



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Beatriz Silveira Buss

**Alocação Multiobjetivo de Religadores Inteligentes em Redes Primárias de
Distribuição via Método de Entropia Cruzada**

Florianópolis
2024

Beatriz Silveira Buss

**Alocação Multiobjetivo de Religadores Inteligentes em Redes Primárias de
Distribuição via Método de Entropia Cruzada**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Diego Issicaba, PhD

Florianópolis
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Buss, Beatriz Silveira

Alocação multiobjetivo de religadores inteligentes em redes primárias de distribuição via método de Entropia Cruzada / Beatriz Silveira Buss ; orientador, Diego Issicaba, 2024.

85 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Método de Entropia Cruzada. 3. Alocação de religadores. 4. Otimização multiobjetivo. 5. Confiabilidade. I. Issicaba, Diego. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Beatriz Silveira Buss

Alocação Multiobjetivo de Religadores Inteligentes em Redes Primárias de Distribuição via Método de Entropia Cruzada

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Leonel Magalhães Carvalho, PhD
INESC TEC

Prof. Leonardo Elizeire Bremermann, PhD
Universidade Federal de Santa Catarina

Marcos Eduardo Pivaro Monteiro, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, PhD
Coordenador do Programa

Prof. Diego Issicaba, PhD
Orientador

Florianópolis, 01 de março de 2024.

Esta dissertação é dedicada aos meus pais e a todos
que me apoiaram durante essa etapa acadêmica.

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto P&D
ANEEL “Novos Elementos de Automação de Rede, Com
Funções Avançadas de Inteligência Distribuída”
fomentado pela empresa EDP, código ANEEL
PD-00380-0027/2018.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem o incentivo e compreensão da minha família e amigos que estiveram presentes nesta fase importante da minha vida.

Em especial, agradeço aos meus pais, Jacy e Hego, pelo amor e apoio incondicional em seguir uma trajetória em que não tiveram a mesma oportunidade. Aos meus irmãos, Alexandre, Fernanda e Amanda, e aos meus sobrinhos, Bernardo e Lucas, que são os amores da minha vida e tornam meus dias mais alegres.

Ao meu parceiro, Álvaro, que constantemente me encoraja e é uma fonte diária de inspiração para mim. Quero agradecer, por seu companheirismo, amor e todo o tempo despendido em discutir sobre tema desta dissertação. Quero estender meus agradecimentos a sua família, que tornou-se minha família também, pelo amor e acolhimento.

Ao meu orientador, professor Diego Issicaba, por acreditar no meu potencial e ter me dado a oportunidade em desenvolver este trabalho. Agradeço vigorosamente por seus ensinamentos e paciência, que foram fundamentais para meu amadurecimento acadêmico e profissional.

Aos professores e colegas do laboratório LabPlan, pelo apoio e momentos de descontração, tornando este período mais prazeroso. Em especial, a Thayane, Vinícius, Vitor, Eduardo, Juliana, Vanessa e Henderson. Estendo meus agradecimentos ao Yago, por ter compartilhado seus conhecimentos e pelo auxílio na introdução ao tema no início deste trabalho.

Ao INESC TEC, pela oportunidade em realizar o intercâmbio como pesquisador visitante, ampliando minha visão profissional e pessoal ao me expor a uma outra cultura e vivências na pesquisa. Em particular, gostaria de agradecer ao Leonel pelo acolhimento e valiosas contribuições que enriqueceram ainda mais este trabalho.

À CAPES e INESC P&D Brasil pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente tornaram esse trabalho possível.

RESUMO

Distribuidoras de energia empenham-se em garantir o fornecimento de energia elétrica em sua área de concessão, conforme padrões de qualidade e confiabilidade previstos em lei. Dado que a maioria das falhas em linhas aéreas de redes de distribuição são de natureza transiente, o uso de religadores reduz significativamente o tempo de interrupção para os consumidores, constituindo-se como uma prática comum aplicada por empresas de distribuição. A alocação de religadores em redes de distribuição é uma tarefa crítica para os planejadores, pois afeta diretamente a confiabilidade esperada do sistema e a percepção dos consumidores quanto à qualidade do serviço. Diante disso, esta dissertação propõe-se desenvolver uma abordagem capaz de lidar com múltiplas funções objetivo, apoiando a alocação de religadores inteligentes, com capacidade de comunicação em arquitetura *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN), em redes de distribuição de energia elétrica. A formulação do problema inclui aspectos relacionados aos custos esperados, à confiabilidade do serviço e à eficiência da comunicação. Neste sentido, esforços concentram-se em evitar multas relacionadas aos índices de continuidade de serviço individuais estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), reduzir os custos correspondentes à Energia Não Suprida (ENS) e minimizar os custos associados à instalação e manutenção do religador. Além disso, visa-se melhorar os índices de confiabilidade da rede, como o índice *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI) e a qualidade da comunicação entre os dispositivos religadores e um concentrador de dados *gateway*. Com esse propósito, o método de Entropia Cruzada (EC) foi estendido para se adaptar a uma perspectiva multiobjetivo, com atenção especial ao processo de seleção das soluções candidatas que compoem o conjunto de elite. Um procedimento em duas etapas foi delineado seguindo duas premissas destacadas na literatura para avaliar a qualidade das soluções. Essas premissas referem-se à convergência das soluções para a fronteira de Pareto e ao nível de dispersão do conjunto de elite ao longo do hiperplano. Em uma primeira etapa, realiza-se uma classificação das soluções candidatas considerando seu nível de não dominância. Se necessário, uma segunda etapa é executada com foco na obtenção de um conjunto de elite bem distribuído. Nessa última etapa, duas alternativas foram avaliadas: *crowding distance* e o critério baseado em pontos de referência. Os estudos de caso foram conduzidos para uma rede de distribuição localizada na região sudeste do Brasil e a avaliação dos critérios empregados na segunda etapa de seleção das soluções candidatas baseou-se em uma comparação de desempenho orientada por um indicador de hipervolume. Os resultados obtidos apontam para a efetividade da abordagem, alcançando soluções não dominadas bem distribuídas ao longo do hiperplano e enfatizam os impactos de diferentes critérios para construção do conjuntos de elite na solução do problema, considerando duas e três funções objetivo.

Palavras-chave: Método de Entropia Cruzada, alocação de religadores, otimização multiobjetivo, confiabilidade.

ABSTRACT

Power utilities are committed to ensure the supply of electricity in their concession areas, according to quality and reliability standards enforced by law. Considering that the majority of failures in overhead distribution systems are of transient nature, the usage of reclosers dictate a significant reduction in customer interruption duration, constituting a common approach by power engineers. The placement of reclosers in distribution networks is a critical task for distribution system planners, as it directly impacts the expected reliability of the system and the customer perception of the quality of service. This work proposes an approach able to deal with multiple objective functions, supporting the placement of intelligent reclosers, with communication capabilities based on a Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) architecture, in power distribution networks. Problem formulation includes aspects related to expected costs, service reliability and communication efficiency. In this sense, efforts are focused on avoiding fines related to individual service continuity indicators established by Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL), reducing the costs corresponding to Energy Not Supplied (ENS), and minimizing the costs associated with recloser installation and maintenance. Moreover, it aims to improve system reliability indices, such as the System Average Interruption Frequency Index (SAIFI), and the quality of communication between recloser devices and a gateway data concentrator. The Cross-Entropy (CE) method has been extended to fit a multi-objective perspective, with particular attention to selecting candidate solutions to construct the elite set. A two-step procedure has been designed following two premises highlighted in the literature for evaluating the quality of solutions. These premises refer to the convergence of solutions towards the Pareto front and the dispersion level of the elite set along the hyperplane. In a first step, a ranking of candidate solutions is performed considering their non-dominance level. If required, a second step is executed focusing on reaching a well-distributed elite set. In the latter, two alternatives have been assessed: crowding distance and reference point-based criterion. Case studies have been conducted for a real distribution feeder in the Southeast region of Brazil and the evaluation of the criteria used in the second step of selecting candidate solutions was based on a performance comparison directed by a hypervolume indicator. Results indicate the effectiveness of the approach, achieving well-distributed non-dominated solutions along the hyperplane and emphasizing the impact of different criteria to build elite sets on the solution of the problem, considering two and three objective functions.

Keywords: Cross-entropy method, multi-objective optimization, recloser placement, reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de espaço de estados do processo de Markov com três estados	31
Figura 2 – Etapas de transição entre os estados do sistema	33
Figura 3 – Arquitetura LoRaWAN	39
Figura 4 – Raio de uma única célula LoRaWAN	41
Figura 5 – Conceito de dominância em um problema de minimização com 2 funções objetivo	51
Figura 6 – Procedimento aplicado para a geração do conjunto de elite	54
Figura 7 – Exemplo de cálculo via critério <i>crowding distance</i>	58
Figura 8 – Associação de soluções candidatas a vetores de referência	60
Figura 9 – Distribuição dos pontos de referência para um problema com 3 funções objetivo	61
Figura 10 – Cálculo da métrica hipervolume para 2 funções objetivo	64
Figura 11 – Comparação de hipervolume usando diferentes vetores de referência	65
Figura 12 – Alimentador real sob análise	67
Figura 13 – fronteiras de Pareto obtidas para o problema com 3 funções objetivo	70
Figura 14 – Alocações de religadores obtidos por 3 soluções diferentes	71
Figura 15 – Comparação de desempenho com base no indicador de hipervolume	73
Figura 16 – Representação de uma rede de distribuição radial	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Visão geral do estado da arte	43
Tabela 2 – Sensibilidade LoRaWAN	54
Tabela 3 – Dados dos parâmetros de confiabilidade	68
Tabela 4 – Dados dos parâmetros relacionados aos custos	69
Tabela 5 – Parâmetros de entrada do algoritmo EC multiobjetivo	69
Tabela 6 – Resultados de desempenho para três soluções encontradas em uma fronteira de Pareto de ambos os critérios	71
Tabela 7 – Valores do diagrama de caixa do hipervolume	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CDOA	Algoritmo de Otimização de Decisão Coletiva
CF	Chave Fusível
CS	Chave Seccionalizadora
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por unidade consumidora
DGC	Desempenho Global de Continuidade
DIC	Duração de Interrupção Individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão
DICRI	Duração da Interrupção Individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão
DII	Dispositivos de Interconexão de Ilhamentos
DJ	Disjuntor
DMIC	Duração Máxima de Interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão
EC	Entropia Cruzada
ECOST	<i>Expected Customer Interruption Cost</i>
ENS	Energia Não Suprida
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por unidade consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão
FO	Funções Objetivo
iid	independentes e identicamente distribuídas
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPSO	Otimização de Enxame de Partículas Melhorado
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
IT	Interruptor
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	<i>Low-power Wide-area Network</i>
LTE-M	<i>Long-term Evolution for Machines</i>
MACO	<i>Multi-objective Ant Colony Optimization</i>
MAIFI	<i>Momentary Average Interruption Frequency Index</i>
MINLP	Programação Não Linear Inteiro Misto

MOGA	<i>Multi-objective Genetic Algorithm</i>
MOPSO	<i>Multi-Objective Particle Swarm Optimization</i>
MT	Média Tensão
NB-IoT	<i>Narrowband-IoT</i>
NEF	<i>Natural Exponential Family</i>
NSGA	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSO	Otimização de Enxame de Partículas
QPSO	Otimização por Enxame de Partículas com comportamento Quântico
RL	Religador
RSS	<i>Received Signal Strength</i>
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SMC	Simulação de Monte Carlo
SMCS	Simulação de Monte Carlo Sequencial
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

\mathcal{F}_ℓ	Conjunto contendo as soluções candidatas no nível de dominância ℓ
N_{occ}	Número de interrupções no sistema
\mathbb{I}	Conjunto de interrupções verificados na unidade consumidora ou no ponto de conexão
$t_{critico}$	Duração da interrupção ocorrida em dia crítico
uc	Índice de unidades consumidoras
C_c	Número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração
C^{DIC}	Custo anual associado ao DIC [R\$/ano]
C^{FIC}	Custo anual associado ao FIC [R\$/ano]
C^{DMIC}	Custo anual associado ao DMIC [R\$/ano]
C^{DICRI}	Custo anual associado ao DICRI [R\$/ano]
V	Indica o valor verificado do indicador de continuidade
P	Indica o valor limite do indicador de continuidade
VCR	Valor monetário base para o cálculo da compensação
kei_1	Coeficiente de majoração 1
kei_2	Coeficiente de majoração 2
T_i^{up}	Tempo em que o componente i esta em estado up (disponível)
T_i^{down}	Tempo em que o componente i esta em estado $down$ (indisponível)
λ	Taxa de falha
μ	Taxa de reparo
U_i	Número randômico distribuído uniformemente
$\tilde{E}[G]$	Valor esperado da função teste G
N_{ano}	Número de anos
a	Índice que especifica o ano
G	Função teste
y_a	Sequência de estados do sistema no ano a
$V(\tilde{E}[G])$	Variância de $\tilde{E}[G]$
β	Coeficiente de variação
λ^P	Taxa de falha permanente
λ^T	Taxa de falha transitória
μ^P	Taxa de reparo permanente
μ^T	Taxa de reparo transitória
N_P	Número de falhas permanentes
N_T	Número de falhas transitória
T_{op}	Tempo de operação do componente
$MTTR_T$	Tempo médio de reparo das falhas transitórias

$MTTR_P$	Tempo médio de reparo das falhas permanentes
$P_{at,1}$	Probabilidade da falta ser extinta na primeira batida do religador
$P_{at,2}$	Probabilidade da falta ser extinta na segunda batida do religador
x_1	Proporção da falha ser extinta na primeira batida do religador
\mathcal{X}	Espaço de estados
x^*	Variável da solução otimizada em \mathcal{X}
γ	Parâmetro de nível
x	Variável aleatória em \mathcal{X}
\mathbb{P}	Probabilidade
\mathbb{E}	Valor de esperança
$\mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}}$	Indicatriz do evento
\mathcal{L}	Estimador de probabilidade
\mathbf{W}	Razão de verossimilhança
D_{KL}	Distância de Kullback-Leiber
N	Número de soluções candidatas
ϱ	Parâmetro de raridade
N_e	Dimensão do conjunto de Elite
α	Coeficiente de suavização
$f_1(\cdot)$	Função objetivo número 1
Q	Número total de pontos de conexão
q	Índice do ponto de conexão
n_q^c	Número de consumidores conectados ao ponto de conexão q
g	Índice para o mês
C^{ENS}	Custo anual associado a ENS [R\$/ano]
R	Número total de religadores instalados
k	Índice do religador
$C_k^{recloser}$	Custo anual associado ao religador k [R\$/ano]
$f_2(\cdot)$	Função objetivo número 2
$f_3(\cdot)$	Função objetivo número 3
\mathbf{u}^*	Vetor de variáveis de decisão de uma solução pertencente ao conjunto de pareto
\mathcal{U}	Espaço amostral para as variáveis de decisão
\mathbf{u}	Vetor de variáveis de decisão
j	Índice das funções de desempenho
C	Conjunto de soluções candidatas
t	Número da iteração
n_{stop}	Parâmetro de parada do algoritmo
m	Número de funções objetivo
p_{ini}	Vetor de probabilidades inicial

p	Vetor de probabilidades
Ber_n	Distribuição de Bernoulli
U	Conjunto de soluções candidatas
$Elite$	Conjunto contendo os índices das soluções de elite
ℓ	Nível de não dominância
$rank$	Vetor de ranqueamento de cada solução candidata em U_t
i	Índice das soluções candidatas
n	Número de trechos disponíveis para a alocação de religadores
D	Conjunto de soluções candidatas
S	Matriz com valores de desempenho das soluções candidatas
S_e	Matriz com valores de desempenho das soluções ranqueadas do nível 1 a ℓ
th	Nível limite para o ranqueamento de não dominância
κ	Vetor que armazena as posições originais das soluções candidatas
r_i	Índice de auxílio no ranqueamento de pareto
r_p	Índice de auxílio no ranqueamento de pareto
o	Índice das soluções candidatas em e
\mathcal{D}_{cd}	Vetor <i>crowding distance</i>
S	Matriz contendo os elementos de S_e ordenados de acordo com a função objetivo j
c	Número de elementos do conjunto \mathcal{F}_ℓ
e	Número de solução candidatas em S_e
h_ℓ	Contador utilizado para identificar os elementos de \mathcal{F}_ℓ na extremidade
oe	Contador de elementos em \mathcal{F}_ℓ armazenados no conjunto de elite
$rank_{cd}$	Vetor com elementos de \mathcal{D}_{cd} ordenados
$index_{cd}$	Vetor que armazena as posições originais em \mathcal{D}_{cd} das soluções candidatas de $rank_{cd}$
w	Vetor de referência
W_{rp}	Conjunto de vetores de referência
ω	Número de pontos de referência
p	Número de divisões definidos para os pontos de referência
\hat{s}_{oj}	Solução candidata o normalizada na função objetivo j
s_{oj}	Valor de desempenho da solução o para a função objetivo j
s_j^*	Ponto ideal da função objetivo j (valor mínimo)
s_j^{nad}	Ponto nadir da função objetivo j (valor máximo)
\hat{S}_o	Vetor com valores de desempenho normalizados da solução o
w	Vetor de referência
\mathcal{D}_{rp}	Matriz que armazena a distância entre todas as soluções o em e e todos os pontos de referência r

r	Índice para os vetores de referência
π	Vetor identificado vetor de referência associado a cada solução candidata em e
r^*	Atribuí o ponto de referência associado a solução o em análise
d	Vetor com e elementos contendo a distância entre a solução o e o vetor de referência associado r^*
\mathcal{O}	Conjunto de soluções associadas ao vetor de referência subscrito
ρ	Vetor com ω elementos que contabiliza o número de soluções no conjunto de elite associados a cada vetor de referência
Ω_r	Conjunto contendo os vetores de referência com menor número de soluções associadas no conjunto de elite
\bar{r}	Vetor de referência estabelecido para seleção uma solução candidata a integrar o conjunto de elite
\mathbf{r}_{hv}	Vetor de referência do hipervolume
A	Matriz adjacência
M	Matriz de alcance
\mathcal{P}	Vetor contendo os nós que possuem equipamentos de proteção
n_{prot}	Identifica o nó de proteção

LISTA DE ALGORITMOS

1	Método de EC para aplicações de otimização	36
2	Algoritmo baseado no método de EC para otimização da alocação de religadores	38
3	Algoritmo para a otimização multiobjetivo via método de EC	52
4	Classificação de pareto (minimização)	56
5	Seleção baseada no critério <i>crowding distance</i>	58
6	Seleção baseada em pontos de referência	62
7	Identificação de nós com interrupção de serviço	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	20
1.2	OBJETIVOS	23
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	23
2	FUNDAMENTOS E DISCUSSÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE	25
2.1	INDICADORES DE CONTINUIDADE DE FORNECIMENTO	25
2.1.1	Indicadores de continuidade de serviço individuais	26
2.1.2	Indicadores de continuidade de serviço coletivos	27
2.1.3	Compensação financeira por violação dos indicadores	28
2.2	METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO DOS INDICADORES DE CONFIABILIDADE	29
2.2.1	Simulação de Monte Carlo sequencial	30
2.2.2	Modelagem de falhas permanentes e transitórias	31
2.3	OTIMIZAÇÃO BASEADA NO MÉTODO DE ENTROPIA CRUZADA	33
2.3.1	Método de entropia cruzada em problemas de otimização combinatoria aplicado na alocação de religadores	36
2.4	COMUNICAÇÃO LORAWAN	38
2.5	DISCUSSÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE	42
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
3	ABORDAGEM DESENVOLVIDA	49
3.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	49
3.2	EXTENSÃO DO MÉTODO DE ENTROPIA CRUZADA PARA MÚLTIPLAS FUNÇÕES DE DESEMPENHO	50
3.2.1	1ª Etapa: classificação de Pareto	56
3.2.2	2ª Etapa: seleção das soluções candidatas em \mathcal{F}_ℓ	57
3.2.2.1	<i>Crowding distance</i>	57
3.2.2.2	Critério baseado em pontos de referência	59
3.3	COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ORIENTADA POR INDICADOR DE HIPERVOLUME	63
3.4	CONSIDERAÇÕES E DISCUSSÕES	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	DESCRIÇÃO DA REDE TESTE E ESTUDOS DE CASO	67
4.2	SIMULAÇÕES E RESULTADOS NUMÉRICOS	69
4.3	COMPARAÇÃO DO MÉTODO MULTIOBJETIVO USANDO <i>CROWDING DISTANCE</i> E O CRITÉRIO BASEADO EM PONTOS DE REFERÊNCIA	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	74

5.1	CONCLUSÕES	74
5.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	77
	ANEXO A – MATRIZ DE ALCANCE	83

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados o contexto, a motivação, os objetivos e a estrutura do trabalho desenvolvido.

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Distribuidoras de energia mantêm constantes esforços para fornecer energia elétrica com qualidade, visando atingir as metas de continuidade e satisfação dos consumidores. Devido à cobertura geográfica das redes de distribuição, que normalmente se estende por zonas urbanas e rurais, interrupções podem ocorrer por diversos motivos, tais como condições meteorológicas adversas, crescimento de vegetação, erro humano, presença de animais, entre outros. Diante disso, considerando que a maioria das falhas em linhas aéreas de distribuição são de natureza transiente, o uso de religadores promove uma redução relevante na duração anual das interrupções consumidoras, constituindo-se como uma prática comum empregada por empresas de distribuição (BROWN, 2009; AZARHAZIN; FARZIN; MASHHOUR, 2023; REIZ *et al.*, 2022).

Em síntese, o religador é um dispositivo que tem por função a detecção de sobrecorrentes e realização de disparos de abertura e fechamento de contatos, com vistas a reduzir o impacto de faltas transitórias e permanentes. Para garantir a restauração do fornecimento, usualmente são efetuados até dois disparos adicionais (ZEINALZADEH; ESTEBSARI; BAHMANYAR, 2019; TIPPACHON; RERKPREEDAPONG, 2009), caso a falta persista após o primeiro disparo. Em situações em que a falta persista até um número máximo de disparos, o religador atua em coordenação com chaves fusíveis, visando isolar o trecho em falta e minimizar o número de consumidores afetados. Por conseguinte, a alocação desse equipamento de proteção em redes de distribuição é tarefa crítica para planejadores de redes de distribuição, em razão dos impactos diretos na confiabilidade esperada do sistema e na percepção dos consumidores perante à qualidade do serviço fornecido.

Diversos trabalhos têm explorado a aplicação de métodos de otimização de forma a promover a alocação mais adequada de religadores, com vistas a melhoria do desempenho dos sistemas de distribuição. Como exemplo, em (ALAM; TARIQ *et al.*, 2021) um Algoritmo Genético (AG) é usado para minimizar os custos globais de um sistema de distribuição radial na presença de geração distribuída. Similarmente, custos são minimizados em (ALAM; PANT; DAS, 2016), com enfoque na alocação de chaves fusíveis e religadores, empregando técnicas de Evolução Diferencial e Programação Não Linear Inteiro Misto (MINLP). Em (BANERJEE *et al.*, 2021), uma abordagem difusa, com base na hibridização de AG e Otimização por Enxame de Partículas com comportamento Quântico (QPSO), é utilizada para definir o número e a posição de

religadores, fusíveis e interruptores. Diferentes estratégias também são implementadas em (ABDI *et al.*, 2014) e (IMANI *et al.*, 2022) para o posicionamento de conjuntos de religadores e seccionadores, onde o primeiro utiliza uma abordagem híbrida baseada no algoritmo de Otimização de Enxame de Partículas Melhorado (IPSO) em conjunto com simulação de Monte Carlo, enquanto o segundo emprega um Algoritmo de Otimização de Decisão Coletiva (CDOA).

