, a matriz de população possui dimensões ( $m \times n+1$ ).

## A.5 Função Objetivo

A função objetivo (FO) é o conjunto de parâmetros que medem o quão próximos os indivíduos da população estão de serem sujeitos exemplares. Ou seja, os indivíduos que se adaptam melhor ao ambiente e que produzem melhores resultados, são bonificados. Já aqueles sujeitos que, naturalmente, não se encaixam ao meio, não são gratificados.

Outra maneira de avaliar os indivíduos é através das funções de restrições, as quais correspondem a um conjunto de regras em que os sujeitos da população são penalizados pela transgressão de comportamento. Estes padrões permitem discriminar seus indivíduos, atribuindo valores de acordo com sua desempenho. Normalmente, os indivíduos que mais se adaptam às regras são aqueles mais valorizados nestes testes e, conseqüentemente, não são penalizados. Por outro lado, aqueles que não seguem os padrões, são punidos, de maneira branda ou severa e, em alguns casos, podem até serem descartados nas próximas gerações.

Assim, a associação das funções objetivo e restrição compõe a classificação geral de um indivíduo, o qual retrata quão apto este apresenta-se perante sua sociedade. As avaliações através de bonificações ou penalizações podem ser através de processos de minimização ou maximização destes valores, e estes *scores* (pontuações) são, normalmente, conflitantes. Por exemplo, quando se busca um indivíduo através da maximização de seu *score*, a bonificação tende a crescer pontos (valor positivo) enquanto a penalização subtrai uma quantia destes (valor negativo). Já em um processo de minimização, a bonificação pode subtrair pontos ou, até mesmo (valor negativo), não atribuir nada (valor nulo), ao passo que a penalização incrementa (valor positivo) o *score* dos indivíduos.

O *score* encontrado pode ser traduzido como o *fitness* de cada indivíduo, o que pode servir de base para calcular sua probabilidade de ser selecionado para reprodução e, também, para verificar se é o sujeito ótimo buscado.

## A.6 Operadores Genéticos

A ideia básica de usar operadores genéticos é permitir a transformação da população atual, através de mudanças em seu código genético, por sucessivas gerações, visando gerar indivíduos com melhores materiais genéticos, os quais são mais aptos às regras e possuem mais chances de sobrevivência.

A aplicação destes operadores garante a diversificação das características da população e, ao mesmo tempo, mantém os melhores atributos adquiridos através das relações das gerações anteriores. Os operadores genéticos buscam simular as características naturais de uma sociedade qualquer, através da seleção natural de seus indivíduos, gerando novos sujeitos via reprodução sexuada (troca genética) entre seus componentes e, através de um problema na reprodução ou por um fator externo, a mutação aleatória de genes nos indivíduos.

Em linhas gerais, os operadores básicos são: *seleção*, *cruzamento* e *mutação*. As definições de cada um, bem como os tipos mais usuais empregados são descritos nas subseções A.6.1, A.6.2 e A.6.3.

### A.6.1 Seleção

O operador Seleção simula o processo natural de sobrevivência dos indivíduos na natureza, de acordo com seu grau de aptidão. Os indivíduos escolhidos para compor parte da nova população são, geralmente, os que possuem melhores *fitness*. Isso significa que, dependendo da técnica de seleção escolhida, indivíduos de baixo grau de *fitness* podem também ser escolhidos para seguir à população, pois esta tática permite a diversificação dos genes e, conseqüentemente, facilita a busca por novas características genéticas.

As técnicas de seleção mais conhecidas são seleção aleatória, torneio, estocástico residual, classificação uniforme, classificação linear, proporcional e, até mesmo, elitismo (BACK; HAMMEL; SCHWEFEL, 1997).

A maneira mais fácil de selecionar os indivíduos para as próximas gerações é de maneira aleatória. Porém, este procedimento dificulta o processo de busca de características ótimas nos próximos indivíduos, já que facilmente um bom indivíduo pode não ser escolhido. Esta tática pode ser utilizada quando, no decorrer das gerações, os indivíduos presentes possuem aspectos genéticos próximos, no qual não existem diferenças significantes em seu valor de *fitness*.

As técnicas mais empregadas são detalhadas nas subseções A.6.1.1, A.6.1.2 e A.6.1.3.

#### A.6.1.1 Seleção Proporcional ou Roleta (Roulette Wheel)

Também conhecido como *Roulette Wheel selection*, a seleção proporcional ou roleta foi originalmente proposta por Holland (1973). A técnica consiste em classificar a aptidão de cada indivíduo da população atual em relação aos demais, de maneira a compor sua probabilidade de ser escolhido e, assim, elencar os indivíduos proporcionalmente ao seu valor de *fitness*. Naturalmente, a tática requer o uso da normalização dos valores de *fitness* de cada indivíduo, preparando-os para a seleção.

A execução do escalonamento permite níveis adequados para competição dos indivíduos durante a técnica de seleção, uma vez que um maior *fitness*, para maximização, implica em mais chances de sobrevivência. Como é uma tática baseada em escolha aleatória devido à probabilidade associada, indivíduos de médio ou baixo valor de aptidão podem ser selecionados para procriação, o que proporciona a não convergência precoce do AG (GOLDBERG, 1989). Vale ressaltar que indivíduos com baixo valor de *fitness* podem conter boas características genéticas não expressados nos sujeitos de elevado nível de aptidão.

A Figura A4 mostra a possibilidade um giro de sorteio para a seleção de roleta, na qual ilustra a maioria dos casos de escolha, que correspondem a indivíduos de maior valor de *fitness*, neste cenário houve a escolha do indivíduo 4, já que representa 40% no escalonamento de *fitness*.

Já na Figura A5 apresenta-se a possibilidade, em menor frequência, de elencar indivíduo de menor valor de aptidão, como o indivíduo 1 (4% na modulação da aptidão), responsável pela diversidade genética e busca de ótimos globais.

Note que estes casos ilustram a possibilidade de diversificação que o operador de seleção proporcional impõe na problemática.