Tipicamente, os trabalhos disponíveis no estado da arte têm por enfoque a avaliação de apenas uma função objetivo, modelada com enfoque na redução de custos globais. Essa abordagem se mostra conveniente uma vez que permite a redução de custos associado a diversos critérios, como àqueles relacionados a expectativas sobre a confiabilidade do sistema, instalação e manutenção dos equipamentos, e assim por diante. Não obstante, é importante considerar os múltiplos fatores que circunstanciam o problema e buscar promover uma avaliação por meio de uma formulação comum. Nesse sentido, a otimização multiobjetivo permite uma busca global de compromisso entre funções objetivo alternativas e, ocasionalmente conflitantes, oferecendo aos tomadores de decisões um conjunto de soluções eficientes em uma fronteira de Pareto, nome atribuído ao conjunto de soluções não dominadas.

Dentre os trabalhos que empregam otimização multiobjetivo, destaca-se o artigo (REIZ *et al.*, 2022), no qual os autores buscam a minimização de duas funções objetivo: os custos associados à ENS e os custos relacionados aos equipamentos. Para esse propósito, o método *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) é aplicado com vistas a encontrar soluções não dominadas de alocação de dispositivos de proteção e controle em redes de distribuição. Os autores em (ZEINALZADEH; ESTEBSARI; BAHMANYAR, 2019) propõem o uso do método *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) para obter o posicionamento ótimo de religadores e seccionadores. A formulação visa minimizar três funções objetivo, a saber: o custo associado à energia indisponível aos consumidores, similar ao ENS, os índices de confiabilidade SAIFI e *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI), e os custos provenientes da instalação dos equipamentos.

Tal tipologia de combinação de funções objetivo tem sido empregada com frequência em trabalhos que têm por objetivo realizar a avaliação multiobjetivo da alocação de equipamentos de proteção em sistemas de distribuição (TIPPACHON; RERKPREEDAPONG, 2009; POMBO; MURTA-PINA; PIRES, 2015; PEREIRA *et al.*, 2018; COSTA; BESSANI; BATISTA, 2022). O método *Multi-objective Ant Colony Optimization* (MACO) é empregado em (TIPPACHON; RERKPREEDAPONG, 2009) para a alocação ótima de chaves e dispositivos de proteção. Os autores (POMBO; MURTA-PINA; PIRES, 2015) aplicam um Algoritmo Evolucionário Memético, que combina o NSGA-II com um algoritmo de busca local. Em (PEREIRA *et al.*, 2018), os autores propõem um modelo de programação não linear inteira mista, com resolução baseada no

método NSGA-II, com o objetivo de encontrar a alocação otimizada, coordenada e seletiva de dispositivos de proteção. O método NSGA-II também é aplicado em (COSTA; BESSANI; BATISTA, 2022) para a obtenção do conjunto de soluções não dominadas, seguido de uma abordagem multicritério para a seleção de uma única solução, vista como a mais adequada para os tomadores de decisão.

Neste contexto, esta dissertação consiste em uma extensão do trabalho desenvolvido por (BARACY *et al.*, 2020), que emprega otimização baseada no método de EC e adapta o modelo de Simulação de Monte Carlo Sequencial (SMCS) para apoiar a alocação ótima de religadores inteligentes em redes de distribuição. Propõe-se o desenvolvimento de uma abordagem para a alocação multiobjetivo de religadores inteligentes, com base no método de de EC. De fato, em problemas de otimização, o método de EC tem o princípio de incentivar a amostragem de eventos significativos por meio da construção de conjuntos de elite em um processo iterativo, visando a redução de variância. A fim de preservar os princípios fundamentais do método, nesta dissertação busca-se adaptar o processo de concepção dos conjuntos de elite de modo a se adequar a perspectiva multiobjetivo. Para tal, foi desenvolvido um procedimento de duas etapas seguindo as premissas destacadas na literatura para avaliação da qualidade de soluções multiobjetivo. Essas premissas referem-se à convergência das soluções para a fronteira de Pareto e ao nível de dispersão do conjunto de elite ao longo do hiperplano. Deste modo, em uma primeira etapa é realizada a classificação das soluções candidatas considerando seu nível de não dominância. Se necessário, a segunda etapa é executada com foco na obtenção de um conjunto de elite bem distribuído. Nessa última, duas alternativas foram avaliadas: *crowding distance*, introduzida no método NSGA-II (DEB; PRATAP *et al.*, 2002); e o critério baseado em pontos de referência, empregado no método NSGA-III (DEB; JAIN, 2014).

Até o presente momento, no que concerne o estado da arte, este trabalho caracteriza-se como a primeira aplicação da abordagem multiobjetivo para o problema, com base no método de EC para a alocação de religadores em redes de distribuição. Além disso, realiza-se a inclusão de uma função objetivo pouco convencional neste tipo de trabalho, que está relacionado com um critério de comunicação tendo em conta um dispositivo religador inteligente de baixo custo. O religador inteligente considerado é equipado com recursos de comunicação compatíveis com o protocolo *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN), que opera dentro das bandas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM), evitando assim tarifas relacionadas à frequência (LELLIS JR; OLIVEIRA, 2021; BARACY *et al.*, 2020). O LoRaWAN consiste no protocolo e arquitetura de rede que utiliza a tecnologia *Long Range* (LoRa) para comunicação de longas distâncias, sendo esta uma das tecnologias mais proeminentes dentro das *Low-power Wide-area Networks* (LPWANs), que em conjunto com as tecnologias *Narrowband-IoT* (NB-IoT), *Long-term Evolution for Machines* (LTE-M) e Sigfox, correspondem a cerca de 96% da

base de dispositivos instalados até 2021 (IOT ANALYTICS, 2021). Por último, destaca-se a utilização de um indicador de hipervolume, na comparação do desempenho do critério *crowding distance* e o critério baseado em pontos de referência, critérios estes aplicados na avaliação do nível de dispersão de conjuntos de soluções candidatas.

O LoRaWAN consiste no protocolo e arquitetura de rede que utiliza a tecnologia Long Range (LoRa) para comunicação de longas distâncias, sendo esta

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo principal desenvolver uma abordagem multi-objetivo para a alocação de religadores inteligentes em redes primárias de distribuição com base no método de EC. Os objetivos específicos a serem cumpridos são definidos na sequência:

- Estender o método de EC de forma a viabilizar aplicações com múltiplas funções de desempenho, com vistas a permitir a resolução de problemas de otimização multiobjetivo da alocação de religadores inteligentes;
- Realizar a modelagem matemática de três funções objetivo, tendo em vista aspectos relacionados com custos, confiabilidade e eficiência de comunicação;
- Realizar estudo de caso de otimização multiobjetivo da alocação de religadores inteligentes, considerando diferentes critérios de dispersão de soluções não dominadas.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está organizado como segue:

Capítulo 1: Este capítulo tem por fim destacar a contextualização e motivação do tema abordado, assim como os objetivos gerais e específicos alcançados. Sumariza-se o conteúdo de cada um dos capítulos da dissertação.

Capítulo 2: Este capítulo tem por objetivo apresentar uma descrição sobre os indicadores de continuidade de serviço estabelecidos para as distribuidoras que atuam no Brasil. Descreve-se os fundamentos teóricos utilizados na abordagem, tais como a aplicação da Simulação de Monte Carlo (SMC) e o método de EC. Apresenta-se uma breve descrição sobre o protocolo de comunicação LoRaWAN, adotado como meio de comunicação do religador. Adicionalmente, sintetiza-se uma revisão sobre o atual estado da arte da alocação de equipamentos de proteção em sistemas de distribuição. Essa revisão baseia-se em métodos que incorporam tanto uma função objetivo quanto abordagens multiobjetivo.

Capítulo 3: Este capítulo tem por fim apresentar a formulação matemática elaborada, contemplando 3 funções objetivo associadas à alocação de religadores em redes de distribuição. O objetivo principal é caracterizar o problema de forma abrangente, visando a minimização dos custos globais, a otimização de um indicador de confiabilidade e a otimização de um figura de mérito relacionada à comunicação do religador com outros instrumentos. Além disso, no capítulo descreve-se a abordagem proposta de extensão do método de EC para abranger múltiplas funções objetivo e apresenta-se o indicador hipervolume, utilizado como métrica na comparação entre critérios de avaliação de dispersão de soluções.

Capítulo 4: Neste capítulo, encontram-se os resultados e discussões da aplicação do método desenvolvido para a alocação de religadores inteligentes em uma rede primária de distribuição real. Ademais, realiza-se uma comparação de desempenho da aplicação do critério *crowding ditance* e do critério baseado em pontos de referência no método proposto.

Capítulo 5: Neste último capítulo, são apresentadas as conclusões da dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS E DISCUSSÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão sobre os fundamentos empregados na concepção da abordagem desenvolvida. Neste sentido, o capítulo tem por fim detalhar os aspectos da análise de confiabilidade utilizados para estimar o desempenho do sistema, além de apresentar uma breve descrição sobre o método de SMCS e sobre o método de EC convencional. Ademais, o capítulo apresenta uma discussão sobre os estudos recentes que abordam a alocação ótima de dispositivos de proteção em rede de distribuição.

O Capítulo 2 está dividido como segue. Na Seção 2.1 estão descritos os indicadores de continuidade de serviços individuais e coletivos, estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), bem como o cálculo de compensação financeira dado o descumprimentos de limites definidos para esses indicadores. Na Seção 2.2, apresenta-se as abordagens frequentemente utilizadas para a estimação dos indicadores de confiabilidade, tendo foco nos fundamentos do método de SMCS, aplicado neste trabalho, e a modelagem empregada para representar falhas permanentes e transitórias. Na Seção 2.3 são descritos os princípios do método de EC. A Seção 2.4 apresenta alguns conceitos básicos da comunicação LoRaWAN. Nas seções 2.5 e 2.6, descreve-se, respectivamente, o estado da arte relacionado às metodologias de alocação de equipamentos de proteção e as considerações finais do capítulo.

2.1 INDICADORES DE CONTINUIDADE DE FORNECIMENTO

As concessionárias distribuidoras de energia são responsáveis por atender diversas diretrizes essenciais para a manutenção dos padrões de fornecimento de energia. Dentre as suas atribuições, destacam-se a minimização de perturbações e ocorrência de interrupções de longa duração, tendo em vista o compromisso de atendimento contínuo aos consumidores. Para garantir esse objetivo, são necessárias iniciativas como a implementação de práticas operacionais eficientes, investimentos em infraestrutura e a adoção de medidas preventivas com vistas a mitigar a ocorrência de interrupções consumidoras.

No âmbito regulatório, no Brasil, essas empresas são sujeitas à supervisão da ANEEL, que normatiza e padroniza as atividades técnicas das distribuidoras por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Especificamente no que diz respeito às regras de continuidade do fornecimento, a ANEEL estabelece, no Módulo 8 do PRODIST, diretrizes para a qualidade do fornecimento da energia elétrica. Nesse módulo, são definidos os indicadores de continuidade de serviço individuais e coletivos, os quais fundamentam-se na frequência e duração das ocorrências de falha (ANEEL, 2021b).

Segundo a ANEEL, os indicadores de continuidade são contabilizados periodi-

camente (em intervalos mensais, trimestrais e anuais) por consumidor ou ponto de conexão. Além disso, a estimativa compreende apenas interrupções de longa duração, ou seja, com duração maior ou igual a 3 minutos, excluindo-se as interrupções classificadas como momentâneas (duração inferior ou igual a 3 segundos) e temporárias (duração superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos).

Nas subseções a seguir são descritos os indicadores de continuidade individuais e coletivos definidos na legislação vigente, assim como as expressões matemáticas estabelecidas para o cálculo das compensações financeiras correspondentes aos indicadores.

2.1.1 Indicadores de continuidade de serviço individuais

Os indicadores de continuidade de serviço individuais são utilizados para avaliar o desempenho do sistema elétrico e a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia. O controle das interrupções aplica-se de forma individual para cada unidade consumidora, central geradora ou ponto de conexão (ANEEL, 2021b). As Equações (1) a (4) referem-se às expressões empregadas na estimação dos indicadores individuais regulamentados atualmente no Brasil.

Duração de Interrupção Individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão (DIC): contabiliza o intervalo de tempo que uma unidade consumidora ou ponto de conexão permaneceu em estado de falta de energia no período de apuração (mensal, trimestral ou anual).

$$DIC = \sum_{i=1}^{N_{occ}} t_i \quad (1)$$

onde DIC é a duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora; t_i é o tempo de duração da interrupção i da unidade consumidora considerada ou do ponto de conexão, no período de apuração; e N_{occ} é número de interrupções da unidade consumidora ou por ponto de conexão considerado, no período de apuração.

Frequência de Interrupção Individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão (FIC): contabiliza o número de interrupções de longa duração total da unidade consumidora ou ponto de conexão durante um período de apuração (mensal, trimestral ou anual).

$$FIC = N_{occ} \quad (2)$$

onde FIC é a frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em número de interrupções.

Duração Máxima de Interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão (DMIC): corresponde ao tempo máximo de interrupção contínua percebida em uma unidade consumidora ou ponto de conexão no período de apuração (mensal).

$$DMIC = \max_{i \in \mathbb{I}} t_i \quad (3)$$

onde $DMIC$ é a duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora; e \mathbb{I} é o conjunto de interrupções verificados na unidade consumidora ou no ponto de conexão, no período de apuração.

Duração da Interrupção Individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão (DICRI): indica o tempo de cada interrupção de longa duração ocorrida em dia crítico. O dia crítico refere-se ao dia em que a quantidade de contingências emergenciais, em um determinado conjunto de unidades consumidoras, supera a média acrescida de três desvios padrões dos valores diários (estimados com base nos 24 meses anteriores ao ano em curso) (ANEEL, 2021a).

$$DICRI = t_{critico} \quad (4)$$

onde $DICRI$ é a duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora; e $t_{critico}$ é a duração da interrupção ocorrida em dia crítico.

2.1.2 Indicadores de continuidade de serviço coletivos

A estimativa dos indicadores de continuidade coletivos faz uso dos indicadores individuais apurados para os conjunto de unidades consumidoras. Esses índices servem como base de comparação de desempenho entre as distribuidoras de energia no Brasil através de um ranqueamento do indicador de Desempenho Global de Continuidade (DGC) (ANEEL, 2021b).

Os indicadores de continuidade de serviço coletivos são especificados nas Equações (5) e (6).

Duração Equivalente de Interrupção por unidade consumidora (DEC): indica o intervalo de tempo médio que cada unidade consumidora, de determinado conjunto, esteve com descontinuidade do serviço de distribuição de energia elétrica no período de apuração.

$$DEC = \frac{\sum_{uc=1}^{C_c} DIC_{uc}}{C_c} \quad (5)$$

onde DEC é a duração equivalente de interrupção expressa em horas e centésimos de horas; uc é o índice da unidades consumidoras atendida em Baixa Tensão (BT) ou Média Tensão (MT); e C_c é o número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT e MT.

Frequência Equivalente de Interrupção por unidade consumidora (FEC): indica o número de interrupções médio em cada unidade consumidora, de determinado conjunto, no período de apuração.

$$FEC = \frac{\sum_{uc=1}^{C_c} FIC_{uc}}{C_c} \quad (6)$$

onde FEC é a frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções.

Além desses dois indicadores coletivos de continuidade, tem-se como relevante o indicador a seguir.

Energia Não Suprida (ENS): refere-se à energia que deixou de ser suprida pelo conjunto devido às interrupções ocorridas no período de apuração.

$$ENS = \sum_{i=1}^{N_{occ}} \sum_{uc=1}^{C_c} P_{uc} t_i \quad (7)$$

onde ENS é a energia não suprida em (kWh). Esse indicador auxilia no cálculo do custo da energia não faturada pela distribuidora.

2.1.3 Compensação financeira por violação dos indicadores

A ANEEL é responsável por estabelecer os limites de continuidade individuais dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI, expressos nas Equações de (1) a (4). Quando os limites são violados, cabe à distribuidora calcular a compensação ao consumidor ou central geradora acessante do sistema de distribuição, efetuando o crédito na fatura, que deve ser apresentada até dois meses após o período de apuração (ANEEL, 2021b).

As Equações (8) a (11) apresentam as expressões utilizadas para o cálculo dos valores de compensação por unidade consumidora ou ponto de conexão.

$$C^{DIC} = DIC_V \frac{VCR}{730} kei_1 \quad (8)$$

$$C^{FIC} = \left(\frac{FIC_V}{FIC_P} \right) DIC_P \frac{VCR}{730} kei_1 \quad (9)$$

$$C^{DMIC} = DMIC_V \frac{VCR}{730} kei_1 \quad (10)$$

$$C^{DICRI} = DICRI_V \frac{VCR}{730} kei_2 \quad (11)$$

onde C^{DIC} , C^{FIC} , C^{DMIC} e C^{DICRI} correspondem aos custos associados a violação dos limites dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI, respectivamente; o subscrito V denota os valores verificados para os indicadores no período considerado; o subscrito P expressa o limite de continuidade para os indicadores, estabelecido no período considerado; o VCR corresponde ao valor monetário base para o cálculo da compensação referente ao mês de apuração do indicador, que depende do nível de tensão da conexão a rede; kei_1 é o coeficiente de majoração cujo valor deve ser fixado em: 34, 40 e 108 para unidade consumidora ou ponto de conexão atendidos em BT, MT e Alta Tensão (AT); e kei_2 é o coeficiente de majoração cujo valor deve ser fixado em: 14 e 20 para unidade consumidora ou ponto de conexão atendido em BT e MT.

2.2 METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO DOS INDICADORES DE CONFIABILIDADE

A estimativa dos indicadores de confiabilidade baseia-se, sobretudo, em abordagens probabilísticas realizadas por meio de métodos analíticos ou de simulação, no qual a SMC e suas derivações são amplamente empregadas. Os métodos analíticos representam os sistemas através de modelos matemáticos e buscam calcular os índices usando expressões numéricas diretas, com base na função distribuição de probabilidade de falha dos estados do sistema (BILLINTON; ALLAN, 1996). Em contrapartida, o método SMC consiste em um procedimento de simulação de eventos aleatórios baseados no comportamento estocástico dos componentes do sistema, observando um intervalo de confiança para validação da estimação de indicadores (BROWN, 2008).

As técnicas de SMC são classificadas como sequencial, que reproduz uma ordem de eventos cronológicos, e não-sequencial, amostrando os estados do sistema independente do período em que ocorrem. Outras vertentes têm sido desenvolvidas para manter o menor esforço computacional do modelo não-sequencial e a cronologia do modelo sequencial, como exemplo nos métodos de SMC quasi-sequencial (DA SILVA; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ *et al.*, 2014) e pseudo-sequencial (MELLO; PEREIRA; LEITE DA SILVA, 1994).

Embora as representações do sistema elétrico por espaço de estados, como no caso dos métodos analíticos e de SMC não-sequencial, forneçam menor esforço computacional para resolução do problema, os métodos sequenciais permitem a representação de aspectos correlacionados ao tempo e espaço (DA SILVA; SCHMITT *et al.*, 2005). Particularmente, para o caso da estimação de indicadores de confiabilidade

em redes de distribuição, o método de SMCS viabiliza a estimação direta do indicador DMIC. Por conseguintes, no desenvolvimento deste trabalho, utiliza-se o método de SMCS para estimar os índices de confiabilidade do sistema de distribuição.

2.2.1 Simulação de Monte Carlo sequencial

Na SMCS, os elementos das redes de distribuição que são sujeitos a falhas, tais como cabos, linhas, transformadores, reguladores de tensão, etc., podem ser representados pelo modelo de Markov a dois estados, definidos com base nas taxas de falha e reparo, e tendo em vista que a fonte de energia da rede esteja sempre disponível para a capacidade exigida (LEITE DA SILVA *et al.*, 2012; BARACY, 2020). No modelo de simulação cronológico, a avaliação do sistema divide-se em intervalos menores – por exemplo, um ano pode ser dividido em períodos horários, contabilizando 8760 faixas de tempo no total – onde o estado inicial usualmente é amostrado a partir de um algoritmo SMC não-sequencial e cada faixa de tempo é simulada em sequência para identificar novas contingências (BROWN, 2008; DA SILVA; R.GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2014). O processo de transição de estados do sistema depende do tempo de permanência de cada componente em uma condição de operação, definida com base nas funções de distribuição de probabilidade dos estados, definidos com base nas taxas de falha e reparo (BILLINTON; LI, 1994; BILLINTON; PAN, 2002). Apoiado neste conceito, os tempos de residência dos elementos em cada estado podem ser modelados como exponencialmente distribuídos conforme as Equações (12) e (13):

$$T_i^{up} = -\frac{1}{\lambda_i} \ln U_i \quad (12)$$

$$T_i^{down} = -\frac{1}{\mu_i} \ln U_i \quad (13)$$

onde T_i^{up} e T_i^{down} são os tempos amostrados em que o componente i encontra-se no estado de operação (disponível) e no estado de falha (indisponível), respectivamente; λ_i corresponde a taxa de falha do componente i ; μ_i representa a taxa de reparo do componente i ; e U_i é um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo $[0, 1]$.

Cada indicador de desempenho da rede de distribuição pode ser estimado usando a Equação (14) (ISSICABA; PECAS LOPES; DA ROSA, 2012; DA SILVA; R.GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2014).

$$\tilde{E}[G] = \frac{1}{N_{ano}} \sum_{a=1}^{N_{ano}} G(y_a) \quad (14)$$

onde y_a denota a sequência de estados do sistema no ano a ; $G(y_a)$ representa a função teste avaliada em y_a ; e N_{ano} expressa o número de anos simulados.

As incertezas das funções teste estimadas são definidas com base na variância dos resultados, de acordo com a Equação (15):

$$V(\tilde{E}[G]) = \frac{E\left[\left(G - \tilde{E}[G]\right)^2\right]}{N_{ano}} \quad (15)$$

A medida de precisão dos resultados é geralmente caracterizada pelo coeficiente de variação β , calculado por meio do desvio padrão do índice estimado, conforme Equação (16):

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\tilde{E}[G])}}{\tilde{E}[G]} \quad (16)$$

Os valores de β , calculados para cada índice de confiabilidade, servem como critério de convergência do processo estocástico.

2.2.2 Modelagem de falhas permanentes e transitórias

As avaliações de confiabilidade de sistemas elétricos normalmente adotam o modelo de Markov a dois estados, os quais representam os estados em operação e em falha permanente dos componentes. Contudo, diante da predominância de falhas transitórias nas redes de distribuição, torna-se fundamental a inclusão de um terceiro estado dos componentes, conforme exposto nos trabalhos de (CALADO, 2015), (VENTURINI, 2018) e (BARACY, 2020). As adaptações incorporadas ao processo de Markov contínuo a dois estados para incluir as falhas transitórias permitem uma análise mais abrangente da confiabilidade do sistema, como destacado no diagrama apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de espaço de estados do processo de Markov com três estados



Fonte: do autor, baseado em (CALADO, 2015).