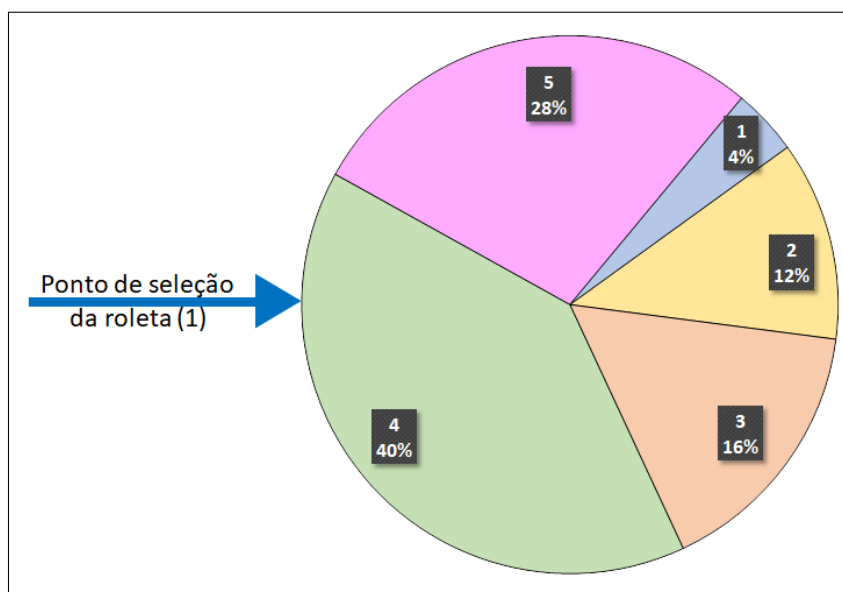


Figura A4 – Primeiro giro, selecionando o indivíduo de maior probabilidade.

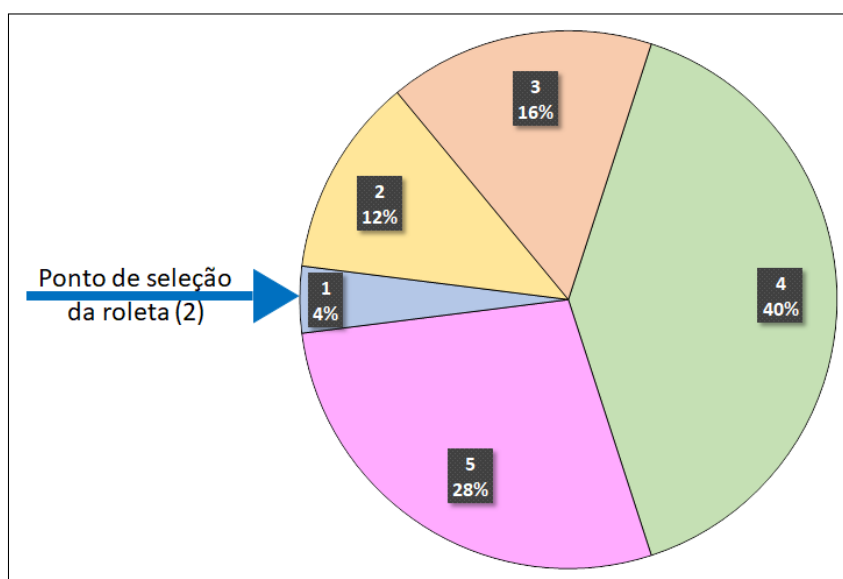


Figura A5 – Segundo giro, selecionando o indivíduo de menor probabilidade.

### A.6.1.2 Seleção por Torneio

Uma outra técnica também utilizada para seleção dos indivíduos para cruzamento é denominada Torneio. Seu funcionamento consiste em elencar poucos indivíduos da população atual, de maneira aleatória, confrontar seus *fitness* e o vencedor do torneio é aquele que possui maior aptidão, caso seja uma otimização de maximização ou menor aptidão, caso seja um problema de minimização. Outro torneio é iniciado, agora para escolha do segundo indivíduo que comporá a população atual. O processo de torneio é repetido até que se encontre o vencedor do último torneio, indivíduo que ocupará a última posição da população selecionada.

A tática de escolha através de sucessivos torneios possui duas variáveis, que são a quantidade de torneios e o número de indivíduos que competem. Para que se permita a diversidade nas próximas gerações, o número de participantes em cada torneio não deve ser muito grande, pois dificultaria a disputa entre indivíduos de baixo *fitness* com outros indivíduos de maior aptidão. Assim, estes entes não prosseguem nas gerações futuras, não disseminando bons genes para busca de novas características capazes de encontrar o ótimo global. O número de torneio, normalmente, é fixado com o número de indivíduos da população.

Para exemplificar a técnica, considere o conjunto de indivíduos que compõem uma população fictícia, apresentado na Tabela A1. Cada sujeito possui seu valor de aptidão, e o problema de otimização é baseado em minimização. São realizados 5 torneios, cada qual com 3 participantes selecionados ao acaso. Em cada disputa, os indivíduos de menor *fitness* ganharão e, conseqüentemente, são selecionados para compor a população atual.

Tabela A1 – Exemplo de seleção por torneio

Indivíduo	<i>Fitness</i>	Torneio			Vencedor
1	100	1	2	3	2
2	15	5	3	1	1
3	350	2	4	3	4
4	1	5	1	2	2
5	500	3	3	5	3

Observe que, os indivíduos menos aptos somente serão selecionados caso forem convocados para participar no torneio atual em multiplicidade (última linha da Tabela A1). Este fato ainda pode ser dificultado, se o número de componentes em cada torneio for elevado. Normalmente, são convocados de 2 a 4 indivíduos para participar das rodadas de torneio.

### A.6.1.3 Seleção por Elitismo

A seleção por elitismo, ou também conhecida como reprodução, é um operador especial de seleção, no qual consiste em garantir que indivíduos de melhores *fitness* da

população atual sejam repassados, diretamente, para a população futura, pulando a etapa de cruzamento. Tem como funções básicas acelerar o processo de convergência por garantir a permanência dos melhores indivíduos da população durante o processo de evolução e auxilia na manutenção da característica dominante, já que no processo de seleção algum indivíduo ótimo pode não ser escolhido para sobrevivência.

## A.6.2 Cruzamento

Após selecionados os indivíduos da população anterior para compor a nova população, estes são submetidos ao operador genético denominado cruzamento, ou recombinação. Os cromossomos são separados em pares e são submetidos a uma técnica de cruzamento genético para gerar novos pares de indivíduos. Neste processo, os indivíduos originais são conhecidos como pais e os resultantes são chamados de "prole".

A principal função deste operador é inserir a diversidade de genes nos indivíduos e, conseqüentemente, promover a proliferação de novos seres. Como seu papel é simular o funcionamento natural da sociedade, nem todos os indivíduos procriam. Logo, existe uma variável denominada probabilidade de cruzamento, na qual se traduz à existência ou não de trocas genéticas entre dois pais. No caso em que não existe o cruzamento, as proles correspondem aos pais (GOLDBERG, 1989). Tipicamente, utilizam-se valores próximos de 0,8 (MIRANDA; RANITO; PROENCA, 1994), ou até mesmo valores variáveis no decorrer da evolução da população.

O operador genético cruzamento pode ser elaborado de diversas maneiras, como por exemplo uniforme, um ponto de corte ou dois pontos de corte, as quais são descritas nos itens A.6.2.1, A.6.2.2 e A.6.2.3, respectivamente. Na prática, as possíveis maneiras de recombinar os indivíduos são casos que podem ser generalizados do cruzamento uniforme.

Existem outros tipos de cruzamento, como heurístico e aritmético, porém estes são empregados em metodologias de otimização cuja codificação é inteira. Vale ressaltar que as técnicas uniformes, um ponto de corte e dois pontos de corte também podem ser aplicadas a este tipo de problema.

### A.6.2.1 Recombinação Uniforme

A recombinação uniforme, ou também conhecida como multiponto, consiste em submeter cada gene dos pais predispostos à troca de material genético a uma comparação binária aleatória, na qual é sorteado um vetor de máscaras cuja dimensão é igual ao número de genes. Ele é preenchido com números 0 ou 1, randomicamente. Os *locus* em que foram preenchidos com 1, significa que existirá a troca genética entre os pais, enquanto a presença do número 0 indica que as proles mantêm a mesma característica genética dos pais, para aquele gene.

A Figura A6 ilustra o exemplo de recombinação uniforme para dois pais, cujos cromossomos possuem 8 genes e as posições sorteadas para troca foram 1, 3, 5, 6 e 8.

#### A.6.2.2 Recombinação a um Ponto de Corte

A recombinação a um ponto de corte também consiste em submeter cada gene dos pais predispostos à troca de material genético a uma comparação binária aleatória, na qual é sorteado um *locus* dos pais e, a partir dele, os genes são trocados um a um, até a última característica genética.

Esta técnica é um caso particular do cruzamento uniforme, já que equivale a existência de uma máscara totalmente preenchida com números 1 após o ponto de corte e com 0 antes deste local. A Figura A6 apresenta os mesmos pais com a aplicação da tática de recombinação a um ponto de corte, na posição 4.

#### A.6.2.3 Recombinação a dois Pontos de Corte

A recombinação a dois pontos de corte é similar ao cruzamento a um ponto, porém são sorteados duas posições para delimitação da região de corte. Logo, os pais predispostos ao cruzamento trocarão material genético apenas dentro do intervalo delimitado por estes dois *locus*.

Também, a técnica de cruzamento a dois pontos é um caso especial da tática de recombinação uniforme, na qual forma-se uma máscara equivalente, com números 0 fora do intervalo de troca e a presença de números 1 na parte interna. Este tipo de operador genético encontra-se ilustrado com os demais na Figura A6, no qual a região de corte está entre os *locus* 3 e 5.

### A.6.3 Mutação

O último operador do modelo canônico do AG é a mutação. Sua inspiração é baseada nas interações do ambiente com os indivíduos que coabitam, promovendo a adaptação de seus entes, na decorrência de alterações externas prolongadas, como mudanças geográfica ou variações na cadeia alimentar. A mutação consiste em aplicar mudanças aleatórias em um ou mais genes dos indivíduos, caracterizando um novo ser e, conseqüentemente, promovendo a diversificação da espécie. Normalmente, este fenômeno é de baixa ocorrência.

A aplicação da mutação em problemas de otimização é para diminuir a tendência de indivíduos semelhantes, o que levaria a perda de genes, potencialmente, bons. Assim, este operador genético provê a varredura aleatória do espaço de busca de soluções, assegurando que o algoritmo não convirja precocemente em uma resposta mínima ou máxima local (GOLDBERG, 1989). Outra função é recuperar bons indivíduos que, pelas metodologias