Sendo assim, os elementos das redes de distribuição podem transitar pelos estados (CALADO, 2015):

- Estado 0: denota o estado do componente em operação – no qual cumpre sua função adequadamente;
- Estado 1: refere-se estado em falha permanente – indicando que o componente não cumpre adequadamente sua função devido a falha permanente;
- Estado 2: refere-se estado em falha transitória – indicando que o componente não cumpre adequadamente sua função devido a falha transitória;

Diante da composição de possíveis estados para os elementos da rede, adaptações na estimação das taxas de transição dos estados de falha e reparo tornam-se necessárias, as quais estão dispostas nas Equações de (17) a (20):

$$\lambda^P = \frac{N_P}{T_{op}} \quad (17)$$

$$\lambda^T = \frac{N_T}{T_{op}} \quad (18)$$

$$\mu^P = \frac{1}{MTTR_P} \quad (19)$$

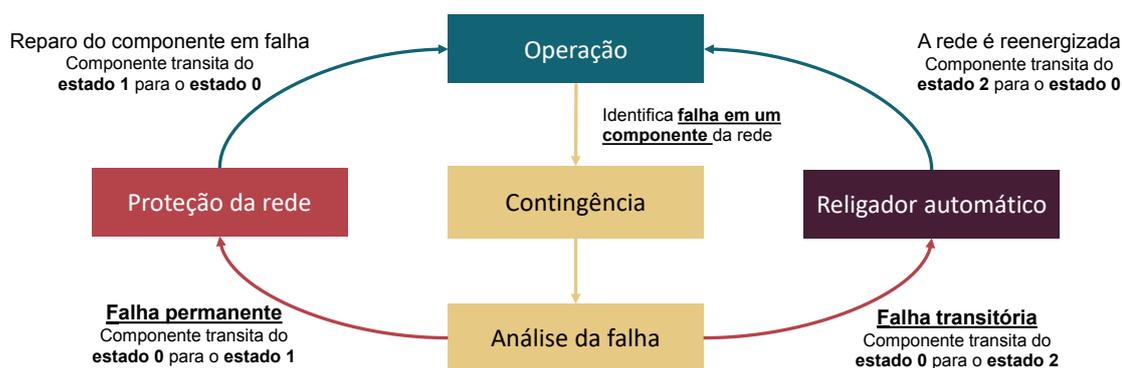
$$\mu^T = \frac{1}{MTTR_T} \quad (20)$$

onde λ^P e λ^T representam as taxas de falha permanente e transitória, respectivamente; μ^P e μ^T representam as taxas de reparo permanente e transitória, respectivamente; N_P e N_T corresponde ao número de falhas transitória e permanente, respectivamente, em período de análise; T_{op} corresponde ao tempo de operação do componente; $MTTR_T$ é o *Mean Time to Repair Transitory*, expressando o tempo médio de reparo das falhas transitórias definido igual ao tempo médio de atuação dos religadores; e $MTTR_P$ é o *Mean Time to Repair Permanent*, expressando o tempo médio de reparo das falhas permanentes. A demonstração de toda a formulação matemática para se obter as probabilidades de residência em cada estado é apresentada em (CALADO, 2015).

A Figura 2 descreve as etapas do modelo de transição entre os estados, empregando o processo que considera uma curva de religamento rápido e posteriormente uma mais lenta dos dispositivos religadores instalados em redes de distribuição (BOLACELL, 2016; VENTURINI, 2018).

A expressão que representa a probabilidade de extinção de uma falha transitória na primeira e segunda atuação do religador, considerando duas tentativas de religamento no total, são dadas pelas Equações (21) e (22), respectivamente, conforme deduzido em (VENTURINI, 2018):

Figura 2 – Etapas de transição entre os estados do sistema



- Proteção da rede: o religador automático mais próximo e à montante do componente em falta atua. Concluído os ciclos de atuação do religador, a proteção à montante mais próxima atua (por exemplo: chave fusível) para extinguir a falta permanente do sistema;
- Religador automático: o religador mais próximo e à montante do componente sob falta atua.

Fonte: do autor.

$$P_{at,1} = \frac{\lambda_T x_1}{\lambda_T + \lambda_P} \tag{21}$$

$$P_{at,2} = \frac{\lambda_T (1 - x_1)}{\lambda_T (1 - x_1) + \lambda_P} \tag{22}$$

onde $P_{at,1}$ e $P_{at,2}$ são as probabilidades da falta ser extinta na primeira e segunda atuação do religador, respectivamente; x_1 representa a proporção da falta ser extinta na primeira batida do religador.

2.3 OTIMIZAÇÃO BASEADA NO MÉTODO DE ENTROPIA CRUZADA

Problemas complexos de simulação, como os de análise de sistemas elétricos, lidam por vezes com a necessidade de modelagem de eventos raros. Devido à baixa probabilidade de ocorrência desses eventos durante os processos de simulação, a obtenção de resultados respeitando intervalos de confiança costuma demandar elevado esforço computacional. Alternativas eficientes que contornam esse problema podem ser obtidas por meio de métodos que empregam a minimização de variância. Neste sentido, o Método de Entropia Cruzada, proposto em (RUBINSTEIN, 1997; RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D P., 2004), tem como princípio a redução da variância por meio da amostragem por importância. Em síntese, o método tem o objetivo de estimular a amostragem de eventos significativos por meio de uma nova distribuição de probabilidade que é atualizada a cada iteração com base no percentil de amostras que apresentem o melhor desempenho.

O método de EC também pode ser formulado para aplicações de otimização de problemas estocásticos, que tipicamente envolvem a estimação da probabilidade de

eventos raros, caso aplicado a esta dissertação. Supondo que se pretende encontrar a solução com maior valor de função de desempenho S , pertencente ao espaço de estados \mathcal{X} , temos o resultado otimizado em x^* denotado por γ^* , tal que

$$S(x^*) = \gamma^* = \max_{x \in \mathcal{X}} S(x) \quad (23)$$

Para resolver a Equação (23), o método de EC associa ao problema de estimação de probabilidade, conhecido como problema estocástico associado, que busca calcular a probabilidade $\mathbb{P}_{\mathbf{u}}(S(\mathbf{X}) \geq \gamma)$ para um vetor de parâmetro fixo $\mathbf{u} \in \mathcal{V}$ e condicionado por um parâmetro de nível γ , como apresentado na Equação (24).

$$\mathcal{L}(\gamma) = \mathbb{P}_{\mathbf{u}}(S(\mathbf{X}) \geq \gamma) = \mathbb{E}_{\mathbf{u}} \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}} \quad (24)$$

onde \mathbf{X} é um valor aleatório definido pela função de densidade de probabilidade $f(\cdot; \mathbf{u})$; $\mathbb{E}_{\mathbf{u}}$ é o valor de esperança; e $\mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}}$ é uma função indicatriz do evento $\{S(\mathbf{X}) \geq \gamma\}$ que retorna 0 ou 1 caso a condição for falsa ou verdadeira, respectivamente. Se o parâmetro γ definido se aproximar do valor ótimo desconhecido γ^* , então $\mathcal{L}(\gamma)$ tipicamente corresponderá a probabilidade de um evento raro. Neste caso, para garantir aumento de desempenho da simulação é utilizado o conceito de amostragem por importância, que compreende na introdução de uma nova densidade de probabilidade $g(\mathbf{x})$. Seja $g(\mathbf{x})$ tal que $g(\mathbf{x}) = 0 \Rightarrow \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}} f(\mathbf{x}) = 0$, a probabilidade $\mathcal{L}(\gamma)$ é reescrita:

$$\mathcal{L}(\gamma) = \int \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}} \frac{f(\mathbf{x}; \mathbf{u})}{g(\mathbf{x})} g(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \mathbb{E}_{\mathbf{u}} \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{X}) \geq \gamma\}} \frac{f(\mathbf{X}; \mathbf{u})}{g(\mathbf{X})} \quad (25)$$

Se \mathcal{X} é um conjunto de amostras independentes e identicamente distribuídas (iid), $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N$, da função $g(\mathbf{x})$, um estimador não tendencioso é utilizado para obter \mathcal{L} , tal como:

$$\hat{\mathcal{L}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}} W(\mathbf{X}_i, \mathbf{u}) \quad (26)$$

onde $W(\mathbf{X}_i) = \frac{f(\mathbf{X}_i; \mathbf{u})}{g(\mathbf{X}_i)}$, conhecido como razão de verossimilhança. A amostra de importância otimizada é obtida quando a densidade de probabilidade g^* minimiza a variância de $\hat{\mathcal{L}}$ em \mathbf{X} condicionado ao evento $\{S(\mathbf{X}) \geq \gamma\}$ (RUBINSTEIN, Reuven Y.; KROESE, Dirk P., 2007):

$$g^*(\mathbf{x}) = \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}} \frac{f(\mathbf{x}; \mathbf{u})}{\mathcal{L}} \quad (27)$$

Tendo em vista que o estimador de probabilidade \mathcal{L} é obtido quando a variância é mínima, é conveniente assumir g^* pertencente à família de função de densidades $f(\cdot; \mathbf{v})$, tal que o parâmetro de referência \mathbf{v} promova uma distância mínima entre g^* e $f(\cdot; \mathbf{v})$. Uma maneira eficaz é utilizar a distância de Kullback-Leiber, também conhecida como entropia cruzada entre duas densidades, como definido na Equação (28) para as funções g e h :

$$D_{KL}(g, h) = \mathbb{E}_g \ln \frac{g(\mathbf{X})}{h(\mathbf{X})} = \int g(\mathbf{x}) \ln g(\mathbf{x}) d\mathbf{x} - \int g(\mathbf{x}) \ln h(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (28)$$

Minimizar a distância entre g^* da Equação (27) e $f(\cdot; \mathbf{v})$ corresponde na escolha de \mathbf{v} de maneira que minimize o segundo termo da equação $-\int g(\mathbf{x}) \ln h(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$ para as funções de densidade desejadas, como definido na Equação (29):

$$\max_{\mathbf{v}} \int g^*(\mathbf{x}) \ln f(\mathbf{x}; \mathbf{v}) d\mathbf{x} \quad (29)$$

Substituindo $g^*(\mathbf{x})$ da Equação (29) pelo termo da Equação (27):

$$\max_{\mathbf{v}} \int \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}} \frac{f(\mathbf{x}; \mathbf{u})}{\mathcal{L}} \ln f(\mathbf{x}; \mathbf{v}) d\mathbf{x} \quad (30)$$

Equivalente a Equação (30), o parâmetro de otimização \mathbf{v}^* é obtido:

$$\mathbf{v}^* = \arg \max_{\mathbf{v}} \mathbb{E}_{\mathbf{u}} \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}} \ln f(\mathbf{X}; \mathbf{v}) = \arg \max_{\mathbf{v}} \mathbb{E}_{\mathbf{w}} \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}} \frac{f(\mathbf{X}; \mathbf{u})}{f(\mathbf{X}; \mathbf{w})} \ln f(\mathbf{X}; \mathbf{v}) \quad (31)$$

onde \mathbf{w} é um parâmetro de referência. O parâmetro de otimização também pode ser estimado através do seguinte problema de otimização estocástico:

$$\hat{\mathbf{v}} = \arg \max_{\mathbf{v}} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}_k) \geq \gamma\}} \frac{f(\mathbf{X}_k; \mathbf{u})}{f(\mathbf{X}_k; \mathbf{w})} \ln f(\mathbf{X}_k; \mathbf{v}) \quad (32)$$

Considerando que em aplicações típicas a função $\hat{D}(\mathbf{v})$ é convexa e diferenciável em relação a \mathbf{v} , a solução da Equação (32) pode ser dada pela expressão a seguir, onde o gradiente está relacionado ao parâmetro \mathbf{v} .

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}_k) \geq \gamma\}} \frac{f(\mathbf{X}_k; \mathbf{u})}{f(\mathbf{X}_k; \mathbf{w})} \nabla \ln f(\mathbf{X}_k; \mathbf{v}) = \mathbf{0} \quad (33)$$

A vantagem da solução abordada é possibilidade de obter a solução analiticamente, especialmente quando a distribuição das variáveis aleatórias pertence à *Natural Exponential Family* (NEF) (RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D P., 2004; DE MAGALHÃES CARVALHO; LEITE DA SILVA; MIRANDA, 2018).

Destaca-se que a solução fornecida pela Equação (32) é útil para eventos no qual a probabilidade $\mathbb{P}(S(\mathbf{X}) \geq \gamma)$ não ultrapasse o limite de $\mathcal{L} \geq 10^{-5}$ em problemas de maximização. Isto porque, avaliando a probabilidade de evento raro, a maioria ou todos os resultados da função indicatriz $\mathbf{I}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma\}}$ será zero. Neste caso, um algoritmo multinível de CE é utilizado para resolver este problema, onde uma sequência de parâmetros de referência $\mathbf{v}_t, t \geq 0$ e parâmetros de nível $\gamma_t, t \geq 1$ são gerados com o objetivo de convergirem a cada iteração t para o resultado ótimo \mathbf{v}^* e γ^* (RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D P., 2004; BOTEV *et al.*, 2013).

Com este propósito, a cada iteração são amostrados N variáveis aleatórias independentes x_1, \dots, x_N baseadas na função de densidade mais recente $f(\cdot; \hat{\mathbf{v}}_{t-1})$ e o parâmetro de nível $\hat{\gamma}_t$ é definido como valor da função de desempenho localizado no quantil $(1 - \varrho)$, onde ϱ é definido como parâmetro de raridade. O valor $\hat{\mathbf{v}}_t$ é atualizado

com base na minimização de entropia cruzada, que considera as amostras de elite $N_e = \lfloor \varrho N \rfloor$ que representam $S(\mathbf{X}) \geq \hat{\gamma}_t$ (RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D P., 2004; BOTEV *et al.*, 2013).

O Algoritmo 1 descreve o método de entropia cruzada para aplicações de otimização:

Algoritmo 1 Método de EC para aplicações de otimização

Seja N a dimensão da amostra a considerar, ϱ o parâmetro de raridade, N_e o número de amostras de elite e $t = 1$.

- 1: Definir um vetor inicial de parâmetros $\hat{\mathbf{v}}_0 := \mathbf{u}$;
- 2: Gerar as N amostras $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N \sim_{iid} f(\cdot; \hat{\mathbf{v}}_{t-1})$. Calcular $S(k) = S(\mathbf{x}_k), \forall k$ e ordenar as funções desempenho tal que $S(1) \leq \dots \leq S(N)$. Considere ainda $\hat{\gamma}_t = S(N - N_e + 1)$ o quantil $1 - \varrho$ de desempenho;
- 3: Para a mesma amostra $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N$ resolver o problema estocástico

$$\max_{\mathbf{v}} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbb{I}_{S(\mathbf{x}_k) \geq \hat{\gamma}_t} \ln f(\mathbf{x}_k; \mathbf{v}). \quad (34)$$

Denotar a solução por $\hat{\mathbf{v}}_t$;

- 4: Se o critério de parada estabelecido é atendido, finalizar o processo. Caso contrário, definir $t = t + 1$ e retornar ao Passo 2.
-

Um problema que pode ocorrer no processo de atualização da variável $\hat{\mathbf{v}}_t$ é a convergência para 0 ou 1 nas iterações iniciais, o que não se torna interessante quando se deseja amostrar uma variedade de eventos. A solução utilizada é aplicar um coeficiente de suavização, α , para a atualização da variável, como apresentado na Equação (35):

$$\hat{\mathbf{v}}_t = \alpha \hat{\mathbf{v}}_t + (1 - \alpha) \hat{\mathbf{v}}_{t-1} \quad (35)$$

O valor de α pode ser determinado no intervalo $[0,1]$, sendo provado empiricamente que valores $0,3 \leq \alpha \leq 0,9$ fornecem bons resultados (RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D P., 2004).

2.3.1 Método de entropia cruzada em problemas de otimização combinatória aplicado na alocação de religadores

Quando o espaço amostral \mathcal{X} é finito, o problema de otimização da Equação (23) é usualmente caracterizado como discreto ou combinatório (BOTEV *et al.*, 2013). No caso aplicado a esta dissertação, a alocação otimizada de religadores na rede de distribuição envolve a melhor combinação de trechos para a instalação desses equipamentos, correspondendo a uma otimização combinatória. Este problema de alocação pode ser modelado como posições em um vetor \mathbf{x} que assume valores binários para a instalação ou não de um religador em trechos candidatos a alocação (BARACY, 2020).

A distribuição de Bernoulli é uma distribuição discreta usualmente aplicada para a resolver problemas relacionados a processos binários e, portanto, adequada para problemas de sistemas elétricos, como a alocação de religadores. Sua função densidade de probabilidade, expressa na Equação (36), pode ser utilizada nas funções densidade de probabilidade presentes na Equação (32).

$$f(\mathbf{x}_k; \mathbf{v}) = \mathbf{v}^{\mathbf{x}_k} (1 - \mathbf{v})^{1 - \mathbf{x}_k} \quad (36)$$

Aplicando a função logaritmo natural na Equação (36), tem-se que

$$\ln f(\mathbf{x}_k; \mathbf{v}) = \ln (\mathbf{v}^{\mathbf{x}_k} (1 - \mathbf{v})^{1 - \mathbf{x}_k}) \quad (37)$$

e, utilizando do operador gradiente em relação à \mathbf{v} , obtém-se:

$$\nabla \ln f(\mathbf{x}_k; \mathbf{v}) = \frac{1}{1 - \mathbf{v}} (\mathbf{x}_k \mathbf{v}^{-1} - 1) \quad (38)$$

conforme manipulações algébricas verificadas em (BARACY, 2020).

A razão de verossimilhança que é utilizada na estimação do parâmetro de referência ótimo é dada pela expressão:

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}_k; \mathbf{u}, \mathbf{w}) = \frac{f(\mathbf{x}_k; \mathbf{u})}{f(\mathbf{x}_k; \mathbf{w})} \quad (39)$$

Substituindo-se as Equações (38) e (39) na expressão do gradiente da Equação (33), obtém-se:

$$\sum_{k=1}^N \mathbf{I}_{S(\mathbf{x}_k) \geq \gamma} \mathbf{W}(\mathbf{x}_k; \mathbf{u}, \mathbf{w}) \frac{1}{1 - \mathbf{v}} (\mathbf{x}_k \mathbf{v}^{-1} - 1) = 0 \quad (40)$$

$$\mathbf{v}^* = \frac{\sum_{k=1}^N \mathbf{I}_{S(\mathbf{x}_k) \geq \gamma} \mathbf{W}(\mathbf{x}_k; \mathbf{u}, \mathbf{w}) \mathbf{x}_k}{\sum_{k=1}^N \mathbf{I}_{S(\mathbf{x}_k) \geq \gamma} \mathbf{W}(\mathbf{x}_k; \mathbf{u}, \mathbf{w})} \quad (41)$$

Considerando que em problemas de otimização combinatória, não existe interesse na estimação do valor de \mathcal{L} e que as amostras no conjunto de elite não apresentam pesos diferentes entre si na determinação do parâmetro de referência ótimo \mathbf{v}^* , conclui-se que a razão de verossimilhança é mantida unitária (BARACY, 2020). Diante disso, a estimação de \mathbf{v}^* , aplicado iterativamente no problema de alocação de religadores, é dada pela Equação (42).

$$\mathbf{v}^* = \frac{\sum_{k=1}^N \mathbf{I}_{S(\mathbf{x}_k) \geq \gamma} \mathbf{x}_k}{\sum_{k=1}^N \mathbf{I}_{S(\mathbf{x}_k) \geq \gamma}} \quad (42)$$

Empregando os conceitos detalhados nesta subseção, o Algoritmo 2 descreve as etapas do modelo de EC aplicado na alocação de religadores inteligentes na rede de distribuição. Destaca-se que o evento $S(\mathbf{x}) \geq \gamma$ tende a ser raro se γ aproxima-se de seu valor ótimo γ^* , em que \mathbf{x} representa uma variável aleatória em \mathcal{X} com uma densidade de probabilidade $f(\mathbf{x}; \cdot)$. Logo, espera-se que se a densidade de probabilidade

estiver próxima de uma densidade ótima, as amostras geradas \mathbf{x} aproximem a função de desempenho $S(\mathbf{x})$ do seu valor ótimo (BARACY, 2020).

Algoritmo 2 Algoritmo baseado no método de EC para otimização da alocação de religadores

- 1: Defina $t = 1$, n o número de trechos candidatos para a alocação; $\mathbf{p}_t[i]$ o i -ésimo elemento de um vetor n -dimensional, \mathbf{p}_1 um vetor com as probabilidades iniciais de alocar religadores;
- 2: Considere N_e igual a parte inteira de ϱN ;
- 3: Considere U_t um conjunto vazio e r_t um vetor vazio;
- 4: Gerar N soluções candidatas usando a distribuição de probabilidade de Bernoulli e coloque as soluções geradas em U_t ;
- 5: Calcule $S(\mathbf{x})$ para cada solução candidata $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$ e adicione este valor a r_t ;
- 6: Ordene r_t em ordem crescente;
- 7: Defina $\gamma_t = r_t[N - N_e + 1]$;
- 8: Se o critério de parada for atendido pela função performance, retorne

$$\mathbf{x}_{output} = \underset{\mathbf{x} \in U_1 \cup U_2 \cup \dots \cup U_t}{arg \max} S(\mathbf{x})$$

e pare o algoritmo. Do contrário vá para o próximo passo;

- 9: Defina

$$\mathbf{p}_{t+1}[i] = \frac{\sum_{\mathbf{x} \in U_t} \mathbf{1}_{\{S(\mathbf{x}) \geq \gamma_t\}} \mathbf{x}[i]}{N_e}$$

para $\forall i = 1, \dots, n$ e $t \leftarrow t + 1$;

- 10: Realize o procedimento de atualização suavizada de probabilidades a seguir e retorne para o passo 2:

$$\mathbf{p}_{t+1}[i] = \alpha \mathbf{p}_{t+1}[i] + (1 - \alpha) \mathbf{p}_t[i]$$

No Algoritmo 2, amostras são geradas utilizando a distribuição de Bernoulli $f(\mathbf{x}_k; \mathbf{p})$ descrita na Equação (36) considerando as probabilidades \mathbf{p} . O parâmetro N determina o número de amostras e o parâmetro ϱ determina uma porcentagem aproximada de amostras do total que formarão o conjunto com as amostras de elite. Dessa forma, dado o espaço de busca $\mathcal{X} = [0, 1]^n$, um esquema iterativo é utilizado, onde em cada iteração t , o valor de γ_t é definido contendo apenas uma fração das soluções candidatas que resultam em $S(\mathbf{x}) \geq \gamma_t$.

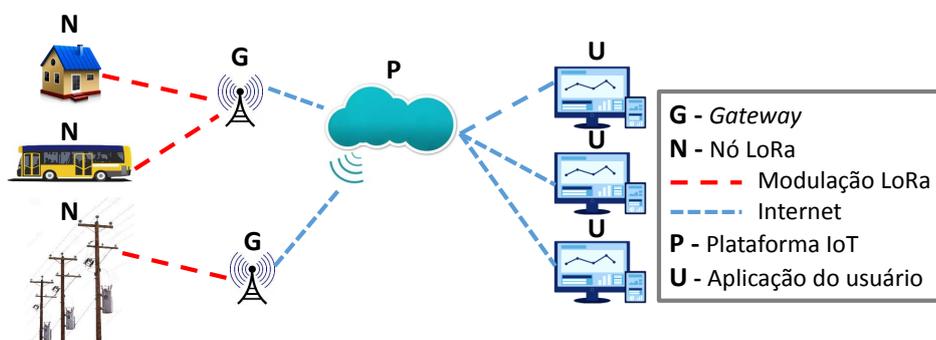
2.4 COMUNICAÇÃO LORAWAN

O protocolo de comunicação LoRaWAN é definido como um protocolo de comunicação sem fio de longo alcance projetado para a comunicação com baixa taxa de transferência de dados, requerendo baixo consumo de energia, ideal para aplicações do tipo *Internet of Things* (IoT) (MAURYA; SINGH; KHERANI, 2022). Essa tecnologia tem encontrado aplicação em diversas áreas, incluindo sistemas elétricos, especialmente no contexto das *smart grids*. Sua relevância nessa esfera se deve ao maior alcance em relação as outras tecnologias, como a NB-IoT e LTE-M, ideal para redes de distribuição extensas, além do baixo consumo de energia e protocolos de segurança

robustos. A aplicação mais conhecida é a implementação de medidores inteligentes, que permitem o monitoramento e controle do consumo de energia em tempo real. Ademais, no âmbito da pesquisa, outros dispositivos tem sido explorados para o uso da tecnologia LoRaWAN, tais como: indicadores de falta e unidades terminais remotas (LI *et al.*, 2019). Neste trabalho, apresenta-se o uso da tecnologia LoRaWAN em religadores inteligentes, uma aplicação ainda pouco explorada (LELLIS JR; OLIVEIRA, 2021).

No protocolo LoRaWAN, *gateways* são usados em uma topologia estrela para transmitir mensagens entre dispositivos, chamados de nós, e a aplicação final (PETRARIU; LAVRIC; COCA, 2019). A arquitetura LoRaWAN, compreendendo os elementos mencionados, pode ser vista na Figura 3.