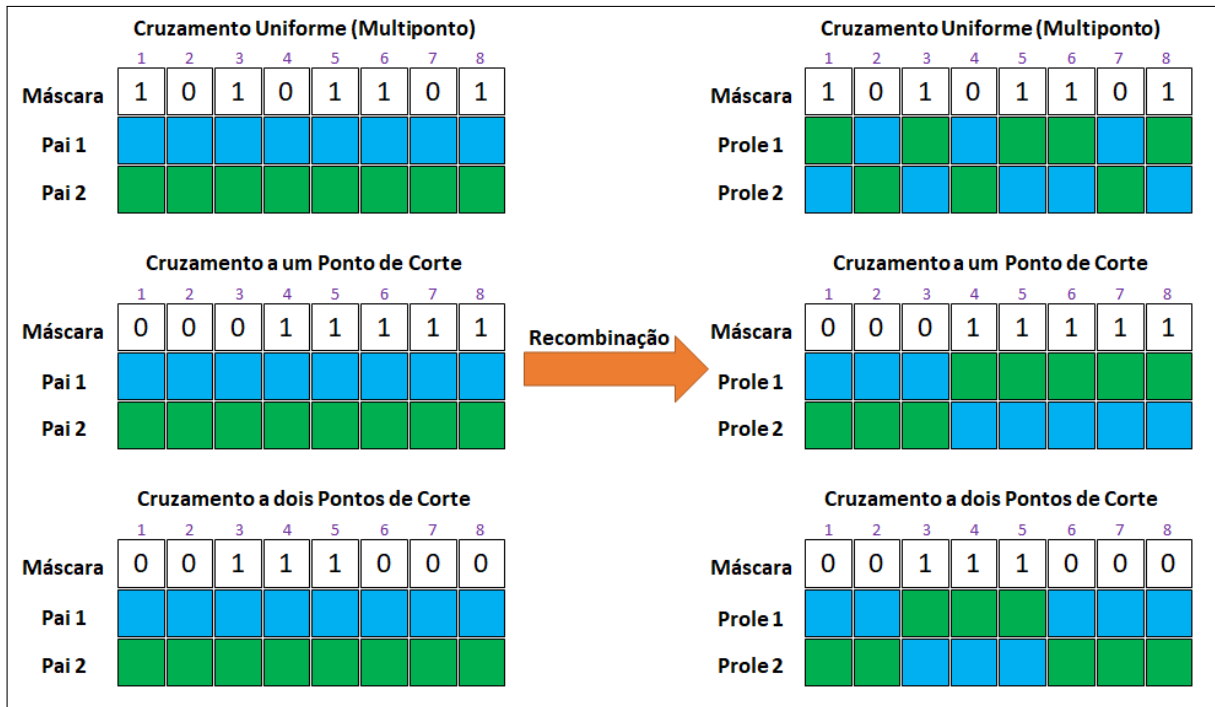


Figura A6 – Tipos de cruzamentos – uniforme, um ponto de corte e dois pontos de corte.

de seleção ou cruzamento, foram perdidos no meio do processo, funcionando como um seguro de vida (MIRANDA; RANITO; PROENCA, 1994).

A mutação, assim como os demais operadores genéticos, possui algumas possíveis modificações em seu funcionamento. Citam-se como exemplos mais conhecidos, a mutação de gene individual, a mutação de indivíduo ou a mutação por inversão. A mutação de gene individual consiste em aplicar testes individuais nos genes, verificando um a um a possibilidade de mutação. Já a mutação de indivíduo baseia-se em apenas um teste de mutação e, em sua ocorrência, um gene aleatório é escolhido para mudança de valor. Finalmente, a mutação por inversão é aquela que, quando verificada, atua na inversão de todos os alelos do cromossomo. Note que esta última é praticada em codificações binárias.

A Figura A7 ilustra as três possibilidades de mutação. Na mutação de gene individual, apenas os *bits* 4 e 5 foram testados positivamente para mutar. Para a mutação de indivíduo, o cromossomo sofreu a mutação e o *locus* 2 foi escolhido para manifestação do fenômeno. Já na mutação por inversão, o indivíduo é passível de mutação, invertendo todos seus alelos.

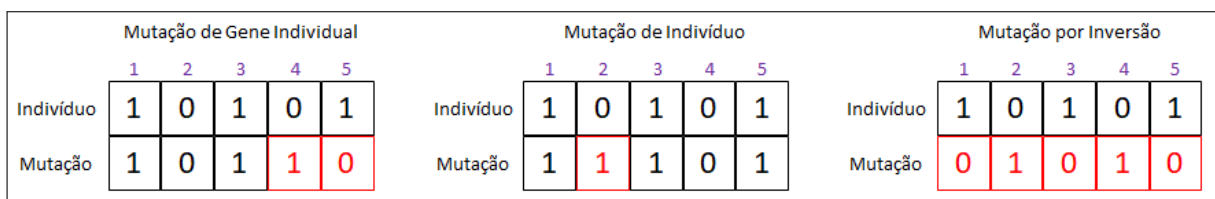


Figura A7 – Tipos de mutação para o mesmo indivíduo.



A frequência da ocorrência de mutação é expressa pela probabilidade de mutação, a qual pode ser fixa ou variável, impactando no desempenho da otimização no AG. A utilização de baixa taxa de mutação implica em maior manutenção da característica dominante e não exploração da diversidade do problema. Já o emprego de altos valores de probabilidade favorecem varredura no espaço de busca, porém podem ser prejudiciais. Uma taxa de mutação igual a 0,5 sempre conduz a uma busca aleatória, independente da taxa de cruzamento (GOLDBERG, 1989).

A literatura retrata valores típicos entre 0,001 a 0,01 (MIRANDA; RANITO; PROENÇA, 1994) ou, até mesmo, sendo o inverso do número total de genes expressas no cromossomo (BACK; HAMMEL; SCHWEFEL, 1997). Uma probabilidade de mutação pequena (próxima de 0,001) está associada ao teste de mutação de gene individual, enquanto uma taxa mais expressiva (próxima de 0,01) traduz uma mutação de indivíduo.

## A.7 Critério de Parada devido à Convergência

O critério de parada, ou critério de convergência, é uma etapa essencial de uma rotina de otimização, pois se não for definida com cautela, o algoritmo pode convergir prematuramente e as soluções encontradas podem representar ótimos locais.

Como nem sempre é possível explorar todo o espaço de busca, os critérios de parada, normalmente, associam-se ao custo benefício entre esforço computacional demandado e varredura suficiente de indivíduos ótimos do problema. Percebe-se que a dificuldade do problema está em quantificar esta última parcela.

Assim, as proposições de parada mais usuais são:

- Função objetivo com valor ótimo alcançado (quando do conhecimento desse valor);
- Fixar um número máximo para gerações de novas populações de indivíduos;
- Permanência de um indivíduo ótimo por determinadas gerações consecutivas, após um percentual do número total de gerações;
- Diferença percentual, entre os *fitness* dos melhores indivíduos de gerações consecutivas, é inferior a um valor tolerável;
- Critérios práticos associados à natureza física do problema.

## A.8 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a definição de uma ferramenta de otimização denominada Algoritmo Genético. Esta técnica computacional é muito poderosa para solução de

problemas de minimização ou maximização de respostas, quando existe um grande espaço de busca.