Figura 3 – Arquitetura LoRaWAN



Fonte: (BARACY, 2020).

Na Figura 3, os dispositivos ou nós, representados por N, transmitem as informações para um ou mais *gateways* utilizando do protocolo LoRa, camada física que permite um link de salto único entre o nó e os *gateways*. Os *gateways*, por sua vez, são responsáveis por converter os pacotes de dados em radiofrequência para pacotes IP, e então transmitir para um servidor de rede central por meio de conexões IP (LORA ALLIANCE, 2024). O servidor de rede, que pode estar na plataforma IoT, realiza o gerenciamento das informações transmitidas, filtrando e removendo dados duplicados, que ocorrem quando um nó é visto por mais de um gateway.

No Brasil, o ato N^o 14448 de 2017 da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), que regulamenta a tecnologia LoRa no país, define a faixa de frequência a ser operada igual ao padrão Australiano, na faixa de 915-928 MHz na banda ISM (ANATEL, 2017). Para atender necessidade particulares de cada aplicação, cada dispositivo final pode operar a partir de uma das seguintes classes: A, B ou C, definidas a seguir, onde a classe A corresponde ao modo padrão de funcionalidade da rede LoRa e deve ser suportada por todos os dispositivos finais LoRaWAN (LORA ALLIANCE, 2024):

- **Classe A – Dispositivos finais bidirecionais de menor potência:** a comunica-

ção classe A é sempre iniciada pelo dispositivo final e é totalmente assíncrona. Neste contexto, cada transmissão de dados enviada do dispositivo para o *gateway* ou rede, conhecida como *uplink*, pode ocorrer em qualquer momento, seguida por duas breves janelas de recebimento de dados do servidor para o dispositivo, denominadas de *downlink*. Se necessário, essas janelas fornecem uma oportunidade para comunicação bidirecional ou envio de comandos de controle de rede, seguindo o protocolo ALOHA. Além disso, o dispositivo final tem a capacidade de entrar em um modo de baixo consumo de energia, determinado pela aplicação específica do dispositivo, sem a necessidade de acionamento periódico pela rede. Isso faz com que a classe A forneça o modo operacional mais eficiente em termos de consumo de energia.

- **Classe B – Dispositivos finais bidirecionais com latência determinística de *downlink*:** os dispositivos da classe B são sincronizados com a rede por meio de *beacons* periódicos em horários programados. Isto proporciona à rede a capacidade de enviar comunicações de *downlink* com uma latência determinística, garantindo uma resposta rápida aos comandos do servidor. No entanto, essa sincronização requer um consumo adicional de energia.
- **Classe C – Dispositivos finais bidirecionais de menor latência:** corresponde a classe mais avançada em termos de capacidade de *downlink*, ao reduzir ainda mais a latência no *downlink*, mantendo o receptor do dispositivo final aberto sempre que o dispositivo não estiver transmitindo.

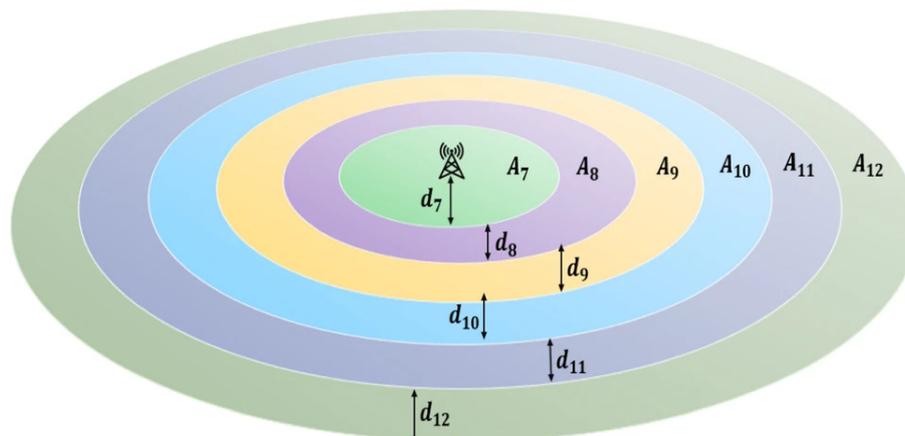
Destaca-se ainda que a arquitetura LoRaWAN detém diversos mecanismos de segurança, os quais visam manter a confidencialidade e integridade dos dados transmitidos. Para tal, são definidas duas camadas de criptografia, a primeira entre o dispositivo e o servidor de rede enquanto a segunda é compartilhada de ponta a ponta no nível do aplicativo, isto é, entre o dispositivo e a aplicação final (LORA ALLIANCE, 2024). Ademais, a autenticação dos dados é conduzida por meio de algoritmos de criptografia avançados, os quais são responsáveis por assegurar a integridade dos pacotes.

Um dos parâmetros de modulação da camada física usado na rede LoRa é o *Spreading Factor* (SF), interpretado como o número de bits necessários para codificar um símbolo LoRa, cuja relação com o tempo de transmissão é expressa na Equação (43):

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (43)$$

onde SF é o *spreading factor* correspondente e BW representa a largura de banda disponível. A equação denota uma relação exponencial com o valor de SF, no qual o

Figura 4 – Raio de uma única célula LoRaWAN



Fonte: (MAURYA; SINGH; KHERANI, 2022).

incremento em SF dobra o tempo no ar para transmitir a mesma quantidade de dados, ou seja, à medida que o SF aumenta, diminui-se a taxa de transmissão de dados (MAURYA; SINGH; KHERANI, 2022). Entretanto, valores maiores de SF também estão relacionados com a maior robustez contra interferências nos sinais recebidos pelo *gateway*.

O dispositivo LoRa normalmente opera com SF variando de 7 a 12 e o valor atribuído a um dispositivo final é baseado na *Received Signal Strength* (RSS), observado por meio de uma medida de potência do pacote de dados recebido. O valor do RSS é diretamente afetado pela distância de comunicação. A Figura 4 ilustra a cobertura de um *gateway*, em que cada anel representa o dispositivo para um SF, onde quanto menor for a distância do dispositivo ao *gateway*, menor será o SF e, conseqüentemente, maior será a taxa de transmissão de dados. O desempenho de dispositivos instalados em uma área de cobertura afastada do centro, onde o SF é mais elevado, pode ser aprimorado por meio da instalação estratégica de *gateways* adicionais. Entretanto, é fundamental avaliar o benefício em termos de eficiência de comunicação em relação aos custos adicionais associados à expansão da infraestrutura, incluindo o aumento de fibra óptica necessária para viabilizar essa expansão.

Além do SF, salienta-se a existência de outro parâmetro similar empregado na avaliação de transmissão de dados do LoRaWAN: o *Data Rate*, que representa o número de bits processados por unidade de tempo. A relação direta entre as métricas indica que quanto maior o SF menor será o valor correspondente do *Data Rate*. Neste trabalho, a análise do SF em relação à taxa de dados transmitida foi utilizada para tornar a formulação menos dependente de regulamentos regionais.

O critério de comunicação do religador, baseado no cálculo do SF, é diretamente utilizado na formulação matemática desenvolvida neste trabalho.

2.5 DISCUSSÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE

Diversas metodologias têm sido adotadas para endereçar problemas relacionados à alocação de dispositivos de proteção e controle em redes de distribuição. No âmbito desses estudos, o principal objetivo consiste em avaliar o sistema de forma a promover melhoria nos índices de continuidade buscando o mínimo impacto nos custos envolvidos.

Uma visão geral sobre as bibliografias correlatas estudadas para a composição deste trabalho é apresentada na Tabela 1. Esse resumo visa identificar os tipos de equipamentos direcionados pelas pesquisas para a integração nas redes de distribuição, quantificar o número de Funções Objetivo (FO) considerados, apontar as abordagens adotadas para solucionar o problema, identificar as considerações utilizadas para a formulação das funções objetivo e destacar os estudos que empregaram SMC para estimar variáveis sujeitas a incertezas.

Alguns artigos apresentam a estruturação do problema de maneira a minimizar os custos globais, levando em consideração as despesas associadas ao ENS, equipamentos e outros encargos a serem restituídos aos consumidores (ALAM; TARIQ *et al.*, 2021; ALAM; PANT; DAS, 2016; ABDI *et al.*, 2014). Em contrapartida, existem trabalhos que adotam lógicas difusas, incorporando o conceito de ponderação para contemplar outros índices de confiabilidade na formulação, tais como aqueles que representam a frequência e duração das ocorrências de falha (IMANI *et al.*, 2022; BANERJEE *et al.*, 2021). Diante disso, nos itens abaixo, apresenta-se uma breve descrição das formulações e técnicas de otimização mono-objetivo empregadas em trabalhos correlatos presentes no estado da arte.

- O método de otimização baseado em Algoritmos Genéticos é empregado na alocação de religadores em rede de distribuição radial, considerando a existência de fluxo de potência bidirecional devido a participação da geração distribuída (ALAM; TARIQ *et al.*, 2021). O método utilizado para estimar os indicadores de confiabilidade tem por base uma abordagem analítica. A formulação do problema inclui uma função objetivo que considera a redução de custos das interrupções com foco nas despesas ressarcidas aos consumidores em decorrência dos danos causados por eventos de falha, a receita associada à ENS e as despesas associadas aos religadores. Além disso, restrições referentes ao número limite de religadores instalados por trecho e por alimentador também são considerados.
- Uma formulação similar é proposta em (ALAM; PANT; DAS, 2016), com foco nos custos globais para a alocação de chaves e religadores na rede de distribuição. Nesse artigo, os autores comparam as técnicas adotando métodos de Evolução Diferencial e o MINLP, enquanto as incertezas do problema são avaliadas usando um método de estimativa pontual.

- A alocação de religadores e seccionalizadores em rede de distribuição primária é realizada em (ABDI *et al.*, 2014), cujo o objetivo principal na minimização de custos. Com esse propósito, a função objetivo é composta pela soma de três elementos, o primeiro relacionado com o Valor Presente Líquido (VPL) do benefício adquirido com a alocação dos equipamentos (obtido pela diferença do custo da ENS total sem e com a utilização de dispositivos de proteção), o segundo elemento refere-se ao investimento dos equipamentos, e, por último, considera-se o VPL associado aos custos de manutenção. A abordagem de otimização empregada no artigo é o IPSO, enquanto a estimativa dos valores de ENS anuais baseiam-se em SMC.
- De forma análoga, o artigo (IMANI *et al.*, 2022) propõe a alocação de dispositivos religadores e seccionalizadores empregando uma abordagem evolutiva CDOA para encontrar o resultado ótimo. A função objetivo é formulada com intuito de minimizar índices de confiabilidade, tais como: SAIDI, SAIFI, *Momentary Average Interruption Frequency Index* (MAIFI) e custos referente a ENS. Adicionalmente, a análise abrange os investimentos necessários para a instalação desses dispositivos na rede de distribuição. Diante da heterogeneidade na função baseada na soma dos elementos descritos, o conceito difuso é aplicado integrando fatores de ponderação para alcançar a homogeneidade desejada na função objetivo.
- A hibridização de duas meta-heurísticas é proposta por (BANERJEE *et al.*, 2021) para definir o número e a posição de religadores, fusíveis e interruptores na rede de distribuição, adotando um AG aprimorado e o QPSO. A abordagem baseada na combinação dos métodos visa suprir as desvantagens de cada um, tornado-a mais robusta que os dois métodos aplicados de maneira individual. O Otimização de Enxame de Partículas (PSO) demonstra eficiência para identificar soluções ótimas locais, contudo, depende da escolha de um ponto inicial. Por outro lado, o método AG é menos sensível a posição inicial e tende a convergir para ótimos globais. Neste sentido, o algoritmo genético se destaca como uma alternativa para definir um espaço de busca local, permitindo que o QPSO identifique rapidamente a solução ótima. A função objetivo combina três funções distintas por meio de coeficientes de ponderação, resultando em uma única função de minimização que abrange os indicadores de confiabilidade SAIDI, SAIFI e os custos relacionados à instalação dos equipamentos, assim como aos custos associados a interrupções permanentes e transitórias.

Embora problemas com uma única função objetivo sejam capazes de representar aspectos relevantes na avaliação de desempenho dos sistemas de distribuição, é importante para os tomadores de decisão compreender a relação entre elementos analisados no problema, que por vezes envolve objetivos conflitantes. Essa compreensão

fornece uma perspectiva mais abrangente sobre a resolução do problema, capturando compromisso envolvido em cada solução encontrada e permitindo a seleção daquela que for mais conveniente. Portanto, as técnicas multiobjetivo destacam-se como estratégias que visam proporcionar um conjunto diversificado de soluções. Abaixo, são citadas as aplicações do estado da arte correlatas a esta dissertação, abordando mais de uma função de desempenho.

- A abordagem proposta em (REIZ *et al.*, 2022) adota o método NSGA-II para obter o conjunto de soluções não dominadas. A seleção subsequente das soluções a partir do conjunto de Pareto é fundamentada no método de programação de compromisso, refinando ainda mais as opções disponíveis para o tomador de decisões. Esse refinamento resulta em um conjunto mais restrito, o qual identifica as soluções mais próximas do ideal. Duas funções objetivo são formuladas para o problema, a primeira representa os custos associados aos equipamentos, abrangendo fusíveis, religadores, chaves seccionadoras automáticas e dispositivos de interconexão de ilhamentos. Por outro lado, a segunda função objetivo contempla os custos associados à ENS. A formulação do problema engloba a presença de geração distribuída, juntamente com sistemas de armazenamento que possibilitam o funcionamento em modo de ilhamento com uma parte da carga da rede de distribuição, operando eficientemente como uma *microgrid*.
- A alocação de religadores e seccionadores na rede de distribuição primária é realizada no artigo (ZEINALZADEH; ESTEBSARI; BAHMANYAR, 2019), empregando o método MOPSO. Três funções objetivo são incorporadas ao problema, sendo elas: o custo da indisponibilidade para os consumidores, análogo ao custo associado ao ENS; a confiabilidade do sistema, avaliada por meio de uma equação de ponderação dos índices SAIFI e SAIDI; e os custos relativos aos equipamentos a serem alocados no sistema de distribuição. Além disso, a formulação tem como restrição o número de seccionadores instalados à jusante de um religador, definindo o limite máximo de 3. Aplica-se uma lógica de compromisso difuso para a seleção de uma única solução presente no conjunto de Pareto.
- Em (TIPPACHON; RERKPREEDAPONG, 2009), o método MACO é aplicado na determinação do posicionamento otimizado de interruptores e dispositivos de proteção, como fusíveis e religadores. O artigo propõe a minimização de três funções objetivos visando a confiabilidade do sistema através dos índices de frequência (SAIFI) e duração (SAIDI) das interrupções e os custos totais, relacionados aos custos das interrupções e dos equipamentos. A coordenação e seleção dos dispositivos de proteção são incorporados como restrições do problema.

- O posicionamento de interruptores e religadores na rede de MT também é abordado em (POMBO; MURTA-PINA; PIRES, 2015), no qual é proposto um Algoritmo Evolucionário Memético, que combina o método NSGA-II com um algoritmo de busca local. Nesse contexto, o NSGA-II realiza a busca global do problema e o algoritmo de busca local avalia os indivíduos vizinhos da população. Para tal finalidade, duas alterações são efetuadas nos indivíduos resultantes do NSGA-II, a primeira avalia o desempenho da rede de distribuição alocando o equipamento de proteção em nós próximos ao obtido pela busca global, enquanto o segundo modifica o tipo de equipamento. A formulação do problema baseia-se nas três funções objetivo clássicas, tendo em vista a minimização dos índices de confiabilidade SAIFI e SAIDI e os investimentos dos equipamentos de proteção.
- Em (PEREIRA *et al.*, 2018), os autores propõem um modelo de programação não linear inteira mista, resolvido usando o método NSGA-II, com o objetivo de encontrar a alocação otimizada de dispositivos de proteção e controle. O escopo do artigo abrange a presença da geração distribuída, a possibilidade de operação no modo ilhado e a realocação de carga durante ocorrências de falta. A formulação matemática do problema inclui duas funções objetivo: a primeira está associada aos custos de interrupção devido ao índice ENS; e a segunda concentra-se nos custos dos equipamentos, contemplando os custos de aquisição e manutenção de fusíveis, religadores, chaves seccionadoras automáticas e dispositivos de interconexão de ilhamentos. Por fim, aspectos relacionados à coordenação e seletividade dos equipamentos são modelados em forma de restrições do problema.
- O problema de otimização multiobjetivo é formulado em (COSTA; BESSANI; BASTISTA, 2022), considerando a alocação de disjuntores, religadores, interruptores e dois tipos de chaves fusíveis (*fuse-blow* e *fuse-save*). Os autores propõem uma abordagem de seleção das soluções baseada em dois passos principais. Inicialmente, o método NSGA-II é empregado para a obtenção do conjunto de soluções não dominadas, sendo aplicada em seguida uma estratégia de tomada de decisões multicritério para auxiliar na seleção da solução mais adequada. No contexto do problema multiobjetivo, foram utilizadas duas funções com o objetivo de minimizar o índice SAIDI e os custos do investimento. Adicionalmente, para a seleção da solução final, o modelo multicritério abrange outros índices de confiabilidade julgados importantes pelos tomadores de decisão. Esses índices incluem SAIFI, ENS, MAIFI e o índice *Expected Customer Interruption Cost* (ECOST), que mede o custo de interrupção para diferentes tipos de clientes durante um intervalo de tempo pré-definido.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos trabalhos presentes no estado da arte dedicados à alocação de religadores e outros equipamentos de proteção em redes de distribuição, não foi identificada a utilização do método de EC em abordagens com múltiplas funções objetivo. Destacando-se na literatura, estudos que empregam métodos de ponderação, tornando o problema mono-objetivo, e uma larga aplicação do método NSGA-II. Com vistas nisso, buscou-se nesta dissertação incorporar aspectos de metodologias multiobjetivo em conjunto com os conceitos do método de EC para o desenvolvimento de uma nova abordagem aplicada ao problema de alocação de religadores inteligentes em redes de distribuição.

Seguindo essa premissa, conduziu-se uma pesquisa em um contexto mais abrangente, explorando estudos que propõem a extensão do método de EC para resolver problemas com múltiplas funções de desempenho. Neste contexto, aponta-se a abordagem desenvolvida por (BEKKER; ALDRICH, 2011), que traz uma estratégia baseada na classificação de Pareto e a construção de histogramas como ferramentas auxiliares na definição de variáveis de decisão. A inviabilidade de aplicar o método proposto pelos autores à problemática abordada nesta dissertação, decorre do uso de variáveis binárias, as quais não são diretamente compatíveis com o modelo baseado em histogramas. Além disso, ressalta-se que ao analisar a metodologia proposta pelos autores, identifica-se a variabilidade no tamanho do conjunto de elite, o que implica à violação do conceito de raridade contida no método de EC. Nesta dissertação, empenhou-se em buscar alternativas para contornar essa questão.

Na revisão da literatura, observa-se ainda que estudos com uma única função de desempenho, possuem predominância em otimizar os custos globais, enquanto as formulações de problemas multiobjetivo têm abordado, usualmente, elementos relacionados a confiabilidade dos sistemas e os custos dos equipamentos. Não obstante, condições associadas a eficiência na comunicação não costumam ser consideradas. Portanto, tendo em conta o problema de alocação de religadores inteligentes de baixo custo com capacidade de comunicação via protocolo LoRaWAN, busca-se neste trabalho aplicar uma formulação capaz de abranger a otimização dada pela relação entre parâmetros de comunicação e a distância entre religadores e o *gateway*.

Por fim, vale ressaltar que há uma limitada exploração do emprego de indicadores de eficácia e de comparação entre soluções de Pareto, aspecto que nesta dissertação é introduzido a partir do indicador hipervolume. Esse enfoque proporciona um embasamento de avaliação na comparação entre o critério *crowding distance* e o critério baseado em pontos de referência.

A formulação estabelecida para o problema, o desenvolvimento de um algoritmo empregando o método de EC adaptado para lidar com múltiplos objetivos, bem como a utilização do indicador hipervolume como base para a comparação entre técnicas multiobjetivo são os principais elementos de contribuição que caracterizam a abordagem

proposta neste trabalho, apresentada em detalhes no Capítulo 3.

3 ABORDAGEM DESENVOLVIDA

Este capítulo tem por fim detalhar a abordagem desenvolvida para a otimização multiobjetivo da alocação de religadores inteligentes em redes primárias de distribuição. O capítulo é estruturado como segue. Na seção 3.1, apresenta-se a formulação do problema de alocação de religadores contemplando três funções objetivo. Na seção 3.2, descreve-se a extensão desenvolvida do método de EC para múltiplas funções de desempenho, com ênfase nas etapas do processo de otimização e algoritmos implementados. Na seção 3.3, apresenta-se a metodologia utilizada para a comparação do desempenho do método frente a diferentes critérios de avaliação de dispersão de soluções não dominadas. Na seção 3.4, por sua vez, dispõe-se as discussões e considerações finais do capítulo.

3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Os religadores são equipamentos de interrupção automática que operam como componentes de proteção de redes de distribuição elétrica. A principal característica de um religador é a capacidade de repetição automática de operação de abertura e fechamento de circuitos, realizando usualmente 3 tentativas de religamento antes da abertura definitiva. A empregabilidade desse equipamento se deve, especialmente, no restabelecimento automático de energia durante eventos de perturbações transitórios, reduzindo a frequência e duração anual de interrupções consumidoras, além de atuar no isolamento de falhas permanentes, minimizando o número de consumidores afetados.

Para as distribuidoras de energia, tais vantagens tornam o religador um aliado na melhoria da confiabilidade do sistema, minimizando as penalidades associadas aos indicadores de continuidade, além de proporcionar redução nos custos de deslocamento de equipe e auxiliar na localização de falhas permanentes. Portanto, na formulação do problema de alocação de um religador de baixo custo, buscou-se considerar de maneira abrangente os elementos relacionados aos custos, confiabilidade e eficiência na comunicação dos dispositivos religadores e servidores de integração com sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Essas premissas foram utilizadas na composição de três funções objetivo distintas.

A primeira função objetivo, dada pela Equação (44), tem por fim minimizar os custos totais despendidos pelas distribuidoras. Concentra-se nas despesas relativas às multas impostas pela agência reguladora ANEEL resultantes da violação de limites de continuidade individuais, às receitas não auferidas devido à ENS durante interrupções e aos custos associados à aquisição, instalação, operação e manutenção do religador.

$$f_1(\cdot) = \sum_{q=1}^Q n_q^c C_q^{FIC} + \sum_{q=1}^Q n_q^c C_q^{DIC} + \sum_{g=1}^{12} \sum_{q=1}^Q C_{g,q}^{DMIC} + C^{ENS} ENS + \sum_{k=1}^R C_k^{recloser} \quad (44)$$

onde C_q^{FIC} , C_q^{DIC} e $C_{g,q}^{DMIC}$ denotam os custos anuais de penalidade por ultrapassar os limites associados ao FIC, DIC e DMIC no ponto de conexão q e mês g , respectivamente; n_q^c representa o número de consumidores conectados ao ponto de conexão q ; ENS é a energia não fornecida, expressa em (kWh); C^{ENS} corresponde ao custo da energia não fornecida, expressa em (R\$/kWh); $C_k^{recloser}$ corresponde a custos diretos associados ao religador k ; Q e R são os números totais de pontos de conexão e religadores instalados, respectivamente.

Considerando que a avaliação da confiabilidade é uma questão fundamental na alocação de religadores, o índice SAIFI, frequentemente aplicado na indústria e em estudos acadêmicos de confiabilidade, foi selecionado para compor o conjunto de funções objetivo. Conforme abordado em (ZEINALZADEH; ESTEBSARI; BAHMANYAR, 2019; BANERJEE *et al.*, 2021), o índice SAIFI caracteriza-se como um contraponto sistêmico do índice FIC , estimando a frequência de interrupções sustentadas durante o período de um ano por unidade consumidora, em (oc./year), como segue

$$f_2(\cdot) = \frac{\sum_{q=1}^Q FIC_q}{\sum_{q=1}^Q n_q^c} \quad (45)$$

onde FIC_q corresponde ao indicador FIC no ponto de conexão q .