Seu funcionamento é baseado nas leis naturais e físicas de uma sociedade qualquer, na qual as mudanças ocorridas, tanto nos indivíduos quanto no desenvolvimento da sociedade, são traduzidas através de operadores genéticos.

Por mais que se apresente como uma ferramenta simples, faz-se necessário o conhecimento de suas variáveis e a correta parametrização, pois uma má combinação de fatores pode desfavorecer a técnica, promovendo demasiado esforço computacional e, até mesmo, a dificuldade na busca de soluções ótimas para o problema modelado.

# ANEXO B – Parâmetros do Sistema *IEEE* *34 Buses Test Feeder* Modificado

Este anexo tem como objetivo apresentar as adaptações realizadas no sistema teste do *IEEE 34 nodes test feeder* (IEEE PES, 2015), ilustrada na Figura B1. Cabe ressaltar que antes de realizarem-se as modificações neste sistema, os valores reais de tensão e corrente foram validados. Estas informações estão disponíveis em (FILHO, 2017).

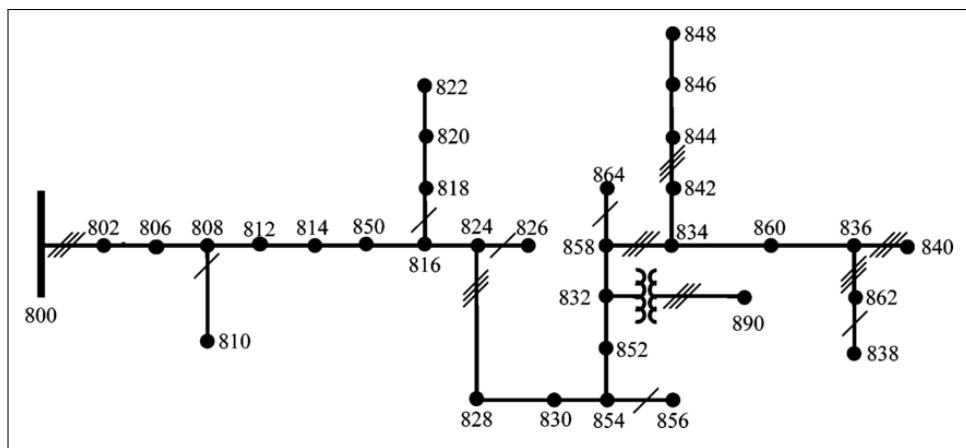


Figura B1 – Representação do *IEEE 34 buses test feeder* (IEEE PES, 2015).

A rede original do IEEE representa um sistema de distribuição real em média tensão, cujas principais características são listadas:

- Alimentador longo, cuja extensão total é, aproximadamente, 90 km;
- Operação em 24,9 kV de tensão nominal;
- A subestação fornece potência nominal de 2500 kVA, em níveis de tensão de 69 kV, a qual é rebaixada através de um transformador delta-estrela solidamente aterrado;
- A rede é predominantemente trifásica, possuindo ramais monofásicos;
- Possui dois reguladores de tensão para ajustar o perfil de tensão ao longo do alimentador;
- Estão instalados dois bancos de capacitores ao final do ramo principal;
- Presença de diversas cargas pontuais e distribuídas, balanceadas e desbalanceadas;
- Para alimentação de um trecho exclusivo, existe um transformador abaixador de 24,9 kV para 4,16 kV.

Em seu trabalho, FILHO (2017) propõe algumas modificações, destacando-se:

1. Inserção de equivalente trifásico e monofásico do sistema em 69 kV: 676 MVA com X/R igual a 4,33 e 467 MVA com X/R igual a 4,02, respectivamente;
2. Retirada do trecho de 4,16 kV para avaliação de eventos em um único nível de tensão (24,9 KV), acrescentando uma carga equivalente na barra 832;
3. Consideração de linhas transpostas, para redução do número de estruturas;
4. Realocação do regulador presente no trecho 814-850 para 812-814, já que a inserção do equivalente em 69 kV prejudicou o perfil de tensão;
5. Alteração dos parâmetros do transformador para adequar ao novo equivalente. Nova potência de 5 MVA, com impedância percentual de 7% e relação X/R igual a 12;
6. Inclusão de dispositivos de proteção em cada ramo do sistema, possibilitando novos cenários para contabilização dos eventos de VTCD.

O sistema modelado e modificado encontra-se representado na Figura B2. É possível observar o transformador, todos os trechos, cargas concentradas, reguladores, capacitores, chaves-fusíveis e o único religador do circuito. Os equipamentos do sistema estão destacados com a fonte verde.

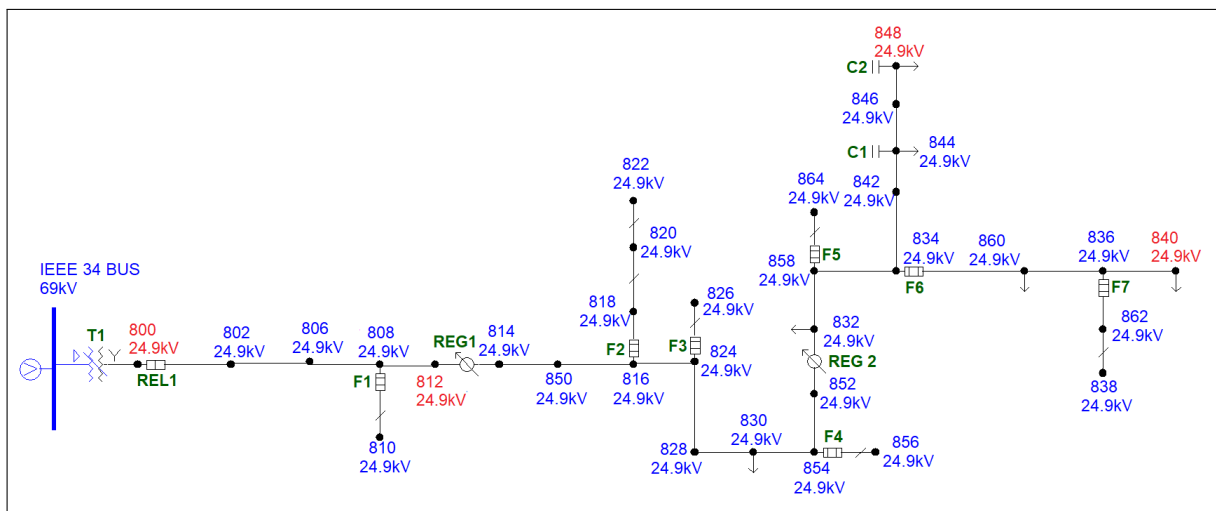


Figura B2 – Modelagem do *IEEE 34 buses test feeder* modificado (FILHO, 2017).