A terceira função objetivo foi aplicada com o fim de garantir que o desempenho dos religadores inteligentes não seja comprometido pela falta de qualidade na comunicação de dados. Em conformidade com os princípios estabelecidos na Seção 2.4, referente a comunicação LoRaWAN, a alocação dos religadores deve ser projetada de forma a otimizar a eficiência da comunicação, o que significa que os dispositivos devem ter o menor SF possível, levando em conta a localização dos *gateways* disponíveis. Portanto, a terceira função objetivo é expressa como a média do SF resultante de cada religador instalado na rede, conforme definido na Equação (46):

$$f_3(\cdot) = \frac{1}{R} \sum_{k=1}^R SF_k \quad (46)$$

onde, SF_k é o *Spreading Factor* correspondente ao religador k .

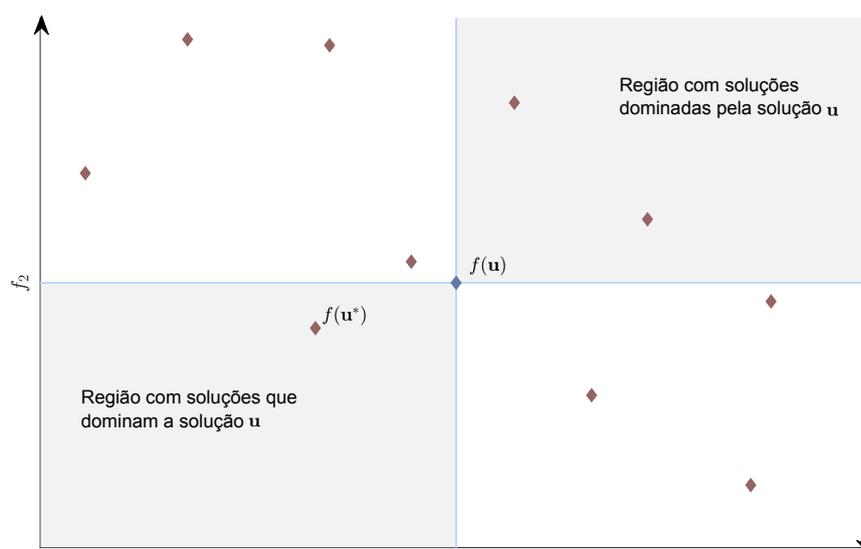
3.2 EXTENSÃO DO MÉTODO DE ENTROPIA CRUZADA PARA MÚLTIPLAS FUNÇÕES DE DESEMPENHO

Problemas multiobjetivo raramente dispõem de uma solução ótima para todas as funções de objetivo. Consequentemente, a busca pela solução ótima não tem foco

na obtenção de um único ponto/solução no espaço viável, mas na obtenção de um conjunto de soluções não dominadas, conhecido como fronteira de Pareto. Em problemas de minimização, um conjunto é apontado como ótimo de Pareto se, para um vetor de variáveis de decisão \mathbf{u}^* , situado em uma região viável \mathcal{U} , não existir $\mathbf{u} \in \mathcal{U}$ tal que $f_i(\mathbf{u}) \leq f_i(\mathbf{u}^*)$, $\forall i = 1, \dots, m$, e $f_j(\mathbf{u}) < f_j(\mathbf{u}^*)$ para pelo menos uma função objetivo j . Em outras palavras, \mathbf{u}^* pertence ao conjunto ótimo de Pareto se não existir nenhum outro vetor de variáveis de decisão capaz de reduzir o valor de uma função objetivo sem causar, simultaneamente, aumento de valor em outra função objetivo (COELLO, 2001).

Como exemplo, a Figura 5 apresenta um problema de minimização envolvendo 2 funções objetivo, evidenciando as regiões de dominância em relação à solução \mathbf{u} .

Figura 5 – Conceito de dominância em um problema de minimização com 2 funções objetivo



Fonte: do autor.

Neste exemplo, destacam-se regiões que exercem domínio sobre a solução \mathbf{u} e aquelas que são dominadas por ela. Ademais, as áreas que não apresentam-se destacadas são indiferentes à solução \mathbf{u} , ou seja, não exercem domínio e tampouco são dominadas por essa solução. Neste contexto, a classificação das soluções baseia-se nos conceitos derivados do método *Multi-objective Genetic Algorithm* (MOGA), onde cada indivíduo é classificado de acordo com o número de indivíduos que o dominam, ou seja, o conjunto \mathcal{F}_1 é formado por soluções não dominadas por nenhum outro indivíduo, o conjunto \mathcal{F}_2 contém soluções que são dominadas por apenas um outro indivíduo e assim por diante.

A extensão proposta baseia-se nos conceitos do método de EC, desenvolvido originalmente para estimação de indicadores em simulação de eventos raros e otimi-

zação combinatória (RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D P., 2004). O método de EC é detalhado na Seção 2.3 e tem como princípio a minimização da distância de Kullback-Leibler, entre uma distribuição de amostragem e uma distribuição alvo desconhecida, por meio da amostragem por importância. Em síntese, o método tem como objetivo incentivar a amostragem de eventos significativos mediante o refinamento de uma distribuição de probabilidade inicial, que por sua vez, é atualizada com base no percentil das melhores amostras, tendo em conta um parâmetro de raridade ρ . As amostras que apresentam o melhor desempenho compõem o conjunto de elite, posteriormente usado para a geração de um conjunto aprimorado de soluções candidatas C_t na iteração t . A dimensão do conjunto de elite equivale a N_e , definido por ρN , onde N corresponde ao número de elementos em C_t .

Os principais passos da extensão do método EC para múltiplas funções de desempenho são apresentados no Algoritmo 3.

Algoritmo 3 Algoritmo para a otimização multiobjetivo via método de EC

Entrada: $N, \rho, \alpha, n_{stop}$, dados da rede de distribuição, m, p_{ini} ;

- 1: $t \leftarrow 1; D_{t-1} \leftarrow \emptyset; N_e \leftarrow \rho N; th \leftarrow N_e$;
- 2: $\mathbf{p}_t \leftarrow [p_{ini}, \dots, p_{ini}]^t$;
- 3: Gerar C_t usando a função de densidade de probabilidade $Ber_n(\cdot, \mathbf{p}_t)$;
- 4: $U_t \leftarrow C_t \cup D_{t-1}$;
- 5: Estimar S_t para U_t ;
- 6: $Elite \leftarrow \emptyset; \mathcal{F}_\ell \leftarrow \emptyset; S_e \leftarrow \emptyset; \ell \leftarrow 0$;
- 7: Executar **Algoritmo 4** para obter o vetor *rank* contendo o nível de não dominância de cada solução em U_t ;
- 8: **para** $i = 1, \dots, N$ **faça**
- 9: $\mathcal{F}_{rank[i]} = \mathcal{F}_{rank[i]} \cup i$;
- 10: **fim para**
- 11: **enquanto** $|Elite| + |\mathcal{F}_\ell| < N_e$ **faça**
- 12: $Elite = Elite \cup \mathcal{F}_\ell$;
- 13: $S_e \leftarrow S_e \cup S_t[\mathcal{F}_\ell]$;
- 14: $\ell \leftarrow \ell + 1$;
- 15: **fim enquanto**
- 16: **se** $|Elite| = N_e$ **então**
- 17: Break;
- 18: **senão**
- 19: $S_e \leftarrow S_e \cup S_t[\mathcal{F}_\ell]$;
- 20: **se** *Crowding distance* **então**
- 21: Executar **Algoritmo 5** para atualizar *Elite*;
- 22: **senão**
- 23: Executar **Algoritmo 6** para atualizar *Elite*;
- 24: **fim se**
- 25: **fim se**
- 26: $D_t \leftarrow \{\mathbf{u}_i \in Elite\}$;
- 27: Se o critério de parada for atendido, retornar o conjunto de soluções não dominadas e finalizar o algoritmo. Caso contrário, vá para o próximo passo.
- 28: Calcular e atualizar \mathbf{p}_{t+1} usando as Equações (47) e (48), respectivamente;
- 29: $t \leftarrow t + 1$;

30: Retornar para o passo 3;

Saída: Conjunto de soluções não dominadas.

Para o problema de alocação de religadores inteligentes, considera-se que cada solução candidata \mathbf{u}_t é composta por n elementos, correspondente ao número de trechos disponíveis para a alocação de religador em nó de origem. O k -ésimo elemento de \mathbf{u}_t é uma variável binária, que assume valor igual a 1 ou 0, indicando a presença ou ausência de um religador no trecho k , respectivamente. Adicionalmente, as soluções candidatas em C_t são modeladas com base na função de densidade de probabilidade de Bernoulli $Ber_n(\cdot, \mathbf{p}_t)$, em que \mathbf{p}_t denota o vetor de probabilidades que variam no intervalo $[0, 1]$. O vetor \mathbf{p}_t é usado para amostrar as soluções candidatas que compõem C_t , sendo declarado na primeira iteração igual a um vetor com probabilidades iniciais \mathbf{P}^{ini} .

Com o intuito de assegurar a preservação das características dos melhores indivíduos ao longo das iterações, de modo a evitar a perda desses indivíduos devido as operações do método, o conjunto de soluções candidatas é expandido mediante a inclusão de D_{t-1} , que corresponde ao conjunto de elite obtido na iteração anterior $t - 1$. Dessa forma, na iteração t , é estabelecido o conjunto $U_t = C_t \cup D_{t-1}$, no qual cada solução é avaliada em termos das funções de desempenho, e os resultados da avaliação armazenados na matriz S_t de dimensão $(N + N_e) \times m$, onde m é o número de funções objetivo em análise.

Os valores de desempenho referentes aos custos totais e índice de qualidade do serviço, necessários para calcular $f_1(\cdot)$ e $f_2(\cdot)$, são estimados para cada solução candidata usando a SMCS descrita na Seção 2.2.1, permitindo obter as quantidades relacionadas à frequência e duração das interrupções consumidoras. No âmbito da SMCS, a identificação dos nós com interrupção do serviço é efetuada por meio da aplicação da matriz de alcance da rede de distribuição, com composição e algoritmo de cálculo detalhados no Apêndice A.

Tendo em vista o cálculo dos SFs necessários para obter $f_3(\cdot)$, as RSSs ou intensidade dos sinais recebidos são adquiridas por meio de um modelo de propagação *Pister-Hack* (DE BARROS *et al.*, 2022). Esse modelo baseia-se na equação de transmissão de Friis e adiciona à esta equação, uma medida de como a intensidade do sinal diminui com a distância, além de um efeito de sombreamento, que corresponde a uma variação aleatória na força do sinal causado por obstáculos no ambiente. Para assumir o pior cenário possível, é usado o valor do limite inferior do modelo. Após isso, os valores definidos na Tabela 2 são aplicados para correlacionar os níveis de sensibilidade com um valor de SF. Neste contexto, o nível de sensibilidade pode ser interpretado como o mínimo valor da RSS necessário para que se obtenha uma comunicação eficiente entre o nó e o *gateway*. Calcula-se, assim, a RSS com base nas

distâncias físicas e determina-se o SF correspondente à sensibilidade necessária.

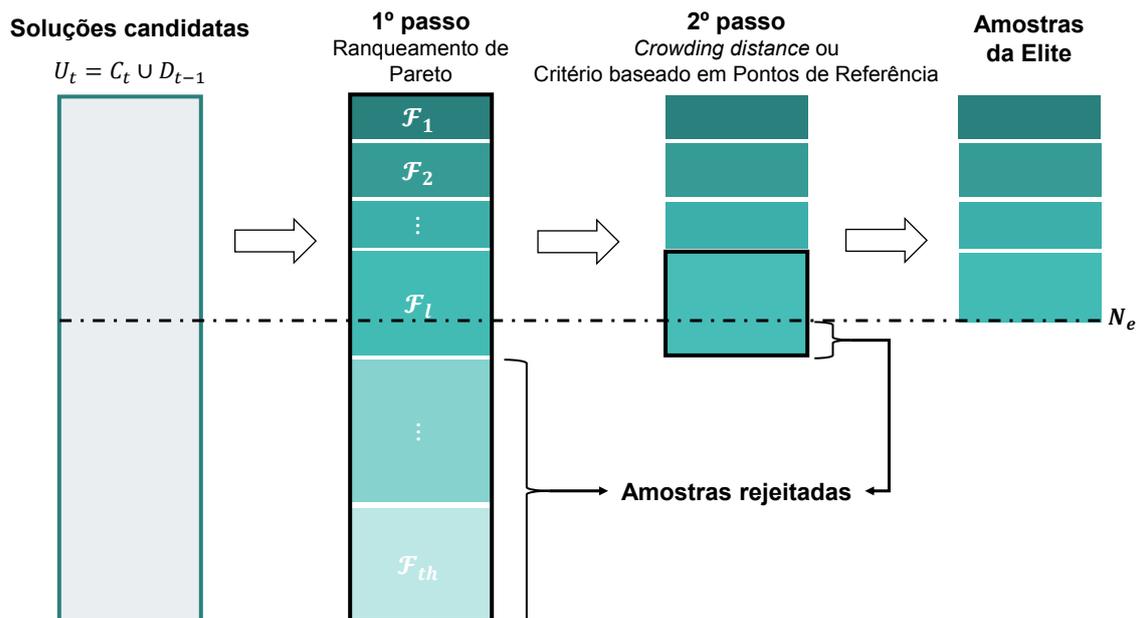
Tabela 2 – Sensibilidade LoRaWAN

SF [dBm]	125 [kHz]
7	-114,97
8	-117,68
9	-120,39
10	-123,11
11	-125,82
12	-128,53

Fonte: (DE BARROS *et al.*, 2022).

Considerando os princípios fundamentais do método de EC, o processo de composição do conjunto de elite é adaptado para se alinhar as características de um problema de otimização multiobjetivo. Embora seja intuitivo gerar um conjunto de elite selecionando as amostras não dominadas, essa prática é um potencial causador de variabilidade no tamanho do conjunto de elite, restringindo a funcionalidade do parâmetro de raridade. Portanto, nesta dissertação, estabeleceu-se um procedimento de duas etapas para selecionar amostras e formar o conjunto de elite, como indicado na Figura 6.

Figura 6 – Procedimento aplicado para a geração do conjunto de elite



Fonte: do autor.

No primeiro passo, um processo de seleção é executado com base no nível de não dominância obtido através do ranqueamento de pareto, que utiliza como dados de entrada o conjunto de valores de desempenho das soluções candidatas S_t . Posterior ao ranqueamento, o conjunto de elite é preenchido com as soluções pertencentes ao conjunto $\{\mathcal{F}_1, \dots, \mathcal{F}_{\ell-1}\}$, onde \mathcal{F}_ℓ corresponde ao conjunto de soluções que acrescentado a *Elite* ultrapassa o número de elementos N_e , que tem valor fixo. As soluções contidas em $\mathcal{F}_{\ell+1}$, do nível não dominado $\ell + 1$, são rejeitadas do conjunto de elite.

No segundo passo, as soluções candidatas em \mathcal{F}_ℓ são analisadas face a distribuição das amostras no conjunto de elite. O critério *crowding distance* ou o critério baseado em pontos de referência são empregados na análise das soluções candidatas em \mathcal{F}_ℓ , no qual se considera os valores de desempenho em S_e formado pelos elementos de S_t das soluções em $\{\mathcal{F}_1, \dots, \mathcal{F}_\ell\}$.

Após definir o conjunto de elite para a iteração t , os elementos são armazenados em D_t e utilizados para definir \mathbf{p}_{t+1} , usando a expressão:

$$p_{t+1}[k] = \frac{1}{N_e} \sum_{\mathbf{u}_t \in U_t} I_{\{\mathbf{u}_t \in D_t\}} u_t[k] \quad (47)$$

onde a função indicatriz $I_{\{\mathbf{u}_t \in D_t\}}$ é igual a 1, se $\{\mathbf{u}_t \in D_t\}$ for verdadeiro, e 0 caso contrário. Um procedimento de suavização é aplicado para o vetor de probabilidade \mathbf{p}_{t+1} visando prevenir uma convergência prematura do algoritmo, conforme Equação (48):

$$\mathbf{p}_{t+1} = \alpha \mathbf{p}_{t+1} + (1 - \alpha) \mathbf{p}_t \quad (48)$$

onde α representa o fator de suavização, o qual pode assumir valores em $[0, 1]$. O processo de otimização termina quando o conjunto de elite permanecer inalterado durante as últimas n_{stop} iterações, retornando o conjunto de soluções não dominadas através do ranqueamento de Pareto.

Com relação à especificação dos parâmetros de entrada do algoritmo, destaca-se a importância de uma adequada escolha do vetor \mathbf{p}_{ini} . Tipicamente, os elementos em \mathbf{p}_{ini} assumem valores iguais a 50%, embora essa premissa acarreta em número elevado de religadores alocados, tornando as soluções candidatas em demasia distantes de uma solução credível. Neste contexto, a definição da probabilidade inicial para cada trecho apto a receber um religador em nó de origem pode ser estrategicamente orientada conforme a Equação (49), a qual estabelece uma relação entre o número de religadores esperado, R , e o número de trechos, n , definindo uma probabilidade inicial equitativa para todos os trechos.

$$p_{ini} = \frac{R}{n} \quad (49)$$

Sendo assim, na hipótese do decisor ter a expectativa de alocação de aproximadamente 5 religadores em uma rede com 250 trechos candidatos, a probabilidade inicial de cada um dos respectivos trechos receber um religador será igual a 0,02 (2%).

As próximas subseções visam detalhar os algoritmos aplicados em cada uma das etapas que conduzem à definição das amostras no conjuntos de elite.

3.2.1 1ª Etapa: classificação de Pareto

A classificação de Pareto baseia-se no algoritmo descrito em (BEKKER; ALDRICH, 2011), que permite o ranqueamento das soluções candidatas até um nível de não dominância especificado por um valor limiar th . Em vista disso, o algoritmo tem como vantagem a necessidade de classificação apenas das soluções presentes nos primeiros níveis de não dominância, requerendo assim menor esforço computacional.

O procedimento para a classificação de Pareto é apresentado no Algoritmo 4.

Algoritmo 4 Classificação de pareto (minimização)

Entrada: S_t, N, m, th ;

```

1:  $rank \leftarrow \mathbf{0}_{N \times 1}$ ;  $j \leftarrow 1$ ;
2: enquanto  $j < m$  faça
3:    $S = descendingSort(S_t, j)$ ;
4:    $\kappa = originalIndices(S_t, S)$ ;
5:    $r_p \leftarrow 1$ ;
6:   enquanto  $r_p < N$  faça
7:      $r_i \leftarrow r_p$ ;
8:     enquanto  $rank[r_p] \leq th$  e  $r_i < N$  faça
9:       se  $S[r_p, 2] \geq S[r_i + 1, 2]$  & ... &  $S[r_p, m] \geq S[r_i + 1, m]$  então
10:         $rank[\kappa[r_p]] \leftarrow rank[\kappa[r_p]] + 1$ ;
11:       fim se
12:        $r_i \leftarrow r_i + 1$ ;
13:     fim enquanto
14:      $r_p \leftarrow r_p + 1$ ;
15:   fim enquanto
16:    $j \leftarrow j + 1$ ;
17: fim enquanto

```

Saída: $rank$.

Inicialmente, um vetor de ranqueamento nulo, $rank$, é inicializado com valores igual a zero. Em seguida, as soluções candidatas são ordenadas em forma decrescente, de acordo com os resultados da função de desempenho j . Para cada função de desempenho j , a relação de dominância é verificada nas colunas $j + 1, \dots, m$, comparando cada solução candidata r_p com $r_i = r_p + 1, r_p + 2, \dots, N$. Na condição de r_i dominar r_p , a posição de ranqueamento da solução r_p é incrementada. Por último, o algoritmo retorna o vetor $rank$ indicando a classificação de cada solução candidata: se a solução o não é dominada por nenhuma outra solução, $rank[o]$ é igual a 0; caso a solução o for

dominada por apenas uma outra solução, $rank[o]$ é igual a 1; e assim por diante.

Em (BEKKER; ALDRICH, 2011), existe uma aplicação do método EC com tamanho variável do conjunto de elite durante o processo iterativo. No artigo, o valor limiar inicial de ranqueamento é relaxado e as soluções com uma classificação de não dominância entre zero e dois são incluídas no vetor de elite. Quando uma nova iteração se inicia e um novo conjunto de soluções candidatas é gerado, o vetor de elite é restringido atribuindo 1 ao limiar. Quando o algoritmo é finalizado, o vetor de elite vigente é refinado uma última vez para th igual a 0, retornando apenas as soluções não dominadas.

Em contrapartida, buscou-se na abordagem desenvolvida, preservar os conceitos originais de raridade e tamanho fixo do conjunto de elite aplicados no método de EC, permitindo visitar soluções candidatas com uma maior variedade de classificações ao longo do processo iterativo. Para tal propósito, esforços são então direcionados para a obtenção de conjuntos de elite com soluções bem distribuídas no espaço das funções de desempenho.

3.2.2 2ª Etapa: seleção das soluções candidatas em \mathcal{F}_ℓ

A segunda etapa é executada com o objetivo de selecionar as soluções candidatas em \mathcal{F}_ℓ de forma a fornecer um conjunto de elite bem distribuído. Dois critérios de seleção foram empregadas, *crowding distance* e o critério baseado em pontos de referência, os quais são descritos detalhadamente nas subseções a seguir.

3.2.2.1 *Crowding distance*

Com o intuito de promover soluções candidatas bem distribuídas no espaço das funções de desempenho, o critério *crowding distance* foi definido por (DEB; PRATAP *et al.*, 2002) como uma alternativa à abordagem da função de compartilhamento usada no método NSGA. Trata-se então do critério empregado no método NSGA-II.

Neste critério, estima-se a densidade em torno de cada solução candidata, assumindo-se que regiões com baixa concentração de soluções, assim como as regiões situadas nas extremidades, convêm serem mais exploradas. Diante disso, calcula-se a distância de aglomeração associado a cada solução identificada em \mathcal{F}_ℓ . Destaca-se ainda, que o procedimento é efetuado considerando todas as soluções já classificadas para o conjunto de elite ($\mathcal{F}_1, \dots, \mathcal{F}_{\ell-1}$) e \mathcal{F}_ℓ , optando por favorecer a diversidade no espaço formado pelo conjunto de elite, e assim, permitindo uma comparação justa com a fronteira de Pareto obtida pela execução do critério baseado em pontos de referência.