A Tabela B1 apresenta as informações sobre o equivalente na subestação.

Tabela B1 – Parâmetros do equivalente de entrada da subestação - 69 kV.

$P_{cc}$ Trifásica [MVA]	X/R Trifásico	$P_{cc}$ Monofásica [MVA]	X/R Monofásico
676	4,33	467	4,02

Tabela B2 – Parametrização do transformador de entrada.

Localização	Potência [MVA]	Primário	Secundário	Z [%]	X/R
Subestação	5,0	69 kV (Delta)	24,9 kV (Estrela Aterrada)	7	12

Já a Tabela B2 contém os dados básicos do transformador da rede modificada.

Os ajustes e parâmetros do religador 1 são conforme Tabelas B3 e B4. Os religadores podem ser ajustados para operações através da curva rápida (R) ou curva lenta (L), ou em outros termos, via função instantânea (50) ou função temporizada (51), respectivamente.

Tabela B3 – Parâmetros gerais do religador

Parâmetros Gerais	
Barra DE - PARA	800 - 802
Instalação	800
Tensão	24,9 kV
Operações	1 <sup>1</sup> ou 4 <sup>2</sup>
Intervalo de Religamento [s]	2 <sup>3</sup> ou 5 <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Filosofia 1L;

<sup>2</sup> Filosofias 1R3L, 2R2L ou 4L;

<sup>3</sup> Tempo morto pós operação R das filosofias 1R3L e 2R2L;

<sup>4</sup> Tempo morto pós operação L das filosofias 1R3L, 2R2L e 4L.

Tabela B4 – Curvas e ajustes do religador

Curvas e Ajustes	Instantânea (R)		Temporizada (L)	
	Unidade Fase	Unidade Terra	Unidade Fase	Unidade Terra
Curva	CENTURION104	CENTURION104	CENTURION010	CENTURION131
<i>Pickup</i> [A]	70	25	70	25
<i>Time Dial</i> [s]	1,15	1,15	9,5	0,2

Os fusíveis adotados encontram-se descritos na Tabela B5, os quais F1 até F6 protegem ramais laterais, enquanto F7 está alocado em um subramal.

O arranjo para as linhas de distribuição está apresentado na Tabela B6.

A caracterização de cada trecho é mostrada na Tabela B7.

As Tabelas B8 e B9 apresentam as especificações de cargas pontuais e distribuídas, respectivamente.

Os reguladores de tensão do sistema possuem os parâmetros apresentados na Tabela B10.

Finalmente, a Tabela B11 informa os valores de ajuste considerados para os capacitores.

Tabela B5 – Curvas dos elos-fusíveis presentes nas chaves de proteção de ramais laterais.

Chave com Fusível		Curva
<b>Elo</b>	F1	25K
	F2	15K
	F3	15K
	F4	15K
	F5	15K
	F6	15K
	F7	10K

Tabela B6 – Parametrização das linhas de distribuição aéreas.

Código	Sequência de Fases	Condutor [ACSR]		Estrutura
		Fase	Neutro	
300	B A C N	1/0	1/0	500
301	B A C N	#2 6/1	#2 6/1	500
302	A N	#4 6/1	#4 6/1	510
303	B N	#4 6/1	#4 6/1	510
304	B N	#2 6/1	#2 6/1	510

Tabela B7 – Descrição dos trechos e suas configurações.

Barra DE	Barra PARA	Comprimento [ft]	Código
800	802	2.580	300
802	806	1.730	300
806	808	32.230	300
808	810	5.804	303
808	812	37.500	300
812	814	10	301
814	850	29.730	300
816	818	1.710	302
816	824	10.210	301
818	820	48.150	302
820	822	13.740	302
824	826	3.030	303
824	828	840	301
828	830	20.440	301
830	854	520	301
832	858	4.900	301
834	860	2.020	301
834	842	280	301
836	840	860	301
836	862	280	301
842	844	1.350	301
844	846	3.640	301
846	848	530	301
850	816	310	301
852	832	10	301
854	856	23.330	303
854	852	36.830	301
858	864	1.620	302
858	834	5.830	301
860	836	2.680	301
862	838	4.860	304

Tabela B8 – Cargas pontuais e suas descrições.

Nó	Modelo de Carga	Fase A		Fase B		Fase C	
		[kW]	[kVAr]	[kW]	[kVAr]	[kW]	[kVAr]
860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105
848	D-PQ	20	16	20	16	20	16
832	D-I	164	92	164	92	164	92
830	D-Z	10	5	10	5	25	10

Tabela B9 – Cargas distribuídas e suas descrições.

Barra DE	Barra PARA	Modelo de Carga	Fase A		Fase B		Fase C	
			[kW]	[kVAr]	[kW]	[kVAr]	[kW]	[kVAr]
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22
836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0

Tabela B10 – Parametrização dos reguladores de tensão.

	Regulador	
	1	2
Barra DE - PARA	814 - 850	852 - 832
Instalação	814	852
Fases	A - B - C	A - B - C
Conexão	FFF, Estrela Aterrado	FFF, Estrela Aterrado
Fases Monitoradas	A - B - C	A - B - C
Largura de Banda	2,0 [V]	2,0 [V]
Razão de Transformação TP ( $N_{pt}$ )	120	120
Corrente Nominal no Primário TC ( $CT_p$ )	100 [A]	100 [A]
Ajustes do Compensador	(Fase A - Fase B - Fase C)	
R [%]	(2,7 - 2,7 - 2,7)	(2,5 - 2,5 - 2,5)
X [%]	(1,6 - 1,6 - 1,6)	(1,5 - 1,5 - 1,5)
Nível de Tensão [V]	(122 - 122 - 122)	(124 - 124 - 124)

Tabela B11 – Parametrização dos capacitores *shunts*.