A distância de aglomeração é calculada a partir da diferença normalizada entre pontos adjacentes de cada solução no espaço formado pelas funções de desempenho. Para cada função objetivo j , as soluções situadas nos extremos assumem valor infinito,

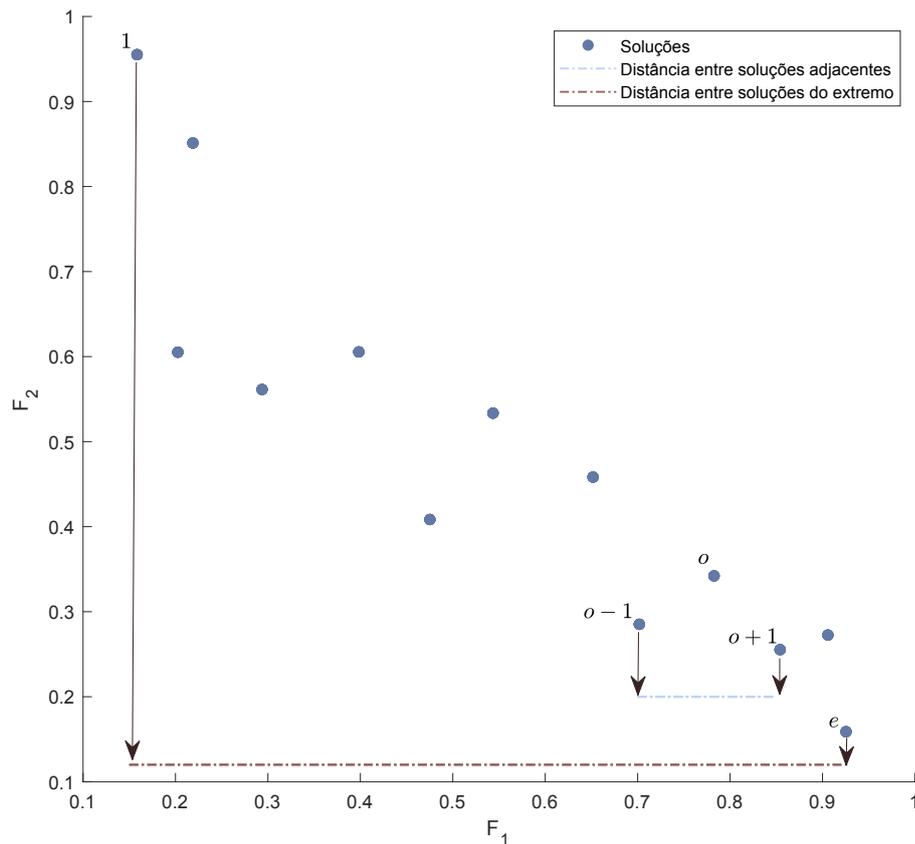
enquanto a contribuição para cada solução intermediária é contabilizada conforme a expressão:

$$\mathcal{D}_{cd}[\kappa[o]] \leftarrow \mathcal{D}_{cd}[\kappa[o]] + \frac{\mathcal{S}[o + 1] - \mathcal{S}[o - 1]}{\mathcal{S}[e] - \mathcal{S}[1]} \quad (50)$$

onde $\mathcal{D}_{cd}[\kappa[o]]$ é o *crowding distance* associado a solução candidata $\kappa[o]$; \mathcal{S} representa os elementos de S_e ordenado em forma crescente de acordo com a função objetivo j ; $\kappa[o]$ corresponde a posição original da solução candidata o em S_t ; e e refere-se a dimensão de S_e .

Um exemplo da aplicação do critério é mostrado na Figura 7. Nesse exemplo, contribuição pertinente à função objetivo F_1 em \mathcal{D}_{cd} para a o -ésima solução candidata em análise é computada pela distância entre os valores de desempenho das amostras $o - 1$ e $o + 1$, e normalizada com base na diferença entre os valores de desempenho das amostras 1 e e .

Figura 7 – Exemplo de cálculo via critério *crowding distance*



Fonte: do autor.

O Algoritmo 5 descreve os passos executados para a seleção das soluções em \mathcal{F}_ℓ a integrar o conjunto de elite.

Entrada: $Elite, \mathcal{F}_\ell, S_e, S_t, m, N$;

- 1: $c \leftarrow |\mathcal{F}_\ell|$; $e \leftarrow |S_e|$; $\mathcal{D}_{cd} \leftarrow \mathbf{0}_{N \times 1}$; $h_\ell \leftarrow 0$; $oe \leftarrow 1$;
- 2: **para** $j = 1, \dots, m$ **faça**
- 3: $\mathcal{S} \leftarrow ascendingSort(S_e, j)$;
- 4: $\kappa \leftarrow originalIndices(S_t, \mathcal{S})$;
- 5: **para** $o = 1, \dots, e$ **faça**
- 6: **se** $\kappa[o] \in \mathcal{F}_\ell$ **então**
- 7: **se** $(h_\ell = 0 \parallel h_\ell = c - 1)$ **então**
- 8: $\mathcal{D}_{cd}[\kappa[o]] \leftarrow \infty$;
- 9: **senão**
- 10: $\mathcal{D}_{cd}[\kappa[o]] \leftarrow \mathcal{D}_{cd}[\kappa[o]] + \frac{\mathcal{S}[o+1] - \mathcal{S}[o-1]}{\mathcal{S}[e] - \mathcal{S}[1]}$;
- 11: **fim se**
- 12: $h_\ell \leftarrow h_\ell + 1$;
- 13: **fim se**
- 14: **fim para**
- 15: **fim para**
- 16: $rank_{cd} \leftarrow descendingSort(\mathcal{D}_{cd})$;
- 17: $index_{cd} \leftarrow originalIndices(\mathcal{D}_{cd}, rank_{cd})$;
- 18: **enquanto** $|Elite| \leq N_e$ **faça**
- 19: $Elite = Elite \cup index_{cd}[oe]$;
- 20: $oe \leftarrow oe + 1$;
- 21: **fim enquanto**

Saída: $Elite$.

Inicialmente, define-se o vetor *crowding distance* \mathcal{D}_{cd} igual a zero para cada solução candidata o ; iterativamente, para cada função objetivo j , o vetor \mathcal{S} é gerado conforme a ordenação crescente do desempenho das soluções candidatas em S_e e os índices originais são armazenados em $\kappa[o]$; caso as amostras das extremidades estejam contidas em \mathcal{F}_ℓ , atribui-se um valor elevado; enquanto as amostras intermediárias em \mathcal{F}_ℓ recebem incrementos conforme a Equação (50). Concluído o procedimento de cálculo da distância \mathcal{D}_{cd} associada a cada solução em \mathcal{F}_ℓ , as amostras que apresentarem o maior valor para o critério são selecionadas para compor o conjunto de elite.

3.2.2.2 Critério baseado em pontos de referência

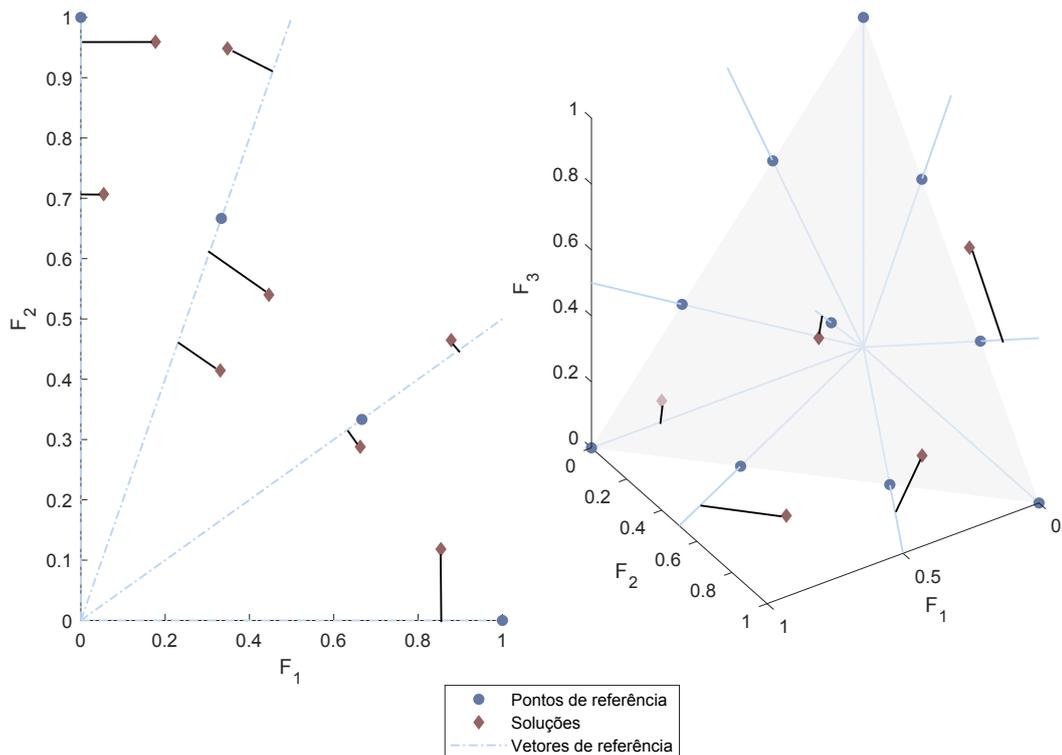
O critério baseado em pontos de referência foi proposto por (DEB; JAIN, 2014) como uma alternativa eficiente para problemas com múltiplas funções objetivo, com vista a manter a diversidade de soluções no espaço amostral. Trata-se do critério empregado no método NSGA-III.

Sinteticamente, o procedimento consiste na definição de pontos igualmente espaçados no espaço formado pelo hiperplano das funções objetivo, gerando vetores de referência que conectam os pontos à origem, e as soluções candidatas normalizadas são então associadas ao vetor de referência mais próximo. Desta forma, para a seleção de amostras, sugere-se que vetores de referência $\mathbf{w} \in W_{rp}$ com menor número de soluções associadas correspondem a regiões menos densas, sendo de interesse

serem mais investigadas.

A Figura 8 ilustra um exemplo de associação das soluções candidatas aos pontos de referência para duas e três funções objetivo. Na figura, os pontos e linhas

Figura 8 – Associação de soluções candidatas a vetores de referência



Fonte: do autor.

tracejadas em azul correspondem, respectivamente, aos pontos e vetores de referência, enquanto os losangos em vermelho indicam as soluções candidatas. A distância entre uma solução e o vetor de referência mais próximo é identificada pelo vetor em preto, o qual é ortogonal ao vetor de referência.

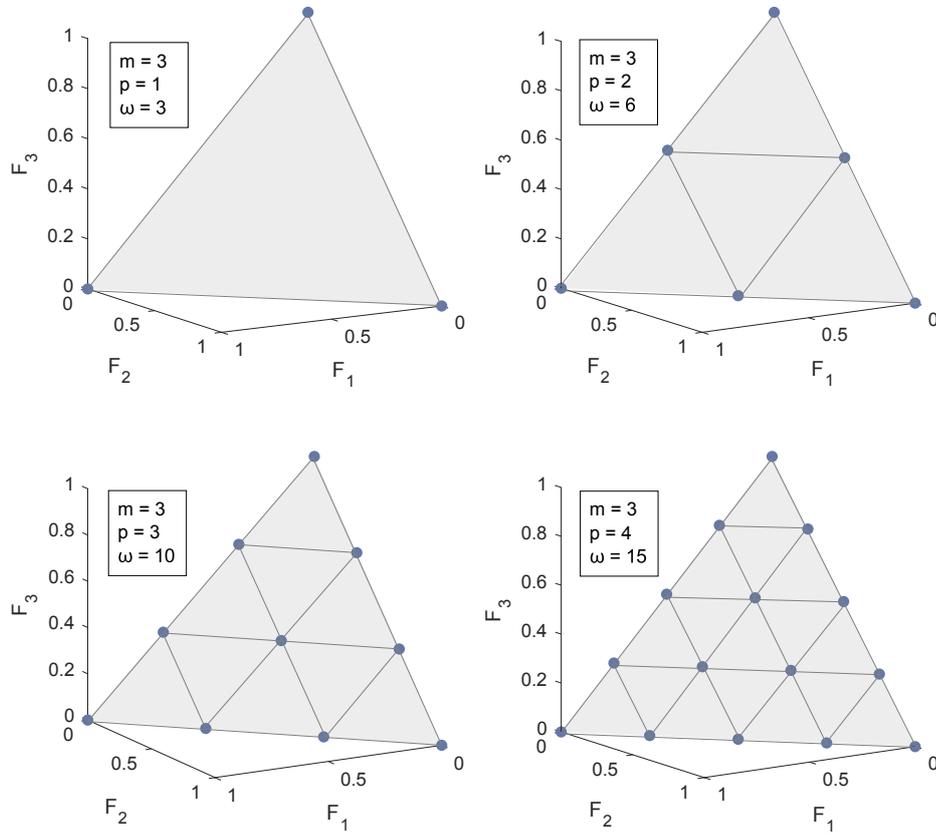
Os pontos de referência são dispostos por um simplex unitário normalizado de dimensão $m - 1$ seguindo a abordagem sistemática adotada em (DAS; DENNIS, 1998). O número total de pontos, ω , corresponde ao produtório dado pela Equação (51) e depende, essencialmente, de m e do número de divisões, p , definido pelo usuário.

$$\omega = \prod_{i=1}^p \left(\frac{m + p - i}{i} \right) \tag{51}$$

Como exemplo, considere um problema com 3 funções objetivo. Definindo-se 5 espaçamentos entre os pontos de referência e cada eixo, ao aplicar a Equação (51) obtém-se ω igual a 21 pontos, que devem estar igualmente distribuídos no plano. A Figura 9

ilustra a posição dos pontos de referência para um problema com 3 funções objetivo e diversificando o valor de p .

Figura 9 – Distribuição dos pontos de referência para um problema com 3 funções objetivo



Fonte: do autor.

Para associar as soluções candidatas aos vetores de referência, os valores de desempenho das soluções em S_e são normalizadas de acordo com a expressão:

$$\hat{s}_{oj} = \frac{s_{oj} - s_j^*}{s_j^{nad} - s_j^*} \quad (52)$$

onde s_j^* e s_j^{nad} denotam os pontos ideal (valor mínimo) e nadir (valor máximo) para a função objetivo j ; e s_{oj} corresponde ao valor de desempenho da solução o para a função objetivo j .

Considere agora $\hat{\mathbf{s}}_o$ o vetor com valores de desempenho normalizados \hat{s}_{oj} , da solução o , e $\mathbf{w}_r \in W_{rp}$ um vetor de referência, a distancia entre a solução candidata e vetor de referência no hiperplano pode ser estimada com base na rejeição de $\hat{\mathbf{s}}_o$ para com \mathbf{w}_r , com segue:

$$\mathcal{D}_{rp}[o][r] = \left\| \hat{\mathbf{s}}_o - \frac{\mathbf{w}_r^T \hat{\mathbf{s}}_o}{\|\mathbf{w}_r\|^2} \mathbf{w}_r \right\| \quad (53)$$

onde \mathcal{D}_{rp} é uma matriz de tamanho $e \times \omega$ que armazena a distancia de cada solução candidata a cada vetor de referência definido; e e denota o número de soluções candidatas em S_e .

O Algoritmo 6 descreve os principais passos para a aplicação do critério baseado em pontos de referência na seleção de soluções candidatas. Os valores de desempenho de cada solução candidata presente em S_e são normalizados usando a Equação (52). O vetor de rejeição calculado conforme Equação (53) permite a identificação em $\pi[o]$ do vetor de referência mais próximo r^* da solução candidata o , assim como a distancia correspondente $\mathcal{D}_{rp}[o][r^*]$ atribuída ao vetor $d[o]$. Se a solução candidata o pertencer ao nível de não dominância \mathcal{F}_ℓ , o é agregado ao conjunto denominado \mathcal{O}_{r^*} ; caso contrário, o valor em $\rho[r^*]$ é incrementado, sendo este vetor responsável por armazenar a contabilização do número de soluções no conjunto de elite associado a cada ponto de referência.

Algoritmo 6 Seleção baseada em pontos de referência

Entrada: $W_{rp}, S_e, \mathcal{F}_\ell, Elite, N_e$;

- 1: $e \leftarrow |S_e|$; $\omega \leftarrow |W_{rp}|$;
- 2: $\pi \leftarrow \mathbf{0}_{e \times 1}$; $d \leftarrow \mathbf{0}_{e \times 1}$; $\rho \leftarrow \mathbf{0}_{\omega \times 1}$;
- 3: $\mathcal{O}_r \leftarrow \emptyset, \forall r = 1, \dots, \omega$;
- 4: Normalizar todos os valores de desempenho \mathbf{s}_o em S_e usando (52);
- 5: **para** $o = 1, \dots, e$ **faça**
- 6: **para** $r = 1, \dots, \omega$ **faça**
- 7: $\mathcal{D}_{rp}[o][r] \leftarrow \left\| \hat{\mathbf{s}}_o - \frac{\mathbf{w}_r^T \hat{\mathbf{s}}_o}{\|\mathbf{w}_r\|^2} \mathbf{w}_r \right\|$;
- 8: **fim para**
- 9: $r^* \leftarrow \operatorname{argmin}_r \mathcal{D}_{rp}[o][r]$;
- 10: $\pi[o] \leftarrow r^*$;
- 11: $d[o] \leftarrow \mathcal{D}_{rp}[o][r^*]$;
- 12: **se** $o \in \mathcal{F}_\ell$ **então**
- 13: $\mathcal{O}_{r^*} \leftarrow \mathcal{O}_{r^*} \cup o$;
- 14: **senão**
- 15: $\rho[r^*] \leftarrow \rho[r^*] + 1$;
- 16: **fim se**
- 17: **fim para**
- 18: **enquanto** $|Elite| \leq N_e$ **faça**
- 19: $\Omega_r \leftarrow \{r : \operatorname{argmin}_r \rho[r]\}$;
- 20: $\bar{r} \leftarrow$ selecionar aleatoriamente em Ω_r ;
- 21: **se** $\mathcal{O}_{\bar{r}} \neq \emptyset$ **então**
- 22: **se** $\rho[\bar{r}] = 0$ **então**
- 23: $\bar{o} \leftarrow \operatorname{argmin}_{o \in \mathcal{O}_{\bar{r}}} d[o]$;
- 24: **senão**
- 25: $\bar{o} \leftarrow$ selecionar aleatoriamente em $\mathcal{O}_{\bar{r}}$;
- 26: **fim se**
- 27: $Elite \leftarrow Elite \cup \bar{o}$;
- 28: $\mathcal{O}_{\bar{r}} \leftarrow \mathcal{O}_{\bar{r}} - \{\bar{o}\}$;
- 29: $\rho[\bar{r}] \leftarrow \rho[\bar{r}] + 1$;
- 30: **senão**

```

31:      $\rho[\bar{r}] \leftarrow \infty;$ 
32:   fim se
33: fim enquanto
Saída: Elite.

```

Com o propósito de selecionar as soluções candidatas em \mathcal{F}_ℓ , o vetor de referência \bar{r} com o menor número de soluções em ρ é identificado. Caso $\mathcal{O}_{\bar{r}}$ for um conjunto vazio, ou seja, nenhuma solução em \mathcal{F}_ℓ for associada a \bar{r} , o vetor de referência é descartado atribuindo um valor elevado a $\rho[\bar{r}]$. Caso contrário, a seleção depende do número de soluções do conjunto de elite que são associados a \bar{r} : se $\rho[\bar{r}]$ for igual a 0, a solução mais próxima ao vetor é escolhida; caso contrário, uma solução pertencente ao conjunto $\mathcal{O}_{\bar{r}}$ é definida aleatoriamente para compor o conjunto de elite. Na sequência, a solução candidata selecionada é excluída do conjunto $\mathcal{O}_{\bar{r}}$ e $\rho[\bar{r}]$ é incrementado. O processo de seleção termina quando o conjunto de elite for completado.

No procedimento descrito, um ponto de referência pode ser associado a uma, mais do que uma ou nenhum solução, sendo igualmente verdade que dois ou mais pontos de referência podem ter o mesmo número de soluções candidatas associadas. Nestes casos, critérios complementares de seleção são arbitrados, como descrito no Algoritmo 6.

3.3 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ORIENTADA POR INDICADOR DE HIPERVOLUME

A avaliação da qualidade de determinada solução em problemas de otimização com uma única função objetivo é relativamente simples e usualmente tem por enfoque a análise da proximidade da solução encontrada para com a solução ótima (AUDET *et al.*, 2021). Por outro lado, quando lidamos com problemas que envolvem múltiplas funções objetivo, é comum o fornecimento de resultados com mais de uma solução ótima. Neste contexto, avaliar a eficiência da abordagem empregada pode não ser uma tarefa trivial. Em linhas gerais, há interesse em se investigar diversos aspectos, tais como:

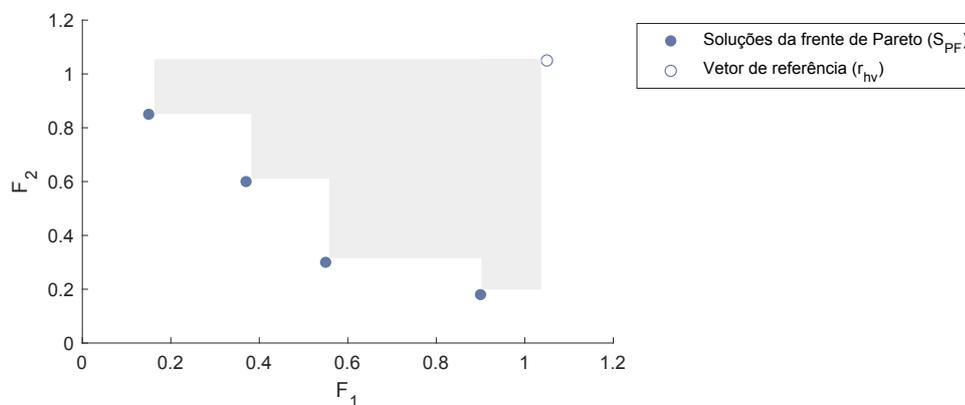
- **Cardinalidade:** refere-se ao número de soluções não dominadas geradas por determinado algoritmo.
- **Convergência:** refere-se à proximidade do conjunto de pontos não dominados à fronteira de Pareto, no espaço formado pelas funções objetivo;
- **Distribuição:** refere-se à forma como as soluções não dominadas estão distribuídas no espaço composto pelas funções objetivo, sendo desejável uma distribuição tão uniforme quanto possível;

- Dispersão: refere-se à dispersão das soluções no espaço, sendo desejável que as soluções não se concentrem em uma única região do espaço de busca.

Em problemas que envolvem a alocação de religadores, a fronteira de Pareto normalmente não é previamente conhecida. Entretanto, ao analisar a proximidade dos resultados em relação ao eixo de interesse, torna-se possível comparar a eficácia da extensão do método EC, usando o critério *crowding distance* ou critério baseado em pontos de referência. Em vista disso, o indicador de hipervolume foi a métrica selecionada para a comparação entre os critérios. Essa escolha se justifica pelo fato de que o indicador de hipervolume permite avaliar a qualidade das fronteiras de Pareto fornecidas, conferindo-se como instrumento para a análise da convergência e distribuição das soluções.

O indicador de hipervolume é dado pelo volume de um espaço, situado no espaço das funções objetivo, formado pelo conjunto de soluções da fronteira de Pareto S_{PF} e um vetor de referência $\mathbf{r}_{hv} \in \mathbb{R}^m$ (AUDET *et al.*, 2021), como ilustrado a Figura 10. Para efeitos de comparação, o conjunto de soluções com o maior valor de hipervolume é apontado como o melhor resultado.

Figura 10 – Cálculo da métrica hipervolume para 2 funções objetivo

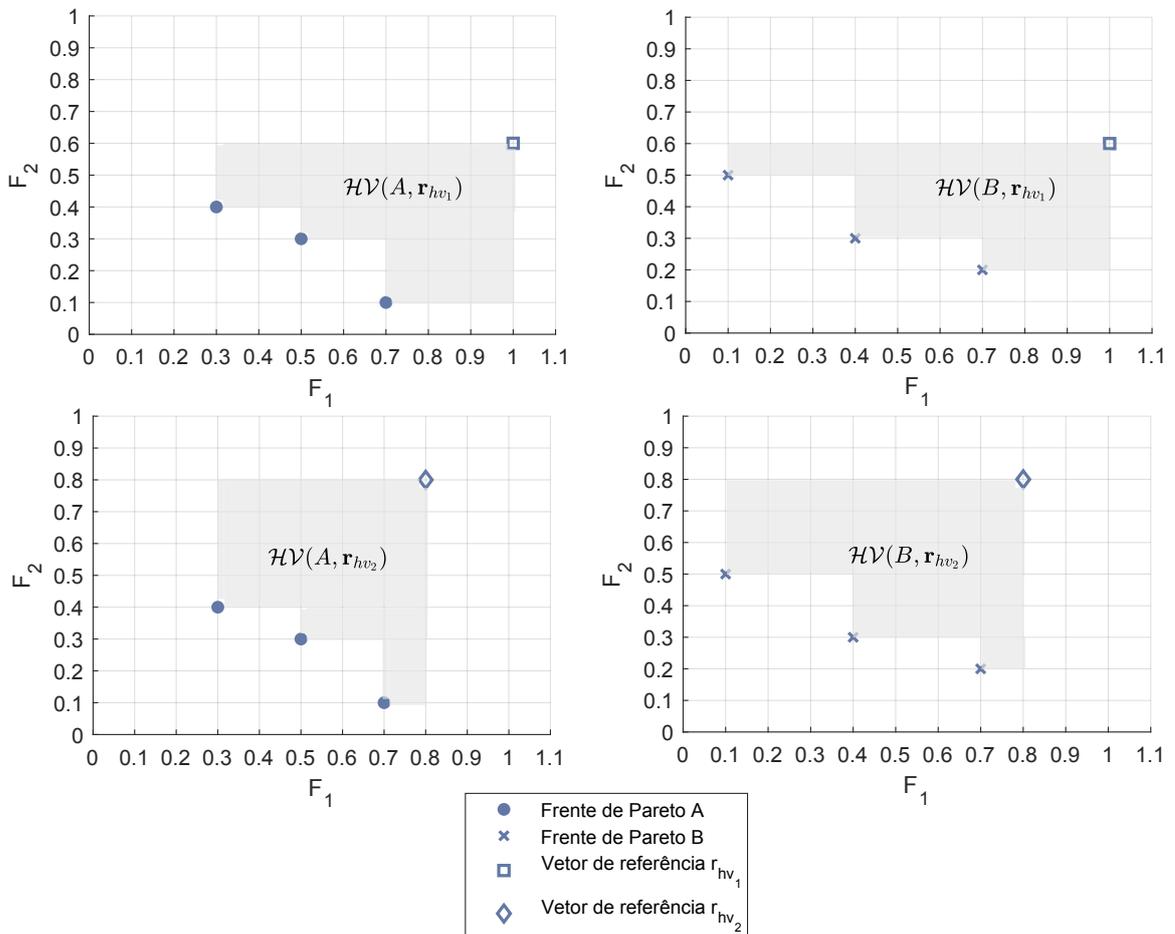


Fonte: do autor, baseado em (AUDET *et al.*, 2021).

Uma questão importante ao se empregar o indicador é a definição do vetor de referência, que apresenta significativo impacto na avaliação (AUDET *et al.*, 2021). Um exemplo é mostrado na Figura 11, no qual dois conjuntos de soluções A e B são avaliados face a dois vetores de referência distintos, \mathbf{r}_{hv_1} e \mathbf{r}_{hv_2} . No primeiro caso, observa-se que $\mathcal{HV}(A, \mathbf{r}_{hv_1}) > \mathcal{HV}(B, \mathbf{r}_{hv_1})$, indicando que o conjunto de soluções A é superior que o conjunto B . Em contrapartida, ao se utilizar o vetor de referência \mathbf{r}_{hv_2} , o resultado se inverte, isto é $\mathcal{HV}(A, \mathbf{r}_{hv_2}) < \mathcal{HV}(B, \mathbf{r}_{hv_2})$. Posto isso, esse exemplo evidencia a necessidade de existir uma regra imparcial para a definição do vetor de referência.

No artigo (ISHIBUCHI *et al.*, 2017), é sugerido que, para assegurar um cálculo justo de hipervolume, deve-se buscar que todas as soluções no conjunto não domi-

Figura 11 – Comparação de hipervolume usando diferentes vetores de referência



Fonte: do autor, baseado em (AUDET *et al.*, 2021).

nado contribuam igualmente para o resultado final. Esse critério afeta principalmente as soluções localizadas nos extremos do hiperplano, uma vez que definido o r_{hv} próximo ao ponto nadir, a contribuição dessas soluções é desconsiderada, enquanto um r_{hv} muito maior que o ponto nadir implica na contribuição superior dessas soluções em relação às demais. Os autores propõem uma regra para a definição do vetor de referência, expressando os elementos de r_{hv} em termos do número de soluções no conjunto avaliado, n_{hv} , conforme apresentado na Equação (54):

$$r_{hv}[j] = 1 + \frac{1}{n_{hv} - 1}, \forall j = 1, \dots, m \quad (54)$$

A métrica é aplicada a um conjunto de soluções normalizadas, onde o ponto ideal e nadir são extraídos considerando todas as soluções presentes nos conjuntos de Pareto em comparação.

3.4 CONSIDERAÇÕES E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentada a formulação matemática desenvolvida para o problema de alocação de religadores em redes de distribuição considerando múltiplas funções objetivo. A abordagem elaborada para o problema contempla três funções de desempenho. De forma abrangente, a proposta visa analisar os custos anuais totais, envolvendo aspectos relacionados às penalidades associadas aos indicadores de continuidade, a receita não faturada pela distribuidora devido à ENS e aos custos que envolvem os religadores, incluindo a aquisição e manutenção do equipamento. As segunda e terceira funções objetivo têm enfoque, respectivamente, na confiabilidade da rede e eficiência associada às taxas de transmissão de dados dos dispositivos instalados. Neste sentido, faz-se ênfase à inclusão na avaliação de aspectos da comunicação de dados, até então ausente na literatura em estudos que abordam a mesma problemática.

Adicionalmente, é disposta no capítulo uma descrição do método desenvolvido para a resolução de problemas com múltiplas funções de desempenho. Propôs-se um método com base em conceitos de EC, combinado com uma classificação da amostragem de elite em duas etapas. A primeira etapa concentra-se no níveis de não dominância, enquanto a segunda, é apresentada por meio de duas alternativas – *crowding distance* e critério baseado em pontos de referência –, favorecendo a obtenção de um conjunto de soluções bem distribuído. A união dessas etapas mostra-se interessante para alcançar aspectos importantes na avaliação de fronteiras de Pareto, tais como a convergência e a dispersão das soluções alcançadas, inerentes ao indicador de hipervolume aplicado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

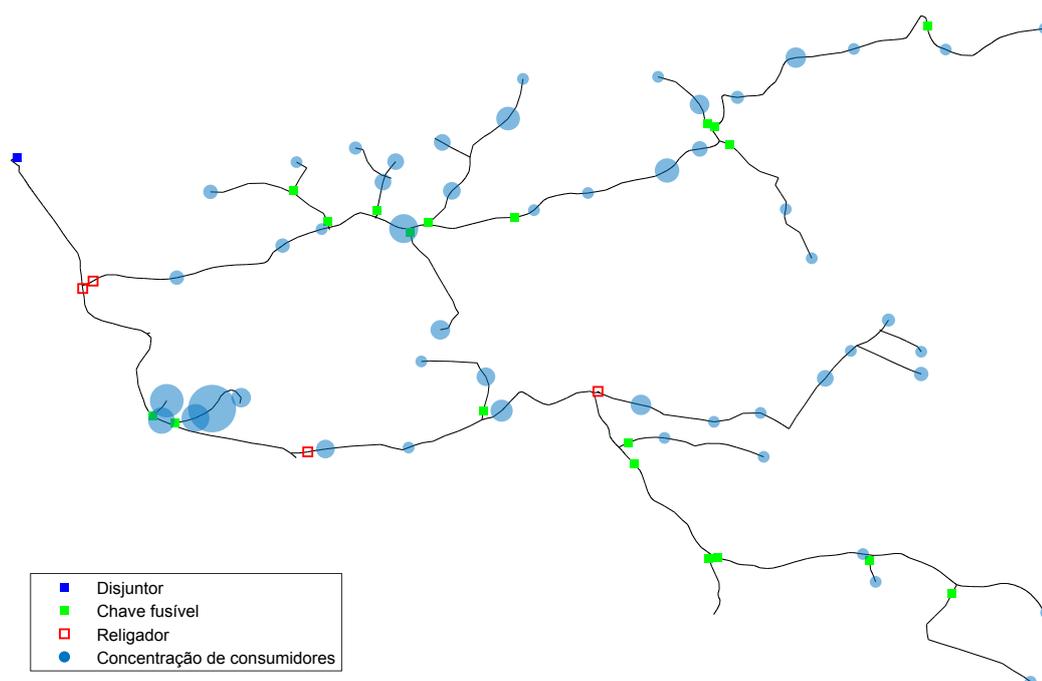
O método estendido de EC foi aplicado para a alocação de religadores inteligentes em uma rede de distribuição real. A avaliação comparativa de desempenho do método empregando os critérios *crowding distance* e pontos de referência, para duas e três funções objetivo, foi fundamentada no cálculo do indicador de hipervolume.

Este capítulo está organizado como segue. Na Seção 4.1, detalha-se as características da rede de distribuição em análise para o estudo de alocação de religadores. Na Seção 4.2, descreve-se os resultados de simulação e realiza-se a validação da método desenvolvido. Por último, na Seção 4.3, apresenta-se a comparação de resultados com a aplicação dos critérios *crowding distance* e pontos de referência.

4.1 DESCRIÇÃO DA REDE TESTE E ESTUDOS DE CASO

A abordagem proposta é aplicada a um alimentador real situado no sudeste do Brasil, ilustrado na Figura 12. Esse alimentador abrange uma extensão de aproximadamente 20 km de linhas aéreas, com um total de 606 trechos. A subestação principal, equipada com o *gateway* de comunicação, é responsável pelo fornecimento de seis alimentadores, o qual opera utilizando um transformador de 138-13,8 kV (D-Ygr) com potência nominal de 15 MVA. O alimentador é responsável por atender 428 consumidores rurais, cuja demanda nominal de energia atinge 716 kVA.

Figura 12 – Alimentador real sob análise



Fonte: do autor.

Dada a dimensão de redes de distribuição reais, existe um elevado número de

possíveis combinações de alocação, o que influencia no tempo de convergência do processo de otimização. Diante desse contexto, a estratégia adotada para a amostragem de soluções candidatas baseou-se na construção de uma rede de distribuição equivalente reduzida, conduzindo a análise de um número restrito de nós passíveis para a alocação de religadores.

Para a construção da rede de distribuição reduzida, destacam-se algumas características importantes que foram preservadas a fim de assegurar uma representação coerente do sistema original:

- Preservar os nós com carga conectada;
- Preservar os trechos com outros dispositivos de proteção;
- Preservar os trechos que contém bifurcações;
- Preservar a existência de mudança no tipo de cabo entre trechos.

Realizada a construção do equivalente reduzido do alimentador, 106 trechos são considerados na representação utilizada para as simulações. Salienta-se que o comprimento dos ramos conectados aos nós excluídos são considerados no ramo formado pelos nós adjacentes mantidos no sistema, de forma a preservar a coerência nas taxas do sistema.

Os dados relativos às taxas de falhas transitórias e permanentes, bem como o tempo médio de reparo dos componentes da rede, foram obtidos junto à correspondente concessionária de energia elétrica. Os limites para os indicadores de interrupção coletivos são estabelecidos pela agência reguladora, neste caso a ANEEL. Valores médios correspondentes aos dados mencionados são detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados dos parâmetros de confiabilidade

Parâmetro	Valor
$\lambda^T [oc./ (km \cdot ano)]$	0,3315
$\lambda^P [oc./ (km \cdot ano)]$	0,0829
$MTTR_P [horas/oc.]$	4
$DEC_P [horas/ano]$	11,00
$FEC_P [oc./ano]$	8,00

Fonte: do autor.

Os parâmetros relacionados aos custos necessários para cálculo da função objetivo $f_1(\cdot)$ são atribuídos de acordo com o descrito na Tabela 4. Na tabela, a variável $C^{reclouser}$, que representa o custo total associado ao religador ao longo de um ano, abrange tanto os custos de investimento quanto de manutenção. O valor do

Tabela 4 – Dados dos parâmetros relacionados aos custos

Parâmetro	Valor
$VCR [R\$/ano]$	51,00
$C^{ENS} [R\%/(pu \cdot ano)]$	1,00
$C^{recloser} [R\$/ano]$	2.035,22

Fonte: do autor.

investimento inicial inclui o custo total de aquisição e instalação do equipamento, equivalente a R\$ 12.419,04. Esse montante é considerado na função objetivo como o valor presente líquido anualizado (VPLa) calculado com base na taxa de juros e vida útil do religador. Assumindo uma taxa de juros de 12% e uma vida útil do religador de 20 anos, obtém-se o custo anual do investimento igual a R\$ 1.662,65. Enquanto o custo de manutenção anual é estimado em 3% do custo de investimento, correspondendo R\$ 372,57 ao ano.

4.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS NUMÉRICOS

Os algoritmos desenvolvidos foram codificados em linguagem JAVA e as simulações foram conduzidas em um processador INTEL® CORE™ i5 CPU 2,50 GHz. Trinta simulações aleatórias foram realizadas usando *crowding distance* e critérios baseados em pontos de referência, considerando um número fixo de 15 iterações como critério de parada para o método de EC multiobjetivo. As SMCSs foram realizadas abrangendo um total de 2.000 anos simulados para cada solução candidata, garantindo que todos os índices estimados alcançassem coeficientes de variação abaixo de 5% (R. BILLINTON, 1994). Os parâmetros de entrada para o algoritmo de execução do método de otimização de EC, tais como N , ρ e α e os valores de probabilidade inicial, p_{ini} , foram definidos conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de entrada do algoritmo EC multiobjetivo

Parâmetro	Valor
N	100
ρ	0,10
α	0,95
p_{ini}	0,094

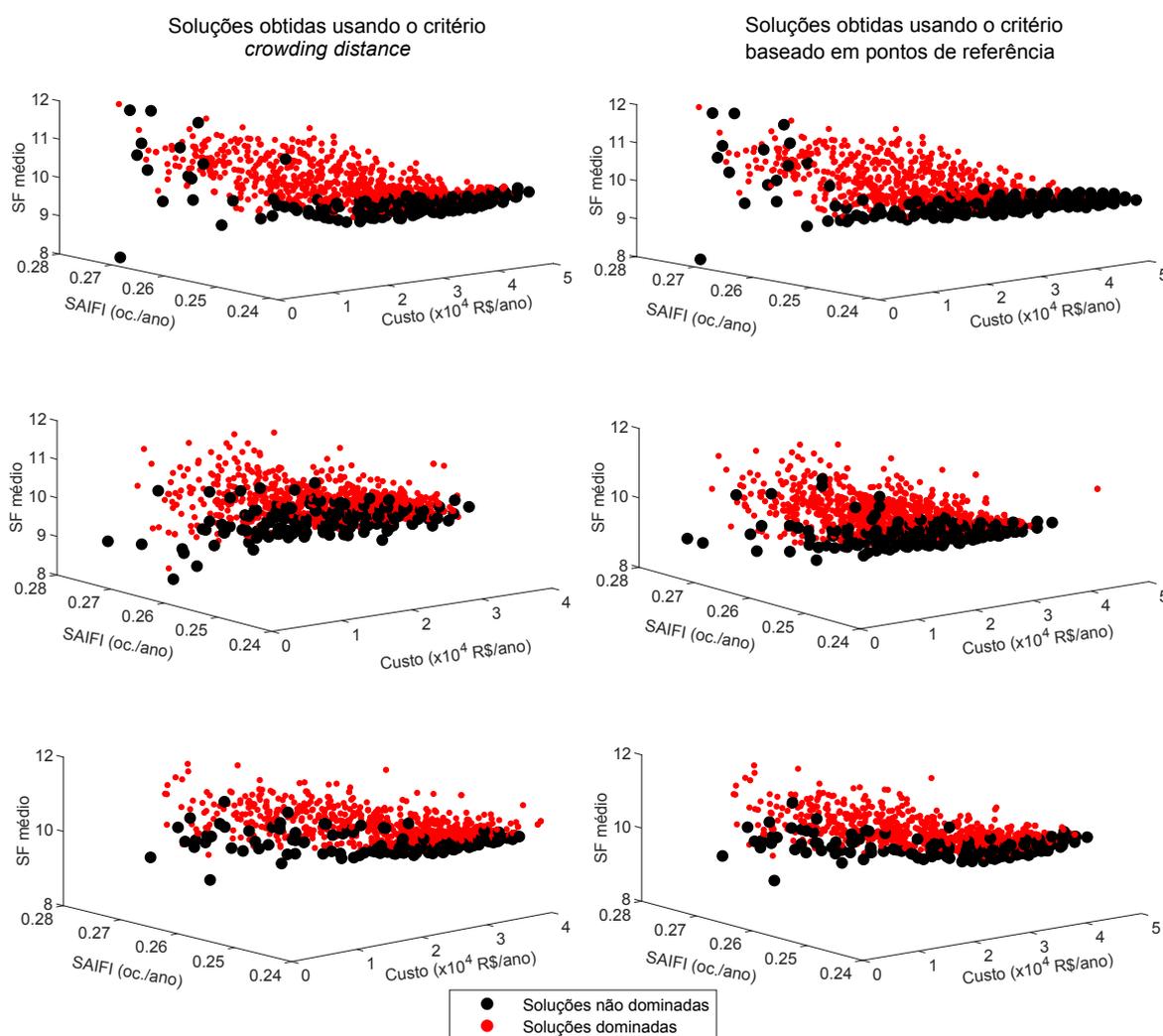
Fonte: do autor.

A análise de uma simulação completa demandou em média 11 horas de processamento, tendo em conta como critério de parada a realização de 15 iterações. Apesar

disso, algumas simulações alcançaram a convergência com um número inferior de iterações, variando entre 9 e 15, ao observar a convergência do conjunto de elite.

A Figura 13 ilustra as soluções avaliadas em três simulações do método de EC estendido usando o *crowding distance* e outras três simulações do método usando o critério baseado em pontos de referência. Em cada gráfico, destaca-se o conjunto de soluções não dominadas obtido para cada um dos casos, demonstrando a eficácia do modelo desenvolvido. Analisando a figura, percebe-se um maior número de soluções

Figura 13 – fronteiras de Pareto obtidas para o problema com 3 funções objetivo



Fonte: do autor.

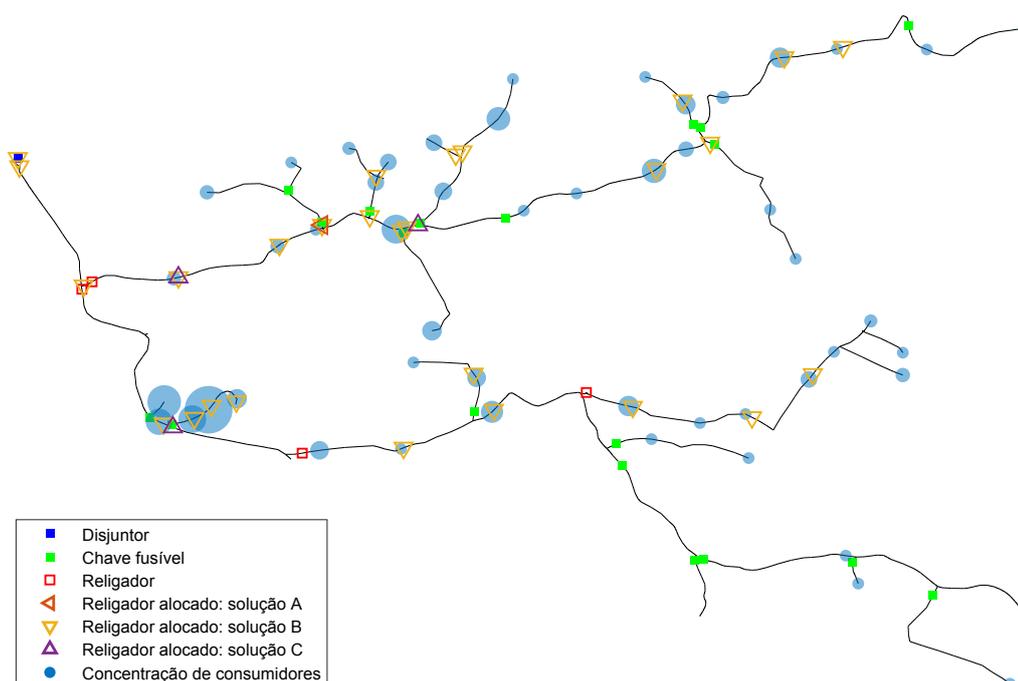
não dominadas a medida em que o custo aumenta. Por outro lado, nas regiões dos gráficos onde os valores da função custo são mais baixos, exibe-se uma dispersão mais acentuada. Essa observação decorre da natureza das soluções com custos mais elevados, as quais caracterizam-se pela inclusão de uma quantidade maior de religadores. Essa presença mais significativa de religadores contribui para um aumento de combinações possíveis de alocações na rede, explicando a tendência observada.

A análise dos resultados de algumas soluções é conduzida a seguir. Para isso, são apresentados os resultados alcançados por ambos os critérios utilizados, representando o melhor desempenho individual em cada função objetivo. Na Tabela 6, são apresentados os valores de desempenhos para as soluções A, B e C, os quais indicam as soluções de menor custo ($\min f_1(\cdot)$), menor SAIFI ($\min f_2(\cdot)$) e menor SF médio ($\min f_3(\cdot)$), respectivamente. Ademais, os posicionamentos dos religadores na rede de distribuição, correspondentes às soluções mencionadas, são mostrados na Figura 14.

Tabela 6 – Resultados de desempenho para três soluções encontradas em uma fronteira de Pareto de ambos os critérios

Solução	$f_1(\cdot)$ Custo [R\$/ano]	$f_2(\cdot)$ SAIFI [oc./ano]	$f_3(\cdot)$ SF médio
A: $\min f_1(\cdot)$	2.901,48	0,2715	9,00
B: $\min f_2(\cdot)$	59.833,92	0,2363	10,07
C: $\min f_3(\cdot)$	6.981,61	0,2730	7,67

Figura 14 – Alocações de religadores obtidos por 3 soluções diferentes



Fonte: do autor.

Na solução A, que representa a solução alcançada com menor custo global, equivalente a 2.901,48 R\$/ano, um único religador foi alocado próximo a um ramal no tronco principal. Apesar da alternativa apresentada fornecer o mínimo custo, identifica-se já significativa redução do índice SAIFI em relação a configuração atual, de 0,3553 oc./ano para 0,2715 oc./ano. Neste resultado, destaca-se o efeito da adição de apenas um religador estrategicamente alocado na rede.

A solução B oferece uma alternativa que resulta no menor SAIFI anual para a distribuidora, representando uma redução de mais de 0,1190 oc./ano. O valor do custo mostra-se elevado para essa solução quando comparada as demais, podendo ser justificado pelo investimento inicial devido à alocação simultânea de vários religadores. Além disso, esse cenário influencia no valor obtido para o SF médio resultante dos religadores alocados, apresentando valor igual a 10,07, que aumenta à medida em que religadores são distribuídos ao longo da rede e distantes da subestação.

Por fim, a solução C oferta o SF médio mínimo obtido nas simulações, igual a 7,67. Essa solução é resultado da alocação de três religadores e se destaca pelo equilíbrio entre os custos e a confiabilidade em relação as outras duas soluções discutidas. Nesse cenário, o custo apresentou-se ligeiramente acima da solução A, em aproximadamente 4080,13 R\$/ano, se comparado a magnitude de custo da solução B. Enquanto o desempenho da confiabilidade acarretou em valor ligeiramente superior ao obtido com a solução A.

4.3 COMPARAÇÃO DO MÉTODO MULTIOBJETIVO USANDO *CROWDING DISTANCE* E O CRITÉRIO BASEADO EM PONTOS DE REFERÊNCIA

A eficácia do método de EC estendido aplicando *crowding distance* e o critério baseado em pontos de referência foi avaliada usando o indicador de hipervolume, considerando o problema com 2 e 3 funções objetivo. Para isso, simulações análogas às realizadas na Seção 4.2, para três funções objetivo, foram realizadas usando apenas as funções objetivo $f_1(\cdot)$ e $f_2(\cdot)$, ou seja, 30 simulações para cada uma das abordagens e fixando o número de iterações igual a 15.