	Capacitor	
	1	2
<b>Instalação</b>	844	848
<b>Fases</b>	A - B - C	A - B - C
<b>Faixa de Regulação</b>	$\pm 0,05$ p.u.	$\pm 0,05$ p.u.
<b>Fases Monitoradas</b>	A - B - C	A - B - C
<b>kVAr (A - B - C)</b>	(100 - 100 - 100)	(150 - 150 - 150)
<b>Nível de Tensão [kV]</b>	(14,376 - 14,376 - 14,376)	(14,376 - 14,376 - 14,376)



## Referências

- ABDI, S. et al. Optimal recloser and autosectionalizer allocation in distribution networks using ipso–monte carlo approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 55, p. 602 – 611, 2014. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061513004298>>.
- ALAM, A. et al. Placement of protective devices in distribution system considering uncertainties in loads, temporary and permanent failure rates and repair rates. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 12, n. 7, p. 1474–1485, 2018. ISSN 1751-8695.
- AMASIFEN, J. C. C. *Metodologias para Avaliação de Riscos e dos Custos de Interrupções em Processos Causados por Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. 191 p. — Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- ANEEL. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica, revisão 10*. 2018.
- ATTARI, S. K. A.; SHAKARAMI, M. R.; POUR, E. S. Pareto optimal reconfiguration of power distribution systems with load uncertainty and recloser placement simultaneously using a genetic algorithm based on nsga-ii. In: *2016 21st Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 46–53. ISSN null.
- AYELLO, F. P.; FILHO, J. M. C. *Protective Relaying: Principles and Applications*. USP - São Paulo: III Concladis - Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica, 1999.
- BACK, T.; HAMMEL, U.; SCHWEFEL, H. . Evolutionary computation: comments on the history and current state. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 1, n. 1, p. 3–17, 1997.
- BECKER, C. et al. Proposed chapter 9 for predicting voltage sags (dips) in revision to ieeec std 493, the gold book. In: *Conference Record Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference 1993*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 43–51. ISSN null.
- BLACKBURN, J. L.; DECKKER, M. *Protective Relaying: Principles and Applications*. New York: Electrical Engineering and Electronics, n. 37, 1987.
- BOLLEN, M. H.; GU, I. Signal processing of power quality disturbances. In: \_\_\_\_\_. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. New York: [s.n.], 2006. p. 760.
- BOLLEN, M. H. J. The influence of motor re-acceleration on voltage sags. In: *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 1994. v. 2, p. 2235–2242 vol.3. ISSN null.
- BOLLEN, M. H. J. Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 32, n. 6, p. 1414–1423, Nov 1996. ISSN 1939-9367.

- BOLLEN, M. H. J. Characterisation of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 4, p. 1666–1671, Oct 1997. ISSN 1937-4208.
- BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. [S.l.]: IEEE Press, 2000.
- BOLLEN, M. H. J.; YALCINKAYA, G.; HAZZA, G. The use of electromagnetic transient programs for voltage sag analysis. In: *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227)*. [S.l.: s.n.], 1998a. v. 1, p. 598–603 vol.1.
- CARVALHO, J. G. *Influência da Proteção na Qualidade da Energia Elétrica*. 120 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- CONRAD, L.; LITTLE, K.; GRIGG, C. Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 27, n. 1, p. 167–172, Jan 1991. ISSN 1939-9367.
- COSTA, M. V. da. *Uma Contribuição à Regulamentação das Variações de Tensão de Curta Duração*. 172 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.
- DAN, A. et al. Recloser application possibilities and the related benefits at a hungarian mv network. In: *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. ISSN null.
- DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. 2002.
- ENAYATI, A.; ORTMEYER, T. H. A novel approach to provide relay coordination in distribution power systems with multiple reclosers. In: *2015 North American Power Symposium (NAPS)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. ISSN null.
- FERREIRA, G. D. *Otimização da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Uma Abordagem Considerando a Seleção e Alocação de Dispositivos de Proteção e Manobras*. 192 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- FILHO, H. K. R. *Impacto de Diferentes Filosofias de Proteção nos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica*. 198 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
- FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 620 p.
- FILHO, J. M. de C. *Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis – Proposta de Novos Indicadores*. 112 p. — Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 2000.
- FILHO, J. M. de C. et al. Comparative analysis between measurements and simulations of voltage sags. In: *10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.02EX630)*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 435–440 vol.2. ISSN null.
- FONSECA, V. R. de C. *Cálculo Estocástico do Afundamento de Tensão*. 123 p. Dissertação (Mestrado) — Pontífica Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

- GARCIA, C. P.; ALVES, M. F. Dimensionamento de compensadores série considerando a frequência de ocorrência dos afundamentos. In: . Cuiabá: [s.n.], 2011. p. 5.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1st. ed. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. ISBN 0201157675.
- GUIGUER. *Proteção de Sistemas de Distribuição*. Porto Alegre: Editora Sagra, 1988. v. 1.
- HAJINIA, M.; MAHAEI, S. M.; JAFARZADEH, J. Simultaneous placement of recloser and fuse based on society development algorithm. In: *2015 20th Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 48–52. ISSN null.
- HOLLAND, J. H. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. *SIAM Journal on Computing*, v. 2, n. 2, p. 88–105, 1973. Disponível em: <<https://doi.org/10.1137/0202009>>.
- HONORATO, K. d. S. *Simulações Estocásticas de Variações de Tensão de Curta Duração em Sistemas de Distribuição*. 130 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.
- IEC 61000-4-30. *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Testing and measurement techniques - quality measurements methods*. 2006.
- IEEE 1159. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. 2009.
- IEEE 493, S. *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Commercial Power (The Gold Book)*. [S.l.: s.n.], 2007.
- IEEE PES, D. S. A. S. *Distribution test Feeders - Online*. 2015. Disponível em: <<https://site.ieee.org/pes-testfeeders/>>.
- INGKING, A. O. F.; GALLANO, R. J. C.; TIO, A. E. D. C. A binary programming model for saifi considering protective device failure. In: *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5. ISSN null.
- KONDO, D. V. et al. A methodology for reclosers allocation in distribution networks. In: *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–8. ISSN null.
- LEBORGNE, R. C. *Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamentos de Tensão*. 163 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.
- MACIEL, L. P. R. *Análise do Impacto das Filosofias de Proteção na Alocação de Reliadores em Redes de Distribuição Primária*. 112 p. — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.
- MCGRANAGHAN, M.; MUELLER, D.; SAMOTYJ, M. Voltage sags in industrial systems. In: *Conference Record. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference 1991*. [S.l.: s.n.], 1991. p. 18–24. ISSN null.
- MICHALEWICZ, Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. 3rd. ed. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. ISBN 978-3-642-08233-7.

- MICHALEWICZ, Z.; NAZHIYATH, G. Genocop iii: a co-evolutionary algorithm for numerical optimization problems with nonlinear constraints. In: *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 2, p. 647–651 vol.2.
- MIRANDA, V.; RANITO, J. V.; PROENCA, L. M. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 4, p. 1927–1933, Nov 1994. ISSN 1558-0679.
- MONTOYA, O. D. et al. Methodology for optimal distribution system planning considering automatic reclosers to improve reliability indices. In: *2014 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T D-LA)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. ISSN null.
- MORSALI, R. et al. Solving a novel multiobjective placement problem of recloser and distributed generation sources in simultaneous mode by improved harmony search algorithm. *Complexity*, v. 21, n. 1, p. 328–339, 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cplx.21567>>.
- NRS 048-2:2003. *ELECTRICITY SUPPLY — QUALITY OF SUPPLY, Part 2: Voltage characteristics, compatibility levels, limits and assessment methods*. 2003. Disponível em: <<http://www.nersa.org.za/Admin/Document/Editor/file/Electricity/IndustryStandards/NRS048\protect\T1\textdollar20part%204.pdf>>.
- OLGUIN, G.; KARLSSON, D.; LEBORGNE, R. Stochastic assessment of voltage dips (sags): The method of fault positions versus a monte carlo simulation approach. In: *2005 IEEE Russia Power Tech*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–7. ISSN null.
- OLIVEIRA, T. C. de. *Afundamentos de Tensão: Avaliação Estatística de Resultados de Medição com Base em Simulações*. 182 p. — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.
- OLIVEIRA, T. C. de et al. Validation of voltage sags short term measurements based on predicted stochastic simulation. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Probablistic Methods Applied to Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–8. ISSN null.
- ONS. *Procedimentos de rede: Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes, revisão 2*. 2011.
- QADER, M. R.; BOLLEN, M. H. J.; ALLAN, R. N. Stochastic prediction of voltage sags in a large transmission system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 35, n. 1, p. 152–162, Jan 1999. ISSN 1939-9367.
- QIN, Q.; WU, N. E. Recloser and sectionalizer placement for reliability improvement using discrete event simulation. In: *2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. ISSN 1932-5517.
- RAHMAWATI, F. et al. Optimal switch placement in radial distribution system based on reliability worth analysis. In: *2015 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 568–572. ISSN 2155-6830.

- RAMOS, A. C. L. *Avaliação dos Impactos da Impedância de Falta e da Geração Distribuída em Estudos de Afundamentos de Tensão*. 196 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.
- ROYTELMAN, I.; WEE, B. K.; LUGTU, R. L. Volt/var control algorithm for modern distribution management system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 10, n. 3, p. 1454–1460, Aug 1995. ISSN 1558-0679.
- SHORT, T. A. *Electric power distribution: Handbook*. 2004.
- SILVA, J. A. M. *Análise Comparativa de Resultados de Simulação de Afundamentos de Tensão Utilizando Programas de Curto-Circuito e de Transitórios Eletromagnéticos*. 215 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.
- SILVA, L. G. W. da et al. Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm. *Electric Power Systems Research*, v. 78, n. 3, p. 372 – 381, 2008. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779607000521>>.
- SOUZA, M.; COSTA, C. A.; JUNIOR, I. H. P. Sistema de localização automática de faltas em linhas de transmissão. In: . Curitiba: [s.n.], 2005.
- STYVAKTAKIS, E.; BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y. H. Automatic classification of power system events using rms voltage measurements. In: *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*,. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 824–829 vol.2. ISSN null.
- SULLIVAN, M.; MERCURIO, M.; SCHELLENBERG, J. Estimated value of service reliability for electric utility customers in the united states. 01 2009.
- VALE, A. L. C. do. *Impacto das Filosofias de Proteção na Qualidade da Energia Elétrica*. 95 p. — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
- WANG, L.; SINGH, C. Reliability-constrained optimum placement of reclosers and distributed generators in distribution networks using an ant colony system algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, v. 38, n. 6, p. 757–764, Nov 2008. ISSN 1558-2442.
- WESTIN, N. d. O. P. et al. Comparação entre metodologias de simulação de vtcds em redes de distribuição. In: *III Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- WESTIN, N. d. O. P. et al. Comparison between voltage sag simulation methodologies in distribution systems. In: *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- ZHANG, L.; XU, Y.; WANG, Z. Research on optimization of recloser placement of dg-enhanced distribution networks. In: *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2592–2597. ISSN null.
- ZONG, W. G.; JOONG, H. K.; LOGANATHAN, G. A new heuristic optimization algorithm: Harmony search. *SIMULATION*, v. 76, n. 2, p. 60–68, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/003754970107600201>>.

---

ÁLZATE, A. et al. Optimal location of reclosers in distribution systems considering reliability in communication channels. In: *2015 IEEE 6th Latin American Symposium on Circuits Systems (LASCAS)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4. ISSN null.