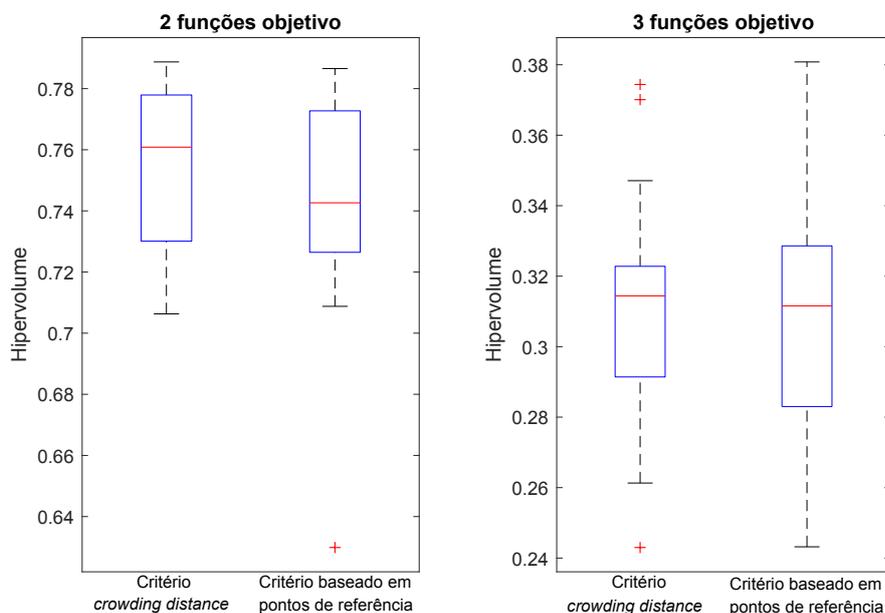
Os vetores de referência do hipervolume, r_{hv} , utilizados na análise de duas e três funções objetivo foram definidos como [1,050, 1,050] e [1,031, 1,031, 1,031], respectivamente. Os resultados são ilustrados no gráfico de caixa da Figura 15, com valores detalhados na Tabela 7, onde ressaltam-se os critérios 1 e 2 representando, respectivamente, o critério *crowding distance* e o critério baseado em pontos de referência.

Tabela 7 – Valores do diagrama de caixa do hipervolume

	2 FO		3 FO	
	Critério 1	Critério 2	Critério 1	Critério 2
Limite superior	0,7887	0,7866	0,3471	0,3808
3º quartil	0,7779	0,7727	0,3228	0,3286
Mediana	0,7608	0,7426	0,3144	0,3116
1º quartil	0,7301	0,7265	0,2914	0,2830
Limite inferior	0,7063	0,7088	0,2613	0,2432

Para a análise com duas funções objetivo, nota-se uma discreta diferença no

Figura 15 – Comparação de desempenho com base no indicador de hipervolume



Fonte: do autor.

indicador de hipervolume entre as medianas obtidas, com valores iguais a 0,7608 e 0,7426. Além disso, variações pequenas também são encontradas no primeiro e terceiro quartis, assim como nos limites inferior e superior, com diferenças na terceira casa decimal. Apenas uma amostra discrepante é identificada no extremo inferior para o critério baseado em pontos de referência. Essas observações indicam uma efetividade similar dos dois critérios quando aplicados no método de EC estendido na solução do problema com duas funções objetivo.

Por outro lado, no contexto de três funções objetivo, embora a mediana do indicador de hipervolume estimado para a *crowding distance* seja ligeiramente menor, ambas as abordagens têm um nível de dispersão igualmente baixo, correspondendo a 0,0314 para o *crowding distance* e 0,0456 para o critério baseado em pontos de referência. Além disso, o quartil superior e o limite superior do critério baseado em pontos de referência são mais altos que os valores correspondentes usando o critério *crowding distance*. Com base nessas comparações, o critério baseado em pontos de referência demonstrou uma capacidade superior de abranger o espaço de atribuído pelas três funções objetivo, no caso em análise.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta uma extensão do método de EC para a resolução de problemas de otimização multiobjetivo, desenvolvida para apoiar a alocação de religadores inteligentes em redes de distribuição. A formulação do problema concentra-se em evitar muitas relacionadas a interrupções no atendimento ao cliente, reduzir os custos correspondentes à ENS e minimizar os custos relacionados à instalação e manutenção de religadores. Adicionalmente, tem-se como objetivo otimizar a confiabilidade da rede, através da redução do índice SAIFI, e a qualidade da comunicação entre os dispositivos religadores e um concentrador de dados, nomeado *gateway*.

A abordagem proposta consiste em uma adaptação do método de EC para se adequar à perspectiva multiobjetivo. Devido peculiaridade da classificação de soluções em problemas com diversas funções objetivo, que apontam para níveis de não dominância formados por um número desconhecido de soluções, a prática em se considerar apenas esta classificação na composição do conjunto de Elite apresenta-se como potencial causador de variabilidade no tamanho desse conjunto.

Neste contexto, um procedimento em duas etapas foi delineado para a seleção das amostras na composição do conjunto de Elite, gerando um conjunto com tamanho fixo em número de soluções. O processo de seleção buscou atender duas premissas destacadas na literatura ao se avaliar conjuntos de Pareto, como a convergência e o nível de dispersão das soluções. Diante disso, na primeira etapa, realiza-se um ranqueamento das soluções baseado no nível de não dominância, e a partir delas o conjunto de Elite é preenchido com as soluções pertencentes às fronteiras de nível $\{\mathcal{F}_1, \dots, \mathcal{F}_{\ell-1}\}$, onde \mathcal{F}_ℓ representa o conjunto de soluções que, ao serem adicionados a *Elite*, causam o extrapolar do tamanho do conjunto. A segunda etapa consiste na seleção das soluções pertencentes a \mathcal{F}_ℓ , tendo em vista um conjunto de elite bem distribuído. Nessa etapa, dois critérios foram implementados: *crowding distance* e pontos de referência.

Os resultados numéricos obtidos para uma rede de distribuição real ressaltam a capacidade da abordagem proposta em encontrar um conjunto eficiente e bem distribuído de soluções não dominadas, alcançando a convergência entre 9 e 15 iterações ao simular 100 amostras por iteração. Com base nesse estudo, foram identificadas três soluções que se destacam ao oferecer o valor mínimo para cada uma das três funções objetivo. Isso evidencia a diversidade de opções para a resolução do problema, com potencial de atender às necessidades mais urgentes da distribuidora.

Uma análise comparativa do desempenho do método, ao aplicar diferentes critérios para a seleção de amostras que compõem a elite, revelou que o critério baseado no ponto de referência é o mais adequado no caso em análise, especialmente quando consideramos três funções de desempenho. Em contrapartida, no problema que envolve duas funções de desempenho, encontrou-se eficácia similar para os critérios utilizados.

Por fim, entende-se que os objetivos estabelecidos para este trabalho foram alcançados, promovendo soluções factíveis para o caso de estudo. Uma abordagem adaptada do método de EC foi desenvolvida, permitindo a aplicação em problemas envolvendo múltiplas funções objetivo. No caso específico deste trabalho, a abordagem foi empregada no problema de alocação de religadores, contudo, ressalta-se que o método se revela uma ferramenta para a resolução de outros problemas que demandam a otimização de mais de uma função de desempenho. Ademais, realizou-se uma modelagem matemática abrangente do problema, incorporando aspectos como custo, confiabilidade e eficiência de comunicação. Por último, efetuou-se a análise de desempenho do método considerando dois critérios distintos para a seleção de amostras, com o intuito de promover a dispersão das soluções no conjunto não dominado.

5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Baseado no panorama atual do estado da arte, no que diz respeito à alocação de equipamentos de proteção em sistemas de distribuição, bem como as contribuições originadas desta dissertação, a seguir, são delineadas algumas sugestões de trabalhos futuros:

1. Considerar avaliações de indicadores de interrupção momentâneas e de sub-tensão, a fim de ampliar a formulação do problema abrangendo problemas de qualidade de energia;
2. Estender a análise da rede de forma a incluir à alocação de outros dispositivos de proteção, tais como chaves fusíveis e seccionadores;
3. Integrar a análise da geração distribuída no sistema de distribuição e analisar os seus possíveis impactos na alocação dos religadores inteligentes e também na reconfiguração de redes;
4. Desenhar uma metodologia para a seleção de soluções na fronteira de Pareto, fornecendo ferramentas práticas e eficazes para auxiliar os planejadores;
5. Realizar uma comparação da abordagem estendida do método de EC com outros métodos multiobjetivo frequentemente utilizados na alocação de equipamentos

em redes de distribuição, visando identificar as vantagens e limitações de cada abordagem;

6. Considerar a utilização de outras tecnologias de transmissão de dados em pontos estratégicos de forma a mitigar os problemas de eficiência na comunicação de religadores alocados distantes do *gateway*;
7. Considerar na formulação do problema a taxa e o tempo de transmissão dos dados, do religador para o *gateway*, necessários para a operação do sistema, e incluir suas implicações nos custos previstos.

REFERÊNCIAS

- ABDI, Sh. *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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.10.012>.
- ALAM, A.; PANT, V.; DAS, B. Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates. **Electric Power Systems Research**, v. 140, p. 619–630, 2016. ISSN 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.05.012>.
- ALAM, A.; TARIQ, M. *et al.* Optimal Placement of Reclosers in a Radial Distribution System for Reliability Improvement. **Electronics**, v. 10, n. 24, 2021. ISSN 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics10243182](https://doi.org/10.3390/electronics10243182).
- ANATEL. **Ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017: Requisitos Técnicos para a Avaliação da Conformidade de Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita**. [S.l.: s.n.], dez. 2017. Disponível em: https://sei.anatel.gov.br/sei/publicacoes/controlador_publicacoes.php?acao=publicacao_visualizar&id_documento=2549681&id_orgao_publicacao=0.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 1 - Glossário de termos técnicos do PRODIST, p. 31, 2021.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade de energia elétrica, p. 69, 2021.
- AUDET, C. *et al.* Performance indicators in multiobjective optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 292, n. 2, p. 397–422, 2021. ISSN 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.016>.
- AZARHAZIN, S.; FARZIN, H.; MASHHOUR, E. An MILP model for reliability-based placement of recloser, sectionalizer, and disconnect switch considering device relocation. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 35, 2023. DOI: [10.1016/j.segan.2023.101127](https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101127).
- BANERJEE, A. *et al.* Optimization and estimation of reliability indices and cost of Power Distribution System of an urban area by a noble fuzzy-hybrid algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 102, 2021. DOI: [10.1016/j.asoc.2021.107078](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107078).
- BARACY, Y. L. *et al.* Recloser placement optimization using the cross-entropy method and reassessment of Monte Carlo sampled states. **Electric Power Systems Research**, v. 189, p. 106653, 2020. ISSN 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106653>.

BARACY, Yago Lafourcade. **Alocação de religadores inteligentes em redes primárias de distribuição**. 2020. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BEKKER, J.; ALDRICH, C. The cross-entropy method in multi-objective optimisation: An assessment. **European Journal of Operational Research**, v. 211, n. 1, p. 112–121, 2011. ISSN 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.10.028>.

BILLINTON, R.; PAN, Z. Incorporating reliability index probability distributions in performance based regulation. *In*: IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37373). [S.l.: s.n.], 2002. 12–17 vol.1. DOI: 10.1109/CCECE.2002.1015167.

BILLINTON, Roy; ALLAN, Ronald N. **Reliability Evaluation of Power Systems**. 2nd. New York: Plenum Press, 1996.

BILLINTON, Roy; LI, Wenyuan. **Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods**. New York: Plenum Press, nov. 1994.

BOLACELL, Gabriel Santos. **Avaliação do impacto de modelos eletrogeométricos de redes aéreas na qualidade de energia de sistemas de distribuição usando técnicas probabilísticas**. 2016. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BOTEV, Zdravko I. *et al.* Chapter 3 - The Cross-Entropy Method for Optimization. *In*: RAO, C.R.; GOVINDARAJU, Venu (Ed.). **Handbook of Statistics**. [S.l.]: Elsevier, dez. 2013. v. 31. (Handbook of Statistics). P. 35–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53859-8.00003-5>.

BROWN, R.E. **Electric Power Distribution Reliability**. 2nd. [S.l.]: Power Engineering (Willis). CRC Press, 2009.

BROWN, R.E. **Electric Power Distribution Reliability, Second Edition**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2008. (Power Engineering (Willis)). ISBN 9780849375675. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=%5C_zPirQEACAAJ.

CALADO, Diane Elissa Desan. **Representação de curto-circuito probabilístico na avaliação da confiabilidade de sistemas de distribuição**. 2015. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

COELLO, C.A.C. A Short Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization. *In*: EVOLUTIONARY Multi-Criterion Optimization. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. P. 21–40.

COSTA, M. M.; BESSANI, M.; BATISTA, L. S. A Multiobjective and Multicriteria Approach for Optimal Placement of Protective Devices and Switches in Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 37, n. 4, p. 2978–2985, 2022. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3120968.

DA SILVA, A. M. L.; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, R. A. *et al.* Composite reliability evaluation with renewable sources based on quasi-sequential Monte Carlo and cross entropy methods. *In: 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*. [S.l.: s.n.], jul. 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/PMAPS.2014.6960618.

DA SILVA, A. M. L.; R.GUIMARÃES, A. C.; NASCIMENTO, L. C. Distribution reliability: Data calibration based on Monte Carlo simulation and evolutionary optimization. *In: 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*. [S.l.: s.n.], 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/PMAPS.2014.6960617.

DA SILVA, A. M. L.; SCHMITT, W. F. *et al.* Analytical and Monte Carlo approaches to evaluate probability distributions of interruption duration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 3, p. 1341–1348, ago. 2005. ISSN 1558-0679. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.851944.

DAS, I.; DENNIS, J.E. Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems. **SIAM Journal on Optimization**, v. 8, n. 3, p. 631–657, 1998. DOI: 10.1137/S1052623496307510. eprint: <https://doi.org/10.1137/S1052623496307510>.

DE BARROS, J.L.V. *et al.* LoRaWAN vs. 6TiSCH: Which one scales better? **Computer Communications**, v. 184, p. 1–11, 2022. ISSN 0140-3664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.12.004>.

DE MAGALHÃES CARVALHO, L.; LEITE DA SILVA, A. M.; MIRANDA, V. Security-Constrained Optimal Power Flow via Cross-Entropy Method. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 6, p. 6621–6629, nov. 2018. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2847766.

DEB, K.; JAIN, H. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 18, n. 4, p. 577–601, 2014. DOI: 10.1109/TEVC.2013.2281535.

DEB, K.; PRATAP, A. *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002. DOI: 10.1109/4235.996017.

IMANI, A. *et al.* Optimal simultaneous recloser and sectionalizer allocation using collective decision optimization algorithm (CDOA). *In: 2022 26th International*

Electrical Power Distribution Conference (EPDC). [S.l.: s.n.], 2022. P. 60–66. DOI: 10.1109/EPDC56235.2022.9817219.

IOT ANALYTICS. **5 things to know about the LPWAN market in 2021**. 2021. Disponível em: <https://iot-analytics.com/5-things-to-know-lpwan-market/>.

ISHIBUCHI, H. *et al.* Reference Point Specification in Hypervolume Calculation for Fair Comparison and Efficient Search. *In: PROCEEDINGS of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*. Berlin, Germany: Association for Computing Machinery, 2017. (GECCO '17), p. 585–592. DOI: 10.1145/3071178.3071264.

ISSICABA, D.; PECAS LOPES, J. A.; DA ROSA, M. A. Adequacy and Security Evaluation of Distribution Systems With Distributed Generation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 27, n. 3, p. 1681–1689, ago. 2012. ISSN 1558-0679. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2184563.

LEITE DA SILVA, A. M. *et al.* Distributed Energy Resources Impact on Distribution System Reliability Under Load Transfer Restrictions. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 4, p. 2048–2055, dez. 2012. ISSN 1949-3061. DOI: 10.1109/TSG.2012.2190997.

LELLIS JR, C. G.; OLIVEIRA, A. A. P. **Three-Pole Polymeric Switch Having Command and Protection Electronics Integrated Into a Standalone Device**. Mai. 2021. US Patent 11,004,633 B1.

LI, R. *et al.* Applications of LoRa Technology in Smart Distribution Grid. *In: 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. [S.l.: s.n.], 2019. P. 1554–1557. DOI: 10.1109/IAEAC47372.2019.8997553.

LORA ALLIANCE. **What is LoRaWAN Specification**. [S.l.: s.n.], 2024. Acessado em: 13 de março de 2024. Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>.

MAURYA, P.; SINGH, A.; KHERANI, A. A. A review: spreading factor allocation schemes for LoRaWAN. **Telecommunication Systems**, v. 80, n. 3, p. 449–468, 2022. DOI: 10.1007/s11235-022-00903-4.

MELLO, J.C.O.; PEREIRA, M.V.F.; LEITE DA SILVA, A.M. Evaluation of reliability worth in composite systems based on pseudo-sequential Monte Carlo simulation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 3, p. 1318–1326, 1994. DOI: 10.1109/59.336134.

PEREIRA, K. *et al.* A Multiobjective Optimization Technique to Develop Protection Systems of Distribution Networks With Distributed Generation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 6, p. 7064–7075, 2018. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2842648.

PETRARIU, A. I.; LAVRIC, A.; COCA, E. LoRaWAN Gateway: Design, Implementation and Testing in Real Environment. *In: 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. [S.l.: s.n.], 2019. P. 49–53.

POMBO, A.V.; MURTA-PINA, J.; PIRES, V.F. Multiobjective planning of distribution networks incorporating switches and protective devices using a memetic optimization. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 136, p. 101–108, 2015. ISSN 0951-8320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.016>.

R. BILLINTON, W. Li. **Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods**. [S.l.]: Springer New York, NY, 1994.

REIZ, C. *et al.* A Multiobjective Approach for the Optimal Placement of Protection and Control Devices in Distribution Networks With Microgrids. **IEEE Access**, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3166918.

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D P. **The Cross-Entropy Method: A Unified Approach to Combinatorial Optimization, Monte-Carlo Simulation and Machine Learning (Information Science and Statistics)**. [S.l.]: Springer, 2004. ISBN 038721240X.

RUBINSTEIN, Reuven Y. Optimization of computer simulation models with rare events. **European Journal of Operational Research**, v. 99, n. 1, p. 89–112, mai. 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00385-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00385-2).

RUBINSTEIN, Reuven Y.; KROESE, Dirk P. **Simulation and the Monte Carlo Method**. 2nd. [S.l.]: JOHN WILEY & SONS, INC., 2007. (Wiley Series in Probability and Statistics).

SPERANDIO, Mauricio. **Planejamento da automação de sistemas de Manobra em redes de distribuição**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

TIPPACHON, Wiwat; RERKPREEDAPONG, Dulpichet. Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization. **Electric Power Systems Research**, v. 79, n. 7, p. 1171–1178, 2009. ISSN 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.02.006>.

VENTURINI, Lucas Fritzen. **Análise probabilística de sistemas de distribuição a partir da resposta de sistemas de proteção a curtos-circuitos**. 2018. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ZEINALZADEH, A.; ESTEBSARI, A.; BAHMANYAR, A. Multi-Objective Optimal Placement of Recloser and Sectionalizer in Electricity Distribution Feeders. *In: 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019*

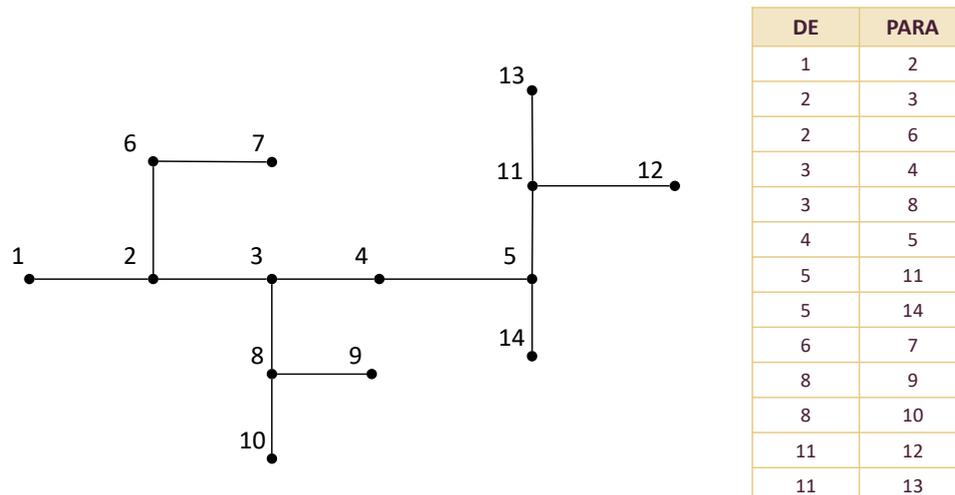
IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe).
[S.l.: s.n.], 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/IEEEIC.2019.8783430.

ANEXO A – MATRIZ DE ALCANCE

A matriz de alcance representa uma alternativa eficiente para identificação do conjunto de nós sob influência dos dispositivos de proteção a cada estado de falha na rede de distribuição. Em síntese, a aplicação da matriz de alcance visa fornecer uma maneira direta de identificar um religador ou outro dispositivo de proteção à montante da falha, assim como os nós com fornecimento interrompido à jusante de um instrumento de proteção ou manobra.

Considere o exemplo de uma rede de distribuição seguindo as conexões indicadas no grafo orientado da Figura 16, onde o nó 1 representa uma subestação que alimenta o sistema radial com n nós. O arranjo da rede consiste em $n - 1$ ramos, cujas ligações estão apresentadas na tabela DE-PARA.

Figura 16 – Representação de uma rede de distribuição radial



Fonte: do autor.

Com base na orientação dos ramos descritos na Figura 16, a matriz adjacência, A , de tamanho $n \times n$, pode ser construída. Na matriz adjacência, cada linha e cada coluna representa um nó da rede de distribuição. Se existir uma ligação entre o nó a montante i (DE) e o nó a jusante j (PARA) define-se $A[i, j]$ igual a 1, caso contrário o valor é igual a 0, formando-se assim uma matriz triangular superior. A matriz elaborada para o exemplo da Figura 16 é expressa na Equação (55):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (55)$$

Ao realizar a multiplicação da matriz de adjacência por ela mesma, é possível identificar um caminho transitando por dois ramos da rede. Portanto, o alcance de um nó para qualquer outro a jusante pode ser caracterizado estendendo-se esta definição de multiplicação ao número de ramos do sistema, mais a matriz identidade, como demonstra a Equação (56) (SPERANDIO, 2008):

$$M = (I + A)^{n-1} \quad (56)$$

onde M corresponde a matriz de alcance; e I representa a matriz identidade de tamanho $n \times n$. Para a aplicação da matriz de alcance nesta dissertação, tem-se o objetivo de identificar os nós a jusante de um equipamento de proteção, diante disso, os valores diferente de 0 encontrados na matriz M são substituídos pelo número 1.

A matriz de alcance delineada para a rede de distribuição descrita é apresentada na Equação (57), onde $M[i, j]$ é igual a 1 caso exista um caminho partindo de i e chegando em j , e igual a 0 caso contrário. Neste sentido, elementos da linha i na matriz com valor igual a 1, determinam o alcance do nó i , ou seja, nós que estão a jusante. Por outro lado, elementos da coluna j iguais a 1, determinam os nós a montante do nó j na rede.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (57)$$

No contexto do problema de atuação dos dispositivos de proteção definidos no vetor \mathcal{P} , que indica a localização (nós) dos equipamentos de proteção da rede e partindo da hipótese de ocorrência de uma contingência no nó x , as etapas descritas no Algoritmo 7 são executadas:

Algoritmo 7 Identificação de nós com interrupção de serviço

Entrada: M, x, \mathcal{P} ;

```

1:  $n_{prot} = 0$ ;
2: para  $i = x - 1, \dots, 1$  faça
3:   se  $M[i, x] = 1 \ \&\& \ i \in \mathcal{P}$  então
4:      $n_{prot} = i$ ;
5:     Break;
6:   fim se
7: fim para
8: para  $j = n_{prot}, \dots, n$  faça
9:   se  $M[n_{prot}, j] = 1$  então
10:    Identifica uma interrupção no nó  $j$ ;
11:   fim se
12: fim para

```
